

MOT EN SIRKULÆR FOSFORØKONOMI I NORGE

STRATEGIER FOR INTEGRERING AV JORDBRUK OG AKVAKULTURSEKTORER PÅ FLERE NIVÅER



ANERKJENNELSER

PROSJEKTFINANSERING



Funded by
The Research
Council of Norway

RAPPORTFORFATTERE

Daniel Beat Müller, NTNU
Miguel Las Heras Hernández, NTNU / NILU
Avijit Pandit, NTNU
Anne Falk Øgaard, NIBIO
Kjell Inge Reitan, NTNU

PROSJEKTTEAM

NTNU Industriell økologi

Daniel Beat Müller
Miguel Las Heras
Hernández
Avijit Pandit
Nils Dittrich
Francis Barre
Anna Eide Lunde
Loïs Lozach
Thomas Galea
Helen Ann Hamilton
Simona Sharma

NTNU Biologi

Kjell Inge Reitan
Ingeborg Hollekim
Bringslid
Inka Anglade

NIBIO

Anne Falk Øgaard
Eva Brod
Ola Hanserud

DTU

Jens Kjerulf Petersen

RÅDGIVENDE PANEL

Andrea Viken Strand, SINTEF
Anna-Sara Bergeland,
Miljødirektoratet
Anne Katrina Berg, Norsk
Landbruks Rådgiving (NLR)
Arne Haarr, Norsk Vann
Asbjørn Veidal,
Landbruksdirektoratet
Benjamin Kleppe, Bellona
Ellinor Bævre Heggset,
Trøndelag fylkeskommune
Emil Beddari, Framtiden i våre
hender
Erik Hagen, Norwegian Western
Sahara Resource Watch

Gisle Berge, Statistisk
sentralbyrå
Hanne Digre, SCALE AQ
Harald Steffensen, Skretting
Helen Ann Hamilton, Biomar
Jens Måge, Avfall Norge
Jon Svenningsen, Jordpro
Julia Fossberg Buhaug, Lerøy
Midt
Karen Johanne Baalsrud,
Mattilsynet
Kari Marte Sjøvik, Norges
Bondelag
Kine Martinsen,
Miljødirektoratet
Knut Vasdal, Foss Gård

Leif Kjetil Skjæveland, Skretting
Leo Morf, Environmental
Agency of Canton Zurich
Margrét Alsvik, Kontali
Ola Hanserud, EcoDo
Per Erik Sørås, Trøndelag
Fylkeskommune
Pia Kupka Hansen,
Havforskningsinstituttet
Tore Krogstad, NMBU
Torleiv Næss Ugland,
TerraMarine
Torstein Kristensen, SCALE AQ
Trude H. Nordli, Sjømat Norge
Vanessa Korsbakken Ivanov,
Miljødirektoratet

ANSVARFRASKRIVELSE

Denne rapporten er produsert av de tidligere nevnte rapportforfatterne, som tar fullt ansvar for rapportens innhold og konklusjoner. Mens medlemmene av det tidligere nevnte rådgivende panelet har bidratt betydelig til utviklingen av denne rapporten, innebærer deres deltakelse ikke nødvendigvis deres godkjenning av rapportens innhold eller konklusjoner.

For å sitere denne rapporten, vennligst bruk følgende referanse

Müller, D. B., Las Heras Hernández, M., Pandit, A., Øgaard, A. F. & Reitan, K. I. (2023). *Mot en sirkulær fosforøkonomi i Norge*. Teknisk rapport. NTNU, Trondheim, Norge.



OPPSUMMERING

Fosfor er en byggestein for liv og spiller derfor en essensiell rolle i matproduksjonen. For øyeblikket kommer store mengder fosfor inn i det norske matsystemet fra utlandet i form av mineralgjødsel, fôrstoffer, matvarer og mikroingredienser til dyrefôr, hovedsakelig i lakseoppdrett. Imidlertid ender bare en liten brøkdel av denne fosforen opp som mat for mennesker, mens den største delen akkumuleres i jord- og vannsystemer. Dette ineffektive systemet fører til to utfordringer:

1. Forsyning av fosfor er avgjørende. Fosfatstein, den primære kilden til fosfor for gjødsel- og mikroingrediensproduksjon, er en begrenset ressurs som er sterkt konsentrert i noen få land. Over 80 % av verdens fosfatsteinreserver finnes bare i fem land, og ~70 % befinner seg i Marokko og Marokko-okkupert Vest-Sahara¹. Den høye konsentrasjonen gjør mange land sårbare for geopolitiske og økonomiske ustabiliteter og truer mattrykgheten. EU har derfor inkludert fosfatstein på sin liste over kritiske råvarer².
2. Akkumuleringen av fosfor i vannsystemer kan føre til eutrofiering og døde soner, som truer fiskebestander og annet vannlevende liv. Den høye konsentrasjonen av fosfor i jord på grunn av overgjødsling over lange tidsperioder øker faren for utslipp til vannsystemer via avrenning, noe som ytterligere forverrer risikoen for eutrofiering.

En mer sirkulær bruk av fosfor kan samtidig redusere forsynings- og forurensningsrisikoene. Dette er særlig relevant i Norge, der regjeringen har ambisjoner om å øke produksjonen av laks og ørret fra nåværende 1,5 millioner tonn til 5 millioner tonn innen 2050.

Å oppnå en sirkulær fosforøkonomi er en kompleks oppgave: (i) Land- og sjøbaserte matsystemer er i økende grad sammenkoblet, for eksempel gjennom produksjonen av fiskefôr eller bruk av fiskegjødsel på jordbruksområder. (ii) Den norske fosforkretsløpet er i økende grad sammenkoblet med andre land, da handelsstrømmene langs hele matforsyningskjeden øker. (iii) Fosforgjødsel, både primær og resirkulert, er ofte forurenset med tungmetaller som kadmium, uran og sink, som har en tendens til å hope seg opp i jord. Rensingen av fosforkretsløpet er derfor avgjørende for jordfruktbarheten og menneskers helse.

Denne rapporten er basert på MIND-P-prosjektet, som studerte det norske fosforkretsløpet for både jordbruk og akvakultur på gårdsnivå og utforsket muligheter for økt sirkularitet. Prosjektet identifiserte gårdsnivå og strukturelle hindringer for å håndtere fosforressursene mer effektivt. Vi foreslår fire grunnleggende strategier for å overvinne disse hindringene:

1. Utvikle og opprettholde et nasjonalt næringsstoffregnskap.
2. Minimere tap og opphopning av fosfor på gårdsnivå.
3. Etablere infrastrukturer for innsamling, prosessering, handel og bruk av gjødsel og fiskeslam for å produsere høykvalitets resirkulerte gjødselprodukter som er skreddersydd for behovene til brukerne i Norge og i utlandet.
4. Vedta en reguleringsramme for å fremme markedet for resirkulerte gjødselprodukter.

De foreslåtte strategiene ble utviklet med støtte fra et rådgivende panel bestående av representanter fra regjeringen, næringslivet, bransjeorganisasjoner og ikke-statlige organisasjoner (NGO-er) gjennomført gjennom både nettbaserte møter og to fysiske workshoper i 2022.



PROSJEKTET MIND-P

MIND-P³ utforsket veier for at Norge skal kunne bli uavhengig av import av primære fosforgjødselprodukter og redusere miljøpåvirkninger ved å utnytte nasjonale sekundære ressurser mer effektivt, med fokus på jordbruk og akvakultur.

METODIKK

1. Studie av det norske fosforkretsløpet på gårdsnivå:
 - romlig fordeling av fiskeslam og gjødselproduksjon
 - potensial for lokal resirkulering
 - potensial for innsamling, prosessering og transport av fosforressurser for resirkulering i områder med fosforunderskudd
2. Analyse av viktige hindringer og muligheter:
 - laboratorie-, drivhus- og feltforsøk med bruk av resirkulerte kilder av fosfor som gjødsel
 - undersøkelser om forbrukeraksept for å forstå villigheten til å akseptere alternative fosforprodukter og -systemer
 - økonomiske hindringer for implementeringen av alternative systemer og teknologier
3. Testing av ulike strategier og teknologier i modellsimuleringer og scenarier utviklet i nært samarbeid med sentrale interessenter.

MIND-P-prosjektet fokuserte på å spore fosfor i det norske matsystemet. Det behandlet ikke eksplisitt (i) matforbruk og bruk av avløpsslam og husholdningsavfall, og (ii) koblingen mellom fosforstrømmer og forurensninger. Forbindelsen mellom sirkulær fosforhåndtering og håndtering av farlige materialer gjennom jordbeskyttelse, matkvalitet og vannforurensning må adresseres i senere arbeid.

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	STORE UTFORDRINGER VED ANTROPOGEN FOSFORBRUK	1
2	DEN NORSKE FOSFORKRETSLØPET	3
	2.1 UTFORDRINGER	3
3	ANBEFALINGER FOR EN SIRKULÆR FOSFORBIOØKONOMI I NORGE	5
	3.1 UTVIKLE OG OPPRETTOLDE ET NASJONALT NÆRINGSSTOFFREGNSKAP	5
	3.2 INNGREP PÅ GÅRDSNIVÅ: minimer tap av fosfor	7
	3.3 INNGREP PÅ REGIONALT NIVÅ: Etablere en infrastruktur for innsamling, behandling og handel med gjødsel og fiskeslam	9
	3.4 VEDTA ET REGULATORISK RAMMEVERK FOR OVERGANG TIL EN SIRKULÆR FOSFORØKONOMI	13
4	Referanser	15

TALLENE

Figur 1: Globalt menneskeskapt kretsløp for fosfor (P). Røde piler indikerer tilførsel av mineralsk fosfor til kretsløpet. Tykke røde piler indikerer uttømming eller akkumulering av fosforressurser i en prosess.	2
Figur 2: Det norske fosforkretsløpet og dets utfordringer [kt P/år]. Jordbruk: gjennomsnitt 2017–2019, Akvakultur: 2021]. Røde piler indikerer hovedstrømmene av fosforimport til det norske kretsløpet. Stiplede piler indikerer mulige nye fosforstrømmer innenfor det norske fosforkretsløpet	3
Figur 3: Systemisk læringstilnærming for etablering av en sirkulær bioøkonomi. Tallene henviser til avsnittene nedenfor.	5
Figur 4: Hierarki av informasjon i et næringsstoffregnskapssystem 15. For mer informasjon, se https://minfuture.eu/ .	6
Figur 5: Inngrep i dyrproduksjon for å redusere fosfortap.	7
Figur 6: Inngrep i akvakultur for å redusere fosfortap	7
Figur 7: Potensialet for reduksjon av mineral-P og akkumulering av P per fylke.	8
Figur 8: Effekter på fosforbehov og utslipp etter tilsetning av fytase i fôret.	8
Figur 9: Fosfortap i jordbruk og akvakultur: Nåværende status og etter gjennomføring av tiltakene som diskuteres i avsnitt 3.2. Ytterligere antakelser er diskutert i MIND-P-publikasjoner ^{11,12} .	10
Figur 10: Totalt tilgjengelig fosfor fra generert gjødsel og fiskeslam.	10
Figur 12: Potensial for innsamling av slam fra ulike strategier.	11
Figur 11: Inngrep på regionalt nivå for innsamling, behandling og handel med gjødsel og fiskeslam	11
Figur 13: Fosforgjødselstrategier for Norge ¹¹ . Mengdene er modellert som gjennomsnitt per år for perioden 2017-19.	12
Figur 14: Potensiell tilførsel av fosfor fra innsamling av fiskeslam sammenlignet med etterspørselen etter mineralgjødsel for forskjellige strategier for bruk av gjødsel i Norge ^{11, 12} . Mengdene for akvakultur er modellert basert på produksjonsnivåene for 2021, mens mengdene for landbruk er gjennomsnitt for 2017-19.	12
Figur 15: Nøkkelinteressenter (bokser), deres forbindelser (piler), og kritiske handlinger (røde prikker) i et regelverk for en sirkulær bioøkonomi.	14

1 STORE UTFORDRINGER VED ANTROPOGEN FOSFORBRUK

I en melding til USAs kongress om fosfat for jordfruktbarhet i 1938 understreket president Franklin D. Roosevelt betydningen av fosfor: «Jeg kan ikke overbetone betydningen av fosfor, ikke bare for jordbruk og jordvern, men også for den fysiske helsen og økonomiske tryggheten til nasjonens befolkning.» Han la til: «det var på høy tid for nasjonen å vedta en nasjonal politikk for produksjon og bevaring av fosfat for fordelene til denne og kommende generasjoner.»⁴

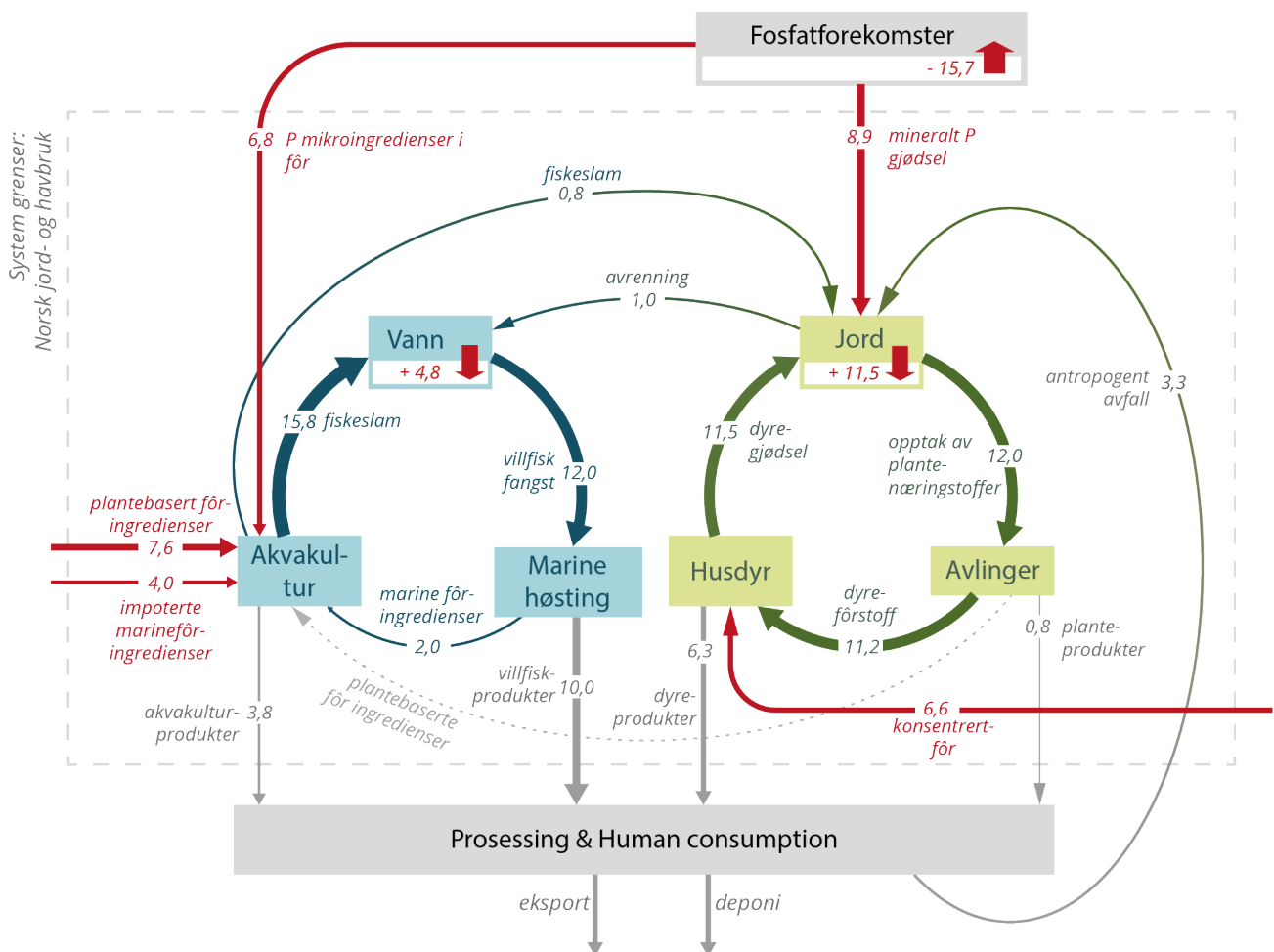
Nasjonale politikker for produksjon og bevaring av fosfor mangler fortsatt, også i Norge, men betydningen av fosfor har ikke avtatt. Mens Roosevelt primært adresserte ressursbevaring, uttrykker Rockström et al. (2009) bekymring for miljøet⁵. I deres banebrytende publikasjon «Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity» diskuterer de påvirkningen av fosforstrømmer til havet som en nøkkelaktør for oksygenfattige hendelser i havet (OAE) og som en sakte drivkraft som påvirker menneskeskapte klimaendringer på planetskala.



2 DEN NORSKE FOSFORKRETSLØPET

Dyrehold og akvakultur er de viktigste driverne for fosforkretsløpet i Norge^{9,10}. Den norske bioøkonomiens bruk av fosfor er ineffektiv og baserer seg på en stor tilførsel av fosfor fra utlandet i form av mineralgjødning, dyrefôr, fiskefôr og mat. Fosforeksporten, hovedsakelig i form av fisk, er mye mindre. Den konstante tilførselen av importert fosfor til det norske fosforkretsløpet fører til akkumulering i jord, havbunn og vannforekomster^{10,11}.

2.1 UTFORDRINGER



Figur 2: Det norske fosforkretsløpet og dets utfordringer [kt P/år]. Jordbruk: gjennomsnitt 2017–2019, Akvakultur: 2021]. Røde piler indikerer hovedstrømmene av fosforimport til det norske kretsløpet. Stiplede piler indikerer mulige nye fosforstrømmer innenfor det norske fosforkretsløpet

- Jordbruket** importerte ~19,6 kt P/år i form av mineralgjødning, konsentrert fôr, fiskegjødning og annet avfall. Utløpene fra jordbruket består av råvarer fra planter og dyr og avrenning, som utgjør ~8,1 kt P/år. Forskjellen på ~11,5 kt P/år er oppsamling i jorda. De råe planteproduktene og dyrene (~7,1 kt P/år) utgjorde omtrent 36 % av den totale tilførselen til jordbruket, mens resten enten akkumulerte i jord (59 %) eller gikk tapt til vannsystemer (5 %)¹¹.

- Oppsamlingen av fosfor i jorda (~11,5 kt P/år) har en tendens til å bli delvis utilgjengelig for planter og blir delvis skylt ut som avrenning til vannforekomster (~1 kt/år)⁶, der det utgjør en risiko for eutrofiering.
- **Akvakulturnæringen** brukte ~20,4 kt P/år i form av fôringredienser (hovedsakelig soyabønner fra Brasil, men også marine ingredienser) og mikroingredienser (mineralfosfor), som er litt mer enn jordbruket brukte. Av denne tilførselen ble 19 % (~3,8 kt P/år) omdannet til råvarene for akvakulturprodukter, 4 % (~0,8 kt P/år) til innsamlet fiskegjødning, med en antatt effektivitet på 70% for innsamling, og 77% (~15,8 kt P/år) til fiskegjødning som direkte slippes ut i vannforekomsten¹². Fosforutslipp til vann forverres av det faktum at laks, som er en kjøttetende fisk, ikke kan fordøye fosfor i plantebaserte fôringredienser. Av denne grunn tilsettes ekstra mineralfosfor til fôret som mikroingredienser. Gjødning blir for tiden hovedsakelig gjenopprettet i smoltproduksjonsanlegg, som utgjør omtrent 6 % av den totale gjødselproduksjonen.
- Fiskeriene utvant ~12 kt P/år fra vannforekomstene i form av fiskefangst. Dette oppveier delvis den ikke-innsamlede fiskegjødningen fra akvakultur (~15,8 kt P/år) og avrenningen fra jordbruket (~1 kt P/år), noe som resulterer i en nettoakkumulering i vannforekomstene på 4,8 kt P/år. Siden fiskeriene og akvakulturen opererer på forskjellige steder, kan vi ikke konkludere med at fiskeriene oppveier påvirkningen av akvakultur.

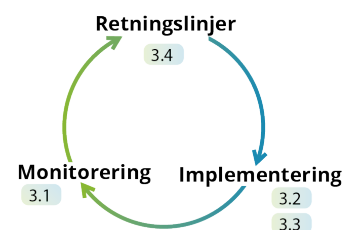
Jordbruk og akvakultur Aktiviteter i Norge krevde import av mineralfosfor og fôringredienser på ~15,5 kt P/år og ~18,4 kt P/år. Bruken av den importerte fosforen resulterte i en akkumulering i jord på ~11,5 kt P/år og en nettostrøm til vannforekomster på 4,8 kt P/år hvis fiskeriene inkluderes som kompensasjon, eller 16,8 kt P/år uten å vurdere kompensasjonen

Bruken av fosfor i akvakultur har nådd nivåer som ligner på dem i jordbruket. Med tanke på målet til den norske industrien om å øke årlig lakseproduksjon fra 1,5 til 5,0 millioner tonn per år innen 2050^{13,14}, vil det norske fosforkretsløpet trolig bli dominert av akvakultur i de kommende tiårene. Dette innebærer en økende eksponering for risikoer knyttet til forstyrrelser i forsyningen av mineralfosfor og utslipp, med mindre det gjøres grunnleggende endringer mot en sirkulær fosforhåndtering.



3 ANBEFALINGER FOR EN SIRKULÆR FOSFORBIOØKONOMI I NORGE

Å etablere en sirkulær bioøkonomi er avgjørende for å beskytte miljøet og næringene som er avhengige av det. Dette er en krevende oppgave som krever **en systemisk læringstilnærming** (Figur 3) og **koordinering** mellom alle sentrale interessenter, inkludert produksjon og forbruk. Her presenterer vi anbefalinger basert på et fosforregnskap for matsystemet, mens forbruket ikke blir adressert. Fysisk regnskap for næringsstoffer gjør det mulig for interessentene å identifisere de mest effektive strategiene (for eksempel gjennom scenarier) og overvåke fremgangen til gjennomførte inngrep.



Figur 3: Systemisk læringstilnærming for etablering av en sirkulær bioøkonomi. Tallene henviser til avsnittene

NØKKELAKTØRER

3.1 Utvikle og opprettholde et «nasjonalt næringsstoffregnskap» for bioøkonomien på ulike romlige skalaer	Miljødirektoratet Statistisk Sentralbyrå Brønnøysundregistrene Mattilsynet Landbruksdirektoratet Fylkesadministrasjoner
3.2 INNGREP PÅ GÅRDSNIVÅ Maksimer utnyttelsen av fosfor i jordbruk og akvakultur og reduser avfall.	Norges Bondelag Norsk Bonde- og Småbrukarlag Sjømat Norge Norsk Landbruksrådgiving
3.3 INNGREP PÅ REGIONALT NIVÅ Utvikle og implementere nye teknologier og praksiser for innsamling, prosessering, handel og bruk av gjødsel og fiskegjødsel. Målet er å produsere høykvalitets resirkulerte gjødselprodukter som er tilpasset behovene til brukerne i Norge og i utlandet.	Norges Fiskeridirektorat Innovasjon Norge Industrielle klynger Bønder Norsk Landbruksrådgiving
3.4 Innføre en reguleringsramme , inkludert finansielle instrumenter, for å fremme et marked for resirkulerte gjødselprodukter og transformere matsystemene.	Miljødirektoratet Landbruksdirektoratet Fiskeridirektoratet Mattilsynet

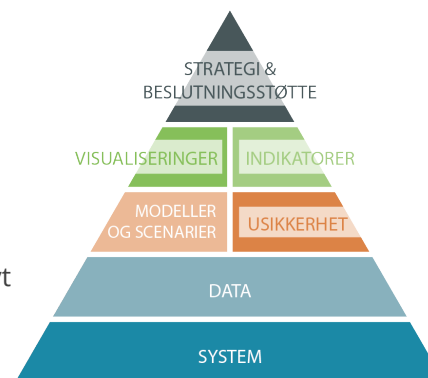
3.1 UTVIKLE OG OPPRETTOLDE EN NASJONAL NÆRINGSSTOFFREGNSKAP

HVORFOR?

Overgangen til en sirkulær bioøkonomi er en kompleks oppgave som påvirker alle aktørene i matkjeden. Endringer foretatt av enkeltaktører kan ha konsekvenser for andre aktører. Å forstå disse systemiske sammenhengene gjennom et næringsstoffregnskap er avgjørende for å anerkjenne potensialet for synergier og unngå uønskede bivirkninger.

HVORDAN?

- Etablere en digital infrastruktur for overvåking av den fysiske dimensjonen av den norske bioøkonomien, inkludert næringsstoffkretsløp (karbon, nitrogen, fosfor) og koblinger med farlige stoffer på ulike nivåer (gårdsnivå, regionalt og nasjonalt): Et nasjonalt næringsstoffregnskapssystem kan tjene som et interaktivt verktøy for å informere om strategier for sirkulær bioøkonomi for private og offentlige interessenter. Ideelt sett bør overvåkingen harmoniseres på internasjonalt nivå for å lette forskning og forståelse av sekundære gjødselmarkeder.



Figur 4: Hierarki av informasjon i et næringsstoffregnskapssystem¹⁵. For mer informasjon se <https://minfuture.eu/>.

- Bruk en eksplisitt systemtilnærming for å informere overvåking og rapportering: Dataene som samles inn og rapporteres i dag, mangler ofte informasjon om dataenes referansepunkter (nederste lag i pyramiden i figur 4). Metadata som definerer målepunktene i en systemkontekst, kan forbedre dataenes robusthet og brukervennlighet (høyere lag i pyramiden).¹⁵
- Bruk næringsstoffregnskapet til å informere beslutninger og planlegging: Bønder kan bruke gårdsnivåets næringsstoffregnskap til å informere om næringsstoffplaner, mens politikere kan bruke aggregerte data til å informere om politikk. En «levende datainfrastruktur» basert på nasjonale statistikker og litteratur bør ideelt sett forbedres og oppdateres av bøndene, noe som vil forbedre analysen på flere nivåer.

BARRIERER

Enheten som eier den digitale infrastrukturen, kan påvirke tilgjengeligheten for andre interessenter.
Konfidensialitetsproblemer kan hindre aktører fra å forplikte seg til og rapportere nøyaktig, noe som kan begrense robustheten.
Insentiver eller reguleringer kan være nødvendige for å oppmuntre private aktører til å engasjere seg i flere rapporteringsaktiviteter.
Bruken av datainfrastrukturen vil kreve ekspertise, spesielt når man laster opp nye data.
Den administrative innsatsen med rapportering kan anses som for høy for industrien

MULIGHETER FOR Å OVERVINNE

Offentlig eierskap til den digitale infrastrukturen kan sikre en balanse mellom tilgjengelighet og konfidensialitet.
En effektiv og brukervennlig datainfrastruktur kan forbedre datakvaliteten og lette gjødsel- og fôringsplaner samt rapportering.
Opplæringsprogrammer i bruk av datainfrastrukturen kan sikre at brukerne har ideell nytte, at systemets kvalitet er garantert, og til slutt at infrastrukturen blir mye brukt.

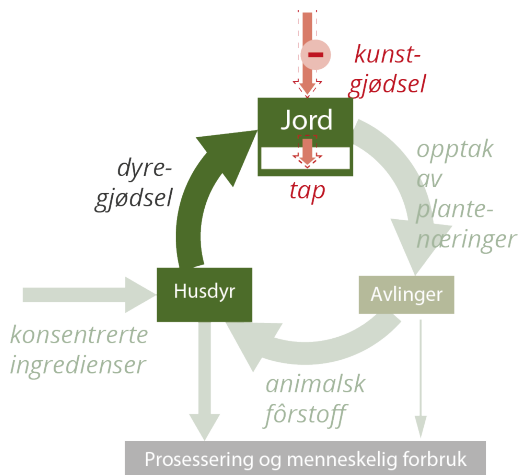
3.2 INNGREP PÅ GÅRDSNIVÅ: minimer tap av fosfor

HVORFOR?

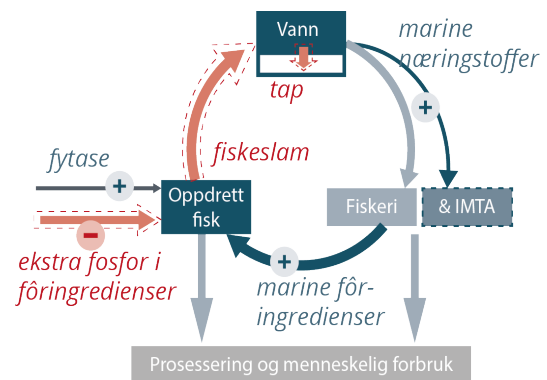
I **landbruket** bidrar flere faktorer til ineffektiv bruk av fosfor: Resirkulerte gjødselstoffer, inkludert gjødsel, har en tendens til å være rike på fosfor, men fattige på nitrogen sammenlignet med plantenes behov. Hvis de blir påført i henhold til deres nitrogeninnhold, som er vanlig praksis, mottar jorda mer fosfor enn plantene kan ta opp, og fosfor akkumuleres i jorda. Sesongavhengighet og området der gjødsel blir påført åkerland, bestemmes ofte av enkelhet i påføring og lagringskapasitet, noe som resulterer i suboptimal gjødsling og forverrer fosforoverskudd i jord. Videre påvirker jordforvaltning, spredningspraksis for gjødsel og hydrologiske forhold sårbarheten for erosjon og avrenning

I **akvakulturnæringen** er det også flere årsaker til fosfortap. Utfordringen med at laks ikke kan fordøye fosfor fra plantebaserte ingredienser, blir for tiden løst ved å tilsette fordøyelige former for fosfor som mikroingrediens i fôret. Dette øker både bruk av primære fosforressurser og tap. Videre er dagens fiskeoppdrett hovedsakelig basert på systemer med åpne merder der fôrtap og fiskenes avføring går tapt til omkringliggende farvann og sjøbunn.

HVORDAN?



Figur 5: Inngrep i dyrproduksjon for å redusere fosfortap.

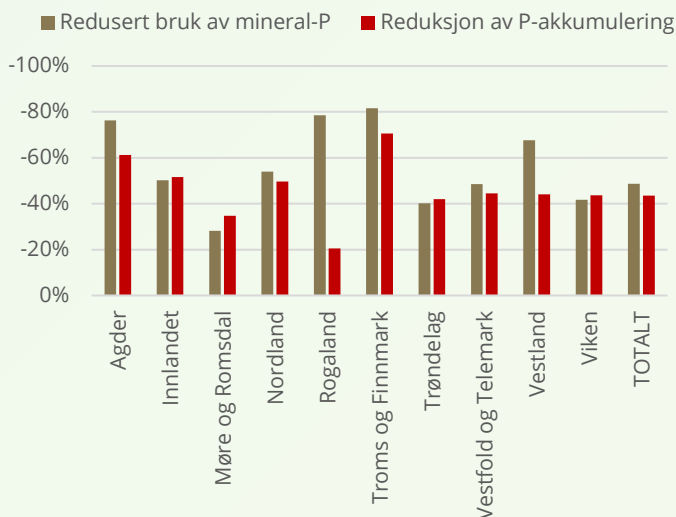


Figur 6: Inngrep i akvakultur for å redusere fosfortap

JORDBRUK

- **Presisjonsforsyning av gjødsel tar hensyn til plantens næringsbehov og jordens næringsforsyning for alle næringsstoffer (N, P, K) og tilpasser gjødselblandingen for å dekke etterspørselen og unngå overskudd.** Når resirkulerte gjødselstoffer brukes, må deres høye innhold av fosfor balanseres med ekstra nitrogenkilder i tråd med plantenes spesifikke krav for å sikre en balansert tilførsel av alle næringsstoffer.
- **Optimaliser sesongavhengigheten for gjødselspåføring:** Gjødselen bør spres i vekstsesongen for å optimalisere plantenes utnyttelse av næringsstoffene. Dette krever tilstrekkelig lagringskapasitet for gjødsel og strengere regulering når spredning er tillatt.

- **Optimaliser den romlige fordelingen av gjødselspåføring:** Gjødsel bør spres over et tilstrekkelig stort område for å unngå overdosering av fosfor. Dette kan kreve at gjødsel må transporteres over lengre avstander eller til områder som er vanskelig å nå. Dette kan derfor kreve egnede infrastrukturer og teknologier for transport og distribusjon¹¹.



Figur 7: Potensialet for reduksjon av mineral-P og akkumulering av P per fylke.

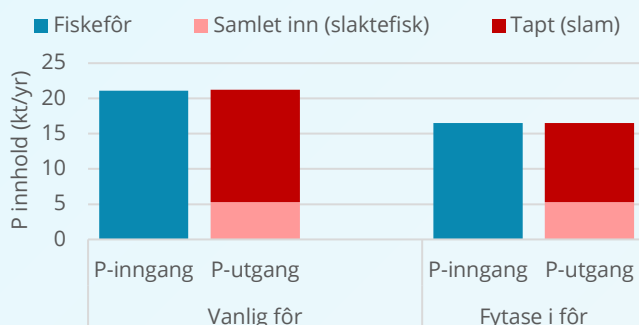
POTENSIAL PÅ GÅRDSNIVÅ FOR Å REDUSERE AVHENGIGHET AV MINERAL-P OG AKKUMULERING AV FOSFOR I JORDA.

Potensialet for gårdsnivåintervensjoner for å redusere bruk av mineral fosfor varierer betydelig etter fylke. For Norge som helhet kunne importen av mineral fosfor reduseres med ~4,4 kt/år (-51%)¹¹.

Potensialet for å redusere akkumulering av fosfor i jorda varierer også etter fylke, med høyere reduksjonspotensial i regioner der gårder kombinerer planteproduksjon og dyreproduksjon. På nasjonalt nivå er reduksjonspotensialet 43 %¹¹.

AKVAKULTUR

- **Fytase i fiskefôr:** Tilsetning av enzymet fytase til fiskefôr kan forbedre tilgjengeligheten av fosfor fra planter¹⁶, noe som muliggjør en reduksjon både i etterspørselen etter mineralt fosfor og utslipp til havet.
- **Modifisere fôringredienser:** Introduksjon av fôringredienser som kan fordøyes effektivt av fisken, for eksempel nordlig krill eller zooplankton, kan også samtidig redusere etterspørselen etter mineralt fosfor og utslipp¹⁷.
- **Integrert multitrofisk akvakultur (IMTA):** Dette er basert på prinsippet om at én art spiser avfallsproduktene til en annen^{18,19}. Fosforutslipp kan fanges opp og brukes av andre marine organismer. Hvis IMTA-produkter brukes til å erstatte jordbruksplanter i fôret, har dette potensial til å redusere både avhengighet av mineral fosfor i fôrproduksjonen og akkumulering i vannet¹².



Figur 8: Effekter på fosforbehov og utslipp etter tilsetning av fytase i fôret.

TILSETNING AV FYTASE TIL FÔRET HAR STORT POTENSIAL FOR Å REDUSERE AVHENGIGHETEN AV MINERAL FOSFOR OG UTSLIPP

Tilsetning av fytase til fôret kan redusere behovet for mineral fosfor i mikroingredienser med opptil ~4,6 kt/år¹². Dette betyr at utslipp av fosfor til omkringliggende farvann også kan reduseres med ~4,6 kt/år, samtidig som den nåværende fiskeproduksjonen opprettholdes¹².

BARRIERER

Mange intervensjoner på gårdsnivå er dyre og kan kreve nye praksiser som kan redusere aksepten deres.

Endring av gjødselpraksis på gårdsnivå kan kreve investeringer i ny infrastruktur for å behandle og spre gjødsel. På den annen side kan etablering av sentraliserte gjødselbehandlingsanlegg redusere behovet for infrastruktur på gården. Investeringer i begge retninger kan forhindre utviklingen av den andre eller resultere i underutnyttede infrastrukturer.

Utfordringer knyttet til dagens fosforhåndtering i akvakultur mottar lite oppmerksomhet og er lavt på den politiske agendaen.

Kostnadene for fytase og nye føringredienser kan hindre deres innlemmelse i fiskefôrblendingen.

Nye føringredienser introduserer risikoen for problemforskyvning til nye områder og trofiske nivåer (f.eks. kan krillbaserte måltider endre økosystemer i polare hav²⁰).

Utrulling av IMTA krever store områder i de norske fjordene, og konkurrerer med allerede eksisterende bruksområder.

IMTA-produksjon krever høy grad av kunnskap om stedets omkringliggende økosystemer. Potensielle problemer knyttet til forstyrrelser med lokal fauna er geografisk avhengige og ikke tilstrekkelig studert.

MULIGHETER FOR Å OVERVINNE

Effektiv fosforressursforvaltning vil sannsynligvis bli økonomisk gunstig i en kontekst med økte priser og nye regulatoriske rammeverk.

Økt bevissthet om betydningen av effektiv bruk av næringsstoffer sammen med økonomiske insentiver kan bidra til en generell optimalisering av ressursforbruket.

Forlengelsestjenester, opplæringsprogrammer og samarbeid med landbruks- og akvakulturinteressenter kan lette adopsjonen av beste praksis for fosforhåndtering.

Behandling av den innsamlede gjødselen i sentraliserte anlegg kan redusere behovet for løsninger for lagring av gjødsel på gården og lette håndteringen av rester.

Deling av infrastruktur, som sentraliserte behandlingsanlegg, kan redusere kostnadene og forbedre den generelle effektiviteten av fosforresirkulering.

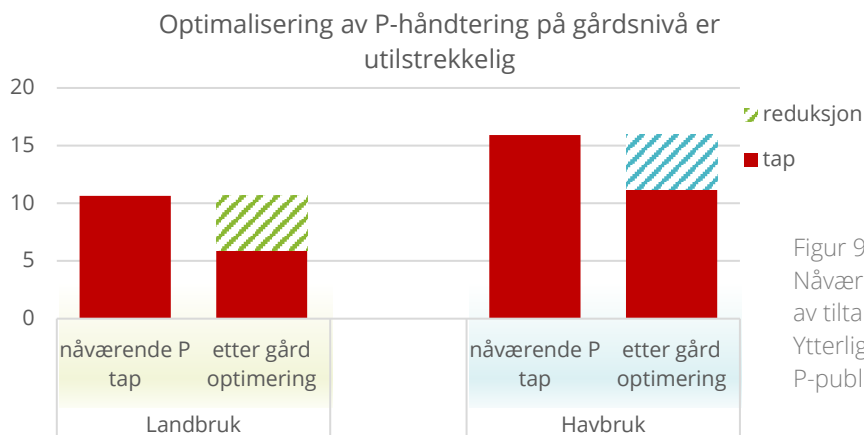
Å konvertere den innsamlede gjødselen og fiskeslammet til høykvalitetsgjødsel med lavt vanninnhold kan redusere behovet for investeringer i ny spredningsteknologi og infrastruktur.

Forskning på effektiv og lavpåvirkende IMTA-utrulling kan potensielt muliggjøre en akvakulturproduksjon med minimale utslipp og lavere importavhengighet.

3.3 INNGREP PÅ REGIONALT NIVÅ: Etablere en infrastruktur for innsamling, behandling og handel med gjødsel og fiskeslam

HVORFOR?

Optimalisering på gårdsnivå er utilstrekkelig for å hindre fosfortap^{11,12} (Figur 7). Årsaken er at noen gårder og regioner har overskudd av sekundært fosfor mens andre har underskudd som dekkes av mineralgjødning. For eksempel har kystområder ofte et stort potensial for gjødningutvinning fra fiskeslam, men kystområder har også tendens til å ha høy dyretetthet^{11,12}, noe som forverrer deres overskudd (Figur 8). Handel med gjødning og fiskeslam kan bidra til å balansere tilbud og etterspørsel.

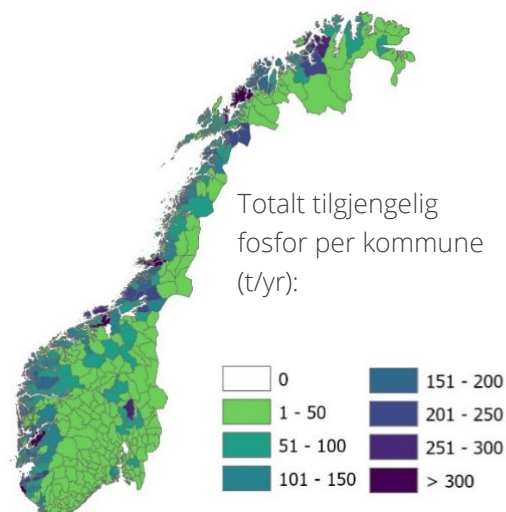


Figur 9: Fosfortap i jordbruk og akvakultur: Nåværende status og etter gjennomføring av tiltakene som diskuteres i avsnitt 3.2. Ytterligere antakelser er diskutert i MIND-P-publikasjoner^{11,12}.

HVORDAN?

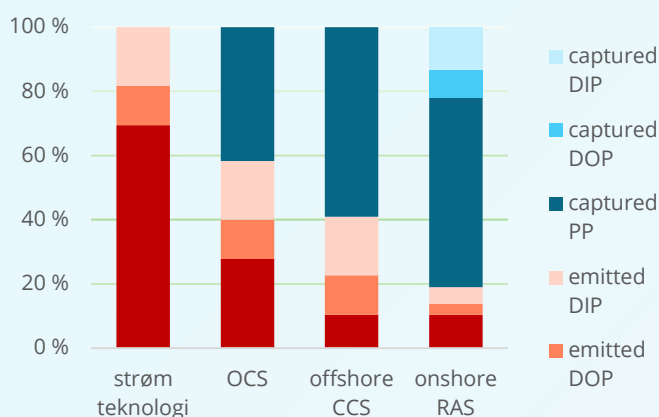
INNFANGING AV FISKESLAM.

- Resirkulerende akvakultursystemer (RAS):**
 Landbaserte systemer, inkludert resirkulerende akvakultursystemer og gjennomstrømningssystemer, som tillater innsamling og behandling av slam. De er egnet for produksjon av smolt og oppdrettsfisk og tillater innsamling av alle former for fosfor (DIP, DOP, PP)*
- Lukkede offshore-beholdningssystemer (CCS):** Ny offshoreteknologi som kontrollerer vanninntak og utslipp. Denne teknologien har potensial til å samle partikulær fosfor (PP).
- Åpne nett mekaniske innsamlingssystemer (OCS):**
 Rensningssystemer som kan installeres i eksisterende åpne merdesystemer. De kan delvis samle partikulært avfall (PP).



Figur 10: Totalt tilgjengelig fosfor fra generert gjødning og fiskeslam.

*DIP: dissolved inorganic phosphorus, DOP: dissolved organic phosphorus, PP: particulate phosphorus



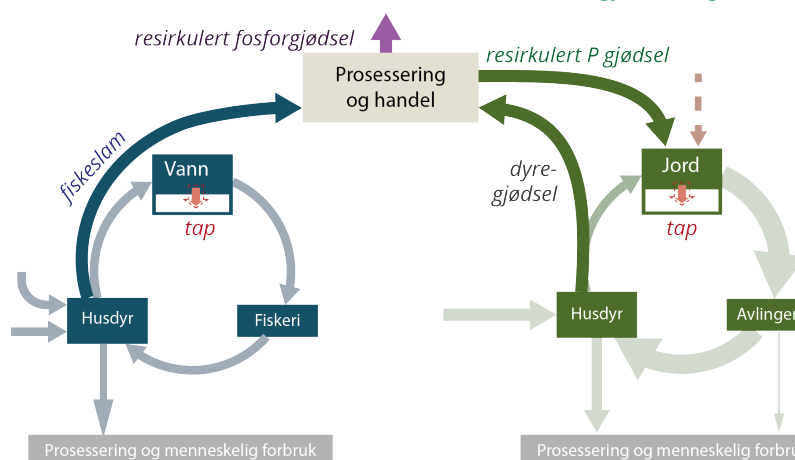
Figur 11: Potensial for innsamling av slam fra ulike strategier.

Innsamlingspotensial fra ulike teknologier⁸

Nåværende bruk av teknologier for innsamling av fiskeslam er begrenset¹⁸. Blant de tre teknologiene har RAS det høyeste innsamlingspotensialet og er den eneste teknologien som kan samle inn alle former for fosfor (DIP, DOP og PP).

Imidlertid krever RAS store landområder, er energikrevende og krever store mengder vann¹⁷, mens CCS og OCS kan implementeres på eksisterende steder.

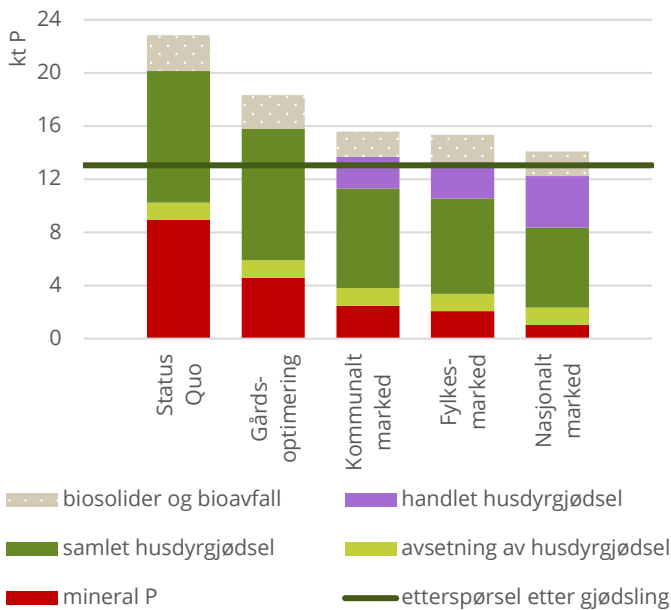
BEHANDLING OG HANDEL MED HØYKVALITETS GJØDSEL (fra gjødsel og fiskeslam)



Figur 12: Inngrep på regionalt nivå for innsamling, behandling og handel med gjødsel og fiskeslam

- Vannfjerning og tørking:** Gjødsel og fiskeslam inneholder mye vann. Avhengig av filtersystemet inneholder innsamlet fiskeslam opptil 95–99,9 % vann. Fjerning av vann er avgjørende for å redusere transportkostnader, lette påføring på jordet og unngå skader på jorden på grunn av tunge maskiner.
- Rensing og avsaltning av slam:** Fiskeslam fra saltvannsoppdrett inneholder betydelige mengder salt. Salt er en uønsket komponent i resirkulerte gjødselmidler fordi det forstyrrer opptaket av nitrogen, reduserer vekst og hemmer plantereproduksjonen. Dette er spesielt kritisk i områder med lite regn, der salt kan hope seg opp i jorden. Fiskeslam kan også inneholde høye nivåer av tungmetaller som sink og kadmium. Disse har en tendens til å hope seg opp i jorden over tid, kan hemme plantevekst og kan komme inn i næringskjeden, noe som er bekymringsfullt for menneskers helse. Ytterligere risikoer er knyttet til bakterier og smittsomme parasitter som kan skade planter, dyr og mennesker. Å unngå tilstedeværelsen av disse komponentene i gjødselmidler er viktig for å sikre langsiktig jordfruktbarhet og helse.
- Balansering av næringsstoffkomposisjonen i gjenvunnet gjødsel:** Fiskeslam, som de fleste andre sekundære gjødselstyper, har en tendens til å være rik på fosfor, men fattig på nitrogen og kalium i forhold til plantenes næringsbehov. I tillegg har fosforet i fiskeslam en tendens til å være dårlig tilgjengelig for planter²¹. Å balansere næringsinnholdet i tråd med plantenes behov og øke tilgjengeligheten av fosfor for plantene er avgjørende for å unngå overgjødning.

Etterspørsel etter mineralgjødning med fosfor under ulike strategier for handel med husdyrgjødsel

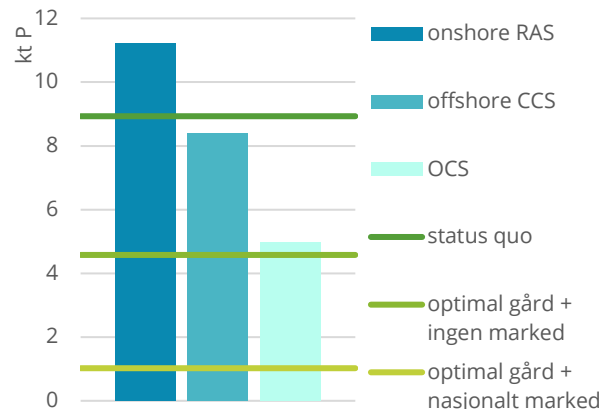


Gjødselhåndteringsstrategier på gårdsnivå kan redusere den agronomiske etterspørselen etter mineralgjødning med fosfor i Norge med opptil 50 %¹¹. Kombinering av optimalisering på gårdsnivå med en infrastruktur for gjødningbehandling og en nasjonal handel med gjenvunnet gjødning kan redusere etterspørselen etter mineralgjødning med fosfor til 1 kt P/år, samtidig som man unngår overgjødning. Merk at denne balansen ikke inkluderer fiskeslam.

Figur 13: Fosforgjødselstrategier for Norge¹¹. Mengdene er modellert som gjennomsnitt per år for perioden 2017-19.

Bruk av fiskeslam som fosforgjødsel i norsk landbruk:

Norsk havbruk har potensial til å samle inn slam som inneholder ~5-11 kt P/år, avhengig av innsamlingssystemet. Etterspørselen etter mineralgjødning er for øyeblikket ~9 kt/år, men den kan reduseres til ~1 kt/år hvis landbruket optimaliserer bruk av gjødning på nasjonalt nivå. Derfor må bruken av fiskeslam i norsk landbruk koordineres nøye med landbruksstrategier for å unngå opphopning av fosfor i jorda. I tillegg må alternative bruksområder for fiskeslam som gjødning utforskes. Dette inkluderer internasjonale markeder for gjenvunnet gjødning eller produksjon av Lithium Iron Phosphate (LFP) batterier. Strategien som velges for bruk av gjødning, fiskeslam og annet organisk avfall vil ha betydelig innvirkning på størrelse, omfang og geografisk fordeling av prosesseringsinfrastrukturen som skal utvikles.



Figur 14: Potensiell tilførsel av fosfor fra innsamling av fiskeslam sammenlignet med etterspørselen etter mineralgjødning for forskjellige strategier for bruk av gjødning i Norge^{11, 12}. Mengdene for akvakultur er modellert basert på produksjonsnivåene for 2021, mens mengdene for landbruk er gjennomsnitt for 2017-19.

BARRIERER

RAS krever store investeringer, bruker mye areal og forbruker mye ferskvannsenergi under drift.

MULIGHETER FOR Å OVERVINNE

Forskning på plassering av anlegg og teknikker for innsamling av slam er nødvendige for å identifisere stedsspesifikke strategier.

Det innsamlede slammet må fraktes til behandlingsanlegg, som krever store infrastrukturer. Disse varierer for landbaserte og offshore-løsninger.

Alvorlige værhendelser som sterke vinder, strømmer eller bølger kan begrense utrulling av CCS og åpne nettinnsamlingsystemer²³.

Det største potensialet for produksjon av sekundær fosforgjødsel i Norge ligger langs kysten, som er langt fra områdene med det høyeste gjødselbehovet¹¹.

Bønder som for tiden bruker **mineral fosfor**, må overbevises om at sekundære gjødsler er trygge, effektive, praktiske, og ikke øker kostnadene deres.

Norges potensial for å gjenopprette resirkulert fosforgjødsel er betydelig høyere enn etterspørselen etter fosforgjødsel^{11,12}.

Eksport av resirkulert gjødsel til land med mindre strenge miljøstandarder kan innebære risiko for underlegen behandling, ineffektiv bruk og forurensning i utlandet²⁴.

Forskning og utvikling av høykvalitets resirkulerte gjødselprodukter kan øke tilliten til resirkulerte gjødselprodukter og skape nye markeder.

Høykvalitetsgjødsel som kan skreddersys til bøndenes behov, kan øke aksepten.

Et regulatorisk rammeverk for resirkulert gjødsel kan lette handel og ansvarlig bruk av disse ressursene.

En salgsforpliktelse for gjødselleverandører om å selge en gitt prosentandel resirkulert gjødsel, kan skape et jevnt spillfelt for resirkulert gjødsel.

Etablering av internasjonale handelsforbindelser for resirkulert gjødsel kan bidra til å unngå akkumulering av fosfor i norsk jord- og vannsystem.

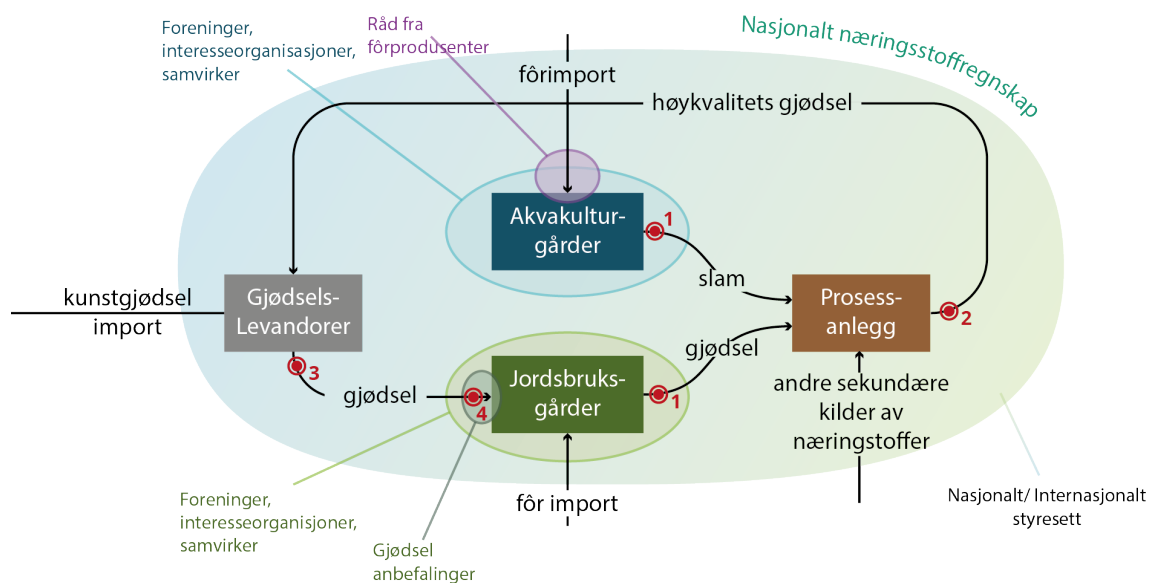
3.4 VEDTA ET REGULATORISK RAMMEVERK FOR OVERGANG TIL EN SIRKULÆR FOSFORØKONOMI

HVORFOR?

Overgangen til en sirkulær fosforøkonomi møter mange utfordringer. Å overvinne disse barrierene er en utfordring der aktører med ulike interesser må koordinere handlingene sine. En dårlig koordinert overgang kan føre til dårlig utnyttede og dermed kostbare infrastrukturer, produkter med variabel kvalitet, usikkerhet blant brukerne og dårlig aksept av gjenvunne gjødselprodukter; kort sagt: dyrere og mindre effektive løsninger. Et regulatorisk rammeverk kan lette en kritisk grad av koordinering for å sikre høy kvalitet på produkter og fungerende markeder samtidig som investeringskostnadene holdes nede. Organiske gjødselprodukter har en økonomisk ulempe sammenlignet med primærgjødsel, spesielt når det kreves høykvalitets- eller rene gjenvunne gjødselprodukter. Det regulatoriske rammeverket må derfor inkludere finansieringsinstrumenter for å skape like konkurransevilkår for alle typer gjødsel.

HVORDAN?

Et regelverk kan fastsette krav og retningslinjer for å oppmuntre interessenter til å ta i bruk teknologier og praksiser som forbedrer ressursutnyttelsen. Å involvere nøkkelinteressentene (inkludert matprodusenter, organisasjoner innen jordbruk og akvakultur, miljøeksperter) i utviklingen av rammeverket kan lette koordineringen ved å etablere gjennomsiktighet og tillit. Samarbeid kan videre lettes gjennom det nasjonale næringsstoffregnskapssystemet (se 3.1). Det kan brukes, i kombinasjon med modeller, (i) for å teste effektiviteten av alternative strategier, (ii) for å overvåke effektiviteten av gjennomførte strategier, og (iii) for å forbedre rammeverket i en iterativ prosess. Rammeverket har som mål å etablere nasjonale markeder for gjenvunne gjødselprodukter ved å fastsette forpliktelser i de beskrevne tiltakene (1-4) nedenfor.



Figur 15: Nøkkelinteressenter (bokser), deres forbindelser (piler), og kritiske handlinger (røde prikker) i et regelverk for en sirkulær bioøkonomi.

1 Akvakultur- og jordbruksgårder: Definere maksimale nivåer for utslipp til vann og akkumulering i jord kan redusere forurensning og ressursavfall samtidig som det sikrer tilgjengeligheten av sekundære ressurser. Dette ville være en indirekte innsamlingsforpliktelse.

2 Gjødsel- og fiskeslambehandling: Krav om spesifikke kvalitetsstandarder for resirkulert gjødsel produsert av gjødsel- og fiskeslambehandlere kan bygge tillit, øke etterspørselen og beskytte miljøkvaliteten.

3 Gjødselleverandører: En forpliktelse for gjødselleverandører til å selge en gitt prosentandel av resirkulert gjødsel kan stimulere produksjonen av høykvalitets resirkulert gjødsel. Andelen må justeres i tråd med økende produksjon av sekundære gjødsel for å sikre behandling og bruk av innsamlede fosforressurser.

4 Jordbruksrådgivere: *Opplæring* av rådgivere om optimal bruk av interne, kjøpte resirkulerte og primære gjødselmidler er avgjørende for å skape like vilkår for alle gjødselprodukter.

4 Referanser

1. Stephen M. Jasinski. *Mineral commodity summaries 2023. Mineral commodity summaries 2023* vol. 2023 132–133 <http://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023> (2023).
2. European Commission. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS On the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative. (2014).
3. MIND-P. MIND-P. *MIND-P* <https://mindp.indecol.no/>.
4. Franklin D. Roosevelt. Message to Congress on Phosphates for Soil Fertility. *The American Presidency Project* <https://www.presidency.ucsb.edu/documents/message-congress-phosphates-for-soil-fertility> (1938).
5. Rockström, J. *et al.* A safe operating space for humanity. *Nature* **461**, 472–475 (2009).
6. Nesme, T. & Withers, P. J. A. Sustainable strategies towards a phosphorus circular economy. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* **104**, 259–264 (2016).
7. Desmidt, E. *et al.* Global Phosphorus Scarcity and Full-Scale P-Recovery Techniques: A Review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **45**, 336–384 (2015).
8. Carpenter, S. R. & Bennett, E. M. Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus. *Environ. Res. Lett.* **6**, 014009 (2011).
9. Hamilton, H. A. *et al.* Investigating Cross-Sectoral Synergies through Integrated Aquaculture, Fisheries, and Agriculture Phosphorus Assessments: A Case Study of Norway. *J. Ind. Ecol.* **20**, 867–881 (2016).
10. Hamilton, H. A. *et al.* Recycling potential of secondary phosphorus resources as assessed by integrating substance flow analysis and plant-availability. *Sci. Total Environ.* **575**, 1546–1555 (2017).
11. Las Heras Hernández, M. *et al.* Farm-level MFA of the agricultural phosphorus cycle in Norway: informing resource efficiency strategies at different regional scales. *Planned* (2023).
12. Pandit, A. *et al.* Spatially and temporally disaggregated mapping of the phosphorus cycle in Norwegian aquaculture for informing circular bioeconomy strategies. *Planned*.
13. Norsk Industri. Veikart for havbruksnæringen. (2017).
14. Sjømat Norge. Aquaculture 2030 – Think globally, act locally. (2017).
15. Daniel Beat Müller *et al.* Maps of the physical economy to inform sustainability strategies. in *HANDBOOK OF RECYCLING: state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientist* (ELSEVIER - HEALTH SCIENCE, 2023).
16. Kumar, V., Sinha, A. K., Makkar, H. P. S., De Boeck, G. & Becker, K. Phytate and phytase in fish nutrition. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* **96**, 335–364 (2012).
17. Olsen, R. E. *et al.* Can mesopelagic mixed layers be used as feed sources for salmon aquaculture? *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **180**, 104722 (2020).
18. Ellis, J. & Tiller, R. Conceptualizing future scenarios of integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in the Norwegian salmon industry. *Mar. Policy* **104**, 198–209 (2019).
19. Wang, X., Olsen, L., Reitan, K. & Olsen, Y. Discharge of nutrient wastes from salmon farms: Environmental effects, and potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquac. Environ. Interact.* **2**, 267–283 (2012).
20. Almås, K. A. *et al.* *Bærekraftig fôr til norsk laks*. <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2758913/Rapport+B%C3%A6rekraftig+f%C3%B4r+til+norsk+laks.+2020.pdf?sequence=1>.
21. Brod, E. & Øgaard, A. F. Closing global P cycles: The effect of dewatered fish sludge and manure solids as P fertiliser. *Waste Manag.* **135**, 190–198 (2021).
22. Ahmed, N. & Turchini, G. M. Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. *J. Clean. Prod.* **297**, 126604 (2021).
23. Clarke, R., Maitland, D. & Bostock, J. Technical Considerations of closed containment sea pen production for some life stages of salmonids. 169 (2018).
24. Schröder, J. J., Smit, A. L. & Rosemarin, A. *Sustainable use of phosphorus*. <https://edepot.wur.nl/163942> (2010).