



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Teknologier for økt kvalitet og mengde resirkulert nitrogengjødsel

Delrapport 3 i prosjektet *Kunnskap om økt nitrogeneffektivitet
gjennom resirkulering*. Revidert utgave.

NIBIO RAPPORT | VOL. 11 | NR. 126 | 2025



Iva Zivanovic og Eva Brod
Divisjon for miljø og naturressurser

TITTEL/TITLE

Teknologier for økt kvalitet og mengde resirkulert nitrogengjødsel. Delrapport 3 i prosjektet Kunnskap om økt nitrogeneffektivitet gjennom resirkulering

FORFATTER(E)/AUTHOR(S)

Iva Zivanovic og Eva Brod

DATO/DATE:	RAPPORT NR./ REPORT NO.:	TILGJENGELIGHET/AVAILABILITY:		PROSJEKT NR./PROJECT NO.:	SAKSNR./ARCHIVE NO.:
24.10.2025 Rev. 06.11.2025	11/126/2025	Åpen		54123	24/01639
ISBN:		ISSN:		ANTALL SIDER/ NO. OF PAGES:	ANTALL VEDLEGG/ NO. OF APPENDICES:
978-82-17-03840-5		2464-1162		48	-

OPPDAGSGIVER/EMPLOYER:

Landbruksdirektoratet

KONTAKTPERSON/CONTACT PERSON:

Semona Issa

STIKKORD/KEYWORDS:

Nitrogen, gjødsling, sirkulærøkonomi

Nitrogen, fertilisation, circular economy

FAGOMRÅDE/FIELD OF WORK:

Miljø og naturressurser, jordbruk

Environment and natural resources, agriculture

SAMMENDRAG/SUMMARY:

Denne rapporten er skrevet på oppdrag av Landbruksdirektoratet og besvarer del 3 i prosjektet «Kunnskap om økt nitrogeneffektivitet gjennom resirkulering». Delprosjektet omhandler eksisterende og nye teknologier som kan øke kvaliteten og mengden resirkulert nitrogengjødsel. Overordnet skiller vi mellom 1) organiske gjødselprodukter med lav prosesseringsgrad, inkludert direkte bruk, biogassbehandling, mekanisk separering, kompostering samt tørking, anrikning og pelletering, og 2) mineralgjødsel fremstilt av organiske råvarer, hvor teknologier som felling, stripping/skrubbing, membranteknologi, adsorbering, (bio-)elektrodialyse og biomassedyrking inngår. Fordelene ved høy prosessering er ofte de samme som ulempene ved lav prosessering, og motsatt. Det finnes ingen enkel teknologisk løsning som passer alle situasjoner og aktører, og i praksis vil teknologivalg i stor grad være styrt av råvaretilgangen.

GODKJENT /APPROVED

Erik Joner

PROSJEKTLEDER /PROJECT LEADER

Marianne Bechmann



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Forord

Bakgrunnen for denne rapporten er at Landbruksdirektoratet og Miljødirektoratet er i prosessen med å utarbeide en helhetlig plan for god nitrogenforvaltning i jordbruket som følger av bestemmelsene i Jordbruksoppgjøret 2023 (Prp. 121 S (2022–2023)). Planen skal munne ut i vurderinger og anbefalinger av tiltak og virkemiddelbruk som kan bidra til bærekraftig nitrogenforvaltning i jordbruket.

Prosjektet gjennomføres på oppdrag av Landbruksdirektoratet, og denne rapporten besvarer delprosjekt 3 i oppdraget «Kunnskap om økt nitrogeneffektivitet gjennom resirkulering»:

- Delprosjekt 1: Kunnskap om nitrogenkilder og -strømmer i jordbruket
- Delprosjekt 2: Kunnskap om barrierer og muligheter for bruk av resirkulert nitrogen som gjødsel
- **Delprosjekt 3: Kunnskap om teknologi for økt kvalitet og mengde resirkulert gjødsel**

Marianne Bechmann har ledet oppdraget i NIBIO. Arbeidet med delprosjekt 1 er ledet av Randi Berland Frøseth, delprosjekt 2 er ledet av Pia Borg og delprosjekt 3 er ledet av Eva Brod. Takk til Annbjørg Øverli Kristoffersen for verdifulle innspill og kommentarer til rapporten.

I denne utgaven av rapporten er tallene for husdyrgjødsel revidert.

Ås, 16.10.2025

Eva Brod

Innhold

Forord	3
1 Innledning	5
2 Bakgrunn: Nitrogen i resirkulert gjødsel	6
2.1 Nitrogensyklus	6
2.2 Jordas nitrogenbidrag fra organisk materiale	7
2.3 Nitrogentilførsel med gjødsel	7
3 Oversikt over relevante regelverk	9
3.1 Norsk gjødselregelverk	9
3.2 EU-gjødselforordning	11
3.3 Regler for økologisk landbruk	13
3.4 Animaliebiproduktforskriften	13
3.5 Nitratdirektiv	13
4 Tilgjengelige råvarer	15
5 Oversikt over tilgjengelige teknologier	17
5.1 Organisk gjødsel med lav prosesseringsgrad	17
5.1.1 Direkte bruk	18
5.1.2 Biogassbehandling (anaerob nedbryting)	21
5.1.3 Mekanisk separering	22
5.1.4 Kompostering	24
5.1.5 Tørking, anrikning og pelletering	25
5.2 Mineralgjødsel fremstilt av organiske råvarer	26
5.2.1 Felling (struvitt)	26
5.2.2 Stripping og skrubbing	27
5.2.3 Bruk av membranteknologi	29
5.2.4 Adsorbering	30
5.2.5 (Bio-)Elektrodialyse	31
5.2.6 Biomassedyrking	32
6 Vurdering av ulike teknologier	34
6.1 Praktiske og agronomiske aspekter	34
6.2 Kostnadseffektivitet	37
6.3 Miljøpåvirkning	38
6.4 Regulatoriske begrensninger	39
6.5 Markedsmessige begrensninger	39
7 Sammendrag og konklusjon	40
8 Litteraturreferanser	42

1 Innledning

Som en oppfølging av Jordbruksoppgjøret 2023 (Prp. 121 S (2022–2023)) skal Landbruksdirektoratet og Miljødirektoratet utarbeide en helhetlig plan for god nitrogenforvaltning i jordbruket. I rapporten «Tiltak for bedre nitrogenforvaltning i norsk jordbruk» foreslår Bechmann m.fl. (2023) bedre resirkulering av organiske avfallsressurser som ett av flere tiltak for å utnytte nitrogen som ellers ville ha gått tapt til vann og luft. Resirkulering er også en viktig del av sirkulærøkonomien. Det er derfor viktig å legge til rette for resirkulering som både gir gode gjødselprodukter og som har minst mulig negativ effekt på klima og miljø gjennom hele verdikjeden. For å oppnå dette trengs det mer kunnskap om organiske nitrogenkilder, deres skjebne i norsk jordbruk, teknologier og behandlingsmetoder for å skape gode resirkulerte gjødselprodukter og hva som skal til for å øke landbrukets etterspørsel etter disse.

Formålet med hele oppdraget har vært å øke kunnskapen om hvordan nitrogeneffektiviteten i jordbruket kan økes gjennom resirkulering av organiske avfallsressurser på en måte som minimerer negative miljøkonsekvenser. Prosjektet er delt i tre og denne rapporten besvarer delprosjekt 3 som skal gi økt kunnskap om teknologi for økt kvalitet og mengde resirkulert gjødsel.

I prosjektbeskrivelsen står det følgende om delprosjekt 3:

Delprosjekt 3 vil gi kunnskap om eksisterende og nye teknologier og behandlingsmetoder som kan øke både kvaliteten og mengden av resirkulert gjødsel. Viktige teknologier og behandlingsmetoder for produksjon, avfallsbehandling og transport av råvarer og sluttprodukter vil bli dekket. Teknologier som kan redusere innholdet av uønskede stoffer som mikroplast, tungmetaller, patogener, frø mm. i resirkulerte gjødselprodukter inngår i kartleggingen. Det samme gjelder for teknologier som kan skille fosfor fra nitrogen.

NIBIO skal vurdere potensialet til hver teknologi og behandlingsmetode basert på faktorer som kostnadseffektivitet, praktiske og agronomiske aspekter, regulatoriske og markedsmessige begrensninger, råvaretilgjengelighet, forskningsbehov og miljøpåvirkning. Vurderingen vil bygge videre på resultatene fra NIBIOs utredning av et omsetningskrav for resirkulert fosfor (Øgaard m.fl., 2024).

Målet med vurderingen er å resultere i et utvalg av teknologier og behandlingsmetoder med høyest potensial for norske produksjonssystemer, med minst mulig negative effekter for miljøet og klimaet. Vi skal også vurdere tiltak for å fremme økt bruk av de utvalgte teknologiene og behandlingsmetodene.

Avgrensninger: Kartleggingen skal begrenses til gjødselprodukter fra organiske avfallskilder, ellers samme avgrensning som delprosjekt 1. Kartleggingen er ikke begrenset til teknologier og behandlingsmetoder som er utbredt i Norge per i dag, dvs. teknologier og behandlingsmetoder brukt i andre land i Europa vil også omfattes av kartleggingen.

2 Bakgrunn: Nitrogen i resirkulert gjødsel

Nitrogen er det næringsstoffet som planter trenger mest av. I planter inngår nitrogen primært i proteiner og klorofyll, men har også viktige funksjoner i DNA og RNA, koenzymer og energibærere som ATP. Planter tar hovedsakelig opp nitrogen i form av ammonium (NH_4^+) eller nitrat (NO_3^-).

2.1 Nitrogensyklus

Nitrogenets kretsløp er komplisert, men kan forenklet beskrives som vist i Figur 2-1.

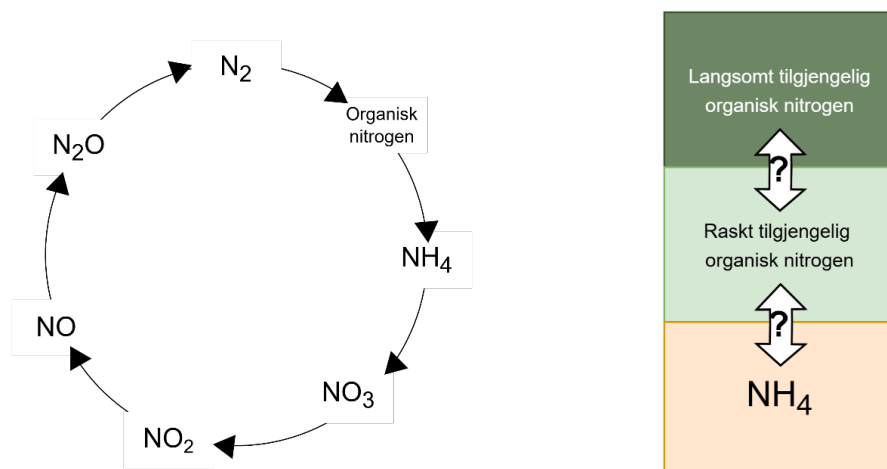
I et naturlig kretsløp tilføres jorda nitrogen fra atmosfærens N_2 gjennom biologisk nitrogenfiksering, hovedsakelig utført av belgvekster som kløver, erter og bønner. I tillegg tilføres noe nitrogen gjennom atmosfærisk nedfall, typisk i størrelsesorden 0,5 til 1,5 kg nitrogen/dekar/år (Aasen, 1997).

Planterester og annet organisk materiale brytes ned til mindre organiske forbindelser, uorganiske næringsstoffer og gasser. Noe nitrogen blir del av jordas humus, som inneholder omtrent 5 % organisk nitrogen. Dette nitrogenet er bundet i organiske forbindelser med karbon og hydrogen. Eksempler på organiske nitrogenforbindelser i jord er proteiner, aminosyrer, nukleinsyrer, og mer stabile forbindelser som lignin.

For at planter skal kunne ta opp nitrogen, må det organiske nitrogenet i jorda mineraliseres, det vil si omdannes til uorganisk nitrogen av jordas mikroorganismer. Hvor mye nitrogen som mineraliseres årlig, avhenger av faktorer som temperatur, fuktighet, oksygentilgang, tid, og forholdet mellom karbon og nitrogen (C:N forholdet) i det organiske materialet.

Under mineraliseringen omdannes organisk nitrogen først til ammonium. Ammonium kan fordampe som ammoniakk (NH_3), særlig ved høy pH og temperatur. I jorda omdanner nitrifiserende bakterier ammonium videre til nitrat. Nitrat er et negativt ion som binder seg svakt til jordpartikler og er derfor utsatt for utvasking.

Under oksygenfattige forhold, som i vannmettet eller pakket jord, kan nitrat reduseres av denitrifiserende bakterier til nitritt (NO_2^-), videre til nitrogenoksider (NO og lystgass, N_2O), og til slutt til N_2 , som returnerer til atmosfæren. Lystgass er en potent klimagass, og utslipp fra jord bidrar betydelig til klimagassregnskapet til jordbruket, både ved bruk av organiske og mineralske gjødselmidler.



Figur 2-1. Til venstre: Nitrogensyklus. Til høyre: Skjema av nitrogenformer i resirkulert organisk gjødsel (modifisert basert på Henriksen, m.fl. 2023)

2.2 Jordas nitrogenbidrag fra organisk materiale

Ved gjødselplanleggingen er mengden av det organisk materiale i jorda en av flere parametere det tas hensyn til ved bestemmelse av nitrogenbehovet. Andre viktige parametere er vekst som er planlagt dyrket, forventet avlingsnivå og forgrøde. Målet med gjødselplanlegging er å tallfeste behovet for nitrogen til å sikre høye avlinger av god kvalitet, samtidig som gjødseloverskuddet bør holdes så lavt som mulig for å minimere kostnader og miljøbelastning.

Frigjøring av plantetilgjengelig nitrogen fra det organisk materiale i jorda kan estimeres ved hjelp av ulike indikatorer. I praksis korrigeres plantenenes nitrogenbehov som oftest med utgangspunkt i jordas moldinnhold og forgrøde. Disse faktorene inngår automatisk i gjødslingsplanleggingsverktøy, eksempelvis i *Skifteplan*, hvor de kombineres med empiriske verdier for nitrogenbehov.

Det er likevel en usikkerhet knyttet til frigjøringsmønsteret til det organiske nitrogenet, siden det i praksis er knyttet til faktisk mikrobiell aktivitet i jorda. Aktiviteten til mikroorganismer er sterkt påvirket av særlig jordfuktighet, temperatur og lufttilgang, og dermed er også frigjøringen av nitrogen i stor grad styrt av fuktighetsforholdene i vekstsesongen, jordtemperaturen mm. Ulike kulturvekster har forskjellige krav til når i sesongen nitrogenet må være tilgjengelig. For eksempel korn er avhengig av mye nitrogen tidlig i vekstsesongen for vekst og utvikling, mens potet i mye større grad er avhengig av god nitrogentilgang senere i vekstsesongen. Dette passer ikke alltid sammen med når nitrogenet blir gjort tilgjengelig, både fra det organiske materialet som er i jorda, og fra organiske gjødselkilder.

2.3 Nitrogentilførsel med gjødsel

I jordbruket tilføres nitrogen som mineralgjødsel, organisk gjødsel og gjennom nitrogenfikserende vekster. I mineralgjødsel regnes alt nitrogen som plantetilgjengelig, det vil si at det ikke må mineraliseres eller omdannes før planterøttene kan ta opp nitrogenet. Det mineralske nitrogenet er utsatt for tap f.eks. ved utvasking, særlig hvis det kommer store nedbørmengder før planterøttene har rukket å ta det opp. Handelsgjødsel kan også inneholde organisk nitrogen, urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), som i jorda raskt omdannes til ammonium og deretter til nitrat. Denne omdanningen skjer ved hjelp av enzymet urease, som finnes i alle jordtyper. Urea er veldig lite brukt i Norge.

Organisk gjødsel inneholder både næringsstoffer og organisk karbon, og bidrar dermed til langsiktig jordhelse. Hvorvidt nitrogen i organisk gjødsel dekker plantenenes behov, kommer ikke bare an på den totale nitrogenmengden, men også andelen nitrogen som blir tilgjengelig for plantene i løpet av vekstsesongen.

Nitrogen i organisk gjødsel kan forenklet deles inn i tre hovedkategorier (Henriksen et al., 2023):

1. **Ammonium dannet ved mineralisering:** Umiddelbart plantetilgjengelig (f.eks. i biorest), forutsatt ammoniakktap kan holdes lave.
2. **Raskt nedbrytbart organisk nitrogen:** Frigjøres gradvis i løpet av vekstsesongen ved mineralisering.
3. **Langsamt nedbrytbart organisk nitrogen:** Mineraliseres i liten grad i løpet av én vekstsesong, og gir derfor begrenset gjødselverdi på kort sikt. Bidrar til god jordkvalitet og karbonlagring i jord.

Når det gjelder nitrogen skal varedeklarasjonen for organisk gjødsel oppgi totalt nitrogeninnhold samt nitrogen i form av nitrat og ammonium (Gjødselvarselskriften, 2025). Det er derimot ingen krav til plantetilgjengeligheten til organisk nitrogen i gjødsel, eller krav til opplysninger om plantetilgjengeligheten. Dette er en utfordring for praktisk bruk. Hvis fordelingen mellom raskt og langsamt nedbrytbart organisk nitrogen er kjent, kan gjødselprodusenter kompensere for lite innhold av plantetilgjengelig nitrogen i enkelte råvarer, f.eks. tradisjonell kompost, ved å kombinere dem med

mineralsk nitrogen. Dette gjør det mulig å lage formuleringer av hybridgjødselprodukter med balanserte forhold mellom næringsstoffene som er bedre tilpasset plantenes behov.

Det finnes per i dag ingen standardiserte verktøy for å vurdere nedbrytbarheten til organisk nitrogen i organiske gjødselråvarer. Det er derfor behov for å utvikle standardiserte indirekte metoder som kan brukes både til produktopimalisering og som grunnlag for mer informativ varedeklarasjon. Tidligere studier har vist at inkuberingsforsøk med jord og organisk gjødsel (f.eks. fiskeslam), gir god korrelasjon med nitrogengjødsleffekter observert i felt (Brod et al., 2023). En videreutvikling og standardisering av inkuberingsforsøk kan danne grunnlag for en praktisk håndbok for bruk av nye organiske gjødselprodukter, i tråd med gjeldende regelverk og agronomiske behov.

3 Oversikt over relevante regelverk ¹

Under viser vi en oversikt over de viktigste aspektene fra relevante regelverk for produksjon og bruk av resirkulert nitrogengjødsel.

3.1 Norsk gjødselregelverk

Fra 1. februar 2025 fikk Norge nye nasjonale regler om produksjon, omsetning, import, lagring og bruk av gjødsel. Formål med revideringen av gjødselregelverket var å redusere negativ miljøpåvirkning ved gjødsling og samtidig legge til rette for økt bruk av sirkulære råvarer og bærekraftig fosforbruk. Det nye norske regelverket gjelder på tvers av gjødselslag (mineralgjødsel og organisk gjødsel) og består av to deler, Gjødselbrukforskriften (2025) og Gjødselvareforskriften (2025).

Positivliste

Det er nytt at gjødselvareforskriften inneholder en positivliste over råvarer og råvarekategorier som kan brukes ved gjødselproduksjon. For eksempel inkluderer positivlista i vedlegg 1 i gjødselvareforskriften fiskeslam fra ferskvannsoppdrett mens slam fra saltvannsoppdrett ikke er listet.

Det er mulig å søke om godkjenning av råvarer som ikke står på positivlista i vedlegg 1 til gjødselvareforskriften. Søkeren må dokumentere råvarens nytteverdi og vise en risikovurdering av råvaren. Mattilsynet er ansvarlig myndighet for vurdering og godkjenning av nye råvarer.

Avløpsslam er én av råvarene som er listet i gjødselvareforskriftens vedlegg 1 men det gjelder noen særlige krav til bruk. Det er for eksempel ikke tillatt å bruke uhygienisert avløpsslam, og det er ikke tillatt å bruke gjødselvarer med avløpsslam på eng, i gartnerier eller der det dyrkes grønnsaker, poteter, bær eller høstes frukt. Det er heller ikke tillatt å bruke gjødselvarer med avløpsslam på jordbruksareal som har P-AL-verdi på 14 eller høyere.

Forurensinger og aktsomhetskrav

Gjødselvarer skal ikke inneholde mer enn 2 spiredyktige ugrasfrø per liter ferdig vare, og heller ikke glass, metall, plast eller andre fremmedlegemer. Totalinnholdet av glass, metall og plast må være < 5 gram/kilogram tørrstoff, og fra 2026 gjelder det særskilte grenser for plastinnhold.

For organiske helse- og miljøfarlige forbindelser gjelder det som tidligere et aktsomhetskrav: Den som produserer eller omsetter gjødselvarer skal vise aktsomhet og treffe rimelige tiltak for å begrense og forebygge at produktet inneholder organiske miljøgifter, plantevernmidler, antibiotika/kjemoterapeutika eller andre miljøfremmede organiske stoffer i mengder som kan medføre skade på helse eller miljø ved bruk. I tillegg gjelder det særlige grenseverdier for innhold av et utvalg organiske miljøgifter i råslam, aske og biokull.

Hygienisering

Gjødselvarer som kan medføre risiko for overføring av sykdommer må være hygieniserte slik at de ikke medfører fare for smitteoverføring til mennesker, dyr og planter. I henhold til Animaliebiproduktforskriften (2016) gjelder hygieniseringskravet ikke for husdyrgjødsel som blir omsatt innenfor eget fylke.

De fleste gjødselvarer skal videre være stabiliserte for å unngå lukt og miljøproblemer ved lagring og bruk. Dette kravet gjelder ikke for husdyrgjødsel som omsettes etter regelverket.

¹ Teksten i dette kapittelet er delvis basert på NIBIO rapport 10/104/2024

Varedeklarasjon

Alle gjødselvarer som omsettes, skal være merket med en varedeklarasjon. Denne skal inneholde en rekke obligatoriske opplysninger, blant annet om produsentens og importørens navn og adresse, samt innhold av tørrstoff, organisk karbon, næringsstoffer, tungmetaller og produktets produksjons- eller batchnummer.

Når det gjelder nitrogen skal varedeklarasjonen for organisk gjødsel oppgi totalt nitrogeninnhold samt nitrogen i form av nitrat og ammonium. Ved omsetning av mineralorganisk gjødsel skal dessuten nitrogen i form av urea deklarerer. Det stilles derimot ikke krav om å oppgi plantetilgjengeligheten til det organiske nitrogenet, og heller ikke minsteinnhold av nitrogen eller andre næringsstoffer.

Fosforbegrensninger

En viktig endring i den nye gjødselbrukforskriften er innføringen av fosforbegrensninger for jordbruksarealer. Fra 2025 er det ikke tillatt å tilføre mer enn 3,5 kg fosfor/dekar/år, uavhengig av gjødseltype. Fra 2027 vil det gradvis innføres regionale innstramminger, med en nedre grense på 2,3 kg fosfor/dekar/år i de fleste regioner innen 2033.

Bruk av avløpsslam er unntatt de årlige fosforgrensene. Her er det tillatt med en maksimal tilførsel på 25 kg fosfor/dekar over en 10-årsperiode. Likevel må mengden plantetilgjengelig fosfor i slammet ikke overstige det som tilsvarer maksimal tillatt fosfortilførsel (Gjødselbrukforskriften, 2025). Hvor tilgjengelig fosforet i slammet er, vil dermed avgjøre om den totale mengden avløpsslam må fordeles over flere spredninger.

Når det gjelder nitrogen, gjelder det som før en øvre grense på 17 kg nitrogen/dekar/år fra husdyrgjødsel i sårbare områder i henhold til Nitratdirektivet (1991). Annen gjødsel kan benyttes i tillegg. Selv om det ikke er innført generelle begrensninger for nitrogen, vil de nye fosforgrensene i praksis også begrense hvor mye nitrogen som kan tilføres gjennom resirkulerte gjødselprodukter.

Tungmetallbegrensninger

I tillegg til fosforbegrensningene, vil innholdet av tungmetaller i gjødselvaren være avgjørende for hvor mye som kan tilføres, avhengig av hvilken grense som slår inn først. For husdyrgjødsel fra egen gård er det bare fosforbegrensningene som gjelder, ikke tungmetallbegrensningene, siden husdyrgjødsel fra egen gård ikke er omfattet av gjødselvareforskriften.

Som tidligere er det definert fire kvalitetsklasser basert på tungmetallinnhold (Tabell 3-1). For produkter i klassene 0, I og II gjelder at råvarene som inngår, ikke kan overstige grenseverdiene for tungmetaller i klasse II. Ved bruk av gjødselvarer som ikke oppfyller kravene til tungmetallinnhold i kvalitetsklasse 0, stilles det krav om analyse av tungmetallinnhold i jorda.

Kvalitetsklassen avgjør maksimal tillatt tilførsel:

- Kvalitetsklasse 0: Gjødselvaren kan brukes fritt på jordbruksareal i mengder som ikke overstiger plantenes gjødselbehov.
- Kvalitetsklasse I og II: Kan brukes i mengder opptil henholdsvis 4 og 2 tonn tørrstoff/dekar over en 10-årsperiode.
- Kvalitetsklasse III: Kan som hovedregel ikke brukes på jordbruksareal. Et unntak gjelder produkter som kun består av forbrenningsprodukter fra rent plantemateriale. Disse kan benyttes med opptil 800 kg tørrstoff/dekar over 10 år. På grøntarealer er tillatt mengde opptil 1 tonn tørrstoff/dekar over samme periode.

Gjødselvarer i tungmetallklasse I, II og III, samt gjødselvarer med fosforbaserte grenseverdier, skal ikke benyttes på jordbruksareal der tungmetallinnholdet i jorda overstiger fastsatte grenseverdier for kadmium, bly, kvikksølv, nikkel, sink, kobber og krom.

Tabell 3-1. Maksimumsgrenser for tillatt innhold av tungmetaller angitt i mg/kg tørrstoff (Gjødselvarereforskriften, 2025)

Kvalitetsklasser	0	I	II	III
Kadmium (Cd)	0,4	0,8	2	5
Bly (Pb)	40	60	80	1600
Bly i dyrkingsmedier	40	52	52	52
Kvikksølv (Hg)	0,2	0,6	3	5
Nikkel (Ni)	20	30	50	80
Sink (Zn)	150	400	800	1500
Kobber (Cu)	50	150	650	1000
Krom (Cr)	50	70	100	150

Den nye gjødselvarereforskriften åpner dessuten for et unntak som er basert på en kobling mellom tungmetall- og fosforinnhold for produkter som inneholder mer enn 1,5 % fosfor på tørrstoffbasis. Unntaket er særlig relevant for produkter hvor tørrstoffet er brukt til energiformål, f.eks. biorest. Disse kan ha høye tungmetallkonsentrasjoner på tørrstoffbasis, uten at forholdet mellom tungmetaller og næringsstoffer nødvendigvis er høyere enn i andre godkjente organiske gjødselprodukter. Dette betyr at selv om f.eks. sinkinnholdet på tørrstoffbasis er relativt høyt, vil det ikke nødvendigvis være begrensende dersom produktet doseres etter plantenes fosforbehov.

3.2 EU-gjødselforordning

Norske gjødselprodusenter kan velge om de vil markedsføre produktene sine i henhold til gjødselvarereforskriften eller i henhold til den nye EU/EØS-dekkende forordningen FPR (EU) nr. 2019/1009.

Forordningen FPR (EU) nr. 2019/1009 trådte i kraft i juli 2022, og erstattet den eksisterende gjødselforordningen EC 2003/2003. Hovedformålet med den nye EU-gjødselforordningen var harmonisering av gjødselregelverket for alle EU og EØS/EFTA-landene, slik at gjødselvarer kan selges på tvers av landegrensene i EU. Ved eksport av norske gjødselvarer til EU-land er det EU-forordningen som blir styrende, og produktet må tilfredsstille kravene til CE-merket gjødsel. Nasjonale forskrifter gjelder fortsatt for bruk av CE-merkede gjødselprodukter.

Forordningen FPR (EU) nr. 2019/1009 er del av EU sin overgang til en sirkulær økonomi. Den inkluderer f.eks. punkter spesifikt om biokull, struvitt, og aske-baserte produkter, og åpner for en omdefinering av disse materialene fra avfall til ressurser, enten som egne gjødselvarer eller komponenter i gjødselvarer.

Forordningen FPR (EU) nr. 2019/1009 er basert på to sentrale begreper: *Product function category* (PFC) og *component material category* (CMC).

Product function category (PFC)

En PFC definerer produktets tiltenkte funksjon. En gjødselvarer kan falle inn under flere PFC-er, f.eks. som gjødsel og kalkingsmiddel. Ofte kombineres ulike produkter for å forbedre effekten av gjødsel, f.eks. ved å tilsette biostimulanter.

PFC-ene som er oppført i FPR (EU) nr. 2019/1009 inkluderer:

- Gjødsel: organisk, mineralorganisk eller uorganisk
- Kalkingsmiddel
- Jordforbedringsmiddel
- Vekstmedium

- Inhibitor
- Biostimulant
- Blandingsprodukt av gjødsel

For hver PFC finnes spesifikke krav til innhold av forurensninger, opprinnelse osv. I motsetning til den norske gjødselvereforskriften gjelder det også minimumskrav til næringsinnhold per produktkategori, som eksempelvis vist for nitrogeninnhold i fire utvalgte PFC i Tabell 3-2.

Tabell 3-2. Minimumskrav til nitrogeninnhold i CE-merket organisk og mineralorganisk gjødsel angitt i FPR (EU) nr. 2019/1009

Gjødselvarer	PFC	Minimumskrav nitrogeninnhold (ferskvekt)	
		Ren nitrogengjødsel	Gjødsel med flere næringsstoffer
Fast organisk	1(A)(I)	2,5 %	1 %
Flytende organisk	1(A)(II)	2 %	1 %
Fast mineralorganisk	1(B)(I)	2,5 % total N, med $\geq 1\%$ organisk N	2 % total N, med $\geq 0,5\%$ organisk N
Flytende mineralorganisk	1(B)(II)	2 % total N, med $\geq 0,5\%$ organisk N	2 % total N, med $\geq 0,5\%$ organisk N

Tabell 3-3. Grenseverdier for tungmetaller og arsen i CE-merket organisk og mineralorganisk gjødsel angitt i FPR (EU) nr. 2019/2009, uttrykt i mg/kg tørrstoff (med mindre annet er spesifisert).

	Organisk gjødsel (PFC 1(A))	Mineralorganisk gjødsel (PFC 1(B))
As (uorganisk)	40	40
Cd	1,5	3 mg Cd/kg tørrstoff ^a 136 mg Cd/kg P ^b
Cr (VI)	2	2
Cu	300	600
Pb	120	120
Hg	1	1
Ni	50	50
Zn	800	1500

^a Total fosforinnhold $< 5\%$ uttrykt som fosforpentoksid-ekvivalent etter masse.

^b Total fosforinnhold $\geq 5\%$ uttrykt som fosforpentoksid-ekvivalent etter masse.

Tabell 3-3 angir grenseverdier for innholdet av tungmetaller og uorganisk arsen i CE-merket organisk gjødsel (PFC 1(A)) og mineralorganisk gjødsel (PFC 1(B)). I motsetning til den norske gjødselvereforskriften finnes det ingen inndeling i kategorier med tilhørende mengdegrensar. I stedet gjelder én felles grenseverdi per PFC. For krom er det innholdet av seksverdig krom (Cr VI), og ikke totalt krominnhold, som skal deklarerer.

Forordningen FPR (EU) nr. 2019/1009 inkluderer også grenser for organiske forurensninger PAH og dioksin PCDD/F, men disse er definert under komponentene til gjødselvarer (CMC). Når det gjelder PAH, er det for eksempel satt en øvre grenseverdi på 6 mg/kg tørrstoff i både fast og flytende biorest som inngår i gjødselvarer.

Component material category (CMC)

CMC er en positivliste over komponenter som er tillatt i EU-gjødselprodukter, enten alene eller i kombinasjoner. Enhver komponent som ikke står på listen, vil ikke være tillatt. Det er listet 15 ulike CMC-er, inkludert for eksempel *Planter*, *plantedeler* eller *planteekstrakter* (CMC 2), *Kompost* (CMC 3), *Biorest fra plantemateriale* (CMC 4), *Annen biorest* (CMC 5) m.fl.

Gjødselvarer som inneholder avløpsslam og/eller fiskeslam kan per i dag ikke omsettes som CE-gjødsel. Det vil si at det i dag ikke er mulig å eksportere gjødselprodukter som inneholder disse råvarene til EU-land. Norge har spilt inn fiskeslam for godkjenning som råvare i CE-merket gjødsel.

3.3 Regler for økologisk landbruk

Den norske Økologiforskriften (2022) er basert på forordning EU nr. 2018/848. Ett av hovedprinsippene i økologisk jordbruk er lukkede næringsstoffkretsløp, og bruk av lettløselig nitrogengjødsel er derfor forbudt. Økologiforskriften stiller også strengere krav til hvilke organiske gjødselvarer som kan brukes enn gjødselvarerforskriften.

Avløpsslam og fiskeslam er blant produktene som ikke er tillatt i økologisk produksjon. Derimot er matavfall fra private husholdninger, storhusholdninger og serveringssteder tillatt som ingrediens i organiske gjødselvarer til økologisk jordbruk. I tillegg er struvitt utvunnet fra avløpsslam nylig blitt godkjent, forutsatt at det kan dokumenteres at produktene er frie for patogener og forurensninger.

3.4 Animaliebiproduktforskriften

Animaliebiproduktforskriften (2016) regulerer blant annet bruken av animalske restråstoffer som gjødsel. Forskriften er basert på forordning EU nr. 1069/2009 og forordning EU nr. 142/2011. I praksis betyr det at produsenter av resirkulerte gjødselvarer som inneholder animalske biprodukter må følge både animaliebiproduktforskriften og gjødselvarerforskriften.

Animalske biprodukter deles i tre kategorier etter risiko for spredning av dyresykdommer eller farlige stoffer, hvor kategori 1 har høyest risiko, mens kategori 3 regnes som lavrisikomateriale. Kun produkter i kategori 2 og 3 kan inngå i gjødselvarer. Kategori 3 materiale kan i tillegg til bruk som gjødsel, anvendes som fôr til matproduserende dyr.

Husdyrgjødsel er i kategori 2. Det betyr at husdyrgjødsel regnes som høyriskomateriale, og må derfor hygieniseres hvis det skal transporteres ut av fylket. Ved bruk innad i samme fylket som husdyrgjødsel er produsert i, er det ikke nødvendig med hygienisering. Kjøkken- og matavfall fra privathusholdninger og storhusholdning er kategori 3 materiale. Fiskeensilasje av død fisk er kategori 2 materiale, mens fiskeensilasje av restproduktene fra sløye-/slaktevirksomhet klassifiseres som kategori 3 materiale. Fiskeslam er ikke definert som et animalsk biprodukt og reguleres derfor kun av gjødselvarerforskriften.

3.5 Nitratdirektiv

Nitratdirektivet (91/676/EØF) ble vedtatt i 1991 for å beskytte vannkvaliteten i Europa mot forurensning fra nitrater fra landbruket. Det er en sentral del av EUs vannpolitikk og omfatter både overflatevann og grunnvann. Direktivet pålegger medlemslandene å identifisere områder som er, eller risikerer å bli, forurenset av nitrater fra landbruket. Disse arealene klassifiseres som sårbare områder. I sårbare områder skal det innføres handlingsplaner med tiltak som reduserer nitratavrenning til vannmiljøet, som blant annet gårdenes kapasitet for oppbevaring av gjødsel og i hvilke perioder det er tillatt å tilføre ulike typer gjødsel.

Implementering i Norge

I Norge er deler av nitratdirektivet innført i norsk rett gjennom gjødselbrukforskriften (2025). Direktivet er gjengitt i § 19 i denne forskriften. Norge har identifisert kystvannet i indre Oslofjord og i Glomma-estuariet som sårbare områder. I henhold til gjødselbrukforskriften skal det i sårbare områder ikke være høyere tilførsel av husdyrgjødsel enn 17 kg nitrogen/dekar/år. Mengden nitrogen i egen husdyrgjødsel bestemmes enten ut fra normtall for ulike dyreslag, eller ut fra en oversikt over

nitrogenstrømmer inn til og ut av husdyrholdet. Det kan gjøres fratrekk for forventet tap av ammoniakk fra husdyrrom og lager.

Siden implementeringen av nitratdirektivet i norsk regelverk kun retter seg mot mengden nitrogen fra husdyrgjødsel, er den ikke til hinder for å tilføre annen nitrogengjødsel i tillegg, f.eks. nitrogenholdig mineralgjødsel. Andre land som har iverksatt nitratdirektivet, har utviklet handlingsplaner som omhandler mer enn bare grensen for nitrogentilførsel med husdyrgjødsel. Bechmann et al. (2024) vurderte konsekvensene av å utvide de sårbare områdene i Oslofjorden til større områder. De konkluderte med at nitratdirektivet først vil ha en betydelig effekt på nitrogenutvasking fra jordbruksarealer dersom det følges opp med konkrete handlingsplaner.

Gjenvunnet nitrogen fra husdyrgjødsel (RENURE)

Når FPR (EU) nr. 2019/2009 ble implementert i 2022, fikk EUs gjødselordning utvidet virkeområdet sitt fra kun å omfatte mineralgjødsel til også å inkludere mineralorganisk og organisk gjødsel. Det gjør at produkter delvis fremstilt av husdyrgjødsel nå kan inngå i ulike gjødselkategorier, og at gjødselblandinger kan inneholde nitrogen og andre næringsstoffer både i mineralsk og organisk form. Dette utfordrer skillet i nitratdirektivet mellom kjemisk gjødsel (fremstilt ved industriell prosess) og husdyrgjødsel som etter animaliebiproduktforskriften er definert som avføring/urin fra husdyr (med eller uten strø), også i bearbeidet form.

Med bakgrunn i EUs overgang til en sirkulær økonomi og nitratdirektivet, la EU-kommisjonen i april 2024 derfor frem et konseptforslag om å tillate gjenvunnet nitrogen fra husdyrgjødsel som mineralgjødsel istedenfor som husdyrgjødsel. Målet er at gjenvunnet nitrogen fra husdyrgjødsel skal kunne brukes på lik linje med mineralgjødsel, også i områder med nitratrestriksjoner, uten å øke risikoen for forurensning av vannmiljøet. Det er foreslått at det skal kunne brukes inntil 10 kg ekstra nitrogen/dekar årlig ut over dagens 17 kg-grense. Forslaget er per i dag ikke vedtatt.

Konseptforslaget er basert på en rapport laget av EUs Joint Research Centre (Huygens et al., 2020) som definerer gjenvunnet nitrogen fra husdyrgjødsel som RENURE-produkter (*REcovered Nitrogen from manURE*).

JRC-rapporten foreslår konkrete kriterier som et produkt må oppfylle for at det skal kunne klassifiseres som RENURE. Blant de viktigste kravene er:

- Mineralnitrogen/totalnitrogen-forhold ≥ 90 %, eller
- Total organisk karbon/totalnitrogen-forhold ≤ 3
- Maksimalt tungmetallinnhold: Kobber: ≤ 300 mg/kg tørrstoff, og sink: ≤ 800 mg/kg tørrstoff

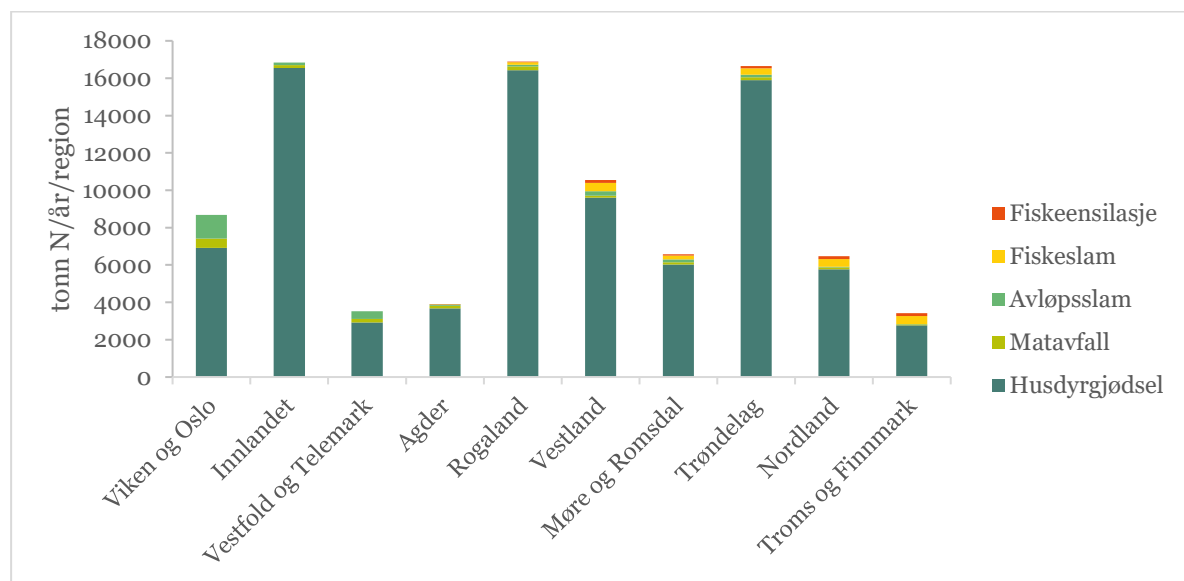
RENURE-kriteriene ble utformet for å sikre at produkter både har agronomisk effektivitet og miljøpåvirkning på nivå med tradisjonell mineralgjødsel. Ifølge Huygens et al. (2020) viser studier at produkter med høy andel mineralnitrogen og lavt C/N-forhold har tilsvarende høy nitrogenutnyttelse som mineralgjødsel, og lav risiko for nitratutvasking. Analyser viser videre at disse produktene generelt inneholder lavere nivåer av pesticider og veterinærmedisiner enn ubehandlet husdyrgjødsel. Risikoen for lukt og patogener er også redusert ved anaerob behandling og korrekt lagring.

Eksempler på produkter som kan oppfylle RENURE-kriteriene inkluderer ammoniumsalter fra stripping og skrubbing, mineralkonsentrater fra membranfiltrering, flytende fraksjoner etter mekanisk separering av biorest etc. (se kapittel 5 for informasjon om teknologiene). I praksis kan det være en utfordring at mange RENURE-produkter ikke oppfyller minimumskravene til næringsinnhold spesifisert for produktfunksjonskategori "Gjødsel" (PFC 1) i EU-forordningen, da de ofte har høyt vanninnhold og lav næringstetthet målt i ferskvekt.

4 Tilgjengelige råvarer

Delprosjekt 1 i dette prosjektet har kvantifisert nitrogenkilder og -strømmer i jordbruket (Frøseth m.fl., delrapport 1). Figur 4-1 viser hovedresultater av delprosjekt 1, og hvilke råvarer som potensielt er tilgjengelige i ulike regioner for produksjon av resirkulert nitrogengjødning.

Husdyrgjødsel utgjør den største kilden til resirkulerbart nitrogen i alle regioner, spesielt i Trøndelag, Rogaland og Innlandet, som har betydelig husdyrproduksjon (Figur 4-1). Dette inkluderer husdyrgjødsel som allerede inngår i lokale kretsløp på gården, og overestimerer derfor husdyrgjødsel som faktisk er tilgjengelig for produksjon av resirkulert gjødning. I mer urbane regioner som Oslo/Viken og Vestfold og Telemark, er matavfall og avløpsslam viktige kilder til den totale nitrogenmengden i tillegg til husdyrgjødsel. I kystregioner som Nordland, Troms og Finnmark, samt Møre og Romsdal, er fiskeensilasje og fiskeslam fremtredende kilder i tillegg til husdyrgjødsel.



Figur 4-1. Estimater av nitrogenmengder (tonn nitrogen/år/region) i norske regioner, fordelt på ulike organiske nitrogenkilder. Se Frøseth m.fl., 2025, delrapport 1, for informasjon om hvordan estimatene er beregnet.

I Norge brukes husdyrgjødsel foreløpig mest direkte uten videre prosessering. Med en estimert årlig nitrogenavrenning fra jordbruksarealer på 56.541 tonn til vann og 29.400 tonn til luft (Frøseth m.fl., 2025, delrapport 1), er det avgjørende å ta i bruk teknologier for å redusere tapene og å oppnå målet om bedre nitrogenutnyttelse (kapittel 5.1.1). Disse tallene gjelder samlet nitrogenutførsel i norsk jordbruk, inkludert husdyrgjødsel og mineralgjødning.

I 2023 ble 575.000 tonn råvarer benyttet til biogassproduksjon, mens 296.000 tonn råvarer gikk til kompostering (SSB, 2024). Biogassproduksjonen benyttet seg hovedsakelig av matavfall (136.000 tonn), husdyrgjødsel (115.000 tonn), og avløpsslam (104.000 tonn). Kompostproduksjonen baserte seg hovedsakelig på park- og hageavfall (98.000 tonn), avløpsslam (67.000 tonn), og matavfall fra husholdninger (44.000 tonn). Produksjonen av organisk og organisk-mineralt gjødning er fortsatt begrenset, og utviklingen av resirkulert mineralgjødning er foreløpig lite aktuell i Norge.

I fremtiden forventes fiskeslam og fiskeensilasje å få økt betydning som kilder til resirkulerbart nitrogen, i takt med utviklingen i havbruksnæringen. Dette gjelder særlig regioner med høy oppdrettsaktivitet, som Rogaland, Vestland, Møre og Romsdal, Trøndelag, Nordland og Troms og Finnmark. Nye krav til oppsamling, økt landbasert oppdrett og teknologiske løsninger for slaminnsamling fra sjøbaserte anlegg vil kunne gi en betydelig økning i tilgjengelige mengder (Øgaard et al., 2024). I tillegg er andelen avløpsslam som må brukes i jordbruket anslått å øke med 62 % innen

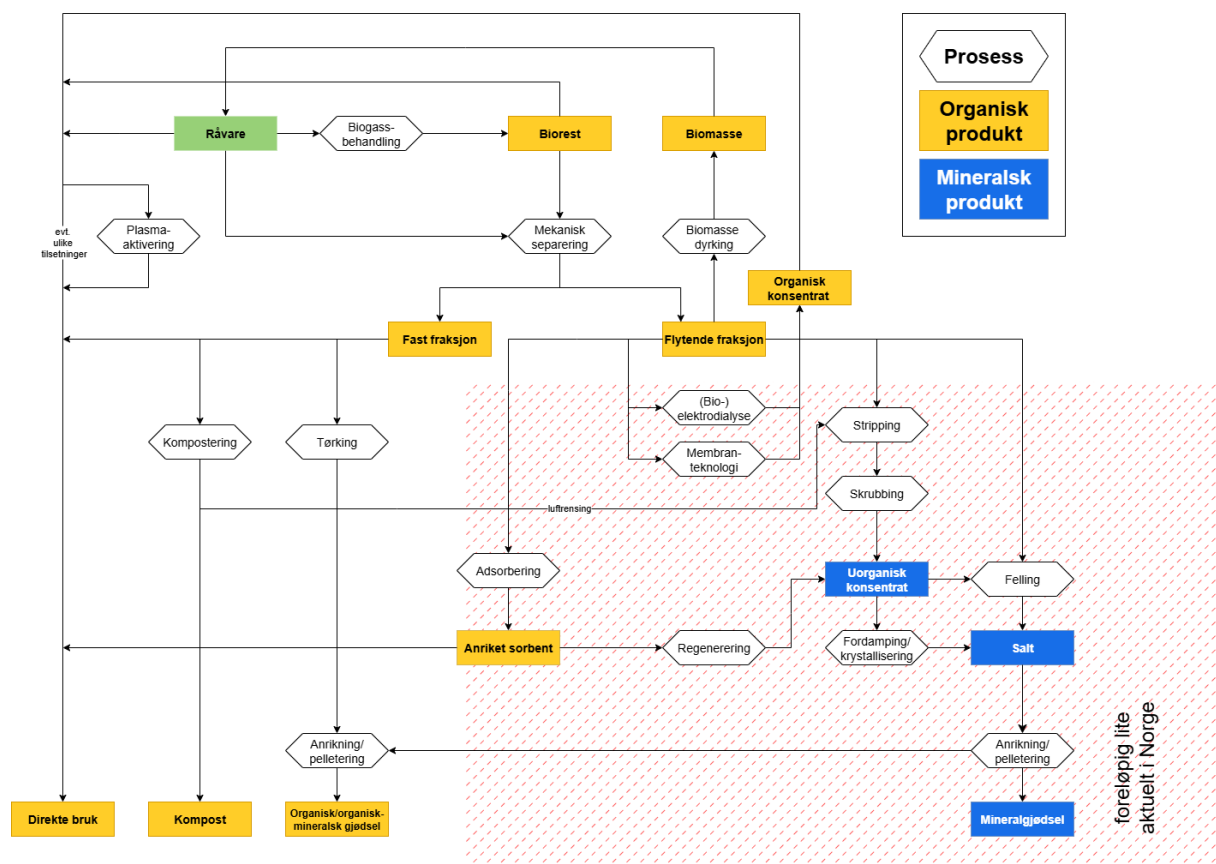
2030 (Øgaard et al., 2024). Fremover vil regioner med store nitrogenoverskudd ha størst utbytte av teknologier som muliggjør produksjon av mineralgjødsel basert på organiske råvarer (kapittel 5.2).

5 Oversikt over tilgjengelige teknologier

Dette kapitlet gjennomgår de viktigste teknologiene for gjenvinning av nitrogen i organiske råvarer som gjødselprodukter, også med hensyn til utviklingsstadiet, anvendelighet og praktisk erfaring. Figur 5-1 viser en oversikt over teknologiene som omtales nærmere i dette kapitlet.

Forenklet kan resirkulert nitrogengjødsel deles i to kategorier:

- Organiske gjødselprodukter med lav prosesseringsgrad og
- mineralgjødsel fremstilt av organiske råvarer.



Figur 5-1. Oversikt over et utvalg av tilgjengelige teknologier som gir organiske eller mineralske resirkulerte gjødselprodukter med nitrogen

5.1 Organisk gjødsel med lav prosesseringsgrad

Organiske gjødselprodukter er produkter som inneholder organisk karbon. EU-gjødselforordningen setter minimumskrav til innhold av organisk karbon i organisk gjødsel, f.eks. minst 15 % i fast organisk gjødsel (PFC 1(A)), mens det norske gjødselregelverket ikke stiller tilsvarende krav. Nitrogen i organisk gjødsel foreligger ofte som organiske forbindelser, men kan dessuten inneholde uorganisk nitrogen. Organiske gjødselprodukter kan være flytende (f.eks. husdyrgjødsel, biorest), eller faste (f.eks. pelletert hønsegjødsel). Energiforbruket for produksjon pleier å være lavt, men det kan være betydelige kostnader knyttet til transport og lagring.

5.1.1 Direkte bruk

Flere av de organiske råvarene omtalt i kapittel 4 kan brukes direkte som gjødsel. Dette gjelder f.eks. husdyrgjødsel fraktet over fylkesgrenser. Regulatoriske krav til direkte bruk av organiske råvarer kommer frem av Gjødselforeforskriften (2025).

Det er store variasjoner i både totalt nitrogeninnhold og nitrogenkvalitet mellom ulike organiske råvarer, også innenfor samme råvaretype. Tabell 5-1 viser en sammenligning av utvalgte organiske råvarer med hensyn til totalt nitrogeninnhold, andel ammoniumnitrogen og utnyttelsesgraden til nitrogen, basert på vekstforsøk fra ulike studier. Ammoniumnitrogen regnes som umiddelbart plantetilgjengelig, forutsatt at ammoniakktapene holdes lave. Tilgjengeligheten av det organiske nitrogenet i løpet av vekstsesongen avhenger blant annet av typen organisk forbindelse, samt fuktighet og temperatur. Teoretiske aspekter ved nitrogenkvalitet i organisk gjødsel er nærmere omtalt i kapittel 2.3.

Tabell 5-1. Oversikt over totalt nitrogeninnhold (kg/tonn våtvekt), andel ammonium av totalt nitrogen (%) og nitrogenutnyttelsesgrad for ulike organiske råvarer, basert på vekstforsøk. Nitrogenutnyttelsesgrad er andelen (%) nitrogen i en organisk råvare som effektivt erstatter nitrogenet i en mineralgjødsel.

Råvare	Totalt N-innhold (kg/tonn)	Andel ammonium (% av totalt N)	N-utnyttelsesgrad (%)	Referanser
Husdyrgjødsel, storfe	2,0-4,4	32-68	13-67	a; b; c; d; e; f
Husdyrgjødsel, gris	1,2-6,4	72-90	41-79	b; c; d; g; e
Husdyrgjødsel, kylling	13-34	5-38	33-85	a; b; c; d; e; g
Husdyrgjødsel, hest	5-33	2,5-12	≈ 40	c; g
Husdyrgjødsel, talle	1,3-9,0	15-26	10-34	a; b; d; e
Kompost ¹	11,8	-	0-20	a; e
Avløpslam	5,5-30	4-42	15-55	a; c; e; g; h
Kjøttbeinmel	79-98	0,3-5	60-80	a; c; i
Fiskeslam, avvannet	5,5-16	9-25	-	j

¹ Grønnsaker, frukt og hage-park avfall. ^a Gutser et al. (2005); ^b Daugstad et al. (2012); ^c Delin et al. (2012); ^d Schils et al. (2020); ^e Velthof et al. (2024); ^f Brod et al. (2025); ^g Henriksen et al. (2023); ^h Øgaard and Brod (2016); ⁱ Brod et al. (2014); ^j Brod et al. (2023).

De fleste organiske materialer har et ubalansert næringsstoff-forhold med for mye fosfor og for lite nitrogen og kalium sammenlignet med plantenes næringsbehov. Dette forsterkes av faren for ammoniakktap særlig ved bruk av flytende organiske råvarer med stor andel ammonium av totalnitrogen. I praksis utgjør ammoniakktap en betydelig andel av nitrogentap i jordbruket og reduserer gjødselelsens nitrogenutnyttelse (Velthof et al., 2024). Det finnes ulike muligheter for å redusere ammoniakktap og dermed øke nitrogenutnyttelsen ved direkte bruk av organiske råvarer, som beskrevet nedenfor.

Nedfelling og nedmolding

I eng er nedfelling og injeksjon blant de mest effektive metodene for å redusere ammoniakktap, med potensial for å kutte utslipp med opptil 80 % sammenlignet med tradisjonell breispredning av husdyrgjødsel. Gjødselinjeksjon har imidlertid noen ulemper, som økte kostnader og energibehov, samt risiko for høyere utslipp av lystgass og nitrat. Stripespredning gir en mer moderat reduksjon i ammoniakktap (30–40 %) sammenlignet med breispredning, men regnes som mer praktisk og effektiv i bruk. I åpen åker er ammoniakktap fra spredning av husdyrgjødsel mer påvirket av hvor raskt gjødsla blir nedmoldet enn av spredemetode (Bechmann et al., 2023).

Effekten av miljøvennlige spredemetoder er størst ved værforhold som øker faren for ammoniakktap som sol og vind. I tillegg kan nitrogeneffektiviteten forbedres ved å tilpasse tidspunktet for spredning til plantenes næringsbehov. Spredning i vekstsesongen, særlig om våren, gir bedre utnyttelse av

nitrogenet enn spredning om høsten. Dette forutsetter imidlertid tilstrekkelig lagerkapasitet for husdyrgjødsel (Bechmann et al., 2023).

Surgjøring

Surgjøring av organiske råvarer er en annen mulighet for å redusere ammoniakktap ved direkte bruk. Ved lav pH skiftes den kjemiske likevekten fra ammoniakk-gass (NH_3) til ammonium (NH_4) i løsning, og faren for fordampning reduseres tilsvarende.

I Danmark har det lenge vært vanlig å surgjøre flytende husdyrgjødsel med svovelsyre (H_2SO_4) som alternativ til nedfelling i tilfeller der overflatespredning er mer aktuelt, særlig etter implementering av handlingsplanen knyttet til EUs nitratdirektiv (se kapittel 3.5). Ifølge Jensen et al. (2018) blir omtrent 20 % av den flytende husdyrgjødselen i Danmark surgjort med svovelsyre. Svovelsyre kan tilsettes under lagring eller rett før spredning. Ifølge Pedersen et al. (2022) gir lagringsbasert surgjøring med svovelsyre i gjennomsnitt 79 ± 18 % reduksjon i ammoniakktap, mens feltbasert surgjøring gir 30 ± 6 % reduksjon. Feltstudier har vist at lagringsbasert surgjøring med svovelsyre økte husdyrgjødselens mineralgjødselekvivalent med 43 ± 27 % sammenlignet med ubehandlet gjødsel (Kai et al., 2008). Dersom gjødsla moldes ned i jorda, har surgjøring liten effekt på den relative nitrogenverdien, men øker likevel total gjødselverdi ved å redusere ammoniakktap i fjøs og under lagring (Sørensen & Eriksen, 2009). Ulempen med surgjøring med svovelsyre er at det kan føre til økt utslipp av illeluktende svovelforbindelser og sulfatutvasking, i tillegg til økt risiko for utslipp av lystgass (N_2O) og redusert metanproduksjon i etterfølgende biogassprosesser (Velthof et al., 2024).

I tillegg til svovelsyre har også surgjøring med organiske syrer vist seg effektivt for å redusere ammoniakktap fra husdyrgjødsel. I forsøk med eddiksyre (CH_3COOH) ble ammoniakktap redusert med 83 %, sammenlignet med 75 % ved bruk av svovelsyre. Eddiksyre reduserte også metanutslipp til nær null, mens svovelsyre ga en reduksjon på 89 %. I tillegg hadde eddiksyre lavere utslipp av luktstoffer (Fuchs et al., 2021). Fordelen med svovelsyre fremfor eddiksyre er at den koster mindre, og at den i tillegg tilfører plantene makronæringsstoffet svovel. En 180-dagers lagringsstudie på husdyrgjødsel av svin viste at uten surgjøring gikk 79,8 % av nitrogenet tapt. Ved surgjøring til pH 5 ble ammoniakktap redusert mest med fosforsyre (H_3PO_4 , 85,1 %), etterfulgt av svovelsyre (H_2SO_4 , 60,3 %), saltsyre (HCl , 49,1 %), eddiksyre (CH_3COOH , 16 %), maursyre (HCOOH , 12,3 %) og salpetersyre (HNO_3 , 4,8 %) (Chen et al., 2024). Forskjeller i effektiviteten av reduksjon av ammoniakktap mellom de to studiene kan tilskrives ulike forsøksoppsett. Det tyder på at det kan være nødvendig å optimalisere metoden ut fra råvaretype og lokale forhold.

Syrnet myse fra yoghurtproduksjon har også blitt vurdert som et mulig middel for surgjøring av husdyrgjødsel. Myse har en rekke bruksområder, men en betydelig andel slippes fortsatt ut i avløpet. Etter 84 dagers lagring med pH senket til under 6, ble det observert en kumulativ reduksjon i ammoniakktap på henholdsvis 40 % og 26 % for blandinger som inneholdt 25 % og 12,5 % syrnet myse sammenlignet med ren husdyrgjødsel (Jatana et al., 2023). I tillegg inneholder myse nitrogen i form av organiske forbindelser.

Fermentering av husdyrgjødsel har også vist å gi forsurende effekt, særlig når lett nedbrytbare karbohydrater som melasse tilsettes. Kommersielle bio-preparater alene har begrenset effekt på nitrogeninnhold og agronomiske parametere, grunnet den allerede rike mikrobielle sammensetningen i blautgjødsel (O'Toole & Capjon, 2020). Den samme studien viste at tilstrekkelig tilførsel av karbohydrater, som for eksempel melasse, kan stimulere veksten av melkesyreproduserende bakterier, noe som resulterer i selvforsuring og effektiv konservering av nitrogen.

Tilsetning av adsorbenter

Tilsetning av adsorbenter til organiske råvarer før spredning på jord er enda et tiltak som kan øke nitrogenutnyttelsen av flytende organiske råvarer ved å redusere ammoniakktap.

Naturlige vannholdige aluminiumsilikater som zeolitter, samt syntetiske amorfe varianter som geopolymere, har vist høy evne til å adsorbere både ammonium- og nitrater. Zeolittens krystallstruktur består av SiO_4 - og AlO_4 -tetraedere bundet sammen i et åpent gitter som gir stor overflate og kationbyttekapasitet. Disse egenskapene gjør adsorbentene i stand til å redusere nitrogentap gjennom fordamping og utvasking, samtidig som de reduserer lukt og luftforurensning. Når adsorbentene tilsettes jord, fungerer de som et reservelager for adsorbert nitrogen som frigjøres gradvis for planter (Krogstad & Rakic, 2016). I forsøk der naturlig zeolitt ble tilsatt husdyrgjødselgjødsel, ble mellom 67 og 98 % av ammoniakken bevart, avhengig av mengden zeolitt som ble brukt (Krogstad & Rakic, 2016). Med en nitrogenbindingsevne på mellom 0,9 og 2 % (9–21 mg N/g zeolitt), vil det kreve mellom 200 og 400 kg zeolitt for å binde ammoniakk fra ett tonn flytende fraksjon av biorest fra husdyrgjødsel. For å tilføre 20 kg nitrogen/dekar, vil det være nødvendig å bruke mellom 1 og 2 tonn zeolitt/dekar (Kocatürk-Schumacher et al., 2017). Nitrogenmettede adsorbenter vurderes som saktevirkende gjødsel fordi ammonium frigjøres fra zeolitten betydelig tregere enn det blir bundet (Ganrot, 2012).

Biokull er et annet materiale som skal kunne binde nitrogen, redusere utvasking og gi positive effekter på jordstruktur, mikrobiologi og plantevekst. Biokull ladet med ammonium skal kunne fungere som langtidsvirkende gjødsel, men en gjennomgang av publiserte studier viser at mekanismene bak dette er uklare, noe som hindrer videre utvikling av denne typen gjødsel (Rasse et al., 2022). Dagens biokull har dessuten som oftest ikke tilstrekkelig bindingskapasitet til å lage produkter med høyt nitrogeninnhold (Weldon et al., 2022). Biokull er alkalisk, og flere studier viser at tilsetning av biokull til husdyrgjødsel eller biorest, enten gjennom direkte bunnfelling eller tørking sammen, kan medføre økte utslipp av ammoniakk (O'Toole et al., 2022). Usikkerheten rundt biokull skyldes også at det finnes mange biokullkombinasjoner, ulike jordtyper og miljøforhold disse er testet under.

Nitrifikasjons- og ureasehemmere

I tillegg til ammoniakkfordamping er nitratutvasking en av hovedkildene til nitrogenutslipp i jordbruket.

Nitrifikasjonshemmere, som dicyandiamid (DCD), nitrapyrin og pyrazol baserte forbindelser kan redusere nitratutvasking og utslipp av lystgass (N_2O) ved å forsinke omdannelsen av ammonium i flytende organiske råvarer som husdyrgjødsel til nitrat (FAO, 2025). Det fremgår videre at ved bruk av gjødselvarer som inneholder urea kan dessuten ureasehemmere som *N-(n-butyl) thiophosphoric triamide* (NBPT) redusere NH_3 -fordamping. Kombinert bruk av urease- og nitrifikasjonshemmere omtales som en lovende strategi for å begrense både ammoniakkfordamping og tap av reaktivt nitrogen gjennom nitrifikasjon og denitrifikasjon til miljøet, og dermed øke nitrogenutnyttelsen i jordbruket (FAO, 2025). Tørket hønsegjødsel fremstilles som den mest relevante råvaren for tilsetning av ureasehemmere, ettersom en stor andel av nitrogenet her foreligger som urinsyre, i motsetning til husdyrgjødsel fra fjøssystemer, der praktiske utfordringer begrenser effekten (Velthof et al., 2024).

Selv om ureasehemmere kan redusere NH_3 -utslipp betydelig, viser studier at bruken kan ha negative bivirkninger ved å påvirke frittlevende nitrogenfiksering. De fleste studier som undersøker mulige negative effekter av inhibitorer på jordens mikrobielle samfunn er likevel kortvarige, og det mangler fortsatt kunnskap om langtidsvirkninger (Velthof et al., 2024).

Plasmaaktivering

Ifølge Graves et al. (2019) er behandling av organiske råvarer med luftplasma, såkalt *plasma activated organic fertilizer* (PAOF), en lovende teknologi for å utnytte potensialet som nitrogengjødsel.

Plasmabehandling innebærer bruk av ionisert luft («plasma») for å redusere ammoniakk og lukt, og for å øke nitrogeninnholdet i gjødsla. Atmosfærisk luftplasma aktiverer gjødselen ved å tilføre reaktive nitrogenforbindelser, særlig nitritt (NO_2^-) og nitrat (NO_3^-), som bidrar til å senke pH. Dette reduserer ammoniakkfordampning og utslipp av metan samt tap av flyktige organiske forbindelser

(VOC). Selv om PAOF i enkelte tilfeller kan øke lystgassutslipp fra jord, antas det at det samlede nitrogentapet fra agroøkosystemet reduseres (Graves et al., 2019).

Eksempel på kommersiell løsning: Den norske *N2 Applied* prosessen er et praktisk eksempel på bruk av plasmateknologi for å forbedre husdyrgjødsel: *N2 Applied* prosessen går ut på at plasmaet genereres direkte fra luft ved hjelp av elektrisitet og brukes til å danne reaktivt nitritt og nitrat som tilføres husdyrgjødsel.

Oppsummering

Produkt: Organiske råvarer kan brukes direkte som gjødsel uten videre behandling, så lenge de oppfyller kravene i Gjødselevareforskriften (2025).

Nitrogenkvalitet: Nitrogenkvalitet varierer mellom ulike råvarer. I flytende materialer som husdyrgjødsel kan over 50 % av totalnitrogenet foreligge som plantetilgjengelig ammonium, men det er utsatt for tap som ammoniakk. Det finnes mange tiltak for å redusere slike tap, f.eks. stripespredning, nedfelling og surgjøring. Virkningen av det organiske nitrogenet er mer usikker, og påvirkes av type nitrogenforbindelse (dvs. raskt eller langsomt nedbrytbart organisk nitrogen) og ytre faktorer som temperatur og fuktighet. Ved mye langsomt tilgjengelig nitrogen i den organiske gjødsla, vil det være utfordrende å dekke behovet for nitrogen for planter med stort nitrogenbehov tidlig i vekstsesongen.

Fordeler: Krever vanligvis lav investering sammenlignet med andre resirkuleringsteknologier for nitrogen. Energiforbruket er generelt lavt, men kan øke noe ved bruk av metoder som gjødselinjeksjon og plasmaaktivering. Tilførsel av organisk materiale kan over tid bidra til forbedret jordkvalitet og karbonlagring.

Ulemper: Forholdet mellom næringsstoffer er ofte ubalansert med for mye fosfor sammenlignet med nitrogen og plantenes behov, f.eks. i husdyrgjødsel. Flytende råvarer er lite egnet til lang transport. Fare for tilførsel av tungmetaller og organiske forurensninger.

5.1.2 Biogassbehandling (anaerob nedbryting)

I 2024 ble til sammen 190.000 tonn tørrstoff organisk materiale behandlet i et biogassanlegg ifølge bransjens egen biogasstatistikk (2025). Derav utgjorde avløpsslam 48 %, matavfall 33 %, fiskeensilasje 9 %, husdyrgjødsel 8 % og fiskeslam 2 %.

I et biogassanlegg brytes råvarene ned av mikroorganismer i et oksygenfritt miljø, noe som resulterer i produksjon av biogass (omtrent 60 % metan og 40 % karbondioksid) og næringsrik biorest. Avhengig av type substrat er omtrent halvparten av det organiske materialet nedbrutt etter biogassprosessen, mens næringsstoffene i stor grad bevares i bioresten.

Ved større norske biogassanlegg har bioresten en flytende konsistens, tilsvarende blautgjødsel, med et tørrstoffinnhold på rundt 5 %. Bioresten kan benyttes som gjødsel direkte eller etter mekanisk separering i en fast og en flytende fraksjon, med eller uten forutgående surgjøring (se kapittel 5.1.3). Useparert biorest og den flytende fraksjonen kan spres med samme utstyr som brukes til husdyrgjødsel (blautgjødsel).

Nitrogenkonsentrasjonen i biorest er vanligvis i samme størrelsesorden som i blautgjødsel, eller noe høyere hvis matavfall eller marine råstoffer er brukt (Brod, 2023). Andelen direkte plantetilgjengelig ammonium (NH_4^+) av totalnitrogen i biorest er derimot vanligvis høyere enn i blautgjødsel. Det skyldes at lett nedbrytbare organiske forbindelser i substratet mineraliserer i biogassreaktoren (Möller & Müller, 2012). Under anaerobe forhold foreligger mineralisert nitrogen som NH_4^+ . I praksis vil noe NH_4^+ felles ut som salter i biogassreaktoren, f.eks. struvitt ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$) eller inngå i dannelsen av ny mikrobiell biomasse. Siden pH i bioresten er høy, er tiltak for å redusere ammoniakktap under lagring og spredning enda viktigere enn for blautgjødsel (se kapittel 5.1.1). Biorest har en lavere

viskositet enn ubehandlet husdyrgjødsel og vil derfor ved spredning trekke raskere ned i jorda. Dette reduserer risikoen for ammoniakktap etter spredning noe sammenlignet med husdyrgjødsel som ikke har blitt behandlet i et biogassanlegg.

Gjødseleffekten av flytende biorest er hovedsakelig knyttet til ammoniuminnholdet (Henriksen et al., 2023). Organisk materiale som har gått gjennom nedbrytningsprosesser er relativt stabilt og videre nedbrytning går sakte sammenlignet med nedbrytningshastigheten for materialer som ikke har gjennomgått nedbrytningsprosesser (Henriksen et al., 2023). Det organiske nitrogenet i bioresten er derfor lite tilgjengelig i løpet av den tiden kornet tar opp næringsstoffer fra jord. På den andre siden betyr det at bruk av biorest som gjødsel over tid kan forbedre jordas fysiske og biologiske egenskaper siden tungt nedbrytbare organiske forbindelser fortsatt er bevart i bioresten.

Anaerob nedbrytning kan fungere som en «døråpner» for videre prosessering av biorest til mer optimaliserte og transportvennlige gjødselprodukter, ettersom slike anlegg fungerer som knutepunkt for resirkulerbare næringsstoffer (Øgaard et al., 2024). Dessuten kan mineralisering av organisk nitrogen til ammonium i biogassprosessen legge til rette for videre prosessering til resirkulert mineralgjødsel gjennom avanserte teknologier beskrevet i kapittel 5.2, særlig etter fraseparering av det organisk materiale (se kapittel 5.1.3).

Forholdet mellom nitrogen og fosfor avhenger av substratmiksen som inngår i biogassprosessen. For eksempel reduseres dette forholdet når andelen fiskeslam i biogassprosessen øker (Brod, 2023). Selv om selve nedbrytningsprosessen ikke medfører tap av nitrogen, kan risikoen for nitrogen tap under lagring, transport og spredning øke dersom andelen ammonium i bioresten er høyere enn i den opprinnelige råvaren.

Oppsummering

Produkt: Biorest

N kvalitet: Raskt nedbrytbart organisk nitrogen i råvaren mineraliseres i biogassreaktoren, og mye av nitrogenet foreligger derfor som ammonium. Biorest har høy pH, og derfor er tiltak for å redusere ammoniakktap ekstra viktig. Organisk nitrogen i biorest er langsomt nedbrytbart, og lite tilgjengelig i løpet av vekstsesongen.

Fordeler: Høy andel plantetilgjengelig nitrogen, samtidig som bruk av biorest over tid vil tilføre jorda organisk materiale. Kan spres med samme utstyr som blautgjødsel. Høy andel ammonium gir muligheter for videre prosessering til mer høyverdig resirkulert nitrogenholdig mineralgjødsel.

Ulemper: Avhengig av substratmiksen er forholdet mellom næringsstoffer ofte ubalansert med for mye fosfor sammenlignet med nitrogen og plantenes behov, særlig ved mye ammoniakktap. Flytende biorest er lite egnet til lang transport, og det kan være betydelige kostnader knyttet til lagring. Fare for tilførsel av tungmetaller og organiske forurensninger.

5.1.3 Mekanisk separering

Mekanisk separering av flytende organiske råvarer som husdyrgjødsel og biorest i en flytende og en fast fraksjon er et viktig steg mot videre prosessering.

Hovedformålet med mekanisk separering er vanligvis å transportere fosfor med den faste fraksjonen til områder med fosforunderskudd. Fast fraksjon av blautgjødsel inneholder typisk mellom 25 og 30 % tørrstoff (Jensen, 2013), og kan brukes som den er, eller prosesseres videre gjennom prosesser som tørking, anrikning og pelletering (se kapittel 5.1.5).

Mens fosfor i teorien i stor grad skal følge den faste fraksjonen, vil nitrogen, særlig ammoniumnitrogenet, og kalium i hovedsak følge vannfasen. Det gir den flytende fraksjonen et forhold mellom næringsstoffene som er bedre tilpasset plantenes behov enn ubehandlet gjødsel, og gjør den godt egnet som gjødsel lokalt.

Samtidig er den flytende fraksjonen særlig godt egnet for videreforedling til mer høyverdig resirkulert nitrogenholdig mineralgjødning fordi den inneholder en høyere konsentrasjon av ammoniumnitrogen og et lavere innhold av organisk materiale enn ikke separerte flytende råvarer. Dette reduserer risikoen for tetting, skumdannelse eller forstyrrelser i kjemiske, biologiske eller termiske behandlingsprosesser, noe som gjør behandlingen mer effektiv og forutsigbar. I tillegg er det lettere å fjerne vann fra en homogen, lavviskøs væske med lite partikler. I kapittel 5.2 beskriver vi ulike teknologier som kan brukes for å fremstille nitrogenholdig mineralgjødning av den flytende fraksjonen etter separering.

Ulike separeringsteknologier varierer i hvor effektive de er til å fjerne tørrstoffet, fosfor og organisk nitrogen fra vannfasen. Forskjellene i separeringseffektivitet er størst for fosfor og tørrstoff, mens nitrogen, og særlig ammoniumnitrogen, i mindre grad lar seg skille ut ved mekanisk separering. Dermed vil variasjonen mellom teknologiene være mindre for ammoniumnitrogen enn for fosfor. Dessuten er separeringseffektiviteten, inkludert for biorest, påvirket av utgangsmaterialet (Carraro, 2024). Tabell 5-2 viser en oversikt over andel tørrstoff, nitrogen, ammonium og fosfor i utgangsmateriale som gjenfinnes i den faste fraksjonen for flytende husdyrgjødsel ved bruk av ulike mekaniske separeringsteknologier. Tallene i Tabell 5-2 gjelder for blautgjødning av svin og storfe uten forbehandling i et biogassanlegg.

Tabell 5-2. Separeringsindeks (= andel tørrstoff, nitrogen, ammonium og fosfor i utgangsmateriale som gjenfinnes i den faste fraksjonen som %) for flytende husdyrgjødsel og ulike mekaniske separeringsteknologier (Christensen m.fl., 2013)

	Sedimentering		Filtrering		Filtrering med trykk ^a		Sentrifugering	
	Svin	Storfe	Svin	Storfe	Svin	Storfe	Svin	Storfe
Tørrstoff	57	55	42	47	35	38	60	63
Nitrogen	NA	33	24	33	11	19	25	32
NH₄-N	NA	28	23	-	-	-	16	16
Fosfor	41	57	30	40	20	14	73	69

^a f.eks. skruetresse. NA: ikke tilgjengelig.

Tilsetning av flokkuleringsmiddel forbedrer separeringen av tørrstoff, totalnitrogen og -fosfor, ettersom fnokkdannelse øker mengden tørrstoff som beholdes i den faste fraksjonen (Christensen et al., 2013). Dermed øker også andelen organisk nitrogen i fast fase, mens ammonium forblir løst i den flytende fasen. Siden polymeren ikke binder ammonium-nitrogen, forbedrer tilsetning ikke separering av denne forbindelsen (Christensen et al., 2013).

Generelt gjelder at jo høyere separeringseffektivitet, desto høyere er også kostnadene (Schoumans et al., 2010). Filtrering med trykk gjennom skruetresser er i dag den vanligste metoden for mekanisk separering av husdyrgjødsel både pga. relativt lave investerings- og driftskostnader og fordi det gir en fast fraksjon med relativt høy tørrstoffprosent. Bare avanserte teknologier som sentrifugering er effektive også til å fraseparere noe organisk nitrogen i tillegg til fosfor. Flytende fraksjoner etter sentrifugering er derfor bedre egnet for videre prosessering enn etter filtrering med skruetresser (Guilayn et al., 2019). Ifølge Carraro et al. (2024) viste selv den mest effektive separeringsteknologien, som klarte å overføre 70 % av det organiske nitrogenet til den faste fraksjonen, at hele 60 % av totalnitrogenet fortsatt ble værende i den flytende fraksjonen. Andelen av totalnitrogen i den flytende fraksjonen ville økes videre gjennom biogassbehandling (Carraro et al., 2024).

En stor andel tungmetaller ser ved mekanisk separering ut til å havne i den flytende fraksjonen, heller enn den faste. I en studie med matavfallsbasert biorest viste Kupper et al. (2014) at den flytende fasen etter sentrifugering inneholdt betydelig mer Cd, Co, Pb, Zn, Cu og andre metaller enn den faste fraksjonen. Det ble forklart ved at metaller i stor grad binder seg til fine partikler (<250 µm), som i større grad følger væskefasen.

Membranfiltrering kan brukes som et supplement til vanlig separering, og er spesielt nyttig for å fjerne små partikler. Mikrofiltrering og ultrafiltrering fjerner partikler i størrelsesområdet fra 0,1 mikrometer ned til 5 nanometer (Christensen et al., 2013). Etter en innledende separering for eksempel med ultrafiltrering, kan for eksempel omvendt osmose brukes for å konsentrere ammonium (NH_4) og ammoniakk (NH_3), som samtidig gir vann med høy renhet (se kapittel 5.2.3).

Oppsummering

Produkt: Flytende fraksjon

N kvalitet: Ammonium vil hovedsakelig finnes i den flytende fraksjonen.

Fordeler: Forholdet mellom næringsstoffene er bedre tilpasset plantenes behov enn i ikke separerte råvarer, og gjør derfor den flytende fraksjonen godt egnet som gjødsel lokalt. Fortsatt tilførsel av noe organisk materiale som over tid kan gi jordforbedrende effekter og karbonlagring. Muligheter for videre prosessering til mer høyverdig resirkulert nitrogenholdig mineralgjødsel, særlig ved foregående biogassbehandling. Kan spres med samme utstyr som blautgjødsel.

Ulemper: Fare for ammoniakktap, og for tilførsel av tungmetaller og organiske forurensninger. Tungmetaller ser ut til å følge flytende fase i større grad enn fast fase. Lite egnet til lang transport, og kostnader knyttet til lagring.

Produkt: Fast fraksjon

N kvalitet: Hovedsakelig langsomt tilgjengelig organisk nitrogen

Fordeler: Muliggjør transport til områder med fosforunderskudd. Tilførsel av organisk materiale som over tid vil gi jordforbedrende effekter og karbonlagring.

Ulemper: Forholdet mellom næringsstoffer er ubalansert med for mye fosfor sammenlignet med nitrogen og plantenes behov. Krever ekstra spredeutstyr, og bør suppleres med andre lett tilgjengelige nitrogenkilder for å dekke plantenes behov for nitrogen. Bør derfor videreprosesseres gjennom tørking, anrikning og pelletering. Fare for tilførsel av tungmetaller og organiske forurensninger.

5.1.4 Kompostering

Kompostering er en relevant metode for behandling av organisk råvarer som matrester og hageavfall, men også den faste fraksjonen etter separering av f.eks. husdyrgjødsel.

Kompostering er en termofil mikrobiell nedbryting av organisk materiale under tilgang på oksygen, f.eks. i ranker eller hauger. Gjennom kompostering blir volumet redusert, og dermed synker transportkostnadene. Vellykket kompostering gir hygienisering av råvaren, og et stabilt jordforbedringsmiddel.

Kompost har generelt lav umiddelbar nitrogenvirkning sammenlignet med mineralgjødsel, ettersom nitrogenet i stor grad er bundet i stabile organiske forbindelser eller i mikrobiell biomasse (O'Connor et al., 2024). De stabile karbonkompleksene gir komposten en langvarig effekt i jord, forbedrer jordstrukturen, øker vannholdingskapasiteten og gir en langsom frigjøring av næringsstoffer. For at planter skal kunne nyttiggjøre seg nitrogenet i komposten, må frigjøringen skje i takt med plantenes behov. Bechmann et al. (2023) påpeker at risikoen for nitrattutvasking fra kompost i vekstsesongen er lav, da plantene effektivt tar opp det frigjorte nitrogenet. Imidlertid kan det oppstå risiko for utvasking utenom vekstsesongen, ettersom noe nitrogen frigjøres fra langsomt nedbrytbare forbindelser også utenom vekstsesongen. Derfor anbefales det å bruke kompost til vekster med lang nitrogenopptaksperiode, og eventuelt benytte fangvekster etter hovedkulturen for å redusere nitrogenlekkasje.

De samme tilsetningsstoffene som eventuelt brukes før direkte bruk av råvarer, kan også inngå i komposteringsprosessen, men med varierende effekt. En oversiktsartikkel om bruk av zeolitter i

kompostering konkluderer med at zeolitter kan redusere ammoniakktap, bidra til et mer variert mikrobielt samfunn og redusere plantetilgjengeligheten av tungmetaller (Soudejani et al., 2019). Samtidig viser andre studier at effekten kan være begrenset: Tilsetning av zeolitten klinoptilolitt (2 %) til den faste fraksjonen av husdyrgjødsel før kompostering ga ingen målbar bevaring av nitrogen (Viaene et al., 2017). Effekten av slike tilsetningsstoffer antas å være mest uttalt i råvarer med høyt væskeinnhold, der mobiliteten til næringsstoffer og gasser er større enn i kompost.

Oppsummering

Produkt: Kompost

N kvalitet: Langsamt tilgjengelig nitrogen bundet i stabile organiske forbindelser

Fordeler: Tilførsel av organisk materiale som over tid vil gi jordforbedrende effekter og karbonlagring

Ulemper: Forholdet mellom næringsstoffer er ubalansert med for mye fosfor sammenlignet med nitrogen og plantenes behov. Investeringsbehov avhenger av hvilket spredeutstyr som finnes på gården fra før. Bør suppleres med andre lett tilgjengelige nitrogenkilder. Fare for nitrogenfrigjøring utenom vekstsesongen, for tilførsel av tungmetaller og organiske forurensninger.

5.1.5 Tørking, anrikning og pelletering

Mange organiske gjødselråvarer har en ubalansert næringsstoffsammensetning sammenlignet med plantenes behov, spesielt med hensyn til forholdet mellom nitrogen, fosfor og kalium. Faste og tørkede produkter har ofte mistet en del av nitrogenet som ammonium under avvanning og som ammoniakk under tørkeprosessen, og inneholder derfor som regel lavere andeler plantetilgjengelig nitrogen enn flytende materialer. Nitrogenet i slike faste produkter foreligger hovedsakelig i organisk form, enten som raskt eller langsamt nedbrytbart organisk nitrogen, og tilgjengeligheten for planter er ofte begrenset tidlig i vekstsesongen.

I praktisk bruk kan ubalansert næringsstoffsammensetning og langsomtvirkende nitrogeneffekter gi utfordringer: Dosering i henhold til fosforbegrensninger i Gjødselbrukforskriften (2025) vil føre til underdosering på nitrogen. Dessuten er organiske gjødselprodukter gjerne mindre kompatible med konvensjonelle sprede- og såsystemer sammenlignet med mineralgjødsel. Dette bidrar til økt arbeidsinnsats og lavere presisjon.

Tørking og pelletering kan forbedre håndterbarhet og lagringsstabilitet. Slike prosesser muliggjør også blanding av ulike organiske råvarer for å oppnå en bedre næringsbalanse. Alternativt kan produktene anrikes med mineralske komponenter, f.eks. ammoniumsulfat, urea eller kaliumsalter, for å kompensere for næringsubalansen. Organisk-mineralske gjødselprodukter (hybridgjødsel) kombinerer fordelene ved begge kildene: Mineralnitrogenets umiddelbare tilgjengelighet og de organiske komponentenes bidrag til jordkvalitet og karbonlagring.

For å stabilisere og tørke massen kreves oppvarming under granulering og pelletering. Dette skjer vanligvis ved temperaturer over 40 °C ved granulering (Spiller et al., 2019) eller ved over 70 °C ved pelletering (personlig kommunikasjon med Yara, 21.2.2024). Samtidig innebærer oppvarmingen en risiko for ytterligere ammoniakktap, særlig dersom pH-en er høy.

Generelt er det behov for videre produktutvikling av organiske gjødselvarer, og mange organiske nitrogenkilder må sees på som mulige råvarer i produksjon av organisk gjødsel, heller enn fullverdige gjødselprodukter.

Oppsummering

Produkt: Pellets eller granuler basert på ulike organiske materialer. Organisk-mineralsk gjødsel eller hybridgjødsel er blandinger av organiske og mineralske komponenter i samme pellet/granul.

Eksempler på kommersielle løsninger:

Den norske bedriften *Grønn Gjødelse AS* (frittstående, heleid datterselskap av Yara Norge) produserer hybridgjødelse i pelletform ved å blande ulike organiske råvarer som hønsegjødelse og vinasse. Produktet kan brukes i kombisåmaskiner og har en bedre næringsbalanse enn ubehandlede organiske fraksjoner.

Den svenske bedriften *Sanitation360* har utviklet en lavteknologisk løsning som stabiliserer og tørker urin direkte under toalettet. Systemet øker pH, bevarer >80 % av nitrogenet og 100 % av fosfor og kalium, og fjerner 95 % av massen gjennom lufttørring. Den tørkede urinen kan brukes direkte eller foredles videre til hybridgjødelse.

Den tyske bedriften *NADU Naturdünger* produserer ulike gjødselpellets basert på mekanisk separert biorest.

N kvalitet: Varierer mellom råvarene som er brukt. Hovedsakelig organisk nitrogen. Virkningen er usikker, og påvirkes av type nitrogenforbindelse (dvs. raskt eller langsomt nedbrytbart organisk nitrogen) og ytre faktorer som temperatur og fuktighet. Hybridgjødelse inneholder mineralnitrogen som sikrer nitrogenervirkning tidlig i sesongen.

Fordeler: Blandinger kan gi mer balansert næringsstoffsammensetning enn rene råvarer. Enklere håndtering i eksisterende redskap evt. til og med i kombisåmaskin. Tilførsel av organisk materiale som over tid vil gi jordforbedrende effekter og karbonlagring.

Ulemper: Risiko for ammoniakktap ved tørring, variabel nitrogenervirkning, fare for tilførsel av tungmetaller og organiske forurensninger.

5.2 Mineralgjødelse fremstilt av organiske råvarer

Mineralgjødelse fremstilt av organiske råvarer inneholder i motsetning til organiske gjødselprodukter ikke organisk karbon. Nitrogen foreligger som lettloslige salter, og gjødelsverdien er derfor i utgangspunktet lik den til konvensjonell mineralgjødelse. Det finnes ulike teknologier for å produsere resirkulert mineralgjødelse, som varierer både i prosess, energibehov og utviklingsstadium. Flere av disse teknologiene kan også kombineres med hverandre, men alle vil også gi en fosforrik organisk restfraksjon som krever avhending. Siden produksjon av resirkulert mineralgjødelse foreløpig er lite utbredt i Norge, bygger kapittel 5.2 i hovedsak på internasjonale studier.

Lønnsomheten til de mest utviklete teknologiene med høy prosesseringsgrad er ofte forbundet med behandling av store volumer, som vanligvis finnes i industriell skala. Teknologiene krever gjerne betydelige investeringer i utstyr, energi og logistikk.

For å fremstille mineralgjødelse med fordeler som rask tilgjengelighet for planter, presis dosering og effektivitet, kombineres ofte flere av teknologiene som er beskrevet nedenfor. Selv om disse teknologiene kan føre til et mellomprodukt (for eksempel struvitt, oppkonsentrert løsning, anrikt adsorbent eller biomasse) som noen ganger kan anvendes direkte, er hovedformålet at dette mellomproduktet skal inngå i produksjonen av mineralbasert nitrogengjødelse.

5.2.1 Felling (struvitt)

Struvittfelling (ammoniummagnesiumfosfat, $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$) er en velutviklet teknologi for nitrogen- og fosforgjenvinning som brukes særlig i land der bruk av avløpsslam i jordbruket ikke er tillatt. Eksempler på kommersielle fullskala systemer for felling av struvitt fra avløpsvann er blant andre *Ostara*, *NuReSys*, *PhosphoGREEN*. Sammenlignet med teknologier som gir flytende uorganiske konsentrater (kapittel 5.2.2 og 5.2.3), er struvitt den eneste teknologien som i utgangspunktet gir et fast salt, og avhengig av råvaren kan produktet inneholde mindre tungmetaller enn konvensjonelle

gjødselvarer som finnes på markedet (Beckinghausen et al., 2020; Robles et al., 2020; Velthof et al., 2024).

Proessen gjennomføres vanligvis på den flytende fraksjonen etter mekanisk separering for å fjerne organisk materiale, men kan også brukes som videreprosessering f.eks. etter bruk av membranteknologi (kapittel 5.2.3). Optimale prosessbetingelser er ved pH rundt 9,5, og et molforhold mellom magnesium og fosfat på minst 1:1 (Lorick et al., 2020). Struvittfelling krever derfor vanligvis tilsetning av løselige magnesium- og fosfationer, f.eks. magnesiumoksid eller magnesiumhydrogenfosfat. Struvitt kan produseres tilsiktet for næringsgjenvinning, men er i biogassreaktorer også en kjent utfordring som fører til avleiringer i reaktorer og røranlegg.

Effektiviteten for gjenvinning av nitrogen fra råvaren varierer fra 10–40 % (Vaneekhaute et al., 2017), men kan overstige > 90 % dersom magnesium-, ammonium- og fosfatinholdet balanseres optimalt (Beckinghausen et al., 2020). Kombinert bruk av zeolitt og struvittfelling har i forsøk gitt fullstendig fosforgjenvinning og mellom 64 og 80 % nitrogengjenvinning (Ganrot, 2012).

For praktisk bruk som gjødsel er det molare N:P-forhold på 1:1 i struvitt en begrensning. Molforholdet tilsvarer vektmessig omtrent halvparten så mye nitrogen som fosfor, og struvitt dekker derfor ikke alene plantenes nitrogenbehov. Utfordringen kan løses ved å blande struvitt med andre gjødselkomponenter, eller ved å bruke struvitt som startgjødsel tidlig i sesongen og å supplere med annen nitrogenholdig gjødsel seinere i sesongen. Bruken av struvitt som eneste nitrogenkilde i gjødslingspraksis kan dessuten være utfordrende, fordi det er lite vannløselig noe som begrenser den umiddelbare tilgjengeligheten for planteopptak. Selv om enkelte studier viser at struvitt kan gi avlinger på nivå med kommersielle gjødslertyper og samtidig redusere lystgassutslipp og øke jordas mikrobielle mangfold (Bonvin et al., 2015; Wang et al., 2023), finnes det også studier som indikerer begrenset tilgjengelighet av nitrogen fra struvitt (Hertzberger et al., 2020).

Siden struvittfelling innebærer høy kjemikaliebruk (f.eks. magnesiumsalter, og NaOH for pH økning), er det tilsvarende høye driftskostnader. Det er også en risiko for utilsiktet felling i rør, samt utfordringer med separering av krystallene, da struvitt har en tetthet på 1,6, noe som er høyere enn vanlige organiske suspenderte stoffer (Zarebska et al., 2015). Det kan derfor være nødvendig å benytte sentrifugering for separeringen av struvittkrystallene, noe som ytterligere øker driftskostnadene.

Struvittfelling kan også inngå som et mellomtrinn for å gjenvinne nitrogen, hvis saltet deretter løses i svovelsyre for å danne ammoniumsulfat, eller hvis det varmes opp for å frigjøre ammoniakk, som deretter absorberes i vann eller syre (Rulkens et al., 1998).

5.2.2 Stripping og skrubbing

Det finnes mange ulike teknologier for å oppkonsentrere ammonium (NH_4) fra flytende organiske råmaterialer, f.eks. bruk av membranteknologi (kapittel 5.2.3) og dyrking av mikroalger (kapittel 5.2.6) etc. Slike teknologier kan anvendes på en rekke organiske råvarer, som flytende fraksjoner fra separert husdyrgjødsel, biorest, fiskeslam og avløpsvann fra industri og kommunale kilder, samt andre substrater med tilstrekkelig høyt nitrogeninnhold. Oppkonsentrerte ammonium- eller mikroalgevæsker er likevel i liten grad relevant for direkte bruk som gjødsel. For å produsere et nitrogenbasert gjødselfprodukt som kan markedsføres, er det mulig å strippe og skrubbe væsken, eller eventuelt kun skrubbe. Prosessene gir et uorganisk mineralkonsentrat der ammonium er bundet i syre. Flytende oppløste nitrogensalter gir imidlertid høye kostnader knyttet til transport og logistikk. Ammoniumsalter i løsning kan videre konsentreres ved fordamping eller krystalliseres til faste salter, men begge prosesser er energikrevende og må vurderes opp mot gevinsten.

Stripping fra flytende råvarer

Stripping av ammoniakk (NH_3) er en prosess der ammoniumrike, flytende organiske råvarer bringes i kontakt med luft, noe som fører til at NH_3 fordampes og transporteres bort med gassen. I stedet for

luft kan man også benytte dampstripping, hvor vanddamp brukes som bærer for ammoniakken. Prosessen foregår i reaktor-/tårnsystemer (strippingkolonner) der væske føres inn og får kontakt med luft eller damp som strømmer motstrøms gjennom en kolonne. Denne er pakket med et materiale som sikrer god kontakt mellom gass og væske. Alternativt kan ammoniakkstripping utføres ved bruk av gasspermeable membraner. Det er tynne vannavstøtende materialer som kun slipper gjennom gasser og ikke væsker (mer om bruk av membranteknologi i kapittel 5.2.3).

Effektiviteten til NH_3 -stripping styres av to hovedparametere: temperatur og pH. Ved å forskyve den termodynamiske likevekten i væsken fra ammonium (NH_4^+) til ammoniakk (NH_3), kan mer ammoniakk overføres til gassfasen. Høy strippingeffektivitet (omdanning av opp til 98 % ammonium til ammoniakk) oppnås ved å øke temperaturen (60-80 °C) og/eller pH-verdien (8-12) (Robles et al., 2020).

For å redusere både kostnader og lukt anbefales stripping ved lav temperatur og høy pH (Zarebska et al., 2015). Ifølge Pandey and Chen (2021) kan metoder som direkte lufting, termisk stripping og vakuumpstripping oppnå tilsvarende effektivitet som bruk av gassgjennomtrengelige membraner. Pilotforsøk med langsom luftstripping har vist at det er mulig å fjerne mellom 80 og 90 % av nitrogen fra biorest bare ved å justere oppholdstid i tillegg til pH og temperatur. Effektiv ammoniakkfjerning kan oppnås allerede ved pH 8 og 40 °C, forhold som ofte uansett forekommer i vanlige biogassanlegg (Provolo et al., 2017). Det er viktig å være oppmerksom på at for høy pH kan føre til utfordringer med utfelling f.eks. av struvitt (se kapittel 5.2.1)

Robles et al. (2020) påpeker at stripping med påfølgende skrubbing er økonomisk og teknisk egnet for råvarer med NH_4^+ -konsentrasjoner over 2000 mg/L. Rulkens et al. (1998) fremhever også at teknologien er spesielt godt egnet for råvarer med høyt nitrogeninnhold. Likevel er det rapportert vellykket fjerning ved konsentrasjoner så lave som 1620 mg NH_4^+ /L (Ukwuani & Tao, 2016).

Skrubbing

Etter stripping kan NH_3 -gass gjenvinnes gjennom våtskrubbing ved hjelp av en syrereaktor hvor likevekten fra ammoniakk til ammonium forskyves igjen, ved hjelp av syre. Ammonium i syreløsning f.eks. ammoniumsulfat (ved bruk av svovelsyre) eller ammoniumnitrat (ved bruk av salpetersyre) kan selges som gjødsel som den er, eller foredles videre.

Mineralsyrer som HCl, H_2SO_4 , H_3PO_4 eller HNO_3 kan brukes til skrubbing (Rulkens et al., 1998) men i praksis vurderes H_2SO_4 som det mest hensiktsmessige alternativet. Ammoniumsulfat er en stabil forbindelse, i motsetning til f.eks. ammoniumnitrat, som er reaktiv og potensielt eksplosiv. Sammenlignet med andre ammoniumsalter inneholder ammoniumsulfat ikke fosfor, slik som ammoniumfosfat, og er heller ikke lettøselig som ammoniumklorid, noe som reduserer risikoen for nitrogentap. Sitronsyre kan også brukes til NH_3 -skrubbing, spesielt i små, kommunale anlegg hvor det kan gi et organisk sluttprodukt (ammoniumsitrat) med lavere miljøpåvirkning sammenlignet ved bruk av svovelsyre (Robles et al., 2020).

Vanligvis er sluttproduktet etter skrubbing ammonium i flytende syreløsning, men det er også mulig å produsere faste sluttprodukter. Faste sluttprodukter lages ved å krystallisere ammoniumsulfat fra overmettet løsning (Ukwuani & Tao, 2016). Som et alternativ, og under spesielle forhold, kan ammonium fra syreløsningen reagere med CO_2 og danne enten ammoniumbikarbonat (NH_4HCO_3) eller urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) (ESPP Scope 147, 2023). Et pilotforsøk har demonstrert at det er mulig å oppnå stabil produksjon av et fast produkt ved hjelp av eco:N teknologien som går ut på å høste ammoniumsulfatkrystaller med 21 % totalnitrogen fra en overmettet løsning (Andersson, 2021). Løsninger som inneholder ammoniumsalter kan også utsettes for biologisk nitrifikasjon hvor ammonium omdannes til nitrat før felling som KNO_3 etter tilsetning av kaliumsalt (PureGreen).

Effektiviteten til stripping- og skrubbingteknologien varierer med råvaretype og teknisk utforming, og vurderes ofte ut fra to perspektiver: Hvor stor andel NH_4^+ som fjernes fra råvaren (N-fjerning), og hvor

mye NH_4^+ som gjenvinnes i sluttproduktet (N-gjenvinning) (Beckinghausen et al., 2020). Generelt vurderes stripping kombinert med skrubbing som en kostnadseffektiv teknologi for nitrogen-gjenvinning fra flytende faser, særlig når varmetilførselen kan optimaliseres og varmegjenvinning er mulig. Sammenlignet med andre metoder for produksjon av mineralgjødelse fremstilt av organiske råvarer, fremstår denne løsningen som teknisk robust og fleksibel. Totalt nitrogeninnhold i sluttproduktet etter skrubbing kommer an på syren som er brukt i prosessen og kan variere mellom 30 og 86 g N/kg for ammoniumsulfat og mellom 132 og 198 g N/kg for ammoniumnitrat (Sigurnjak et al., 2019).

Eksempel på praktisk bruk: Vestfjorden Avløpsselskap (VEAS) kombinerer biologisk avløpsrensing med stripping og påfølgende skrubbing, og henter ut rundt 15 % av nitrogenet i avløpsvannet som ammoniumsulfat gjennom kjemisk sorpsjon med svovelsyre. Produktet selges til landbruket via Acinor (Norsk Senter for Sirkulær Økonomi, 2025). Prosessen reduserer klimagassutslipp sammenlignet med tradisjonell biologisk rensing, og særlig hvis ammoniumsulfat erstatter konvensjonell mineralgjødelse (Svanes et al., 2014). Forsøk med VEAS-produktet har vist gode resultater på plantevekst (FlexAgri). En utfordring sammenlignet med konvensjonell mineralgjødelse er imidlertid håndtering og distribusjon av store volum.

Luftrensing med skrubbing

Mange virksomheter inkludert biogass- og komposteringsanlegg, avløpsrenseanlegg og avfallsforbrenning, er pålagt å rense prosessluften før den slippes ut i atmosfæren. Det finnes to hovedstrategier: Enten optimalisere prosessen slik at ammoniakkdannelsen (NH_3) reduseres, eller, motsatt, å stimulere prosessen til økt ammoniakktap fra råvaren slik at gassen fanges opp og fjernes gjennom skrubbing.

Langtidsmålinger fra fem gårdsanlegg viste at syrereaktorer, hvor skrubbingløsning sprayeres som mikroskopiske dråper og resirkuleres kontinuerlig, kan oppnå en gjennomsnittlig fjerningseffektivitet for NH_3 på 96 %, med variasjoner på mellom 40 og 100 % (Melse & Ogink, 2005). Skrubbingløsning består vanligvis av ammoniumsulfat. For optimal effektivitet må løsningen ha samme temperatur som luften som renses (Rulkens et al., 1998).

De mest utbredte teknologiene innen luftrensing er modulbaserte luftskrubbere, som fjerner ammoniakk samt andre uønskede gasser, partikler og støv fra prosessluften. Den forurensede lufta føres inn i våtskrubbersystemet og passerer gjennom et kammer hvor forurensninger reagerer kjemisk med skrubbemediet eller absorberes i væsken (AEC Systems; EXEON).

En utfordring med luftrensing med skrubbing fra et nitrogengjenvinningsperspektiv, er at konsentrasjonen av ammoniumsalter i den oppsamlede løsningen ofte er lav. I tillegg kan det være krevende å selektivt fjerne ammoniakk fra andre forurensende gasser i prosessluften.

5.2.3 Bruk av membran teknologi

Bruk av membran teknologi, som membranfiltrering og omvendt osmose, er relativt godt utviklete og utbredte metoder. Teknologien gir ammoniumrike konsentrater som kan være relevante å kombinere med andre teknologier for videre oppkonsentrering, inkludert stripping og skrubbing (se kapittel 5.2.2).

Membranfiltrering

Gasspermeable membraner er membraner som tillater selektiv diffusjon av gasser. Før prosessen må partikler i den organiske råvaren fjernes ved filtrering, f.eks. ved mekanisk separering av husdyrgjødsel eller biorest (kapittel 5.1.3). Deretter tilsettes kalk eller natriumhydroksid for å heve pH og fremme omdanning av ammonium til ammoniakk i gassform. Den flytende fasen kan så filtreres gjennom hydrofobe, mikroporøse hulfibermembraner med gassfylte porer. Det gjør det mulig å

overføre ammoniakk fra den flytende fasen til en sur mottaksløsning, mens andre komponenter i gjødselblandingen holdes tilbake. I den sure mottaksløsningen bindes ammoniakken som ammoniumsalt (se avsnittet om skrubbing i kapittel 5.2.1) (Rulkens et al., 1998).

Den største utfordringen ved membranbasert ammoniakkgjenvinning er faren for membranforurensing, i tillegg til at membraner kan inneholde evighetskjemikalien PFAS (ESPP Scope 147, 2023). Likevel gir gasspermeabel membranteknologi kombinert med lufting høy ammoniakkfjerning og -gjenvinningsgrad, samtidig som kapital- og driftskostnader er lavere enn for tradisjonell luftstripping med pakket kolonne, direkte lufting, eller termisk/vakuumstripping (Pandey & Chen, 2021). Kostnadene påvirkes av flere faktorer, men kan reduseres betydelig. For eksempel oppnådde Dube et al. (2016) en gjenvinningseffektivitet på mellom 96 og 98 % på bare fem dager, mot tidligere 25 dager, ved å integrere lufting i prosessen.

Omvendt osmose

Omvendt osmose er en trykkdrevet membranfiltreringsteknologi som brukes til å separere oppløste næringsstoffer, særlig ammonium og kalium, fra flytende organiske råvarer som husdyrgjødsel eller biorest.

Prosesen fungerer omvendt sammenlignet med membranfiltrering: Vannet presses gjennom en semipermeabel membran, som holder tilbake oppløste stoffer som ammonium (NH_4^+), kalium (K^+) og andre ioner. For å redusere membranforurensing er forbehandling med mikrofiltrering eller ultrafiltrering nødvendig. En effektiv forbehandling skal gi minimal forurensing med organiske partikler i sluttproduktet.

I et system der sentrifugering og mikrofiltrering var koblet til en omvendt osmose enhet (GENIUS system), ble henholdsvis 34 % av totalt nitrogen og 48 % av NH_4 -nitrogenet fra den opprinnelige konsentrasjonen i bioresten overført til konsentratet (Van Puffelen et al., 2022). Ifølge oversiktsartikkelen til Pandey and Chen (2021) kan omvendt osmose ha en ammoniakkfjerningsgrad på mellom 90 og 97 %. Konsentratet inneholder nitrogen utelukkende i mineralform, og kan derfor klassifiseres som et alternativ til syntetisk, nitrogenbasert gjødsel i henhold til RENURE-kriteriene (se mer om RENURE under kapittel 3.5) (Van Puffelen et al., 2022). Alternativt kan konsentratet etter omvendt osmose viderebehandles f.eks. gjennom stripping og skrubbing (se kapittel 5.2.2). Sammenlignende forsøk med omvendt osmose av biorest og ubehandlet husdyrgjødsel viste at biorestbehandling ga høyere innhold av ammoniumnitrogen i konsentratet og lavere i permeatet (Zarebska et al., 2015).

5.2.4 Adsorbering

Det finnes en rekke materialer som selektivt kan adsorbere ammonium (NH_4^+) fra flytende råvarer, inkludert både kjemisk eller termisk modifiserte og umodifiserte zeolitter, leire og harpikser. Når adsorbenten er mettet med ammonium, kan den enten brukes direkte som gjødsel (kapittel 5.1.1), eller prosesseres videre til nitrogensalter i løsning.

Adsorpsjon skjer vanligvis i pakket kolonne. Når mediet er mettet, tas kolonnen ut av drift for regenerering. Det gjør det mulig å gjenvinne NH_4^+ og/eller fosfat som en konsentrert løsning, samtidig som adsorbenten kan gjenbrukes. Regenerering kan utføres ved vask med salpetersyre (HNO_3), natriumklorid (NaCl), eller via biologiske prosesser.

Zeolitt-molekylsiler har vist særlig gode resultater for rensing av avløpsvann. Under optimaliserte betingelser er det rapportert over 40 % fjerning av ammoniakk-nitrogen fra avløpsvann med varierende sammensetning (Jiang et al., 2024). Flere studier har kombinert nitrogenadsorpsjon med ulike regenereringsstrategier.

- Regenerering med natriumnitratløsning kan gi en ammoniumnitratløsning med mellom 0,02 og 0,04 % total nitrogen (Qin et al., 2023). Ammonium kan deretter nitrifiseres biologisk, konsentreres via elektrodialyse til mellom 0,1 og 0,2 % nitrogen, og deretter inndampes til natriumnitratkrystaller.
- Regenerering med natriumhydroksid (NaOH) produserer en alkalisk, ammoniakk-rik strøm som reagerer med fosforsyre (H_3PO_4) ammoniumdihydrogenfosfat ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) med ca. 0,35 % nitrogen (Sheikh et al., 2023).

Adsorbering er en metode som kan være godt egnet til småskala bruk og har lavere energibehov enn f.eks. membranstripping. Selektiv utvinning av ammonium med skreddersydde adsorbenter kan dessuten kombineres med fosforutvinning. Ulemper inkluderer faren for forurensning av systemet ved bruk av bioest og husdyrgjødsel. God forbehandling kan redusere denne risikoen. Høye konsentrasjoner av andre ioner i væsken (f.eks. K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) kan redusere effektiviteten. Regenerering krever dessuten høy kjemikaliebruk, og effektive systemer er fortsatt under utvikling.

Ioniske væsker (IL-er)

Ifølge ESPP Scope 147 (2023) kan også polare organiske løsemidler, inkludert ioniske væsker («ionic liquids», IL), effektivt binde ammoniakk fra gassfaser. IL-er består ofte av nitrogenholdige organiske strukturer (f.eks. pyrimidin- eller imidazoliumringer) kombinert med funksjonaliserte kationer og anioner, inkludert metallioner. De har lavt damptrykk, høy termisk stabilitet og kan danne omfattende hydrogenbindingsnettverk. Ammoniakkopptaket varierer fra opptil 3 % (40 mg NH_3 /g IL) (Tian and Liu (2022) til over 20 % i enkelte studier (Zhang et al. (2021). Desorpsjon skjer vanligvis ved oppvarming til mellom 80 og 200 °C, men er mindre effektivt for IL-er som binder ammoniakk kjemisk via metallioner. Ytelsen påvirkes av adsorpsjonskapasitet, selektivitet, temperatur og vannfølsomhet, ettersom vann kan konkurrere med NH_3 om bindingsplasser. Utfordringer inkluderer kostnader, miljøpåvirkning og toksisitet, men enklere IL-analoger som fenol- eller azol-glyserolbaserte løsemidler kan være mer bærekraftige alternativer. Ammoniakk fanges vanligvis i svovelsyreløsning, men salpetersyre (HNO_3) kan også brukes.

Et nyere alternativ er innkapslede ioniske væsker (ENIL-er) der IL-er plasseres i en kolonne med hule, porøse karbon-silikon-mikropartikler. ENIL-er regenereres ved oppvarming til 130 °C eller 200 °C under nitrogenstrøm, noe som frigjør en gassblanding av nitrogen (N_2) og ammoniakk (NH_3). Prosessen for å gjenvinne ammoniakk fra gassstrømmen er fortsatt under utvikling.

Eksempler av pilotprosjekter over teknologier for gjenvinning av næringsstoffer finnes i ESPP Scope 145 (2023).

5.2.5 (Bio-)Elektrodialyse

Elektrodialyse (ED) er en prosess der ioner separeres ved hjelp av elektrisk strøm og semipermeable membraner. Metoden har tradisjonelt blitt brukt til å fjerne ioner fra vann, f.eks. ved avsalting, men har de siste årene fått økt oppmerksomhet for gjenvinning av næringsstoffer fra avløpsvann. Produktet etter prosessen er en konsentrert næringsløsning, og, avhengig av teknologien, H_2 og/eller H_2O_2 .

Prinsippet er at en elektrisk strøm skaper et potensial som driver noen ioner gjennom membranene, mens andre holdes tilbake. Elektrodialyse kan betraktes som en membranfiltreringsteknologi som benytter bipolare membraner eller ionebyttematerialer. Ulemper er risiko for membranforurensning (fouling), bruk av membraner som kan inneholde PFAS, samt at teknologien fortsatt er under utvikling.

I litteraturen er det også beskrevet noen varianter til elektrodialyse:

- Membranfri elektrokjemisk metode: *Electrochemical NO_3^- conversion synchronized with NH_3 recovery* (ECSN) kombinerer nitratreduksjon med ammoniakktutvinning fra nitratrik

avløpsvann. Teknisk-økonomiske vurderinger og livssyklusanalyser viste at metoden var svært effektiv for å gjenvinne ammoniakk fra NO_3^- -rike strømmer (Zhang et al., 2024).

- Hybrid elektrodialyse + elektrokjemisk ammoniakkstripping (EAS): I en studie ble ammoniakk konsentrert til $> 3 \text{ g/L}$ gjennom tre ED-sykluser (8 timer), før elektrokjemisk ammoniakkstripping gjenvant $> 90 \%$ av ammoniakken med et energiforbruk på $11,6 \text{ kWh/kg NH}_3$ i løpet av 5 timer (Aung et al., 2024).
- Ioneselektiv elektrode: En ioneselektiv kalium–nikkel–heksacyanoferrat-elektrode fungerte som mediator for spontan oksidasjon av organisk materiale og opptak av ammonium (NH_4^+) og kalium (K^+) fra husdyrgjødsel. Selektiviteten var nær 100% med indikasjoner på betydelig økonomiske og miljømessige fordeler (Wang et al., 2024).

Bio-elektrodialyse

Ved bio-elektrodialyse er prinsippet i hovedsak det samme som ved vanlig elektrodialyse, men den elektriske spenningen skapes helt eller delvis av mikrobiell aktivitet i et bioelektrokjemisk system, for eksempel en mikrobiell elektrokjemisk celle.

Bioelektrokjemiske systemer (BES) kan gjenvinne ammonium ved lavt spesifikt energiforbruk, samtidig som det produseres hydrogengass. Elektroner frigjort ved oksidasjon av organiske forbindelser brukes til å produsere energi, mens ammoniumioner (NH_4^+) beveger seg fra anode til katode for å opprettholde elektrisk nøytralitet. I katodekammeret omdannes NH_4^+ til ammoniakk (NH_3) på grunn av høy pH, og ammoniakken kan deretter gjenvinnes via fordamping og absorpsjon i en syreløsning.

Zhang and Angelidaki (2015) viste at bipolar bioelektrodialyse er en lovende metode for å gjenvinne ammoniakk og sulfat, samtidig som hydrogen produseres. Svovelsyren som dannes kan brukes til å fange ammoniakk, og gjenvinning av sulfat eliminerer behovet for ytterligere fjerning av hydrogensulfid fra biogass.

BES-teknologi kan kombineres med membranbaserte teknologier for å gjenvinne næringsstoffer fra flytende råvarer og oppnå opptil 90% gjenvinningseffektivitet (Robles et al., 2020).

Ulike simulerte scenarier viste at integrering av en (bio)elektrodialyse-enhet i et standard avløpsrensingsanlegg reduserer konsentrasjonen av både total suspendert stoff, totalnitrogen og kjemisk oksygenforbruk i utløpsvannet (Koskue et al., 2022). Selv om økt energibruk fra BES-enheten ga høyere driftskostnader, var den antatte inntekten fra det gjenvunnet næringsstoffproduktet tilstrekkelig til å gjøre BES-teknologien økonomisk attraktiv ved realistisk lave strømtettheter (1 og 5 A/m^2). Koskue et al. (2022) konkluderte med at redusert strømforbruk er avgjørende for økonomisk bærekraft, og at stigende gjødselpriser kan fremskynde storskala implementering.

En utfordring ved bio-elektrolyse er ustabilitet til den biogenererte strømmen og dermed også varierende fjerningsrater og effektivitet for totalnitrogen (Georg et al., 2023).

5.2.6 Biomassedyrking

Det er forsket på bruk av mikroalger, fotosyntetiske bakterier, konsortier av disse samt dyrking av andemat (*Lemna minor* L.) for gjenvinning av næringsstoffer fra organiske kilder. I påvente av at produkter fremstilt fra biomasse dyrket på gråvann blir godkjent for annen bruk, fremstår anvendelse som gjødsel som det mest naturlige alternativet. Biomassen kan brukes som substrat i biogassanlegg eller avvannes mekanisk før kompostering eller foredling til pelletert gjødsel. Utfordringer knyttet til bruk som gjødsel inkluderer behovet for avvanning og tørking, noe som kan være både energikrevende og kostbart.

Mikroalger kan effektivt ta opp fosfor og nitrogen fra kildeseparert svartvann, og danne grønn biomasse som kan brukes som langsomt frigjørende biogjødsel. I et forsøk fjernet *Chlorella sorokiniana* over 99 % av ammonium og fosfat når den ble dyrket i 10 % behandlet svartvann, men magnesium og sporstoffer var vekstbegrensende og måtte tilføres for optimal biomasseproduksjon (Moges et al., 2020). I avløpsvann fra resirkulerende akvakultursystemer (RAS) for laks oppnådde mikroalger nesten fullstendig fjerning av nitritt, nitrat og fosfat, og omtrent 90 % reduksjon av ammonium (Borg-Stoveland et al., 2024).

Fotosyntetiske bakterier er de organismer som er mest brukt i avløpsvannbehandling på grunn av sin allsidige metabolisme. De kan assimilere store mengder karbon, nitrogen og fosfor og akkumulere disse i biomassen for videre resirkulering i prosessen. Prosessen påvirkes av lys- og oksygenforhold, pH, sporstofftilgang og C/N-forhold (Robles et al., 2020).

Andemat (*Lemna minor* L.) har vært brukt i Sørøst-Asia og Sør- og Nord-Amerika til næringsstoffgjenvinning fra husdyrgjødsel, og er vist å kunne tilpasses moderat klima i Nederland (Rulkens et al., 1998). Biomassen kan brukes både som organisk gjødsel og som dyrefôr, avhengig av dyrkingssubstrat.

Høsting av biomasse er mest kostnadseffektivt når enkle forbehandlinger som autoflokkulering, bioflokkulering eller koagulering kombineres med fast-væske-separasjon, for eksempel gravitasjonssedimentering eller flotasjon (de Morais et al., 2023). Biomasseproduksjonen påvirkes av flere faktorer, inkludert avhengighet av sollys, risiko for innblanding av uønskede stoffer, utfordringer ved høsting, redusert lysinntrengning, behov for fortynning, stort arealbehov og toksisitetsfare hvis nitrogennivået overstiger 60 mg L⁻¹ (Vaneckhaute et al., 2017).

6 Vurdering av ulike teknologier

Kapittel 5 i denne rapporten gir en oversikt over eksisterende og nye teknologier og behandlingsmetoder for gjenvinning av nitrogen i organiske råvarer som gjødselprodukter. I dette kapitlet skal vi vurdere potensialet til teknologiene for å øke kvalitet og mengde av resirkulert gjødsel og potensialet for å bli implementert under norske forhold. Som utgangspunkt for vurderingen viser Tabell 6-1 en sammenligning av teknologiene som er beskrevet i kapittel 5 med tanke på nitrogenkvalitet og risiko for ammoniakktap, næringsstoffbalanse, og andre praktiske og agronomiske aspekter, samt kostnader, FoU behov og potensiell miljøpåvirkning.

6.1 Praktiske og agronomiske aspekter

Nitrogeninnhold og plantetilgjengelighet

Produkter med lav prosesseringsgrad (kapittel 5.1) skiller seg grunnleggende fra produkter med høy prosesseringsgrad (kapittel 5.2). Fordelene ved høy prosessering er ofte de samme som ulempene ved lav prosessering, og motsatt.

Produkter med lav prosesseringsgrad inneholder nitrogen både i organisk og uorganisk form i varierende forhold. Plantetilgjengeligheten er derfor ofte usikker og avhenger i stor grad av andelen ammonium i forhold til totalnitrogen, samt hvor raskt det organiske nitrogenet brytes ned i jord (se kapittel 2.3). Organiske produkter tilfører jorda også organisk karbon, som kan bidra til jordforbedring og karbonlagring over tid. Biogassbehandling øker andelen ammonium av totalnitrogen med etterfølgende risiko for ammoniakktap. Plasmaaktivering kan anrike flytende organiske produkter med ekstra totalnitrogen i form av ammonium.

I de fleste produkter med høy prosesseringsgrad foreligger nitrogen derimot utelukkende som uorganisk nitrogen, som er direkte plantetilgjengelig. Slike produkter mangler organisk materiale, og har derfor ingen jordforbedrende effekt, selv om de er basert på organiske råvarer og klassifiseres som resirkulert gjødsel.

Spørreundersøkelsen blant kornbønder som ble gjennomført i delprosjekt 2 bekrefter at forutsigbar og kjent nitrogeneffekt er et av de viktigste kriteriene som bestemmer bønders gjødselvalg, da plantetilgjengelig nitrogen er styrende for både avling og kvalitet (Borg m.fl., 2025, delrapport 2). Nytt gjødselregelverket begrenser hvor mye fosfor som er tillatt tilført et areal, noe som i praksis også vil begrense hvor mye nitrogen som kan tilføres med organisk gjødsel. Dette øker kravene til at både nitrogen og fosfor i organiske og mineral-organiske produkter faktisk er plantetilgjengelig, siden det ikke lenger er mulig å kompensere lav gjødseleffekt ved å øke gjødselmengden.

At organiske gjødselprodukter har potensial til å øke organisk innhold i jorda ble også nevnt som en av viktigste motivasjonsfaktorene for å ta i bruk resirkulert gjødsel i spørreundersøkelsen blant kornbønder som ble gjennomført i delprosjekt 2 (Borg m.fl., 2025, delrapport 2). Likevel vil bøndene prioritere å sikre avling og kvalitet. Tilførsel av organisk materiale slår derfor først ut som argument for et organisk gjødselprodukt, hvis nitrogenkvaliteten er sikret (Borg m.fl., 2025, delrapport 2). Samtidig innebærer organisk materiale i organiske gjødselprodukter en risiko for innføring av uønskede stoffer (f.eks. tungmetaller, organiske miljøgifter, mikroplast etc.) i jorda, noe som ble nevnt som en viktig barriere for bruk av organisk gjødsel i spørreundersøkelsen gjennomført i delprosjekt 2 (Borg m.fl., 2025, delrapport 2).

Tabell 6-1. Sammenligning av tilgjengelige teknologier er rangert fra lavest til høyest: 0, +, ++, +++, og utarbeidet med utgangspunkt i eksisterende oversiktsliteratur (Beckingham et al., 2020; Lessmann et al., 2023; Pandey & Chen, 2021; Robles et al., 2020; Rulkens et al., 1998; Vaneeckhaute et al., 2017; Velthof et al., 2024; Vingerhoets et al., 2025; Zarebska et al., 2015).

Teknologi	Produkt	Nitrogen form	Plante-tilgjengelighet	Næringsstoff-balanse (NPK)	Risiko for tap av NH ₃	Andre praktiske og agronomiske aspekter	Kostnader	Utviklingsbehov	Annen miljøpåvirkning	Kommentar
Direkte bruk	Organisk gjødsel	Organisk og uorganisk nitrogen i varierende forhold	+	Ikke balansert	+(+)	+ Organisk materiale som over tid kan gi jordforbedrende effekter og karbonlagring.	0	0	0	Lav miljøpåvirkning forutsatt ammoniakktap og transportavstand holdes lave
Plasma-aktivering	Anrikt organisk gjødsel		++		0		++	+	+	Høyt energibruk øker kostnader
Biogass-behandling	Biorest		++		+++	- Behov for tilpasset spredeutstyr - Kostnader knyttet til lagring og transport, avhengig av vanninnhold	++	+	0	Lav miljøpåvirkning forutsatt ammoniakktap, transportavstand og utslipp av restmetan holdes lave
Mekanisk separering	Flytende fase		++		++	- Kan inneholde uønskete stoffer	+	+	0	Energibruk avhengig av metoden, evt. bruk av flokkulanter.
	Fast fase	Hovedsakelig organisk	0		0	- Behov for større spredemengde sammenlignet med mineralgjødsel	+	+	0	Tungmetaller følger i stor grad flytende fase.
Kompostering	Kompost		0		0		0	+	0	Lav miljøpåvirkning, forutsatt optimal drift. Industrielle anlegg krever relativt stort areal.
Tørking, blanding, pelletering	Organisk gjødselpellet	Organisk og uorganisk i varierende forhold	+	Relativt balansert	0	+ Organisk materiale som over tid kan gi jordforbedrende effekter og karbonlagring + Kan brukes i kombisåmaskin	++	+	+	Noe energibruk og evt. bruk av tilsetningsstoffer
Tørking, blanding, anrikning, pelletering	Hybridgjødsel		++	Balansert	0	-Kan inneholde uønskete stoffer - Behov for større spredemengde sammenlignet med mineralgjødsel	++	++	+	

Teknologi	Produkt	Nitrogen form	Plante-tilgjengelighet	Næringsstoff-balanse (NPK)	Risiko for tap av NH ₃	Andre praktiske og agronomiske aspekter	Kostnader	Utviklingsbehov	Annen miljøpåvirkning	Kommentar
Stripping og skrubbing	Ammonium-salt (i løsning)*	Uorganisk	+++		0		+++	++	+++	Høyt energibruk, kjemikaliebruk (rensing, gjenvinning), evt. bruk av membraner som inneholder PFAS og har lav levetid
Adsorbering			+++	Bare nitrogen	0	Sammenlignbar med konvensjonell mineralgjødsel, forutsatt prosessert til ammoniumsalt	+++	+++	+++	Evt. kjemikaliebruk ved regenerering
(Bio-) Elektrodialyse	Ammoniumrik løsning**		+++		0		+++	+++	+++	Fare for ammoniakk tap under prosessering
Membran-teknologi			+++		0		+++	+++	+++	Membraner kan inneholde PFAS og ha lav levetid
Felling	Struvitt		+++		0		+++	++	++	Høyt kjemikalieforbruk
Biomasse-dyrking	Organisk konsentrat	Organisk	+	Ikke balansert	0	jf. direkte bruk	+++	+++	+++	Stort arealbehov og energibruk for oppvarming og lys, tilsetning av CO ₂ og kjemikalier

* kan prosesseres til fast produkt

** kan prosesseres til ammoniumsalt (i løsning)

Balansert forhold mellom næringsstoffer

Ubalanse i forholdet mellom nitrogen, fosfor, kalium og andre essensielle plantenæringsstoffer er en utfordring ved praktisk bruk av resirkulerte gjødselprodukter, både fremstilt ved lav og høy prosesseringsgrad.

I organiske produkter finnes som regel både nitrogen og fosfor, men i et forhold som ofte ikke samsvarer med plantenes næringsbehov. Det skyldes blant annet at ammonium (NH_4) er utsatt for tap til vannfasen gjennom avvanningsprosesser eller til luft som rent nitrogen (N_2) eller ammoniakk, samtidig som fosfor i organiske gjødselråvarer kan ha lav plantetilgjengelighet (Øgaard m.fl., 2024).

Høyt prosesserte produkter inneholder derimot vanligvis bare, eller hovedsakelig nitrogen. Fosfor og de andre næringsstoffene i råvarene vil samles i en organisk rest som også trenger avhending. Struvitt inneholder fosfor og magnesium i tillegg til nitrogen, men likevel i et ubalansert forhold sammenlignet med plantenes behov. Uansett prosesseringsgrad må resirkulerte gjødselprodukter derfor suppleres eller blandes med andre komponenter for å sikre en balansert næringstilførsel.

Mekanisk separering er én lav teknologisk strategi for å skille fosfor fra nitrogen fra flytende råvarer. Etter separering har den flytende fraksjonen et bedre næringsforhold og kan lettere utnyttes lokalt, men fosforinnholdet er ofte fortsatt høyere enn ønskelig. En annen strategi er produksjon av hybridgjødsel (mineralorganisk gjødsel): Istedenfor å fjerne fosfor, blir en avvannet råvare tilsatt mineralnitrogen. Produktet kombinerer dermed langsomt virkende organisk nitrogen og stabilt karbon med en rask tilgjengelig nitrogenkilde, og forener dermed flere fordeler.

Andre praktiske og agronomiske aspekter

Praktiske forhold ved bruk som gjødsel er også viktige å ta med i vurderinger av teknologier for nitrogengjenvinning. Gjødselprodukter med lavt nitrogeninnhold må spres i større mengder enn mineralgjødsel, noe som kan innebære flere kjøringar for å dekke plantenes næringsbehov og et økt behov for lagerplass. Enkelte produkter, som biorest, krever dessuten spesialutstyr for spredning. Har ikke gårdbrukeren dette tilgjengelig, kan entreprenører leies inn, men dette innebærer en ekstra kostnad og usikkerhetsmoment angående tidsriktig spredning. Pellets, enten organiske eller mineralorganiske, har fordelen at de ofte kan brukes med eksisterende utstyr, som kombisåmaskin.

6.2 Kostnadseffektivitet

Når det gjelder vurderinger av kostnadseffektivitet, finnes det fortsatt begrenset mengde data som gjør det vanskelig å sammenligne ulike gjødselprodukter på tvers av lav og høy prosesseringsgrad. Per i dag er det uansett få, om noen, alternativer som kan anses som reelt konkurransedyktige i sammenligning med konvensjonell mineralgjødsel.

Jo mer avansert en metode er, desto høyere blir investerings- og driftskostnadene for produsenten. Produksjon av mineralgjødsel-lignende produkter fra organiske råvarer medfører betydelige start- og driftskostnader, men kan samtidig oppnå høyere aksept hos sluttbrukere enn produkter som i mindre grad ligner mineralgjødsel. Organiske gjødselprodukter med lav prosesseringsgrad har derimot lavere produksjonskostnader, men kan innebære økte utgifter for sluttbrukeren i forbindelse med transport, lagring, håndtering og i enkelte tilfeller avlingstap eller redusert kvalitet. På den andre siden bidrar organiske produkter med tilførsel av organisk materiale, som over tid kan gi positive samfunnseffekter utover den rent bedriftsøkonomiske gevinsten.

Kostnadseffektiviteten må derfor vurderes både bedriftsøkonomisk og samfunnsøkonomisk, der også sosiale og miljømessige aspekter inngår. Livssyklusanalyse kan være et nyttig verktøy for å belyse både fordeler, ulemper og potensiell miljøpåvirkning av ulike former for næringsstoffgjenvinning. Valget mellom lav og høy prosesseringsgrad handler i stor grad om hvem som tar kostnaden, og eventuelt hvem som skal kompenseres for økonomiske ulemper. Dette gjør satsingen på resirkulering til et

politisk spørsmål om man skal prioritere høyt prosesserte løsninger til tross for høyt energibruk, eller velge enklere prosesser med lavere produksjonskostnader og potensial for karbonlagring i jord, men større utfordringer knyttet til logistikk og bruk.

Råvaretilgjengelighet

Kostnadseffektivitet for enhver prosess vil i stor grad bestemmes av tilgjengeligheten på råvarer. I praksis vil derfor regional og lokal tilgang på nitrogenrike råvarer avgjøre hvilke teknologier og behandlingsmetoder som har størst potensial for norske produksjonssystemer.

Med nytt gjødselregelverk vil flere regioner i økende grad oppleve betydelige overskudd av organiske råvarer (Øgaard m.fl., 2024; Frøseth m.fl., 2025, delrapport 1). Økt regional råvaretilgjengelighet gir gode forutsetninger for biogassproduksjon, og biorest egner seg dessuten godt som «døråpner» for teknologier med høy prosesseringsgrad, hvor ammoniakk kan fanges og utnyttes under behandlingen.

I områder med begrenset tilgang på råvarer derimot vil lavteknologiske behandlingsmetoder som mekanisk separering og kompostering, eller direkte bruk fremstå som de mest fordelaktige løsningene.

Sammenligning av kostnadseffektivitet til teknologier med høy prosesseringsgrad

Det finnes noen få studier som direkte sammenligner kostnader for ulike teknologier med høy prosesseringsgrad, selv om sammenligninger er krevende siden mange fortsatt befinner seg på laboriestediet eller ikke er optimalisert for gjenvinning av næringsstoffer. Vaneeckhaute et al. (2017) har evaluert effektivitet, kostnader og brukervennlighet av teknologier for gjenvinning av næringsstoffer fra biorest. De konkluderte med at struvittutfelling/krystallisering, og ammoniakkstripping og påfølgende skrubbing er blant de mest lovende teknologiene med høy prosesseringsgrad for fullskala anvendelse.

6.3 Miljøpåvirkning

Når resirkulerte gjødselprodukter markedsføres, må det i henhold til gjødselwareforskriften (2025) foreligge dokumentasjon på at de ikke utgjør en forurensningsrisiko for avlingene eller jorda.

Miljøeffektene knyttet til produksjon, håndtering, lagring og bruk av resirkulerte gjødselprodukter er derimot mer usikre og variable, særlig med hensyn til energibruk, ammoniakktap og risiko for forurensning. Som for kostnadseffektivitet, mangler det systematiske data på tvers av ulike teknologier, ikke minst fordi ulike undersøkelser opererer med forskjellige systemgrenser.

Produksjon av høyt prosesserte gjødselprodukter er som regel mer energikrevende enn behandling med lav prosesseringsgrad. Dette henger blant annet sammen med at høyteknologiske metoder for gjenvinning av mineralnitrogen fra organiske råvarer ofte resulterer i fortynnede produkter med lav nitrogenkonsentrasjon. For å omdanne disse til faste og mer brukervennlige produkter kreves ytterligere prosessering med høyt energiforbruk.

Også blant lavteknologiske behandlingsprosesser finnes variasjoner i miljøpåvirkning. Selv om energiforbruket generelt er lavere enn i høyteknologiske prosesser, er mange av metodene avhengige av tilsetningsstoffer som kan ha uønskede miljøeffekter, for eksempel fellingskjemikalier, flokkulanter eller membraner som inneholder PFAS. Energiforbruket varierer også: Mekaniske separeringsteknologier med høy effektivitet har som regel et høyere energibehov, som ved bruk av dekanterentrifuger sammenlignet med skruetresser. Samtidig kan en mer energikrevende dekanterentrifuge bidra til bedre fosforutnyttelse og redusert fosforbelastning på vannmiljøet.

Risikoen for ammoniakktap er størst i lite prosesserte flytende produkter som inneholder ammonium i en form som lett kan fordampe. I faste produkter med lav prosesseringsgrad har mye av ammoniakken allerede gått tapt under behandlingen. For høyt prosesserte produkter er derimot et hovedmål å bevare nitrogenet ved å binde det som tilgjengelig ammonium.

Risikoen for forurensninger (i.e. organiske miljøgifter, tungmetaller, mikroplast etc.) er som regel høyest ved bruk av lavt prosesserte produkter. Samtidig vil alle høyt prosesserte teknologier generere biprodukter som må håndteres, og det er sannsynlig at uønskede stoffer ender opp i disse reststrømmene dersom de ikke havner i sluttproduktet eller i avløpsvannet. Det er derfor nødvendig å vurdere miljøeffekter ut fra et helhetlig systemperspektiv, ikke bare sluttproduktet.

6.4 Regulatoriske begrensninger

Gjødselforskriften (2025) fastsetter allerede omfattende kvalitetskrav som resirkulerte gjødselprodukter må oppfylle før de kan tas i bruk. Resultater fra oppdrag 2 (Borg m.fl. 2025; delrapport 2) viser imidlertid at gårdbrukere ikke nødvendigvis har tillit til gjødselregelverket. Dette kan skyldes flere forhold: 1) manglende tillit til at reglene er tilstrekkelig gode til å sikre bøndernes interesser, 2) utilstrekkelig informasjon om reglene, eller 3) opplevelse av at myndighetene mangler kapasitet til å kontrollere etterlevelsen. For å styrke sluttbrukernes tillit er det derfor viktig å identifisere årsakene til skepsis og vurdere tiltak som justering av regelverket, økt kontroll eller målrettede informasjonskampanjer.

Det kan også være relevant å trekke erfaringer fra EU, hvor økt resirkulering har vært et av hovedmålene med det nye gjødselregelverket FPR (EU) nr. 2019/1009 (se kapittel 3.2). Det nye gjødselregelverket stiller bl.a. krav til minimumsinhold av næringsstoffer i resirkulert gjødsel noe som bidrar til standardisering av resirkulerte produkter. I lys av implementeringen FPR (EU) nr. 2019/1009 og Nitratdirektivet (1991; kapittel 3.5) ble det i 2024 også foreslått RENURE-kriterier som kan fungere som et referansegrunnlag for hvilke kvalitetsparametere resirkulerte nitrogengjødselprodukter bør oppfylle (Huygens et al., 2020).

6.5 Markedsmessige begrensninger

I tillegg til praktiske og agronomiske aspekter, kostnadseffektivitet og miljøpåvirkning, er det viktig å ta hensyn til markedsmessige begrensninger. Produksjon av resirkulerte gjødselprodukter kan bare bli lønnsomme hvis det finnes et marked for dem.

Spørreundersøkelsen som Borg m.fl. (2025) gjennomførte i delprosjekt 2 for å klarlegge muligheter og barrierer for økt bruk av resirkulert gjødsel, bekreftet tidligere funn: Bønder er positive til resirkulert gjødselprodukter så lenge de ikke er dyrere enn mineralgjødsel, har forutsigbar og god gjødseleffekt, og ikke medfører betydelige driftsulemper. Bekymringer knyttet til uønskede stoffer ble også fremhevet, og usikkerheten kobles til mangel på kunnskap (Borg m.fl., 2025, delrapport 2).

Dette samsvarer med funnene til Zarebska et al. (2015) som i en oversiktsartikkel påpeker at teknologier for nitrogengjenvinning bør være enkle å bruke, robuste og ha lave investerings- og driftskostnader. Vingerhoets et al. (2025) har vist at markedsaksepten for resirkulerte gjødselprodukter er høyere i områder med overskudd av husdyrgjødsel, i tillegg til at teknologier for næringsgjenvinning er enklere økonomisk å gjennomføre der.

7 Sammen drag og konklusjon

I denne rapporten har NIBIO, på oppdrag av Landbruksdirektoratet, sammenstilt kunnskap om eksisterende og nye teknologier som kan øke både kvaliteten og mengden av resirkulert nitrogengjødsel.

Overordnet skiller vi mellom produkter med lav og høy prosesseringsgrad. Fordelene ved høy prosessering er ofte de samme som ulempene ved lav prosessering, og motsatt.

Organisk gjødsel med lav prosesseringsgrad

Organisk gjødsel (f.eks. organiske gjødselpellets, kompost mm.) inneholder organisk karbon i tillegg til nitrogen og andre næringsstoffer. Innholdet av organisk karbon kan ha positive effekter på jordkvalitet, samtidig som organiske gjødselvarer krever lavere teknologiske investeringer enn resirkulert mineralgjødsel.

Utfordringene med organisk gjødsel er:

- Ofte lavere og/eller mer variabel plantetilgjengelighet til nitrogen sammenlignet med mineralgjødsel
- Vanskelig å dokumentere og deklare plantetilgjengeligheten til nitrogen
- Ubalansert forhold mellom nitrogen, fosfor og kalium i forhold til plantenes behov
- Behov for større spredemengder enn ved mineralgjødsel
- Risiko for at uønskede stoffer følger det organiske materialet (f.eks. tungmetaller, organiske miljøgifter og mikroplast)

Generelt er det behov for videre produktutvikling av organisk gjødsel, og mange organiske gjødselressurser må sees på som råvare i produksjon av organisk gjødsel, heller enn fullverdige gjødselvarer. Det skyldes både ubalansert forhold mellom næringsstoffer, og ukjent og/eller utilstrekkelig plantetilgjengelighet av det organiske nitrogenet

Mineralgjødsel fremstilt av organiske råvarer – høy prosesseringsgrad

I motsetning til organisk gjødsel inneholder mineralgjødsel fremstilt av organiske råvarer svært lite eller ingen organisk karbon. Eksempler er ammoniumsulfat (flytende eller som salt) og struvitt. Disse må tilføres andre næringsstoffer for å bli fullverdige gjødselvarer. Fordelen er at produktene ligner konvensjonell mineralgjødsel i både spreedegenskaper og tilgjengelighet av næringsstoffer og at teknologien kan utnytte råvarer som har lav aksept som organisk gjødsel.

Utfordringene med resirkulert mineralgjødsel er:

- Høyt investeringsbehov i teknologi
- Stort energiforbruk
- Lav økonomisk lønnsomhet, særlig ved begrenset råvaretilgang
- Fosforrik organisk restfraksjon som krever avhending

Teknologiske løsninger avhengig av råvaresituasjon

Det finnes ingen enkel teknologisk løsning som passer alle situasjoner og aktører. I praksis vil valg av teknologi avhenge av råvaretilgangen. Tilgangen på råvarer vil øke i mange regioner de neste ti årene (Øgaard m.fl., 2024; Frøseth m.fl., 2025, delrapport 1). Samtidig vil innskjerping av fosforbegrensningene i gjødselbrukforskriften kombinert med deponiforbudet for organisk materiale bidra til å øke behovet for nye løsninger for regionale overskudd av organiske restprodukter.

Med dagens kunnskapsgrunnlag peker vi på følgende mulige retninger:

- **Lokale løsninger** – Hvis gårdbrukere har behov for prosessering av husdyrgjødsel for eksempel for å oppfylle kravene i gjødselbrukforskriften eller nitratdirektivet (samt eventuelle nye handlingsplaner), kan enkle, teknologiske løsninger som mekanisk separering være aktuelle (se kapittel 5.1.3). Den flytende fraksjonen vil ha et næringsstoff-forhold som er bedre tilpasset lokal bruk enn ubehandlet husdyrgjødsel eller biorest.
- **Regionale løsninger med moderat investeringsbehov** – Samarbeid mellom flere aktører kan gi grunnlag for mer avanserte løsninger. I praksis vil slike initiativ oppstå mellom bønder gjennom overskudd av fosforrike råvarer som følge av innskjerping i fosforbegrensninger i gjødselbrukforskriften. Knutepunkt for innsamling («grendeanlegg») vil da fungere som utgangspunkt for videre prosessering, gjerne i kombinasjon med biogassproduksjon (se kapittel 5.1.2) med etterfølgende behov for tiltak som kan minske ammoniakktap (se kapittel 5.1.1). Videre vil mekanisk separering gi en nitrogenrik flytende fase som kan brukes lokalt, mens fastfasen kan avvannes før videre prosessering eller transport (se kapittel 5.1.3).
- **Tverregionale løsninger med større investeringsbehov** – Profesjonelle anlegg (bedrift eller kommunalt) med større tilgang til råvarer kan kombinere biogass med mer avansert teknologi. Av høyteknologiske løsninger fremstår stripping/skrubbing som velutviklet og kostnadseffektiv, og den gir mulighet for splitting av nitrogen og fosfor. Videre virker utvinning av fast ammoniumsalt gjennom krystallisering som lovende og bør undersøkes nærmere (se kapittel 5.2.2). Fosforrik biorest med organisk materiale vil fortsatt måtte håndteres.
- **Håndtering av faste råvarer** – Fastfraksjoner fra lokale, regionale og tverregionale initiativ kan transporteres lengre. Fast fraksjon etter mekanisk separering av biorest eller husdyrgjødsel, og faste råvarer (f.eks. fjørfegjødsel, fiskeslam) kan inngå i produksjon av organiske eller mineral-organiske pellets (hybridgjødsel) (se kapittel 5.1.5). Virkemidler vil trolig være nødvendig for å utløse videreforedling av faste råvarer.

Sentralisert database

Det kan være nyttig å etablere en sentralisert database med oversikt over råvaretilgang, kjemisk sammensetning, nedbrytbarhet, utslippsfaktorer og risiko for utvasking. Et slikt verktøy vil kunne styrke ressursutnyttelsen og redusere miljøbelastningen.

8 Litteraturreferanser

- AEC Systems. Retrieved 05.05.2025 from <https://www.aecsystems.eu/project-en/composting-odour-scrubber/>
- Andersson, S. L. (2021). *Kvæveåtervinning genom stripping och kristallisation* (978-91-7883-296-5 (ISBN)). (B-rapport, Issue. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ivl:diva-3412>
- Animaliebiproduktforskriften. (2016). Forskrift om animalske biprodukter som ikke er beregnet på konsum (animaliebiproduktforskriften). FOR-2016-09-14-1064. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2016-09-14-1064>
- Aung, S. L., Choi, J., Cha, H., Woo, G., & Song, K. G. (2024). Ammonia-selective recovery from anaerobic digestate using electrochemical ammonia stripping combined with electrodialysis. *Chemical Engineering Journal*, 479, 147949. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147949>
- Bechmann, M., Berland Frøseth, R., Rivedal, S., Brod, E., Fischer, F., Seehusen, T., & Øgaard, A. F. (2023). *Tiltak for bedre nitrogenforvaltning i norsk jordbruk* (2464-1162).
- Bechmann, M., Fischer, F., Kaste, Ø., Ugstad, H., Wilsher-Lohre, S., Winger, A. C., & Øgaard, A. F. (2024). *Konsekvenser av utvidelse av det sårbare området for nitratdirektivet i Oslofjorden* (978-82-17-03541-1). <https://hdl.handle.net/11250/3136486>
- Beckinghausen, A., Odlare, M., Thorin, E., & Schwede, S. (2020). From removal to recovery: An evaluation of nitrogen recovery techniques from wastewater. *Applied Energy*, 263, 114616. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114616>
- biogasstatistikk. (2025). *Bransjens biogasstatistikk*. Biogas Norge og Biogas Oslofjord. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMjkoZTA5ZGUtMjFkOSooMDk1LThkMjltNzgzYzJiNzcyNzc3IiwidCI6IjU2NjNkNmEyLWM2NGYtNGVhZio5YjhjLWVmM2Y5NTkwYWU2NyJ9&pageName=ReportSection>
- Bonvin, C., Etter, B., Udert, K. M., Frossard, E., Nanzer, S., Tamburini, F., & Oberson, A. (2015). Plant uptake of phosphorus and nitrogen recycled from synthetic source-separated urine. *AMBIO*, 44(2), 217-227. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0616-6>
- Borg, P., Byers, E., Brod, E., Kvakkestad, V., Kristoffersen, A. Ø. 2025. Barrierer og muligheter for bruk av resirkulert gjødsel. Delrapport 2 i prosjektet Kunnskap om økt nitrogeneffektivitet gjennom resirkulering. NIBIO rapport vol. 11, nr. 125.
- Borg-Stoveland, S., Draganovic, V., Spilling, K., & Gabrielsen, T. (2024). Successful growth of coastal marine microalgae in wastewater from a salmon recirculating aquaculture system. *Journal of Applied Phycology*, 36, 2851-2861. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03310-1>
- Brod, E. (2023). *Bioest fra marine råstoffer: Kjemisk sammensetning og gjødselkvalitet*. NIBIO. <https://hdl.handle.net/11250/3106198>
- Brod, E., Haraldsen, T. K., & Krogstad, T. (2014). Combined waste resources as compound fertiliser to spring cereals. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 64(4), 329-340. <https://doi.org/10.1080/09064710.2014.907928>
- Brod, E., Henriksen, T., Ørnsrud, R., & Eggen, T. (2023). Quality of fish sludge as fertiliser to spring cereals: Nitrogen effects and environmental pollutants. *Science of The Total Environment*, 875, 162541. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162541>
- Brod, E., Kristoffersen, A. Ø., & Persson, T. (2025). *Foredling av storfegjødsel: Fosfor- og nitrogeneffekter av nye gjødselprodukter*. NIBIO. <https://hdl.handle.net/11250/3200396>
- Carraro, G. (2024). *Nitrogen recovery from biogas plants: A route for white ammonia production* [Linköpings universitet]. Faculty of Arts and Sciences. <https://doi.org/10.3384/9789180758604>
- Carraro, G., Tonderski, K., & Enrich-Prast, A. (2024). Solid-liquid separation of digestate from biogas plants: A systematic review of the techniques' performance. *Journal of Environmental Management*, 356, 120585. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120585>
- Chen, G.-y., Dong, J.-z., Wu, P., Yang, G., & Meng, J. (2024). Effects of different acidifiers on the conversion and loss of nitrogen from pig slurry during long-term storage. *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103539. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103539>
- Christensen, M. L., Christensen, K. V., & Sommer, S. G. (2013). Solid-Liquid Separation of Animal Slurry. In *Animal Manure Recycling* (pp. 105-130). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118676677.ch7>
- Daugstad, K., Kristoffersen, A., & Nesheim, L. (2012). *Næringsinnhold i husdyrgjødsel Analyser av husdyrgjødsel frå storfe, sau, svin og fjørfe 2006-2011*. Bioforsk. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/11250/2447504>

- de Morais, E. G., Sampaio, I. C. F., Gonzalez-Flo, E., Ferrer, I., Uggetti, E., & García, J. (2023). Microalgae harvesting for wastewater treatment and resources recovery: A review. *New Biotechnology*, 78, 84-94. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.10.002>
- Delin, S., Stenberg, B., Nyberg, A., & Brohede, L. (2012). Potential methods for estimating nitrogen fertilizer value of organic residues. *Soil Use and Management*, 28, 283-291. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00417.x>
- Dube, P. J., Vanotti, M. B., Szogi, A. A., & García-González, M. C. (2016). Enhancing recovery of ammonia from swine manure anaerobic digester effluent using gas-permeable membrane technology. *Waste Management*, 49, 372-377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.011>
- ESPP Scope 145. (2023, 19th January). Nitrogen Recovery. Workshop on Nitrogen Recovery, Brussels.
- ESPP Scope 147. (2023, 7th June). Showcasing N-recovery R&D. 1st White Ammonia and N-recovery Research Meeting (WARM), Brussels.
- EU nr. 142/2011. (2011). *Commission Regulation (EU) No 142/2011 of 25 February 2011 implementing Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and implementing Council Directive 97/78/EC as regards certain samples and items exempt from veterinary checks at the border under that Directive Text with EEA relevance*. Luxembourg: Publications Office of the European Union Retrieved from <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/142/oj>
- EU nr. 1069/2009. (2009). *Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing Regulation (EC) No 1774/2002*. Luxembourg: Publications Office of the European Union Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2009/1069/oj/eng>
- EU nr. 2018/848. (2018). *Regulation (EU) 2018/848 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on organic production and labelling of organic products and repealing Council Regulation (EC) No 834/2007*. Luxembourg: Publications Office of the European Union Retrieved from <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/848/oj>
- EU nr. 2019/1009. (2019). *Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003*. Luxembourg: Publications Office of the European Union Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj/eng>
- EXEON. Retrieved 05.05.2025 from https://exeon.co.uk/no/industrielt-lukt--og-utslippskontrollsystem/v%C3%A5te-skrubbe/?utm_term=ammonia%20oscrubber&utm_campaign=Norway+-+Scrubber&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=1872624737&hsa_cam=21693117967&hsa_grp=164553032582&hsa_ad=713119151450&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-296046633973&hsa_kw=ammonia%20oscrubber&hsa_mt=p&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gad_campaignid=21693117967&gbraid=oAAAAADi9PbhWomLE917dox1zRSqIED3BW&gclid=CjoKCOjw953DBhCyARIsANhIZoYEqYzFDHbI2VGaz2-RntLcFBdW4-wJKmhRRvamzOZhXlN2660_BHMaAjITEALw_wcB
- FAO. (2025). *Sustainable nitrogen management in agrifood systems*. FAO. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cd3388en>
- FlexAgri. Retrieved 29.08.2025 from <https://www.flexagri.no/god-effekt-av-a-bladgiodsle-korn-etter-blomstring/>
- Frøseth, R. B., Kristoffersen, A. Ø., Bechmann, M., Brod, E. 2025. Nitrogenkilder og -strømmer i jordbruket. Delrapport 1 i prosjektet Kunnskap om økt nitrogeneffektivitet gjennom resirkulering. NIBIO rapport vol. 11, nr. 124.
- Fuchs, A., Dalby, F. R., Liu, D., Kai, P., & Feilberg, A. (2021). Improved effect of manure acidification technology for gas emission mitigation by substituting sulfuric acid with acetic acid. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100263>
- Ganrot, Z. (2012). Use of zeolites for improved nutrient recovery from decentralized domestic wastewater. *Handbook of Natural Zeolites*, 410-435. <https://doi.org/10.2174/978160805261511201010410>
- Georg, S., Puari, A. T., Hanantyo, M. P. G., Sleutels, T., Kuntke, P., ter Heijne, A., & Buisman, C. J. N. (2023). Low-energy ammonium recovery by a combined bio-electrochemical and electrochemical system. *Chemical Engineering Journal*, 454, 140196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140196>

- Gjødselbrukforskriften. (2025). Forskrift om lagring og bruk av gjødsel mv. (gjødselbrukforskriften). *FOR-2025-01-29-115*. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2025-01-29-115>
- Gjødselvarereforskriften. (2025). Forskrift om produksjon, omsetning og import av gjødselvarer av organisk opphav og visse uorganiske gjødselvarer (gjødselvarereforskriften). *FOR-2025-01-29-116*. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2025-01-29-116>
- Graves, D. B., Bakken, L. B., Jensen, M. B., & Ingels, R. (2019). Plasma Activated Organic Fertilizer. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 39(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9944-9>
- Grønn Gjødsel AS. Retrieved 22.08.2025 from <https://www.gronngjodsel.no/hybrid-n-4/>
- Guilayn, F., Jimenez, J., Rouez, M., Crest, M., & Patureau, D. (2019). Digestate mechanical separation: Efficiency profiles based on anaerobic digestion feedstock and equipment choice. *Bioresource Technology*, 274, 180-189. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.090>
- Gutser, R., Ebertseder, T., Weber, A., Schraml, M., & Schmidhalter, U. (2005). Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168, 439-446. <https://doi.org/10.1002/jpln.200520510>
- Henriksen, T. M., Kristoffersen, A. Ø., Øgaard, A. F., & Brod, E. (2023). *Organiske avfallsprodukt som gjødsel – Bestemmelse av nitrogenerneffekten*. NIBIO. <https://hdl.handle.net/11250/3068643>
- Hertzberger, A. J., Cusick, R. D., & Margenot, A. J. (2020). A review and meta-analysis of the agricultural potential of struvite as a phosphorus fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, 84(3), 653-671. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/saj2.20065>
- Huygens, D., Orveillon, G., Lugato, E., Tavazzi, S., Comero, S., Jones, A., Gawlik, B., & Saveyn, H. (2020). *Technical proposals for the safe use of processed manure above the threshold established for Nitrate Vulnerable Zones by the Nitrates Directive (91/676/EEC)*. European Commission: Joint Research Centre <https://doi.org/doi:10.2760/373351>
- Jatana, B. S., Gami, S. K., & Ketterings, Q. M. (2023). Assessing the Impact of Mixing Acid Whey With Dairy Manure On pH and Nitrogen Dynamics During Manure Handling. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), 2878-2890. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01243-1>
- Jensen, J., Krogh, P. H., Sørensen, P., & Petersen, S. O. (2018). Potentielle miljøeffekter ved anvendelse af forsuret gylle på landbrugsjord.
- Jensen, L. S. (2013). Animal Manure Residue Upgrading and Nutrient Recovery in Biofertilisers. In *Animal Manure Recycling* (pp. 271-294). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118676677.ch14>
- Jiang, Q., He, J., Wang, Y., Chen, B., Tian, K., Yang, K., Wei, H., & Xu, X. (2024). Efficient removal of ammonia–nitrogen in wastewater by zeolite molecular sieves prepared from coal fly ash. *Scientific Reports*, 14(1), 21064. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72067-x>
- Kai, P., Pedersen, P., Jensen, J. E., Hansen, M. N., & Sommer, S. G. (2008). A whole-farm assessment of the efficacy of slurry acidification in reducing ammonia emissions. *European Journal of Agronomy*, 28(2), 148-154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.06.004>
- Kocatürk-Schumacher, N. P., Bruun, S., Zwart, K., & Jensen, L. S. (2017). Nutrient Recovery From the Liquid Fraction of Digestate by Clinoptilolite. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 45(6), 1500153. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/clen.201500153>
- Koskue, V., Pyrhönen, V.-P., Freguia, S., Ledezma, P., & Kokko, M. (2022). Modelling and techno-economic assessment of (bio)electrochemical nitrogen removal and recovery from reject water at full WWTP scale. *Journal of Environmental Management*, 319, 115747. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115747>
- Krogstad, T., & Rakic, V. (2016). *The use of natural zeolite (clinoptilolite) for the treatment of farm slurry and as a fertilizer carrier*. Norwegian University of Life Sciences (NMBU) Aas, Norway.
- Kupper, T., Bürge, D., Bachmann, H., Güsewell, S., & Mayer, J. (2014). Heavy metals in source-separated compost and digestates. *Waste Management*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.007>
- Lessmann, M., Kanellopoulos, A., Kros, J., Orsi, F., & Bakker, M. (2023). Maximizing agricultural reuse of recycled nutrients: A spatially explicit assessment of environmental consequences and costs. *J Environ Manage*, 332, 117378. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117378>
- Lorick, D., Macura, B., Ahlström, M., Grimvall, A., & Harder, R. (2020). Effectiveness of struvite precipitation and ammonia stripping for recovery of phosphorus and nitrogen from anaerobic digestate: a systematic review. *Environmental Evidence*, 9(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s13750-020-00211-x>
- Melse, R. W., & Ogink, N. W. M. (2005). Air scrubbing techniques for ammonia and odor reduction at livestock operations: Review of on-farm research in the Netherlands [Review]. *Transactions of*

- the American Society of Agricultural Engineers, 48(6), 2303-2313.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-32244449217&partnerID=40&md5=261a95440613149b9977dcde681b184f>
- Moges, M. E., Heistad, A., & Heidorn, T. (2020). Nutrient Recovery from Anaerobically Treated Blackwater and Improving Its Effluent Quality through Microalgae Biomass Production. *Water*, 12(2), 592. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/2/592>
- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 242-257.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>
- N2 Applied. Retrieved 19.08.2025 from <https://n2applied.com/>
- Nitratdirektivet. (1991). Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (Nitrates Directive). 91/676/EEC. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1991/676/oj/eng>
- Norsk Senter for Sirkulær Økonomi. (2025). Veas henter verdier i avløpsvannet: Forurensning er bare ressurser på avveie. Retrieved 22.08.2025 from <https://ncce.no/no/veas-henter-verdier-i-avlopsvannet-forurensning-er-bare-ressurser-pa-avveie/>
- NuReSys. Retrieved 14.08.2025 from <https://nuresys.com/technology/>
- O'Connor, J., Mickan, B. S., Gurung, S. K., Siddique, K. H. M., Leopold, M., Bühlmann, C. H., & Bolan, N. S. (2024). Transforming waste to wealth: Impact of food waste-derived soil amendments and synthetic nitrogen fertilizer on soil dynamics. *Soil Use and Management*, 40(3), e13093.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/sum.13093>
- O'Toole, A., & Capjon, A. (2020). *Fermentering av husdyrgjødsel: En biologisk metode for redusert tap av ammoniakk til luft?* NIBIO. <http://hdl.handle.net/11250/2641768>
- O'Toole, A., Lunder, O. E., Weldon, S. M., Rassat, A., Joner, E., Lind, V., & Rasse, D. (2022). *Effekt av biokull i planteproduksjon, gjødsellager og husdyrproduksjon* (978-82-17-03047-8).
<https://hdl.handle.net/11250/2985223>
- Ostara. Retrieved 19.08.2025 from <https://www.ostara.com/products/>
- Pandey, B., & Chen, L. (2021). Technologies to recover nitrogen from livestock manure - A review. *Science of The Total Environment*, 784, 147098.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147098>
- Pedersen, J., Feilberg, A., & Nyord, T. (2022). Effect of storage and field acidification on emissions of NH₃, NMVOC, and odour from field applied slurry in winter conditions. *Journal of Environmental Management*, 310, 114756.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114756>
- PhosphoGREEN. Retrieved 14.08.2025 from <https://www.suez.com/en/denmark/wastewater/phosphorus-recovery-via-struvite-precipitation>
- Provalo, G., Perazzolo, F., Mattachini, G., Finzi, A., Naldi, E., & Riva, E. (2017). Nitrogen removal from digested slurries using a simplified ammonia stripping technique. *Waste Management*, 69, 154-161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.047>
- PureGreen. Retrieved 16.04.2025. from <https://puregreenagriculture.com/>
- Qin, Y., Wang, K., Zhou, Z., Yu, S., Wang, L., Xia, Q., Zhao, X., Zhou, C., Ye, J., & Wu, Z. (2023). Nitrogen recovery from wastewater as nitrate by coupling mainstream ammonium separation with side stream cyclic up-concentration and targeted conversion. *Chemical Engineering Journal*, 455, 140337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140337>
- Rasse, D. P., Weldon, S., Joner, E. J., Joseph, S., Kammann, C. I., Liu, X., O'Toole, A., Pan, G., & Kocatürk-Schumacher, N. P. (2022). Enhancing plant N uptake with biochar-based fertilizers: limitation of sorption and prospects. *Plant and Soil*, 475(1), 213-236.
<https://doi.org/10.1007/s11104-022-05365-w>
- Robles, Á., Aguado, D., Barat, R., Borrás, L., Bouzas, A., Giménez, J. B., Martí, N., Ribes, J., Ruano, M. V., Serralta, J., Ferrer, J., & Seco, A. (2020). New frontiers from removal to recycling of nitrogen and phosphorus from wastewater in the Circular Economy. *Bioresource Technology*, 300, 122673. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122673>
- Rulkens, W. H., Klapwijk, A., & Willers, H. C. (1998). Recovery of valuable nitrogen compounds from agricultural liquid wastes: potential possibilities, bottlenecks and future technological challenges. *Environmental Pollution*, 102(1, Supplement 1), 727-735.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)80105-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)80105-X)
- Sanitation360. Retrieved 07.05.2025 from <https://sanitation360.se/our-product/#howitworks>
- Schils, R., Schröder, J., & Velthof, G. (2020). Fertilizer Replacement Value. In (pp. 189-214).
<https://doi.org/10.1002/9781118921487.ch5-1>

- Schoumans, O. F., Rulkens, W. H., Oenema, O., & Ehlert, P. A. I. (2010). Phosphorus recovery from animal manure - Technical opportunities and agro-economical perspectives. *Alterra-report*, 2158. <https://edepot.wur.nl/163684>
- Sheikh, M., Lopez, J., Reig, M., Vecino, X., Rezakazemi, M., Valderrama, C. A., & Cortina, J. L. (2023). Ammonia recovery from municipal wastewater using hybrid NaOH closed-loop membrane contactor and ion exchange system. *Chemical Engineering Journal*, 465, 142859. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142859>
- Sigurnjak, I., Brienza, C., Snauwaert, E., De Dobbelaere, A., De Mey, J., Vaneeckhaute, C., Michels, E., Schoumans, O., Adani, F., & Meers, E. (2019). Production and performance of bio-based mineral fertilizers from agricultural waste using ammonia (stripping-)scrubbing technology. *Waste Management*, 89, 265-274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.043>
- Skifteplan. Retrieved 10.08.2025 from https://www.skifteplan.no/ny-kunde?gad_source=1&gad_campaignid=6537028794&gbraid=oAAAAACwYggtE5ILN3js_Bm_dMDQ3mzXVJO&gclid=CjwKCAjw2brFBhBOEiwAVJX5GCXukZeHc6bcXCM5XuuwOX44LYxaiFS3tniFLCFAylnH4MJKNIRCxoC5JkQAvD_BwE
- Soudejani, H. T., Kazemian, H., Inglezakis, V. J., & Zorpas, A. A. (2019). Application of zeolites in organic waste composting: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 22, 101396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101396>
- Spiller, M., Muys, M., & Vlaeminck, S. (2019). Sustainable multifunctional fertilizer -combining bio-coatings, probiotics and struvite for phosphorus and iron supply Deliverable 1.4 Recommendations for struvite producers to make their product suitable for use as phosphorous source in fertilisers. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23468.21127>
- SSB. (2024). 12359: Biologisk behandling av avfall, etter materialtype (1 000 tonn) 2017–2023. [Statistikk]. <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/avfall/statistikk/avfallshandtering-ved-avfallsanlegg>
- Svanes, E., Arnøy, S., & Saur Modahl, I. (2014). Miljøvurdering av Vestfjorden Avløpsselskap. Norsus. <https://norsus.no/wp-content/uploads/or-2014-miljoevurdering-av-vestfjorden-avloepsselskap-indikatorprosjekt.pdf>
- Sørensen, P., & Eriksen, J. (2009). Effects of slurry acidification with sulphuric acid combined with aeration on the turnover and plant availability of nitrogen. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(3), 240-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.01.024>
- Tian, J., & Liu, B. (2022). Ammonia capture with ionic liquid systems: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(5), 767-809. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835437>
- Ukwuani, A. T., & Tao, W. (2016). Developing a vacuum thermal stripping – acid absorption process for ammonia recovery from anaerobic digester effluent. *Water Research*, 106, 108-115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.054>
- Van Puffelen, J. L., Brienza, C., Regelink, I. C., Sigurnjak, I., Adani, F., Meers, E., & Schoumans, O. F. (2022). Performance of a full-scale processing cascade that separates agricultural digestate and its nutrients for agronomic reuse. *Separation and Purification Technology*, 297, 121501. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121501>
- Vaneeckhaute, C., Lebuf, V., Michels, E., Belia, E., Vanrolleghem, P. A., Tack, F. M. G., & Meers, E. (2017). Nutrient Recovery from Digestate: Systematic Technology Review and Product Classification. *Waste and Biomass Valorization*, 8(1), 21-40. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9642-x>
- Velthof, G. L., Cals, T. C. A., van 't Hull, J. P., Lesschen, J. P., Lessmann, M., Porre, R. J., Ros, M. B. H., Rietra, R. P. J. J., Schoumans, O. F., Veenemans, L., & Westerik, D. (2024). Managing organic resources in agriculture: future challenges from a scientific perspective [Review]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1393190>
- Viaene, J., Nelissen, V., Reubens, B., Willekens, K., Driehuis, F., De Neve, S., & Vandecasteele, B. (2017). Improving the product stability and fertilizer value of cattle slurry solid fraction through co-composting or co-ensiling. *Waste Management*, 61, 494-505. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.037>
- Vingerhoets, R., Spiller, M., Schoumans, O., Vlaeminck, S. E., Buysse, J., & Meers, E. (2025). Economic potential for nutrient recovery from manure in the European union. *Resources, Conservation and Recycling*, 215, 108079. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108079>
- Wang, L., Ye, C., Gao, B., Wang, X., Li, Y., Ding, K., Li, H., Ren, K., Chen, S., Wang, W., & Ye, X. (2023). Applying struvite as a N-fertilizer to mitigate N₂O emissions in agriculture: Feasibility

- and mechanism. *Journal of Environmental Management*, 330, 117143.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117143>
- Wang, R., Yang, K., Wong, C., Aguirre-Villegas, H., Larson, R., Brushett, F., Qin, M., & Jin, S. (2024). Electrochemical ammonia recovery and co-production of chemicals from manure wastewater. *Nature Sustainability*, 7(2), 179-190. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01252-z>
- Weldon, S., van der Veen, B., Farkas, E., Kocatürk-Schumacher, N. P., Dieguez-Alonso, A., Budai, A., & Rasse, D. (2022). A re-analysis of NH₄⁺ sorption on biochar: Have expectations been too high? *Chemosphere*, 301, 134662.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134662>
- Zarebska, A., Romero Nieto, D., Christensen, K. V., Fjerbæk Søtoft, L., & Norddahl, B. (2015). Ammonium Fertilizers Production from Manure: A Critical Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(14), 1469-1521.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2014.955630>
- Zhang, G., Li, B., Shi, Y., Zhou, Q., Fu, W.-J., Zhou, G., Ma, J., Yin, S., Yuan, W., Miao, S., Ji, Q., Qu, J., & Liu, H. (2024). Ammonia recovery from nitrate-rich wastewater using a membrane-free electrochemical system. *Nature Sustainability*, 7(10), 1251-1263.
<https://doi.org/10.1038/s41893-024-01406-7>
- Zhang, L., Dong, H., Zeng, S., Hu, Z., Hussain, S., & Zhang, X. (2021). An Overview of Ammonia Separation by Ionic Liquids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(19), 6908-6924. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00780>
- Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2015). Recovery of ammonia and sulfate from waste streams and bioenergy production via bipolar bioelectrodialysis. *Water Research*, 85, 177-184.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.032>
- Øgaard, A. F., & Brod, E. (2016). Efficient Phosphorus Cycling in Food Production: Predicting the Phosphorus Fertilization Effect of Sludge from Chemical Wastewater Treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(24), 4821-4829.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05974>
- Øgaard, A. F., Kvakkestad, V., Bjerke, K., Brod, E., Byers, E., Nesse Solvåg, A., Sposob, M., Strøm-Andersen, N., & Wilsher-Lohre, S. (2024). *Vurdering av et omsetningskrav for resirkulert fosfor*.
- Økologiforskriften. (2022). *Forskrift om økologisk produksjon og merking av økologiske landbruksprodukter, akvakulturprodukter, næringsmidler og fôr m.m. (økologiforskriften)*. Lovdata Retrieved from <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2022-06-11-1171>
- Aasen, I. (1997). *Mangelsjukdomar og andre ernæringsforstyrningar hos kulturplanter*. Landbruksforl.

Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) ble opprettet 1. juli 2015 som en fusjon av Bioforsk, Norsk institutt for landbruksøkonomisk forskning (NILF) og Norsk institutt for skog og landskap.

Bioøkonomi baserer seg på utnyttelse og forvaltning av biologiske ressurser fra jord og hav, fremfor en fossil økonomi som er basert på kull, olje og gass. NIBIO skal være nasjonalt ledende for utvikling av kunnskap om bioøkonomi.

Gjennom forskning og kunnskapsproduksjon skal instituttet bidra til matsikkerhet, bærekraftig ressursforvaltning, innovasjon og verdiskaping innenfor verdikjedene for mat, skog og andre biobaserte næringer. Instituttet skal levere forskning, forvaltningsstøtte og kunnskap til anvendelse i nasjonal beredskap, forvaltning, næringsliv og samfunnet for øvrig.

NIBIO er eid av Landbruks- og matdepartementet som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter og eget styre. Hovedkontoret er på Ås. Instituttet har flere regionale enheter.