



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2025 60 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Test av sensorteknologi for registrering av variasjon i plantetilgjengelig nitrogen i jord

Testing of sensor technology for detecting variation in
plant-available Nitrogen in soil

Ida Aabogen Haugaard

Master i miljøvitenskap

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som en avslutning på studieprogrammet i miljøvitenskap, ved fakultetet MINA ved NMBU, og markerer avslutningen på fem lærerike år.

Oppgaven inngår i forskningsprosjektet ProteinBar, som har som formål å øke proteininnholdet i norsk fôrbygg og dermed redusere behovet for importert protein, til fordel for økt norsk selvforsyning. Prosjektet er finansiert av Norges forskningsråd og er et samarbeid mellom fakultetene REAKTEK, BIOVIT og MINA ved NMBU, samt NIBIO, Graminor, Yara Norge, Felleskjøpet Fôrutvikling, Felleskjøpet Agri, Agdir og Norsk Landbruksrådgiving.

Denne oppgaven er én av to masteroppgaver i arbeidspakke 2 i ProteinBar. Sindre Stokke og jeg, sammen med våre veiledere Trine A. Sogn og Ingunn Burud, har delt kunnskap på tvers av faglig bakgrunn. Vi har sammen forsøkt å gi et godt innblikk i multispektrale sensorers anvendbarhet i norsk landbruk. Takk til både Sindre Stokke og Ingunn Burud for et godt samarbeid og gode innspill.

En stor takk til Trine A. Sogn for all hjelp og veiledning i arbeidet med denne oppgaven. Du har gitt meg frihet og tydelige forventninger – noe som har vært til stor hjelp og motivasjon. Takk for at du har vært en verdifull diskusjonspartner i både store og små spørsmål, i og utenfor arbeidet med oppgaven.

I denne oppgaven har det vært en betydelig mengde felt- og laboratoriumsarbeid. Jeg vil derfor rette en stor takk til alle feltteknikerne som har hjulpet meg på Kjerringjordet, og til alle lab-teknikerne som har veiledet meg i analysearbeidet. Jeg vil særlig takke Tore Krogstad for opplæring og tilrettelegging i bruk av nitratselektiv elektrode.

Jeg vil også rette en takk til Yara Norge for tildeling av deres masterstipend og for at dere hadde tiltro til at min oppgave ville kunne bidra positivt til norsk landbruk.

Til jentene - dere har vært uvurderlige, både sosialt og faglig. Uten dere ville ikke tiden på Ås vært den samme.

Til sist, en stor takk til Magnus - min aller beste støttespiller.

Ås, 11.05.2025

Lda Aa. Havggaard

Sammendrag

Effektiv nitrogenforvaltning er avgjørende for å sikre gode avlinger i norsk landbruk, og redusere uønsket tap av nitrogen til miljøet. Bruk av teknologi til presisjonsgjødsling kan bidra til å øke nitrogenutnyttelseeffektiviteten. I markedet er det en «jungel» av sensorer som kan være egnet, men de mangler testing på uavhengige data under norske forhold. Formålet med denne undersøkelsen er å vurdere på hvorvidt ulike sensorer kan gi bonden pålitelig informasjon om variasjoner i plantevekst og innhold av plantetilgjengelig nitrogen i jord gjennom en vekstsesong.

Undersøkelsen er gjennomført på to forsøksfelt, Pilotfeltet og E166, på NMBU, Ås. Det ble tatt jordprøver og gjort registreringer med ulike sensorer gjennom vekstsesongen 2024. Jordprøvene ble analysert for plantetilgjengelig nitrogen med standard metode og en enklere, alternativ metode basert på en ioneselektiv elektrode. Resultatene fra disse metodene ble sammenlignet med målinger fra ulike sensorer: Yara N-sensor, dronen DJI Mavic Multispectral, Agdirs Soil Scouts, NPK-sensor fra ComWin, og porevannsanalyser fra AgriSenze.

Sensorene viste varierende resultater avhengig av nitrogengjødsling (behandling), nitrogenkonsentrasjon i jorda og plantenes vekststadium. De spektrale metodene (Yara N-Sensor og bilder fra DJI Mavic Multispectral) gav best samsvar med variasjoner i det plantetilgjengelige nitrogeninnholdet i jorda målt med standard metode.

Denne undersøkelsen tydeliggjør behovet for testing av sensorteknologi til uavhengige data fra norsk jord og dyrkingsforhold. Undersøkelsen understreker også viktigheten av godt og tett samarbeid mellom forskning og anvendt agronomi. For at teknologien kan utvikles videre, og god testing og verifisering sikres, må det være god forståelse både av måleresultater, effekt og praktisk nytte.

Abstract

Knowledge-based management of Nitrogen is crucial in Norwegian agriculture to ensure good crop yields and to reduce unwanted loss of Nitrogen to the environment. Use of new technology for registration of variation in plant and soil N status and precise fertilization can improve the Nitrogen use efficiency. The market offers a “jungle” of potential sensors, however they are all generally lacking testing and verification to independent data reflecting Norwegian soils and plant growth conditions. The purpose of this study is to assess whether different sensors can provide farmers with reliable and valuable information about variations in plant growth and soil content of plant-available Nitrogen throughout a growing season.

The study was conducted at two experimental fields, Pilotfeltet and E166, at NMBU, Ås. Soil samples were taken, and measurements by various sensors were performed throughout the 2024 growing season. The soil samples were analysed for plant-available Nitrogen, using both the standard method and a simpler, alternative method based on an ion selective electrode. The data from these methods were compared with measurements from the sensors: Yara N-Sensor, DJI Mavic Multispectral drone, Agdir's Soil Scouts, NPK-sensor from ComWin, and porewater analysis from AgriSenze.

The sensors showed varying results depending on Nitrogen fertilization (treatment), Nitrogen concentration in the soil, and the growth stage of the plants. The spectral methods (Yara N-Sensor and images from the DJI Mavic Multispectral) best reflected the variations in plant-available Nitrogen content in the soil, as measured by the standard method.

This study highlights the need for testing and verification of available sensor technology with independent data from Norwegian soils and growing conditions. Furthermore, it also emphasizes the importance of close collaboration between research and applied agronomy. For sensor technology to be further developed and properly tested and verified, the need for solid understanding of measurement results, their effects, and practical application are crucial.

Innholdsfortegnelse

<i>Forord</i>	<i>i</i>
<i>Sammendrag</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
<i>Innholdsfortegnelse</i>	<i>iv</i>
1 Innledning	1
2 Bakgrunn og teori	3
2.1 Nitrogenets kretsløp.....	3
2.2 Plantetilgjengelig nitrogen.....	6
2.3 Nitrogengjødsel.....	6
2.4 Nitrogenutnyttelseeffektivitet.....	7
2.5 Miljøkonsekvenser av nitrogen.....	7
2.6 Utfordringer med bestemmelse av nitrogen.....	7
2.7 Presisjonsgjødsling.....	8
2.7.1 Fjernmåling.....	9
2.7.2 Nærmåling.....	10
3 Materialer og metode	13
3.1 Forsøksdesign og områdebeskrivelse.....	13
3.1.1 E166.....	14
3.1.2 Pilotfeltet.....	16
3.2 Metoder for innsamling av data.....	18
3.2.1 Jordprøver.....	18
3.2.2 Yara N-Sensor.....	19
3.2.3 AgriSenze.....	20
3.2.4 Agdir – Soil Scout.....	21
3.2.5 ComWin NPK-sensor.....	22
3.2.6 Multispektrale bilder.....	23
3.3 Jordanalyse.....	24
3.3.1 Forbehandling av prøvene.....	24
3.3.2 Tørrstoff og glødetap.....	24
3.3.3 Bestemmelse av nitrat og ammonium i KCl-ekstrakt.....	25
3.3.4 Bestemmelse av nitrat med selektiv elektrode.....	26
3.4 Bruk av kunstig intelligens.....	26
3.5 Statistiske analyser.....	27
3.5.1 Datagrunnlaget.....	27
3.5.2 Regresjonsanalyse.....	27

4	Resultater	29
4.1	<i>Sesongvariasjon i jordas innhold av mineral N.....</i>	29
4.1.1	Pilotfeltet	29
4.1.2	E166.....	30
4.2	<i>Sensorer for måling av N i planter og jord</i>	35
4.2.1	Yara N-Sensor	36
4.2.2	ComWin NPK-sensor	38
4.2.3	AgriSenze	38
4.3	<i>Multispektrale bilder</i>	40
4.3.1	Spektrale bånd.....	41
4.3.2	Vegetasjonsindekser	43
4.4	<i>Sensormålinger av andre jordegenskaper.....</i>	48
5	Diskusjon.....	50
5.1	<i>Sesongvariasjon i plantetilgjengelig N og gjødselplanlegging.....</i>	50
5.2	<i>Nitrat med NSE sammenlignet med KCl/FIA.</i>	51
5.3	Yara N-Sensor	52
5.4	Vegetasjonsindekser og spektrale bånd.....	53
5.5	Agdir – Soil Scout	54
5.6	ComWin NPK-sensor.....	54
5.7	AgriSenze.....	55
5.8	Oppsummering.....	55
6	Konklusjon	57
7	Videre forskning	58
8	Referanser	59
9	Vedlegg.....	63
9.1	<i>Vedlegg 1 – Tidsseriegrafer.....</i>	63
9.2	<i>Vedlegg 2 - Regresjonsplot</i>	64
9.3	<i>Vedlegg 3 – Boksplot spektrale data</i>	65
9.4	<i>Vedlegg 4 – Heatmap</i>	66

1 Innledning

Nitrogen (N) er et essensielt næringsstoff for alt liv, og er nødvendig for å sikre høye avlingsnivåer og god kvalitet på mat- og fôrplanter i det norske landbruket. Samtidig kan N være et betydelig problem for miljø og klima når N blir i overskudd og kommer på avveie. Det har blitt gjennomført en rekke tiltak for å redusere N-avrenning til vann og N-utslipp til atmosfæren, men norsk landbruk bidrar bl.a. fremdeles med over 40% av nitrogentilførselen til Oslofjorden (Engesmo et al., 2024). Denne nitrogentilførselen har bidratt til økologiske problemer med f.eks. algeoppblomstring. Dette er en av årsakene til at det er viktig å ytterligere optimalisere N-utnyttelseseffektiviteten (NUE) og dermed minimere N-avrenningen fra landbruket.

Skal vi øke selvforsyningsgraden til 50 % i Norge (Meld. St. 11 (2023-2024)), samtidig som vi reduserer påvirkning på natur og miljø (Meld. St. 35 (2023–2024)), er god nitrogenforvaltning viktig. Nitrogenutnyttelseseffektivitet handler om å minimere overskudd og tap av nitrogen, samtidig som avlingsnivået opprettholdes. Dette krever at nitrogengjødsel tilføres med presisjon, nøyaktig tilpasset vekstmediet, avlingstype og vekstforholdene, ofte helt ned på centimeternivå. For å oppnå dette kreves mye kunnskap om plantenes vekst og N-opptak, samt om innholdet og biotilgjengeligheten av N i jord.

I dag finnes en rekke teknologiske hjelpemidler som kan bidra til presisjonsgjødsling. Disse er f.eks. Global Positioning system (GPS), satellitter, værprognoser og sensorteknologi. Tross tilbudet beskriver Seniorforsker Audun Korsæth ved Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) det slik: «Dagens gårdbrukere står overfor en «jungel» av digitale tilbud, og risikoen for feilinvesteringer i ny teknologi og programvare kan virke større enn noensinne. De færreste løsningene som tilbys kan vise til uavhengig kvalitets-sikring eller veldokumenterte tilpasninger til norske særegenheter. Nøytrale råd om bruk av nye teknologiske løsninger er mangelvare.» (NIBIO, u.å.-b). Det er altså et stort behov for å teste og vurdere kvaliteten av tilgjengelige sensorteknologier, f.eks. sammenheng mellom digitale registreringer og reelt innhold av plantetilgjengelig N i jord, spesielt under norske forhold.

Denne oppgaven inngår i forskningsprosjektet ProteinBar, som har som overordnet mål å øke proteininnholdet i norsk fôrbygg, for å dermed kunne redusere behovet for import av proteinråvarer og øke den norske selvforsyningen. ProteinBar er finansiert av Norges forskningsråd og er et tverrfaglig samarbeid mellom fakultetene REALTEK, BIOVIT og MINA på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), og videre med NIBIO, Graminor, Felleskjøpet Fôrutvikling, Felleskjøpet Agri, Agdir, Norsk Landbruksrådgivning og Yara Norge. Oppgaven inngår i arbeidspakke 2 som omhandler sensorteknologi og gjødslingsstrategier.

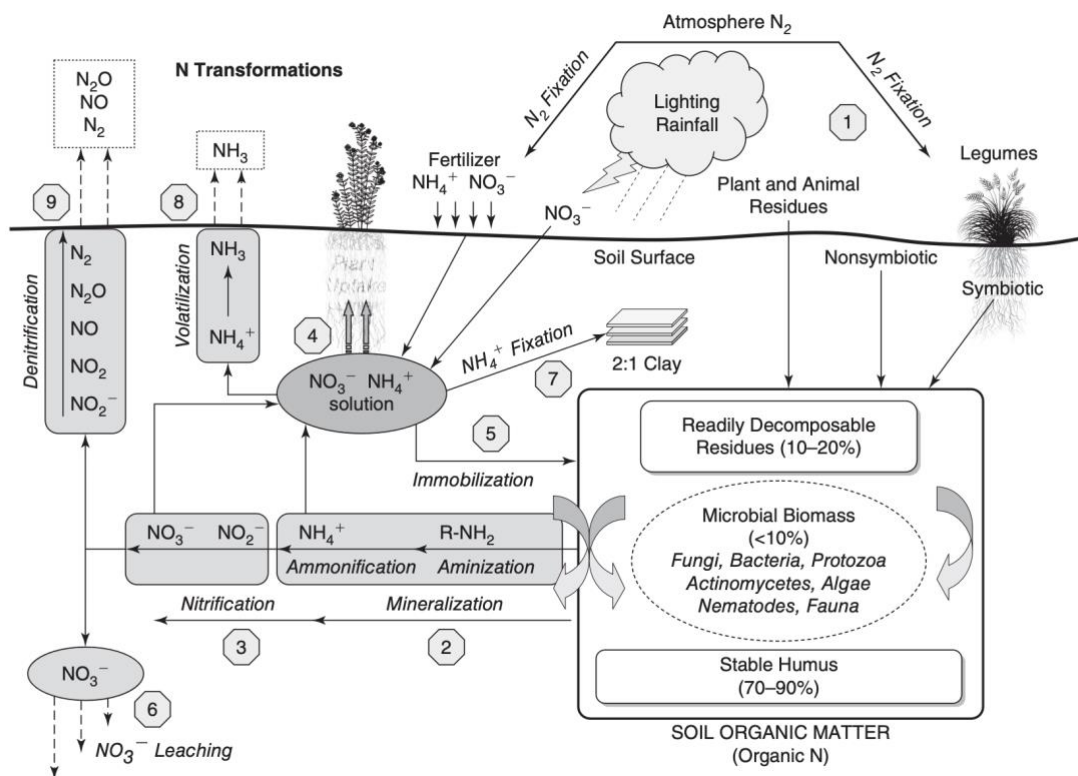
Problemstillingen som undersøkes i denne oppgaven er: ***Kan sensorer gi bonden pålitelig informasjon om variasjoner i plantevekst og innholdet av plantetilgjengelig nitrogen i jorda gjennom en vekstsesong?*** Hvis ja, hvis sensoren er pålitelig, kan bonden justere og forbedre presisjonen i nitrogen-gjødslingen ved bruk av den.

For å besvare dette har jordprøver fra to forsøksfelt med bygg blitt samlet inn gjennom vekstsesongen i 2024. Prøvene ble analysert for plantetilgjengelig N v.hj.a. to ulike metoder. I nederste del av matjordsjiktet ble det gravd ned sensorer fra Agdir som kontinuerlig måler endringer i temperatur, fuktighet og ledningsevne. Forsøksfeltene ble ukentlig avbildet v.hj.a. dronen DJI Mavic Multispectral. I vekstperioden fra busking fram til skyting ble det gjennomført registreringer med Yaras håndholdte N-sensor. Porevann ble samlet inn v.hj.a. et lysimeter fra AgriSenze og videre analysert på deres laboratorium med deres nitratsensor. I tillegg anvendes en ComWin NPK-sensor for måling av pH, ledningsevne, nitrogen, fosfor og kalium i jord. Det vil bli forsøkt funnet sammenhenger mellom målt plantetilgjengelig N i jord og endringer registrert av de ulike sensorverktøyene.

2 Bakgrunn og teori

2.1 Nitrogenets kretsløp

Nitrogenets kretsløp (Figur 2-1) beskriver hvordan N blir omdannet og transportert frem og tilbake mellom luft, jord og vann. Dette kretsløpet bestemmer også i hvilken tilstandsform N foreligger, og om det er reaktivt eller ikke (inert). I kretsløpet inngår en rekke transformasjoner. De viktigste er mineralisering, nitrifikasjon, immobilisering, utlekking, fiksering, denitrifikasjon og tap i gassform.



Figur 2-1 Nitrogenets kretsløp. Figur er hentet fra (Havlin et al., 2016).

Atmosfæren består av omkring 78% nitrogengass (N_2) (Brady & Weil, 2013; Havlin et al., 2016). N_2 er en ikke-reaktiv, inert gass. Atomene i molekylet N_2 er sterkt bundet sammen med trippelbindinger, og det krever svært mye energi for å bryte opp denne bindingen (Brady & Weil, 2013). N_2 kan likevel omdannes til reaktivt nitrogen gjennom mikrobiell fiksering, eller fiksering gjennom lynnedslag (Brady & Weil, 2013). I tillegg kan N_2 gjøres reaktivt gjennom industriell fiksering, f.eks. Haber-Bosch-metoden.

Organisk materiale (OM) er hovedkilden til N i de fleste naturlige økosystemer. Tilførselen av plantetilgjengelig N i jord styres av mineralisering av OM. Mineralisering er omdanningen av organisk N til uorganisk, mineralsk N (Brady &

Weil, 2013; Havlin et al., 2016). Mineraliseringsprosessen skjer gjennom at heterotrofe mikroorganismer bryter ned organiske molekyler for å benytte seg av karbonet. Denne prosessen resulterer da hovedsakelig i dannelselse av ammonium (NH_4^+) (Brady & Weil, 2013).

Jordas fysiske egenskaper som fuktighet og temperatur er med på å bestemme vilkårene for mikrobiell aktivitet (Havlin et al., 2016). Dette sammen med mengde OM i jord er med på å styre hvor mye N som blir mineralisert og dermed gjort plantetilgjengelig i et jordsmonn. Organisk materiale i jord inneholder omtrent 5% N, og igjennom en vekstsesong blir omtrent 1 – 3 % av dette omdannet til uorganisk N, dvs. mineralisert og plantetilgjengelig (Brady & Weil, 2013; Havlin et al., 2016). For å få nok mineral N til å sikre god plantevekst, er det da gunstig å ha en høy andel av OM i jorda og ha optimale temperatur og fuktighetsforhold. Dette bidrar til god mineralisering og et godt basisinnhold av plantetilgjengelig N gjennom vekstsesongen (Havlin et al., 2016). Det er mulig å estimere mineralisering av N basert på innhold av OM i jord, og det er grunnlaget for korreksjonstabellene for nitrogengjødsling (NIBIO, u.å.-a).

Prosessen som styrer forholdet mellom ammonium (NH_4^+) og nitrat (NO_3^-) i jorda, er nitrifikasjon. Nitrifikasjon er en mikrobiell prosess hvor NH_4^+ blir oksidert til NO_3^- (Brady & Weil, 2013; Havlin et al., 2016). Denne prosessen er også avhengig av de fysiske jordegenskapene temperatur og fuktighet. Siden nitrifikasjonsprosessen er en oksidasjon er den avhengig av aerobe forhold (Brady & Weil, 2013; Havlin et al., 2016). Det vil si at det er nødvendig med luftfylte porer og dermed god oksygentilgang i jorda.

Immobilisering forsinker og reduserer dannelsen av mineral N, dvs. mineraliseringen. Immobilisering er prosessen hvor organisk N, N i form av aminer, blir spist av mikroorganismene og lagret i mikrobiell biomasse (Brady & Weil, 2013; Havlin et al., 2016). Det som styrer om det vil være en netto mineralisering i jorda, eller en netto immobilisering, er forholdet mellom karbon (C) og N i det organiske materialet. Er forholdet C:N høyt, dvs. over 20-25 (20:1 - 25:1) vil vi få en immobilisering (Havlin et al., 2016). Det vil si at mikroorganismene som bryter ned det organiske materialet må selv benytte seg av nitrogenet, og det vil ikke være et overskudd som kan frigjøres som plantetilgjengelig mineral N til jordsmonnet. Er C:N under ca. 20:1 vil det bli en netto mineralisering, og en frigjøring av uorganisk, mineral N i jordsmonnet. Etter hvert som vi får en økt nedbryting av organisk materiale vil C:N forholdet minke, og det vil bli en netto mineralisering (Havlin et al., 2016). I agronomisk planteproduksjon er sjeldent immobilisering et stort problem for plantenes N-forsyning da det ofte blir tilført organisk gjødsel med et lavt C:N forhold, eller mineralgjødsel (f.eks. NH_4NO_3). Tilførsel av N-gjødsel vil, totalt sett, kraftig redusere C:N forholdet i jordsmonnet (Havlin et al., 2016).

Nitrogen kan transporteres ut fra jordsmonnet gjennom fordamping, f.eks. som amoniakk-gass (NH_3). Under mineralisering, blir det produsert en liten andel NH_3 , men dette er ikke den største kilden til NH_3 gass (Brady & Weil, 2013). Likevekten mellom NH_3 og NH_4^+ er styrt av fysiske jordegenskaper som temperatur og fuktighet, men også av pH (Brady & Weil, 2013). Generelt vil høy pH, kombinert med høy fuktighet og temperatur øke tap av NH_3 som gass (Havlin et al., 2016). Skal en minimere N-tap gjennom fordampning er det spesielt viktig å tilføre gjødseltyper med høyt innhold av NH_4^+ , som f.eks. husdyrgjødsel, på korrekt måte (Havlin et al., 2016). Korrekt måte innebærer rask nedmolling, og spredning under kjølige, vindstille og fuktige værforhold (Skøien et al., 2011).

Ammonium (NH_4^+) er et positivt ladet ion, og kan derfor bli bundet til negativt ladde partikkeloverflater i jordsmonnet. Denne prosessen kalles kationbinding. Ammonium kan også bindes mellom sjiktpakker i leirmineraler. Denne bindingen er ikke avhengig av ladning og kalles ammoniumfiksering. I hovedsak er det organisk materiale og leirpartikler som har negativ overflate. I jordsmonn med negativ overflateladning, kan derfor NH_4^+ bli bundet til leirpartikler, og plantetilgjengeligheten av NH_4^+ reduseres (Havlin et al., 2016). Når NH_4^+ er fiksert, vil det også kunne hindre omdanning til nitrat.

I motsetning til NH_4^+ vil ikke NO_3^- binde seg til partikkeloverflatene i jord. Den strømmer fritt i jordas porevann (Brady & Weil, 2013). Nitrat er derfor svært mobilt, og dersom det ikke tas opp av plantene vil det raskt transporteres nedover i jordprofilen og ut av jorda med drensvannet. Dette er lite gunstig da tap av N til vann har negative konsekvenser for miljø og bondens økonomi. I nedbørsfeltet til Oslofjorden har nitrogenavrenning fra landbruket et stort fokus (Walden et al., 2015).

Nitrat (NO_3^-) kan bli omdannet tilbake til N_2 gass gjennom denitrifikasjon. Denitrifikasjon er en mikrobiell prosess som foregår under anaerobe, dvs. vannmettede og oksygenfattige, forhold (Havlin et al., 2016). Denitrifikasjon foregår gjennom en rekke reaksjoner og hvis den ikke er fullstendig kan en få utslipp av diverse NO_x gasser og lystgass (N_2O). Lystgass er en klimagass med høyt oppvarmingspotensiale. En ufullstendig denitrifikasjon er derfor lite gunstig. Faktorer som påvirker hvorvidt denitrifikasjonen er fullstendig, er tilgjengelighet av NO_3^- , fuktighet (oksygentilgang), pH og temperatur (Havlin et al., 2016).

2.2 Plantetilgjengelig nitrogen

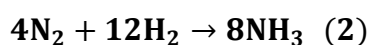
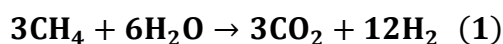
Planter tar i hovedsak opp de uorganiske formene for N, NO_3^- og NH_4^+ , men også aminosyrer og urea kan tas opp av noen planter (Courty et al., 2015; Nedrebø & Nome, 1972). Nitrat er mobilt i jord og tas dermed lettere opp enn NH_4^+ . I planten bli nitratet redusert til NH_4^+ og videre til amin v.h.j.a. nitratreduktase og nitritt reduktase (Havlin et al., 2016). Omdanning av ammonium til amin krever mindre energi (Courty et al., 2015).

Som nevnt, er N et essensielt makronæringsstoff for planter, og er viktig for dannelse av proteiner og klorofyll. Mangel på N vil gi dårlig vekst, svake og gulnende planter med utilstrekkelig proteininnhold (Brady & Weil, 2013). For mye N er imidlertid heller ikke gunstig da dette kan gi økt fare for legde i avlingene og/eller sein modning (Brady & Weil, 2013). For best mulig avling, og best økonomi for bonden, er det viktig å tilføre tilstrekkelig, men ikke for mye N. Tilførsel av for mye N har også negative konsekvenser for miljø og klima (Brady & Weil, 2013; Walday et al., 2015).

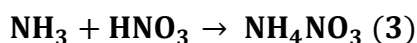
2.3 Nitrogengjødsel

For å optimalisere avling tilføres N som gjødsel til agronomiske planteproduksjonssystemer, ofte som mineralgjødsel eller husdyrgjødsel. Mineralgjødsel, dannet ved bruk av Haber-Bosch prosessen har vært svært viktig får å øke matproduksjonen på verdensbasis (Zhang et al., 2015).

Haber-Bosch produserer ammoniakk (NH_3) ved forbrenning av metan (CH_4) for å produsere hydrogengass (H_2) (1), som blir kombinert med N_2 under høyt trykk og varme (2) (Schlesinger & Bernhardt, 2020; Smil, 2004). Fra NH_3 kan det videre bli dannet en rekke typer mineralgjødsel som f.eks. ammoniumsulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) og urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) (Havlin et al., 2016).



I Norge benyttes i hovedsak ammoniumnitrat (NH_4NO_3) som mineralgjødsel. Ammoniumnitrat blir dannet ved at NH_3 blir oksidert med salpetersyre (HNO_3) (3) (Havlin et al., 2016). Ammoniumnitrat er vannløselig, som betyr at plantene raskt får tilgjengelig NH_4^+ og NO_3^- (Nedrebø & Nome, 1972).



Husdyrgjødsel inneholder en varierende mengde organisk N og NH_4^+ , bl.a. avhengig av hvilke dyr gjødselen stammer fra. Nitrogeninnholdet i husdyrgjødsel er i hovedsak organisk, men vil bli mineralisert av mikrober, både i gjødselen og i jorda (Nedrebø & Nome, 1972).

2.4 Nitrogenutnyttelseseffektivitet

Nitrogen er altså en viktig innsatsfaktor i landbruket, og er helt sentral for å oppnå gode avlinger med god kvalitet. Samtidig er N en utfordring for klima og miljø, og det blir da viktig å begrense tap av N til vann og luft. Når N tilføres som gjødsel snakker en ofte om nitrogenutnyttelseseffektivitet (NUE). Nitrogenutnyttelseseffektivitet er den andelen av nitrogenet vi tilfører systemet som havner i produktet som produseres (Bechmann et al., 2023; Zhang et al., 2015). Det er ønskelig å ha en høy NUE, da dette betyr et lavt overskudd av mineral N når vekstsesongen er over, og dermed en reduksjon i risiko for nitrogentap til miljøet, som f.eks. i form av nitratavrenning og lystgassutslipp (Zhang et al., 2015).

Bruk av ny sensorteknologi er blitt sett på som en av løsningene for å oppnå økt NUE (Zhang et al., 2015). Colaço & Bramley rapporter om mellom 5 og 45% reduksjon i totalt forbruk av N-gjødsel ved bruk av sensorer i gjødsling uten at det medfører noen reduksjon i avling av betydning (Colaço & Bramley, 2018). Dette betyr at det er et stort potensial innen presisjonsgjødsling og sensorteknologi for økt NUE, men at det er stor variasjon i effektiviteten og kvaliteten av målingene til ulike teknologier.

2.5 Miljøkonsekvenser av nitrogen

Nitrogenutslipp fra landbruket er relativt høyt og er en krevende miljøutfordring. Nitrogen på avveie kan skape problemer for økosystemer både på land, i vann og i luft. De viktigste kildene til N-utslipp fra landbruket er NH_3 - og N_2O -gassutslipp til atmosfæren, og avrenning av NO_3^- til vann. Årlig slippes det ut omtrent 24 000 tonn NH_3 i Norge, hvorav 81% stammer fra husdyrgjødsel og 13% fra mineralgjødsel (Bechmann et al., 2023). I tillegg slippes det ut omtrent 7800 tonn NO_x og 3900 tonn N_2O (Bechmann et al., 2023; SSB, u.å.). Den totale avrenningen av N til norskekysten er beregnet til å være omtrent 28 900 tonn NO_3^- - N (Guerrero & Sample, 2021). Ifølge resultatene fra undersøkelsene til program for jord- og vannovervåkning (JOVA), er omtrent 80 % av det totale nitrogentapet fra landbruksjord avrenning i form av NO_3^- (Bechmann et al., 2024). Dette avhenger selvsagt av driftsform.

2.6 Utfordringer med bestemmelse av nitrogen

Analyser av nitrogen i jord er ressurskrevende. Metodene som benyttes i dag er både tidkrevende å gjennomføre, instrumentene er dyre og det er begrenset med automatikk i prosessen (FOSS, 2008a; FOSS, 2008b). I landbruket er det i dag lovpålagt å gjennomføre uttak av jordprøver hvert 4. – 8. år (Forskrift om gjødselplanlegging, 1999). Analysene som må utføres for å tilfredsstille kravene i forskriften, blir gjort på tørket jord. Det blir ikke analysert innhold av nitrogen direkte, men via analyse av organisk materiale (moldklasse) kan mengden organisk nitrogen

estimeres (Eurofins, u.å). Analyse av mineral N (NH_4^+ og NO_3^-) er mulig å bestille, men den må gjøres på fryst prøve og er kostbar (Eurofins, u.å). Innholdet og fordelingen av plantetilgjengelig N forandrer seg mye gjennom vekstsesongen og et analyseresultat for plantetilgjengelig N i ett prøvepunkt ved ett tidspunkt, gir lite reell verdi for bonden på tidspunktet da prøveresultatene foreligger. Da burde vedkommende ha justert sin gjødslingsstrategi for lenge siden for å kunne optimalisere NUE.

På tross av de analytiske utfordringene er det viktig å kunne gi gode estimater på innholdet av plantetilgjengelige N i jord. Dette er spesielt viktig når en skal utvikle gode gjødslingsstrategier for å maksimere avling, minimere avrenning av N til nærliggende vannforekomster og lystgassutslippet til atmosfæren. I dag korrigeres N-gjødslingsbehov etter korreksjonstabeller utviklet av NIBIO (NIBIO, u.å.-a). Disse korreksjonstabellene baserer seg på faktorer som moldklasse og forgrødeeffekt (NIBIO, u.å.-a).

2.7 Presisjongjødsling

Presisjonsjordbruk, og spesielt presisjongjødsling av nitrogen, har som formål å øke NUE og dermed hindre avrenning og gassutslipp av N. Dette skal oppnås ved å tildele det nitrogenet planten nøyaktig behøver til rett tid og på rett sted (Miao et al., 2022). Dette er med på å øke NUE uten å redusere avlingsnivå (Bechmann et al., 2023). I tillegg kan variabel gjødsling øke kvaliteten til avlingene, ved å kunne maksimere avlingspotensiale for ulike deler av skiftet (Hedley, 2015). Det en ønsker er en effektiv og nøyaktig måling av plantetilgjengelig N i jord eller hva som er tatt opp i planter. Denne målingen vil så bidra til optimal estimering av om gjødslingsbehovet gjennom vekstsesongen (Miao et al., 2022).

Det skjer en kontinuerlig og rask utvikling av sensorer og verktøy for registrering av næringsstatus eller egenskaper i jord og planter. Slike verktøy er blitt svært attraktive siden de tradisjonelle jordprøvene gir begrenset informasjon og da har et begrenset potensial knyttet til variabel og presis gjødsling. En utfordring med den raske utviklingen, og det voksende antallet sensorer på markedet, er at det ofte er mangel på utprøving og testing på uavhengige data, og tilstrekkelig informasjon om metode som blir benyttet i målingene (NIBIO, u.å.-b).

Ofte deler en sensorer for registrering av plante- eller jordegenskaper inn i to hovedgrupper; fjernmåling (remote sensing) og nærmåling (proximal sensing) (Bochtis, 2022; Najdenko et al., 2024).

2.7.1 Fjernmåling

Remote sensing, eller fjernmåling innebærer innsamling av data fra jordoverflaten uten fysisk kontakt med planter eller jord, v.h.j.a. sensorer. Slike sensorer er ofte spektrale og baserer seg på bilder eller refleksjon fra jord eller planter, og de er ofte montert på drone (UAV – unmanned aerial vehicles), fly eller satellitter (Bochtis, 2022). Denne teknologien har et stort potensiale for bruk innen presisjonslandbruk, da den kan bidra til effektiv overvåkning av plantevekst. Data fra slike sensorer kan være et nyttig hjelpemiddel for f.eks. presisjonsgjødsling (Wang et al., 2025).

Sensorene som benyttes i fjernmåling fanger opp den elektromagnetiske strålingen som reflekteres fra jordoverflaten og vegetasjonen (Bochtis, 2022). Det finnes en rekke slike sensorer og de har ulik oppløsning og fanger opp ulike spekter. Rød-Grønn-Blå-sensorer (RGB-sensorer), vanlige kameraer, fanger opp det synlige lyset fra det røde, grønne og blå spekteret. Multispektrale sensorer fanger også opp det synlige lyset, men i tillegg nær infrarødt (NIR) lys. Hyperspektrale sensorer er de mest komplekse og kan registrere refleksjonen fra en rekke bølgelengder, helt ned til 4nm (Bochtis, 2022).

Refleksjonsdata fra sensorene kan benyttes til å beregne en rekke vegetasjonsindekser (VI). Ulike VI-er er utviklet for å si noe om spesifikke egenskaper til planter og kan benyttes til f.eks. å si noe om sykdommer, ugress, eller for å estimere avling (Wang et al., 2025). Disse VI-ene beregnes fra reflektansen i ulike spektralbånd, og kan korrelere med egenskaper som biomasse eller klorofyllinnhold (Farella et al., 2022). På bakgrunn av dette kan verdier fra ulike VI-er brukes til indirekte å kunne si noe om innholdet av N i jord. En av de mest brukte VI-ene er den normaliserte vegetasjonsindeksen, NDVI, som blir beregnet ut ifra reflektansen i rødt og nær infrarødt lys. NDVI opererer på en skala fra -1 til 1 og gir indikasjoner på plantenes helse og mengde biomasse (Bochtis, 2022). Informasjon fra VI-er kan benyttes til å lage såkalte tildelingsfiler, som kan f.eks. benyttes til presisjonsgjødsling.

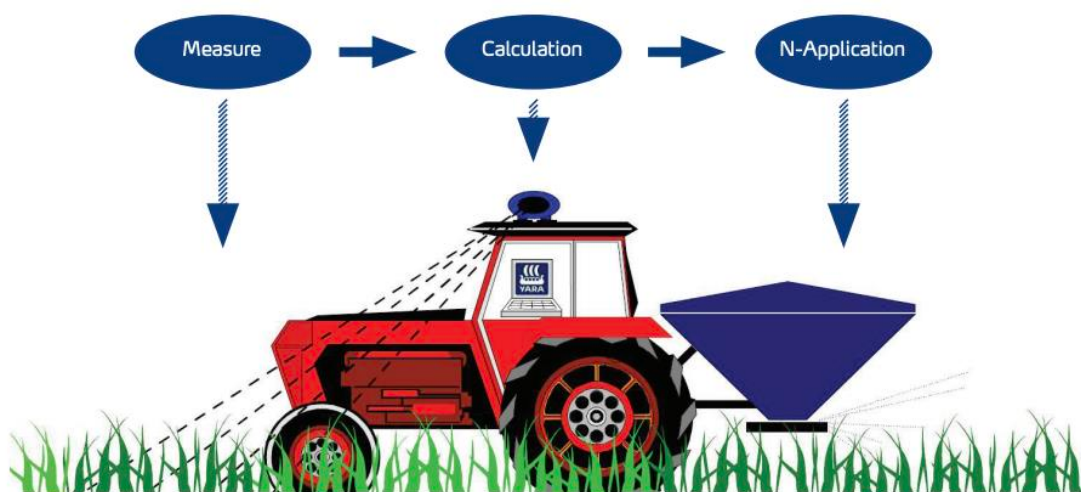
Som nevnt innebærer fjernmåling også data fra satellitter. Yara har utviklet et verktøy som heter Atfarm, hvor en benytter satellittbilder til å gi informasjon om skiftene på et gårdsbruk. Ved hjelp av Atfarm er det mulig å beregne og utføre variabel gjødsling. I løsningen vil du få NDVI-kart, kart med estimert N-opptak, og optimaliserte biomassekart. Disse kartene baserer seg på algoritmene bak deres N-sensor. En slik satellittløsning er sensitiv for skydekke, og kvaliteten på bildene og hyppigheten av fotograferingen vil avhenge av skydekket. I Atfarm er det mulig å lage tildelingsfiler som da kan brukes til å fordele gjødsel variabelt på et skifte ut ifra det varierende nitrogenbehovet plantene har innad på et skifte (Yara Norge, u.å.-b; Yara Norge, u.å.-c).

2.7.2 Nærmåling

Nærmåling innebærer sensor-registreringer gjort på jord eller planter innenfor 2 m. I nærmålinger er spennet i metoder brukt i sensorene svært varierende. Nærmåling kan innebære spektrale sensorer, som Yara N-sensor, eller elektrokjemiske sensorer som ioneselektive elektroder. Nærmåling kan altså innebære både inngripende, i kontakt med planter og jord, og ikke inngripende metoder.

Yara N-Sensor

Yara N-Sensor er et verktøy som kontinuerlig, basert på registreringer av refleksjon fra plantene, beregner nitrogenopptak i planter og tildeler gjødsel basert på det. Sensoren registrerer refleksjonen fra åkeren i spekteret for synlig lys og nær infrarødt lys (400 - 900nm) (Figur 2-2). Systemet beregner N-opptaket i biomassen basert på refleksjonen, og tildeler deretter gjødsel etter behovet (Bochtis, 2022). Dette systemet gjør det mulig å tildele gjødsel variabelt, basert på den individuelle plantens faktiske behov. I senere vekststadier (etter skyting), f.eks. ved en eventuell proteingjødsling, vil det være mulig å velge å ikke tildele gjødsel til områder med dårlig vekst, da det kan være andre faktorer enn N-mangel som begrenser veksten (Yara Norge, u.å.-d).



Figur 2-2 Konseptillustrasjon av Yara N-Sensor hentet Yara N-Sensor brukermanual (Yara, u.å.).

Yara har også en håndholdt versjon av N-Sensor. Denne sensoren er utviklet for bruk i forskning (ruteforsøk) og rådgivning (Yara, 2019). Registreringer med håndholdt N-Sensor vil gi en sensor nitrogen-verdi (SN-verdi) som er et estimat på mengde N tatt opp i biomassen i kg per hektar. Håndholdt Yara N-Sensor har blitt benyttet av for å lage N-prognoser i Norge. N-prognosene er informasjon om kornplantenes nitrogenopptak underveis i sesongen fra ulike lokaliteter i Norge, og blir publisert på

Yara Norge sine nettsider. Dette arbeidet blir gjennomført sammen med NIBIO og Norsk Landbruksrådgivning. Disse N-prognosene er ment å være et hjelpemiddel for planlegging og gjennomføring av delgjødsling, da bønder kan bruke disse verdiene til å avgjøre når og hvor mye gjødsel som skal tilføres gjennom en sesong (Yara Norge, u.å.-a).

Det er dokumentert at Yara N-Sensor kan bidra til å øke kvaliteten på avlingene, og gi en avlingsgevinst på omtrent 2,4% i vårhvete og 2% for bygg (Korsæth et al., 2019; Söderström et al., 2004). Bruk av N-Sensor skal også ha bidratt til en redusert N-avrenning på 0,6 og 0,3 kg N per dekar for vårhvete og bygg (Bechmann et al., 2023; Korsæth et al., 2019).

Elektrokjemiske sensorer

Det finnes en rekke elektrokjemiske sensorer som kan benyttes til å bestemme innhold av ulike ioner i vann. Elektrokjemisk deteksjon registrerer en kjemisk endring som oppstår ved en elektrode når det skjer en reduksjon eller oksidasjon. Det elektriske signalet som oppstår, blir da målt. Slik bestemmelse kan f.eks. være potensiometrisk, eller voltametrisk (Alahi & Mukhopadhyay, 2018).

I potensiometrisk bestemmelse benyttes ofte ioneselektiv elektrode (ISE) (Alahi & Mukhopadhyay, 2018). Potensiometrisk bestemmelse med ISE er basert på måling av spenningsforskjeller, eller potensialforskjeller, mellom en ionespesifikk elektrode og en referanselektrode. ISE kan f.eks. ha en membran som kun lar det spesifikke ionet det skal måles på, her nitrat, passere. Spenningsforskjellen mellom den ionespesifikke elektroden og referanselektroden blir benyttet til å beregne konsentrasjonen. Slike ISE-målinger er raske og kan gi gode resultater, men den kan påvirkes av konkurranse med andre ioner, og er generelt mindre presis ved lave konsentrasjoner. Det er flere studier som viser til gode resultater med bruk av ulike ISE-er (Kim et al., 2007; Najdenko et al., 2024; Øien & Selmer-Olsen, 1969). Nøyaktigheten vil selvfølgelig variere avhengig av type og leverandør, samt konsentrasjon. En ulempe med slike sensorer er at de må kalibreres regelmessig, og det kreves en del kompetanse og erfaring for å kunne gjennomføre pålitelige analyser.

I voltrametrisk bestemmelse måles elektrisk strøm mens spenningen varieres over tid. Ionet, her nitrat, reduseres ved en elektrode når en påfører spenning, og strømmen som da registreres er proporsjonal med nitratkonsentrasjonen i prøven. I slik analyse benyttes ofte en arbeidselektrode, som er der selve reduksjonen skjer, en referanselektrode med stabil spenning, og en motelektrode som lukker kretsen (Alahi & Mukhopadhyay, 2018). I AgriSenze sin nitratsensor benyttes voltrametrisk bestemmelse. AgriSenze benytter også en standard addisjonsmetode for kalibrering. I kalibreringen tilsettes kjente mengder med nitrat til prøven (pers.kom, Sindre Sjøpstad, AgriSenze).

Geoelektriske konduktivitetssensorer

Geoelektriske sensorer kan benyttes til å måle jordas elektriske ledningsevne (EC). Slike sensorer kan f.eks. virke ved at to eller flere elektroder er i kontakt med jord, og det sendes en svak strøm mellom disse. Endringer i strømstyrken registreres, og den vil da gi informasjon om EC. Elektrisk ledningsevne påvirkes av ulike jordegenskaper som f.eks. innhold av vann og næringsstoffer (Corwin & Lesch, 2005). Målinger av EC gir derfor informasjon om konsentrasjon av salter som nitrat, ammonium, kalium og fosfat, samt pH (Dattatreya et al., 2024; Najdenko et al., 2024).

Agdir har utviklet en nettbasert løsning med kontinuerlig overvåkning av jordegenskaper med den geoelektriske konduktivitetssensoren «Soil Scout». Soil Scout sensoren graves ned i jordprofilet, på ønsket dyp, og blir liggende der gjennom hele vekstsesongen. Sammen med de geoelektriske EC-målingene, registrerer sensorene også vanninnhold og temperatur. Med Agdirs nettløsning fås en kontinuerlig overvåkning av endringer i EC, vanninnhold og vannbalanse, samt temperatur.

ComWin NPK-sensor er en konduktivitetmåler, som også skal kunne gi verdier for N, fosfor (P), kalium (K), pH, vanninnhold, temperatur og EC. Uten at det er dokumentert, ser det ut som denne sensoren baseres på korrelasjoner mellom EC og de andre parameterne. Teorien bak og beregningsgrunnlaget for parameterne denne sensoren gir data på, er ikke dokumentert.

3 Materialer og metode

3.1 Forsøksdesign og områdebeskrivelse

Innsamling av jordprøver og feltregistreringer med sensorer, ble gjennomført på to forsøksfelt på Kjerringjordet, rett ved NMBU, campus Ås (Figur 3-1). Forsøksfeltene vil videre bli omtalt som *Pilotfeltet* og *E166*.



Figur 3-1 Oversiktsbilde som viser beliggenheten av feltene E166 og Pilotarealet ved forsøksområdet Kjerringjordet ved NMBU, campus Ås. Kartutklippet er hentet fra Norgeskart (Norgeskart 2025).

3.1.1 E166

E166 er et felt hvor det foregår et forsøk på langtidsvirkninger av ulike organiske gjødseltyper. Forsøket ble etablert i 2014, og har 6 ulike gjødslingsbehandlinger og en kontroll (ugjødslet). Hver behandling, samt kontroll, har tre gjentak. Feltet pløyes ikke, men harves årlig etter tilførsel av gjødsel. I vekstsesongen 2024 ble det dyrket Annika 2-radsbygg. Jorda i forsøksfeltet er en gleysol, en siltig leittleire (Kilden - Jordsmonn 2025). Jorda har en tekstur bestående av 23% leire, 55% silt og 22% sand.

I denne undersøkelsen ble det gjort registreringer og tatt jordprøver fra rutene behandlet med husdyrgjødsel (rute nr. 6, 24 og 39) og mineralgjødsel (rute nr. 9, 18 og 28), samt de ugjødslede kontrollrutene (rute nr. 13, 20 og 31). Se Figur 3-3 for oversiktsbilde over ruteoppsett. I disse rutene er det gravd ned en Soil Scout sensor fra Agdir. Rutene tildelt husdyrgjødsel er behandlet med 3t/daa husdyrgjødsel (HDG) fra Ås gård + 5 kg N /daa gitt som OPTI-KAS 27-0-0 (Figur 3-2). Rutene tildelt mineralgjødsel var tildelt 10 kg N /daa gitt som Fullgjødsel 22-3-20 (Figur 3-2). De ugjødslede rutene har da ikke blitt tildelt noe N etter feltet ble etablert. Oversikt over glødetap for de ulike rutene sortert etter behandling finnes i Tabell 3-1.

Tabell 3-1 Oversikt over glødetap for de utvalgte forsøksrutene ved E166.

Behandling	Rute nr.	Glødetap %
Ugjødslet	13	5,8
	20	6,3
	31	7,4
HDG fra Ås Gård	6	7,2
	24	6,4
	39	6,8
Mineralgjødsel	9	5,9
	18	6,5
	28	7,5

- 1 **Ugjødslet**
- 2 **Mineralgjødse** 10 kg N/daa (som Fullgjødse 22-3-10)
- 3 **HDG fra Ås Gård** 3 t/daa + 5 kg N (som OPTI-KAS 27-0-0)
- 4 **Biorest fra Lindum** 3 t/daa
- 5 **Kloakkslam hvert 5. år,**
som Ledd 2 de andre årene 10 kg N/daa (som Fullgjødse 22-3-10)
- 6 **Grøn 8K NPK 8-3-5 hønsegjødse** 10 kg N/daa (tilsvarer 125 kg gjødse/daa)
- 7 **Kompostert hestegjødse** 3,8 m³ + 5 kg N (som OPTI-KAS 27-0-0)

Figur 3-2 Oversikt over behandlinger for langtidsforsøk for organiske gjødsetyper, E166. I dette studiet er rutene med behandling 1, 2 og 3 benyttet.

Rutenr.:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Rep.1													
Ledd nr.:	4	7	3	5	6	3	7	6	2	2	5	4	1
Rutenr.:	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Rep.2													
Ledd nr.:	4	6	5	7	2	4	1	7	3	5	3	2	6
Rutenr.:	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Rep.3													
Ledd nr.:	3	2	7	4	1	2	6	4	5	6	7	5	3

Figur 3-3 Oversiktsbilde over ruteoppsett for langtidsforsøk for organiske gjødsetyper, E166. Behandling (ledd nr.) er beskrevet i fargekoder som er forklart i Figur 3-2.

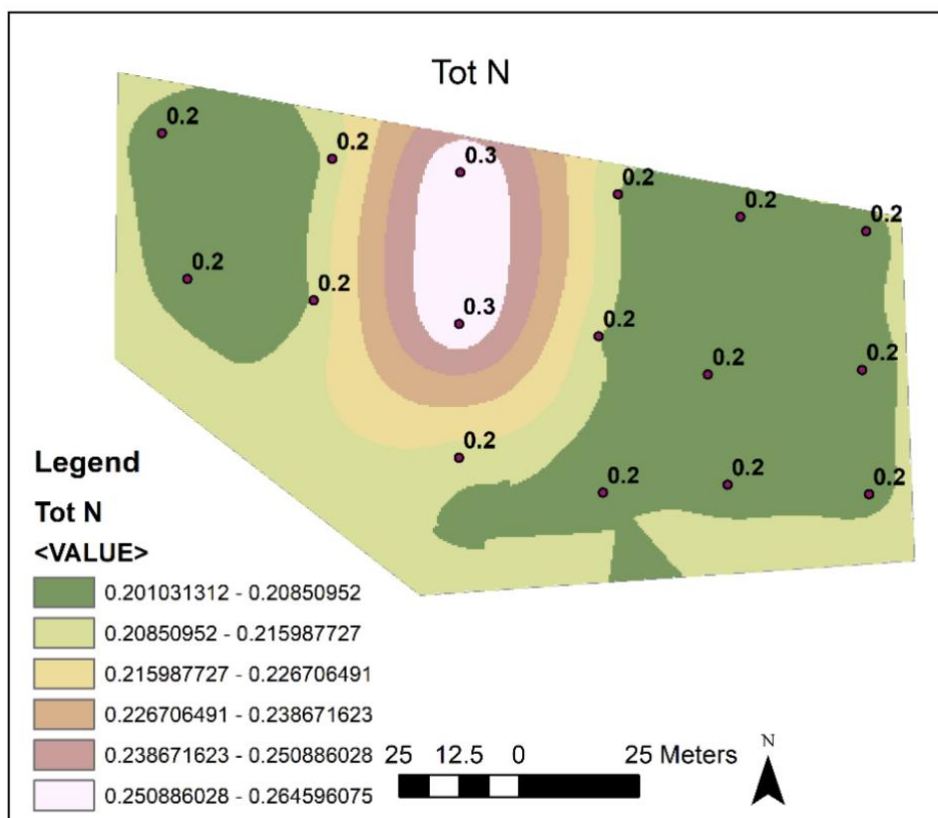
3.1.2 Pilotfeltet

Pilotfeltet benyttes i sammenheng med prosjektet ProteinBar til bl.a. utprøving av ulike sensorteknologi. Området har tidligere blitt benyttet til jordarbeiding- og gjødslingsforsøk. Også i pilotfeltet ble det i vekstsesongen 2024 dyrket 2-radsbygg, Annika. Hele feltet har blitt behandlet likt og det ble den 24.april tilført 13 kg N per dekar som Fullgjødsel 22-3-10. Jorda i feltet er klassen gleysol, og noe stagnisol, en siltig mellomleire med innslag av siltig leittleire (Kilden - Jordsmonn 2025).

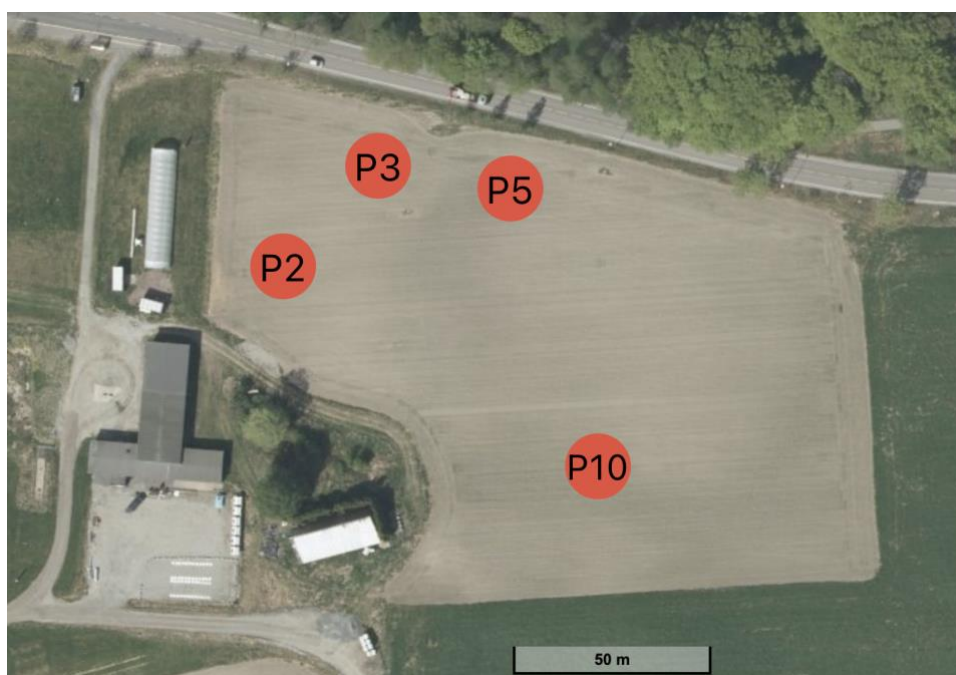
I prosjektet ProteinBar har det tidligere blitt gjennomført jordanalyser fra feltet. Analysene viser intern variasjon i glødetap, total nitrogen og karbon (Tabell 3-2). På bakgrunn av den interne variasjonen ble det valgt ut fem punkter (Figur 3-4 og Figur 3-5) for installasjon av Agdirs Soil Scout sensorer.

Tabell 3-2 Oversikt over glødetap %, total karbon % og total nitrogen % for prøvepunktene benyttet i denne undersøkelsen. Analysene og beregningene har blitt gjennomført av ProteinBar.

Prøvepunkt	Glødetap %	Tot. C %	Tot. N %
P2	6,7	2,7	0,2
P3	5,2	1,9	0,2
P5	8,1	3,3	0,3
P10	7,0	2,8	0,2



Figur 3-4 Variasjon i innhold % totalt nitrogen. Figuren er hentet fra ProteinBar.



Figur 3-5 Punktene hvor det har vært gjennomført prøvetakning, samt nedgravd Agdirs Soil Scout. Kartutklippet er hentet fra Norgeskart (Norgeskart 2025).

3.2 Metoder for innsamling av data

3.2.1 Jordprøver

Gjennom vekstsesongen, mai til september, ble jordprøver samlet inn fra de 9 forsøksrutene i E166, samt i de 5 prøvepunktene i Pilotfeltet (Figur 3-3 og Figur 3-5). Jorda ble prøvetatt omtrent en gang i uken, men intervallene kunne variere avhengig av værforholdene. Det ble f.eks. ikke samlet inn jordprøver i perioder med mye nedbør, men først når jorda var tørket tilstrekkelig. Årsaken til at jordprøver fortrinnsvis ble tatt i relativt tørr jord, var for å gjøre forbehandling av jordprøvene enklere. Prøvene skulle ikke tørkes, men fryses ned og siktes fuktige.

Jordprøvene ble tatt med en standard jordbor og prøvene ble samlet fra en dybde på 0-20 cm. For hvert av prøvepunktene ble det gjennomført 4 stikk i området til prøvepunktet. Jorda ble samlet i en plastbøtte og blandet godt med en liten spade (Figur 3-6). Deretter ble jorda overført til en tett, markert, plastpose og lagt i fryseren. Jordprøvene ble fryst for å hindre videre nitrogenomsetning frem til analysetidspunkt.



Figur 3-6 Bilde av utstyr benyttet under innsamling av jordprøver.

3.2.2 Yara N-Sensor

Gjennom sesongen ble det gjennomført målinger med en håndholdt Yara N-Sensor. Målinger ble hovedsakelig gjennomført på plantene i vekstadiet mellom busking til skyting (DC22-53). Det ble gjennomført målinger i tidsperioden 29.mai til 27.juni.

Målingene ble gjennomført ved å stå langs kanten på anleggsrutene, eller ved prøvepunktet. Håndholdt N-Sensor holdes slik at den optiske sensoren peker på prøvepunktet, og informasjonsskjermen peker mot den som gjennomfører målingen (Figur 3-7). Sensoren ble holdt omtrent i brysthøyde. For hvert prøvepunkt ble det gjennomført 5 målinger ved å trykke på startknappen på skjermen, og vente på registrering av SN-verdien. I henhold til håndboken, anbefales det å ta minst 2, men helst 4 eller flere registreringer per forsøksfelt (Yara, 2019). Det ble derfor gjennomført 5 registreringer for hvert punkt, og den gjennomsnittlige SN-verdien for disse 5 målingene ble notert. SN-verdien er som nevnt et estimat på kg N per hektar tatt opp i biomassen.



Figur 3-7 Illustrasjonsbilde av hvordan Yara N-Sensor holdes for registrering.

3.2.3 AgriSenze

AgriSenze satt ut en installasjon (Figur 3-8) med hensikt å samle inn porevann fra prøvepunkt P2. Installasjonen fungerte som et lysimeter og hadde en solselledrevet pumpe som sugde ut porevann fra jorda. Det var noen tekniske problemer med pumpen så intervallene på innsamling av porevann varierte. Det ble i hovedsak forsøkt å samle inn porevann daglig i de periodene installasjonen var operativ. Porevannet ble samlet inn i plastbeger og fryst ned.

Porevannet ble senere analysert for innhold av nitrat på laboratoriet til AgriSenze, med deres elektrokjemiske nitratsensor.



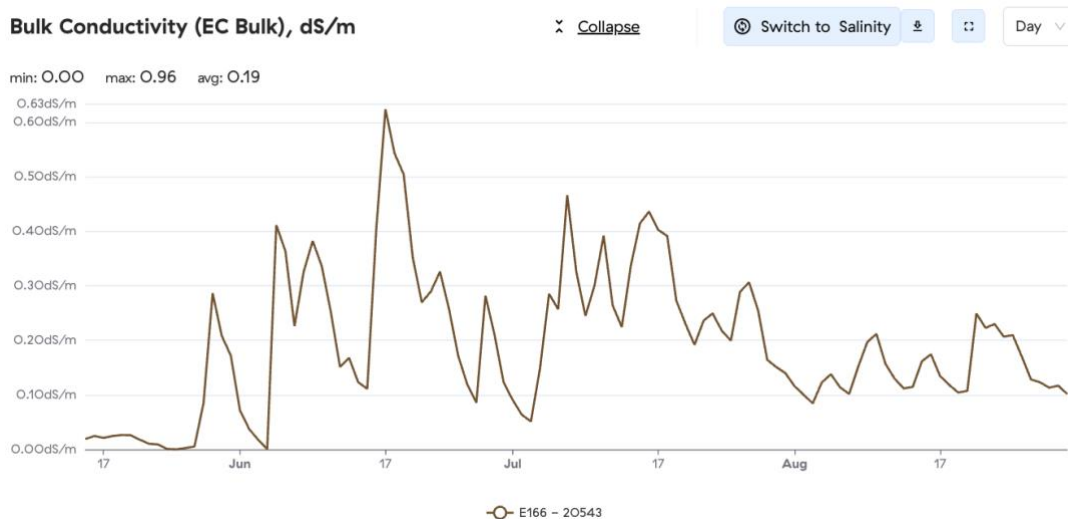
Figur 3-8 AgriSenze sin installasjon ved P2, Pilotfeltet, for innsamling av porevann.

3.2.4 Agdir – Soil Scout

Soil Scout sensorer fra Agdir (Figur 3-9) ble gravd til ned 14. mai og tatt opp etter innhøsting. Gjennom denne perioden registrerte Agdir sine systemer kontinuerlige data på elektrisk ledningsevne (EC), vanninnhold og temperatur. Etter endt vekstsesong ble det tatt ut et utvalg av dataene fra nettløsningen til Agdir (Figur 3-10). Dataene som ble tatt ut var gjennomsnittlige verdier fra hver dag, samt minimum- og maksimumsverdier.



Figur 3-9 Illustrasjonsbilde fra nedgraving av Agdir sine Soil Scout.



Figur 3-10 Skjermutklipp fra nettløsningen til Agdir. Her vises utviklingen av elektrisk ledningsevne registrert ved rute 13, E166.

3.2.5 ComWin NPK-sensor

Gjennom vekstsesongen ble det tatt sporadiske registreringer med en ComWin sensor for nitrogen (N), fosfor (P) og kalium (K) (NPK-sensor) (Figur 3-11). Sensoren måler også pH og EC. Målingene ble gjennomført ved å stikke probene ned i jorda fra overflaten. Målingene gir da registreringer i de øverste 5 cm av jorda. Sensoren fikk stå ned i jorda omtrent 1 minutt, slik at verdiene fikk stabilisert seg, før målingene ble lest av og notert.



Figur 3-11 Illustrasjonsbilder fra brukermanualen til ComWin NPK-sensoren.

3.2.6 Multispektrale bilder

Gjennom vekstsesongen ble det gjennomført droneflygninger av masterstudent Sindre Stokke, ved fakultetet for realfag og teknologi (REALTEK), NMBU. Dronen DJI Mavic Multispectral ble benyttet (Figur 3-12).

Mavic har ikke et dedikert blått bånd, men den har et RGB-kamera med 20 megapiksler og en 4/3 CMOS-sensor. I tillegg har den fire multispektrale kameraer for båndene Green (560 ± 16 nm), Red (650 ± 16 nm), Red Edge (730 ± 16 nm) og Nær-infrarød (NIR) (860 ± 26 nm). For innstillingene på dronen ble det benyttet en høyde på 30 meter over bakkenivå, en vinkel på 90 grader slik at kameraet peker rett ned, og en hastighet på 1 m/s. Flyvningene ble gjennomført en dag ukentlig for alle feltene mellom kl. 10:00 og 14:00. Dette tidspunktet ble valgt, da solen står høyt nok på himmelen til at avlingene kaster minimale skygger. Flyvningene ble også, så langt det lot seg gjøre, kun gjennomført under stabile lysforhold, det vil si enten klar himmel eller jevnt skydekke (pers.kom, Sindre Stokke).



Figur 3-12 Illustrasjonsbilde fra droneflyvning. Foto: Sindre Stokke.

3.3 Jordanalyse

Alle jordanalysene ble gjennomført i henhold til metodebeskrivelsen fra øvingsheftet *Laboratoriemetoder til emnet JORD212, Jordanalyse*, (Krogstad, 2009) og Foss Application Note 5226 og 5206 (FOSS, 2008a; FOSS, 2008b).

3.3.1 Forbehandling av prøvene

Før ekstraksjon og analyse, ble det gjennomført en forbehandling av jordprøvene. Ulikt standardmetode for forbehandling av jordprøver, ble ikke disse prøvene tørket. Prøvene ble holdt fryst, og videre bearbeiding ble gjennomført med fryst og fuktig jord. I henhold til *Laboratoriemetoder til emnet JORD212, Jordanalyse*, (Krogstad, 2009) skal alle jordanalyser for landbruket gjennomføres på fraksjonen < 2 mm. Siden prøvene her ikke var tørket, men fryste og fuktige ble fraksjonen < 3 mm brukt (pers.kom. prof.emerit. Tore Krogstad), slik at siktingen ble enklere å gjennomføre.

Prøvene ble holdt frosset for det var ønskelig å hindre omdanning av nitrogen, og det ble veid opp jord til de ulike analysene direkte etter sikting. Der analysene ikke skulle gjennomføres umiddelbart etter innveiling, ble de siktede og innveide prøvene lagt på kjølerom, eller tilbake i fryser.

3.3.2 Tørrstoff og glødetap

Det er nødvendig å bestemme tørrstoffinnholdet i en prøve når en skal gjennomføre analyser på fuktig jord. Ved å gjøre dette vil en kunne oppgi resultatet på mengde tørr jord (Krogstad, 2009).

3 til 5 g jord ble veid inn i en porselensdigel og ble tørket ved 105°C i et tørkeskap i minst 6 timer, eller over natten. Prøvene ble avkjølt i en eksikkator i omtrent 30 minutter før de igjen ble veid og tørrstoffprosent ble beregnet (Krogstad, 2009).

For glødetapsbestemmelse veies 2 til 5 g tørket jord inn i en porselensdigel og glødes ved 550°C over natten.

Beregningene ble gjennomført slik (Krogstad, 2009).

$$\%Tørrstoff = \frac{m_3 - m_1}{m_2} \times 100$$

$$\%Glødetap = \frac{m_3 - m_4}{m_3 - m_1} \times 100$$

m_1 = vekt av digel

m_2 = vekt av jordprøve før tørking

m_3 = vekt av digel og jordprøve etter tørking

m_4 = vekt av digel og jordprøve etter gløding

For mineraljord må en korrigere glødetapet for leirinnhold for å beregne innhold av organisk materiale. Organisk materiale (%) beregnes ved å ta glødetapet (%) minus korreksjonstallet i Tabell 3-3 (Krogstad, 2009).

Tabell 3-3 Korreksjonstabell for leirinnhold ved omgjøring av glødetap til innhold organisk materiale (Krogstad, 2009).

Jordart	Leirinnhold	Korreksjonstall
Sand og silt	5-9 %	1
Lettleire	10-24 %	2
Mellomleire	25-39 %	2,5
Stiv leire	40-59 %	3,5
Meget stiv leire	> 59 %	4,5

3.3.3 Bestemmelse av nitrat og ammonium i KCl-ekstrakt

Innhold nitrat og ammonium i en jordprøve blir bestemt i ekstrakt med 2 M kaliumklorid (KCl). Før ekstraksjon ble det laget 5 l av 2 M KCl-løsning ved å tilsette 745,5 g KCl til en målekolbe med volum på 5 l. Deretter ble det fylt i deionisert vann opp til 5 l. Løsningen ble deretter blandet godt for å sikre fullstendig oppløsning.

Selve ekstraksjonen ble gjennomført ved å tilsette 20 ml 2 M KCl til 2 g fryst og siktet jord i plastbegre. Prøvene ble deretter ristet i 45 minutter før de ble filtrert over i nye plastbegre gjennom Whatman blue ribbon filterpapir. Filtrerpapiret ble først vasket med 2 M KCl. Ekstraktene ble lagt i fryseren, frem til analysetidspunkt. Prøven ble tint på kjølerom før analysen.

Innhold av NO_3^- og NH_4^+ ble analysert med FIASStar 5000 i henhold til Application Note 5206 og 5226 (FOSS, 2008a; FOSS, 2008b). Analyseresultatene ble senere korrigert m.h.p. tørrstoff.

3.3.4 Bestemmelse av nitrat med selektiv elektrode

Øien og Selmer beskriver i sin artikkel «Nitrate Determination in Soil Extracts with the Nitrate Electrode», utvikling av en metode for å bestemme nitrat i jord ved å benytte Orion nitratselektiv elektrode på løsning laget av jord ekstrahert med 0,01 M kobbersulfat (CuSO_4) (Øien & Selmer-Olsen, 1969). I deres studie gav bruken av Orion elektroden gode resultater for nitrat i jord, og denne metoden ble da utprøvd i denne undersøkelsen.

Nitrat er lett løselig i vann og vil derfor også løses lett ut i fortynnede saltoppløsninger. I denne bestemmelsen ble det benyttet en 0,01 M kopparsulfatløsning (CuSO_4) som ekstraksjonsmiddel da dette hemmer biologisk omsetning og dermed forhindrer tap av nitrat (Krogstad, 2009; Øien & Selmer-Olsen, 1969).

Til denne bestemmelsen ble det laget en 0,01 M CuSO_4 løsning ved å løse ut 5 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ med 2000 ml deionisert vann i en målekolbe. I tillegg ble det laget en 1000 mg $\text{NO}_3\text{-N/l}$ løsning ved å løse opp 7,218 g KNO_3 i 1 l deionisert vann. Ut ifra denne standardløsningen ble det videre fortynnet til ulike standardløsninger som holdt 0, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20 og 50 mg $\text{NO}_3\text{-N/l}$. I tillegg var standardoppløsningene 0,01 M CuSO_4 (Krogstad, 2009; Øien & Selmer-Olsen, 1969).

10 g jord ble tilsatt i et glassbeger med 50 ml 0,01 M CuSO_4 (Krogstad, 2009; Øien & Selmer-Olsen, 1969). Deretter ble løsningen ristet i omtrent 15 minutter før den ble stående urørt i noen minutter slik at jorda fikk sedimentert. Væsken ble dekantert over i et mindre glass for lettere måling.

Det ble benyttet en Orion ioneselektiv elektrode med en nitratselektiv membran for å bestemme nitratinnholdet i kobbersulfatekstraktene. Målingen ble gjennomført ved å først måle millivolt i standardkonsentrasjonene, og deretter ble det laget en logaritmisk graf som gjenspeiler målingene. Deretter ble millivolt målt i ekstraksjonsløsningene omregnet til nitratinnhold etter grafen (Krogstad, 2009; Øien & Selmer-Olsen, 1969). Nitratkonsentrasjonen ble senere korrigert m.h.p. tørrstoff.

3.4 Bruk av kunstig intelligens

I denne oppgaven har det blitt benyttet kunstig intelligens (KI). KI plattformen ChatGPT (Open AI, 2025) har blitt benyttet i bistand til utvikling av koder, samt feilsøking av koder, for statistisk analyse i RStudio. All bruk av KI har blitt gjennomført i henhold til NMBUs retningslinjer for bruk av KI (NMBU, 2025).

3.5 Statistiske analyser

3.5.1 Datagrunnlaget

Studiet inneholder et stort utvalg av ulike indikatorer for å predikere eller estimere innhold av N i jord og planter, og det ble gjennomført regresjonsanalyse på hele datasettet. Det vil si at den lineære sammenhengen mellom hver indikator mot tre kategorier av mineral N i jord ble analysert. De tre kategoriene er innhold av ammonium (KCl-ekstrahert/FIA), innhold av nitrat (KCl-ekstrahert/FIA) og totalt innhold av mineral N (ammonium + nitrat). Regresjonsanalysen ble gjennomført for hvert felt eller prøvepunkt separat.

Data er ikke blitt modellert. Noen ekstreme verdier er blitt utelatt dersom det var en kjent årsak til ekstremverdien. Hvis det har blitt gjennomført analyse på et utvalg av data er dette kommentert. Utelatelse av ekstreme verdier er hovedsakelig skjedd i analysen av sammenheng mellom nitrat bestemt med KCl/FIA og nitrat bestemt med nitratselektiv elektrode.

Da det ble sett som svært viktig å her se på utvikling over tid, ble grafer med endringer i ulike former for N over tid framstilt.

I resultatkapittelet er det presentert figurer for utvalgte felt, ikke for alle. Ofte er det valgt en fra hver N-behandlingstype. Gjentakene som tilsynelatende er det mest «typiske» er vist.

3.5.2 Regresjonsanalyse

Det er blitt gjennomført regresjonsanalyse v.h.j.a. RStudio (RStudio, 2024). Regresjonsanalysen belyser om det er en sammenheng mellom variabler, og kvantifiserer hvor god sammenhengen er. Det er i hovedsak benyttet enkel lineær regresjon, hvor en rettlinjert sammenheng mellom forklaringsvariabelen x og responsvariabelen y testes.

Den lineære regresjonslinjen kan uttrykkes slik:

$$y = a + bx$$

Her vil a være konstanten, som beskriver ved hvilken y -verdi linjen krysser y -aksen, og konstanten b , er linjens stigningstall. Det vil altså si hvor mye y -verdien øker når x -verdien øker med en enhet. Verdien til stigningstallet kan derfor uttrykke hvorvidt x kan forklare y (Løvås, 2013).

Korrelasjonskoeffisienten, R , ligger mellom -1 og 1 og beskriver den lineære sammenhengen mellom x og y . Hvis R er nær null, er det liten sammenheng mellom x - og y -verdiene (Løvås, 2013).

Regresjonskoeffisienten, R^2 , angir hvor stor andel av variasjonen i responsvariabelen y som kan forklares av forklaringsvariabelen x . R^2 ligger mellom 0 og 1 og en $R^2 = 1$ betyr en perfekt forklaringsgrad (Løvås, 2013).

Signifikansnivå, p -verdien, benyttes for å vurdere om resultatene er statistisk signifikant, altså om det er sannsynlig å observere denne sammenhengen igjen (Løvås, 2013). En lav p -verdi er gunstig, og for at resultatene kan beskrives som statistisk signifikant må p -verdien være $< 0,05$. I denne undersøkelsen ble det benyttet p -verdi $< 0,1$ siden det i dette arbeidet er ofte høy p -verdi, da n (antall observasjoner) som oftest er ganske lavt. Noen figurer viser til regresjonsresultater med p -verdi $> 0,1$.

Fra regresjonsanalysen er resultatene vist for enkeltruter, ikke som gjennomsnitt for hver behandling (E166, $n=3$). Når gjennomsnitt ($n=3$) ble brukt i regresjonsanalysene ble forklaringsverdien (R^2) betydelig redusert. Variasjonen i jordas N-innhold innad i forsøksfeltet var nærmest en støy som dekket over tidvis svært god korrelasjon mellom sensormålinger og innhold av plantetilgjengelig N i jord.

Heatmap

For enkelt å kunne skille mellom de ulike metodens lineære sammenheng og statistiske signifikans ble det ved hjelp av RStudio laget tre «heatmaps» som viser R^2 -verdier for de ulike parameterne for hvert felt. Der det var gjentak (feltet E166) ble det likevel valgt å kjøre for hvert felt. Det er først og fremst metodens evne til å fange opp endringer i målt N-nivå i jorda som er hovedmålet her, og ikke nødvendigvis i hvilken grad den gir et godt mål for effekt av ulike nitrogentilførsel. Også for «heatmap»-ene ble det satt krav om at p -verdien skulle være $< 0,1$ og $R^2 > 0,5$.

4 Resultater

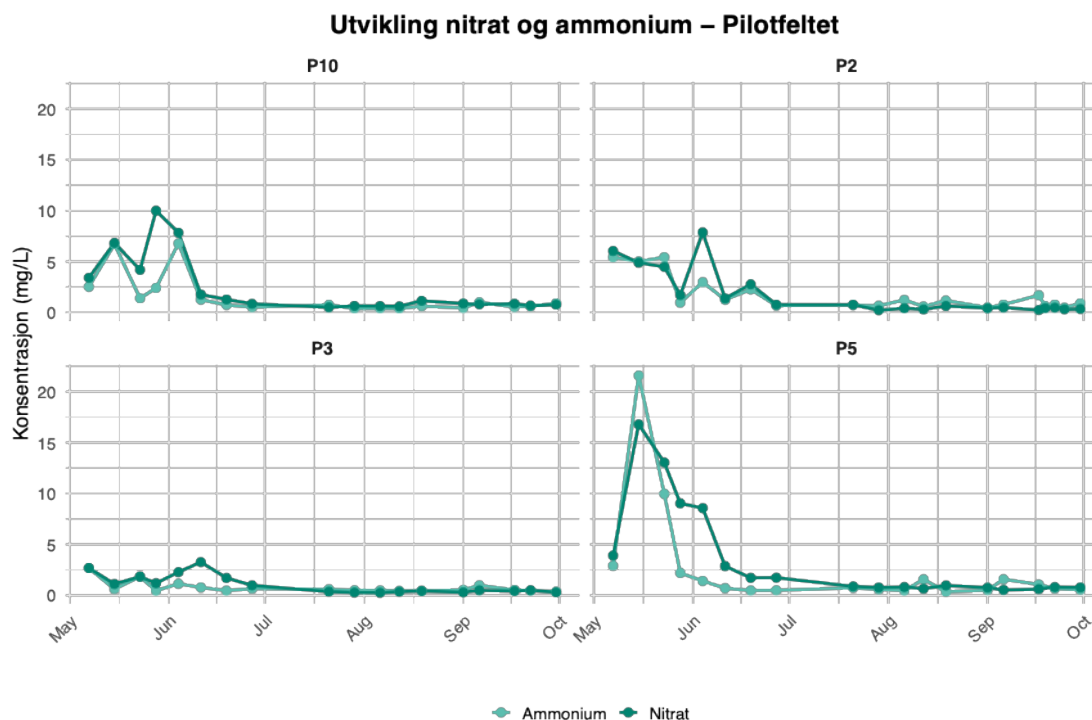
I det følgende vil summen av KCl-ekstraherbart NH_4^+ og NO_3^- bli omtalt som mineral N.

4.1 Sesongvariasjon i jordas innhold av mineral N

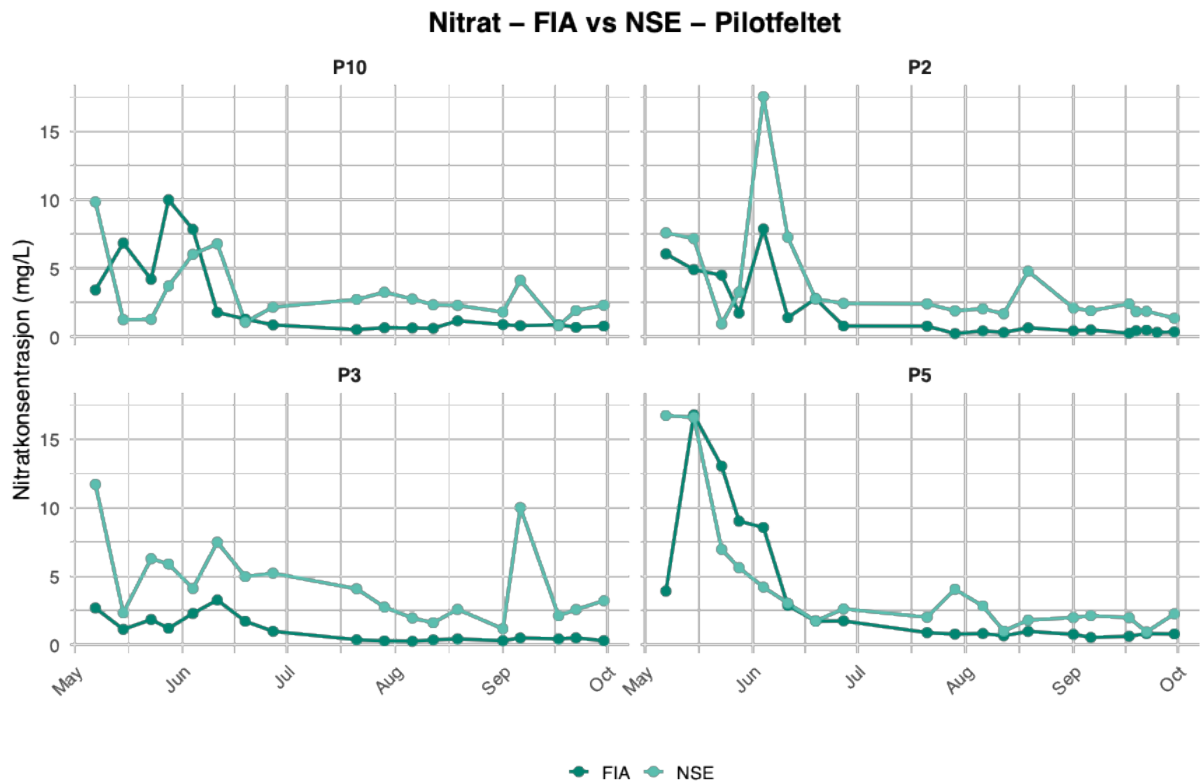
4.1.1 Pilotfeltet

For alle prøvepunktene i Pilotfeltet (P2, P3, P5 og P10) observeres en tydelig variasjon i innholdet av mineral N gjennom vekstsesongen (Figur 4-1). Tidlig i vekstsesongen, mellom mai og juli, observeres en tydelig topp i innhold mineral N. Dette etterfølges av en rask nedgang, før innholdet holder seg stabilt lavt fram til høsting. Maksimumsverdien til mineral N-toppene varierer for de ulike prøvepunktene, avhengig av organisk materiale i punktet, og varierer med tidspunkt. Den høyeste registreringen av mineral N for er felt P5, med en tydelig topp allerede midten av mai. Den laveste maksimumsverdien for mineral N er registrert i punkt P3, i midten av juni. Variasjonen er direkte korrelert med variasjonen i det naturlige innholdet av organisk materiale (glødetap) i Pilotfeltet (Tabell 3-2).

Variasjonen i innhold KCl-ekstrahert NO_3^- ble sammenlignet med NO_3^- bestemt med Orion nitratselektiv elektrode (NSE). Selv om det er sammenfallende trender over tid, er det nærmest systematisk registrert høyere verdier for nitrat målt med NSE (Figur 4-2).



Figur 4-1 Utvikling av KCl-ekstrahert nitrat (NO_3^-) og ammonium (NH_4^+) i de fire prøvepunktene (P2, P3, P5 og P10) på Pilotfeltet gjennom vekstsesongen. Analysert med FIA.



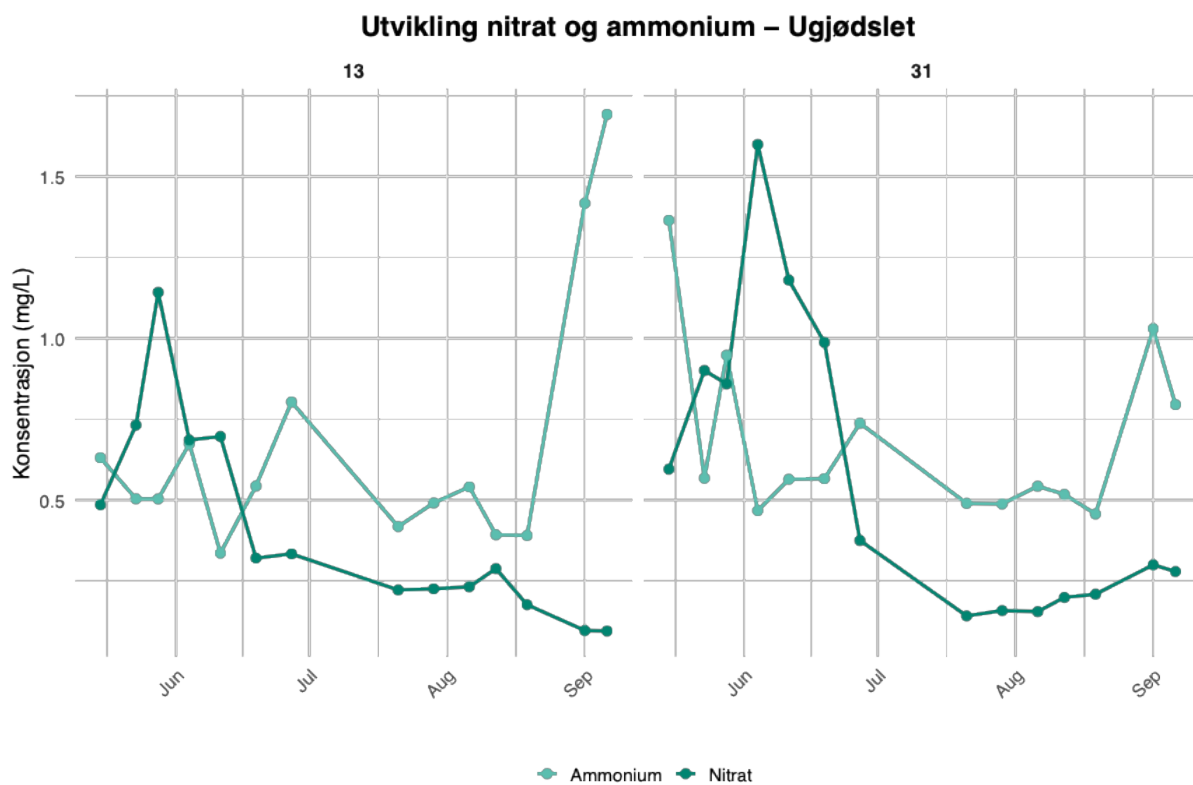
Figur 4-2 Sammenligning av utvikling av innhold av nitrat (NO_3^-) gjennom vekstsesongen, bestemt med Orion nitratselektiv elektrode (NSE) og fra KCl-ekstrakt bestemt med FIA, for prøvepunktene på Pilotfeltet.

4.1.2 E166

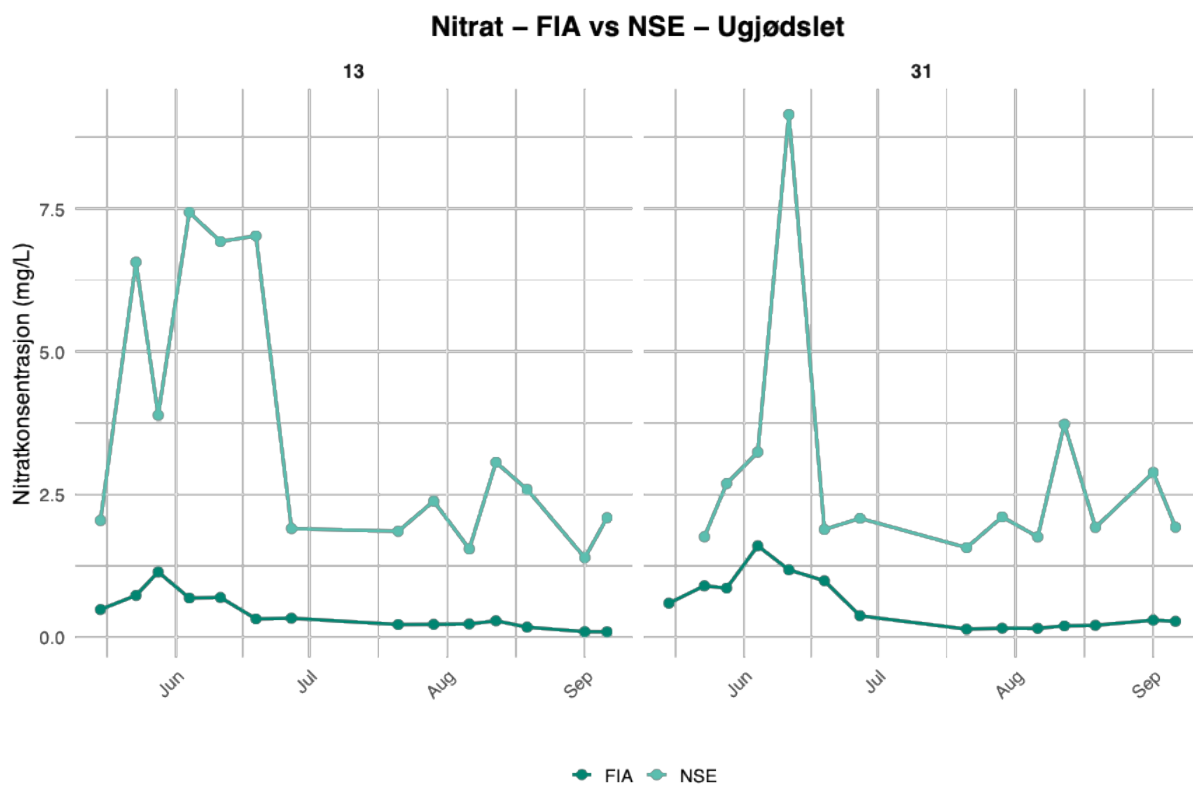
For feltet E166 er utviklingen av mineral N gjennom vekstsesongen for hver av behandlingene ugjødslet, tilført husdyrgjødsel og tilført mineralgjødsel, vist i Figur 4-3 til og med Figur 4-8. Hovedtrenden i variasjon gjennom vekstsesongen er som i Pilotfeltet, men det er i tillegg variasjon mellom de ulike behandlingene.

Ugjødslet

Konsentrasjonen av mineral N i ugjødslet jord er generelt ganske lav og relativt stabil gjennom sesongen (Figur 4-3), men det er høyest innhold av nitrat i juni-juli. Variasjonen over tid som observeres i innhold KCl-ekstrahert NO_3^- vises også i NO_3^- - verdiene bestemt med NSE. Det er sammenfallende trender, men høyere verdier med NSE (Figur 4-4).



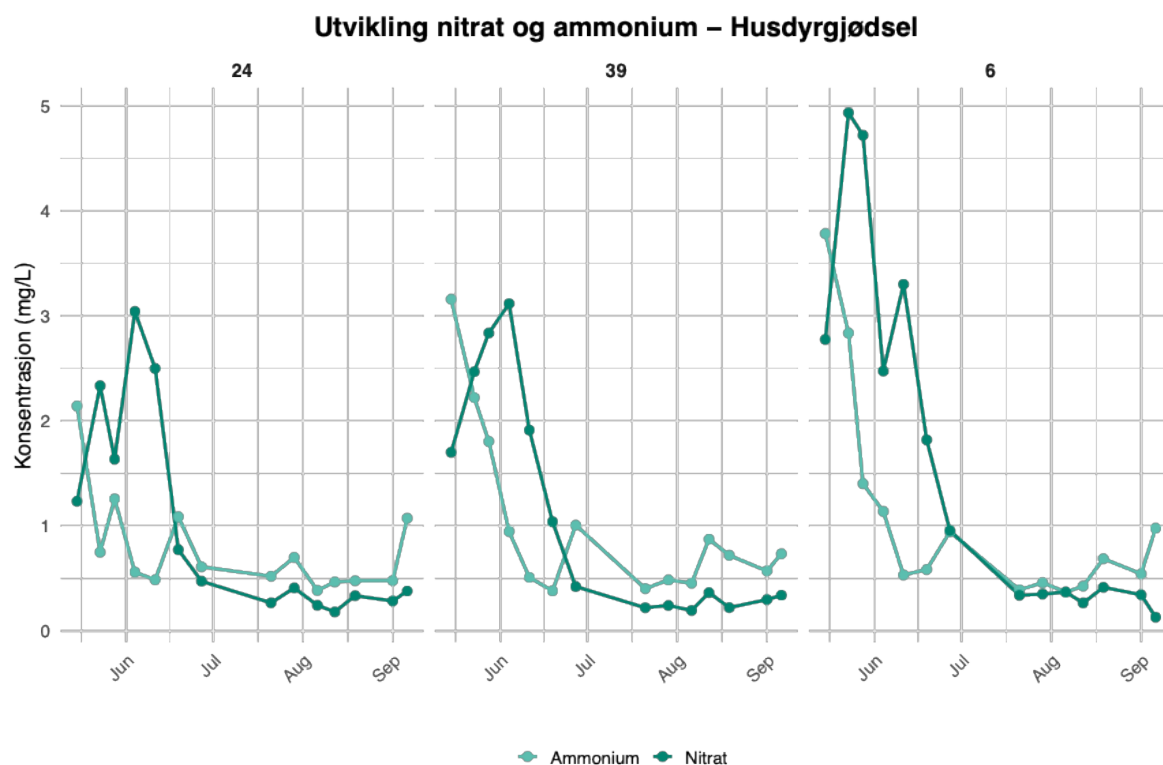
Figur 4-3 Utvikling av KCl-ekstrahert nitrat (NO_3^-) og ammonium (NH_4^+) for et utvalg av de rutene ved E166 som ikke har blitt tildelt gjødning. Analysert med FIA.



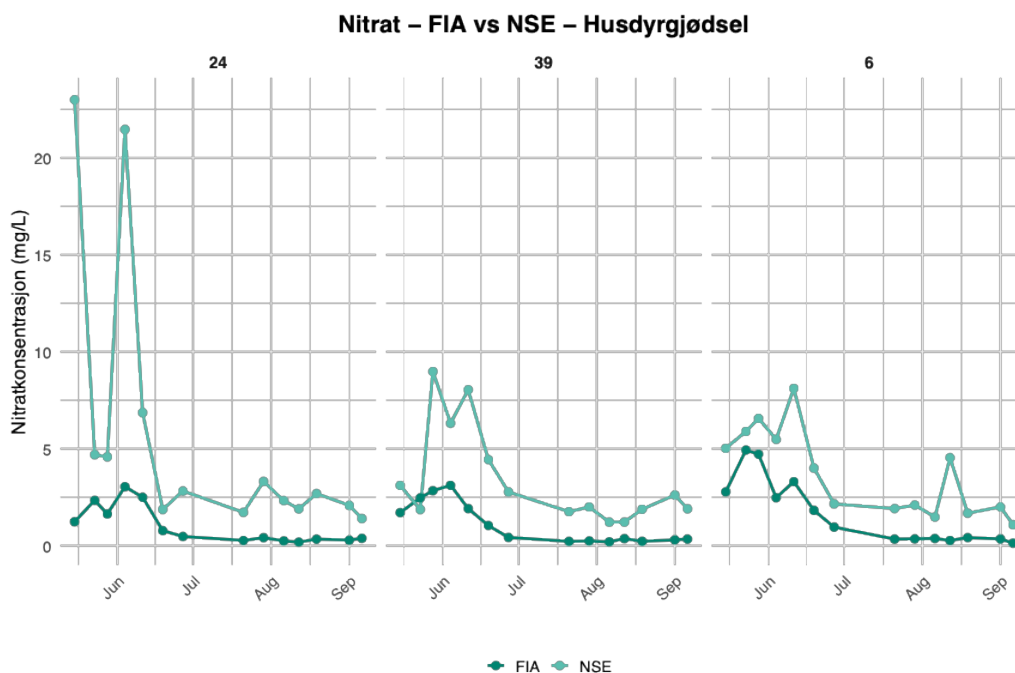
Figur 4-4 Sammenligning av utvikling av innhold av nitrat gjennom vekstsesongen, nitrat bestemt med Orion nitratselektiv elektrode (NSE) og KCl/FIA for et utvalg av de ugjødslede feltene på E166.

Husdyrgjødsel

For rutene tilført husdyrgjødsel er konsentrasjonen av mineral N (Figur 4-5) betydelig høyere enn i ugjødslet kontroll, spesielt tidlig i vekstsesongen (Figur 4-3). Lengre ut i vekstsesongen (juli – september), er konsentrasjonen relativt lik mellom ruter tildelt husdyrgjødsel og kontroll. Tidsvariasjonen som observeres i innhold KCl-ekstrahert NO_3^- observeres også for NO_3^- bestemt med NSE, men igjen observeres det generelt høyere verdier med NSE (Figur 4-6).



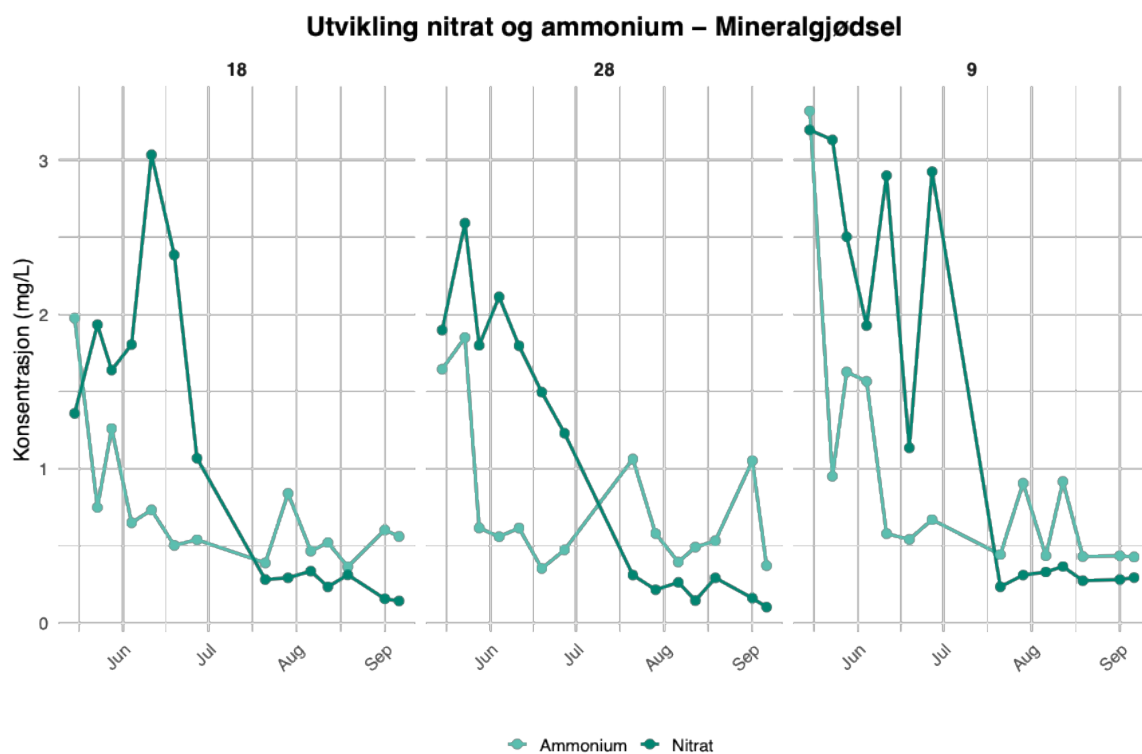
Figur 4-5 Utvikling av KCl-ekstrahert nitrat (NO_3^-) og ammonium (NH_4^+) i de rutene ved E166 som har blitt tildelt husdyrgjødsel. Analysert med FIA.



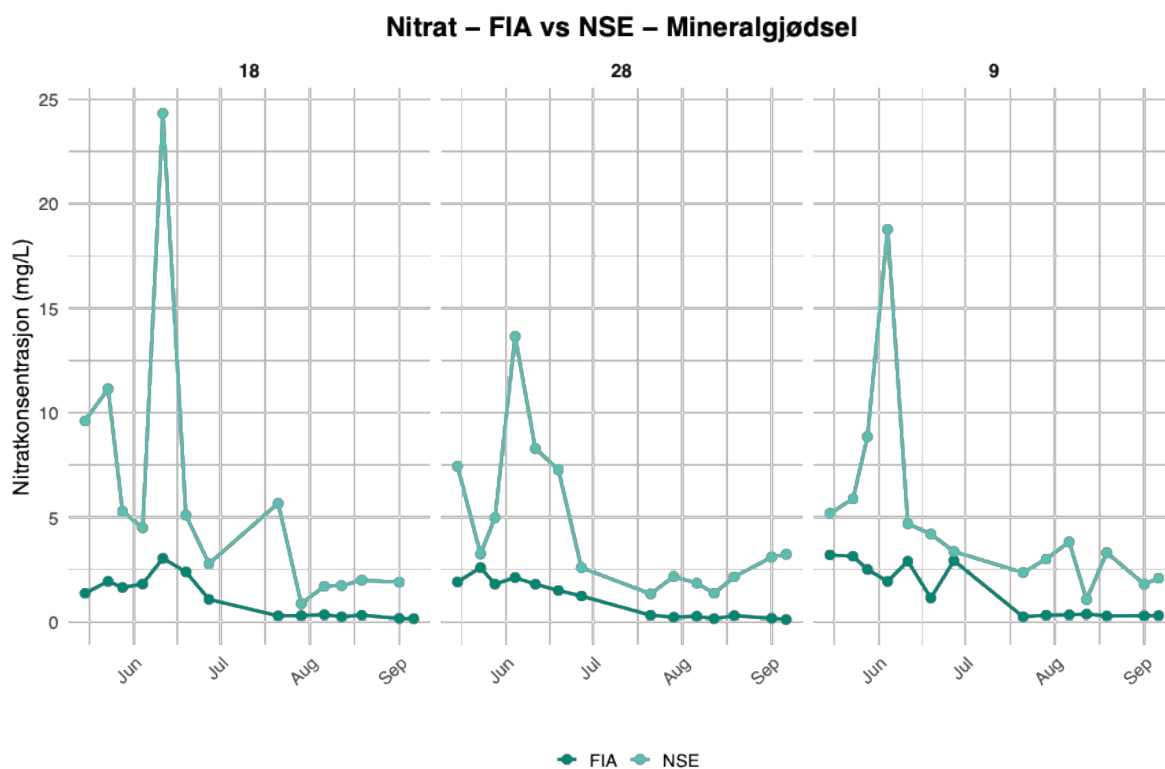
Figur 4-6 Sammenligning av utvikling av innhold av nitrat gjennom vekstsesongen, bestemt med Orion nitratselektiv elektrode (NSE) og KCl/FIA for feltene gjødslet med husdyrgjødsel på E166.

Mineralgjødsel

Innholdet av mineral N i rutene tilført mineralgjødsel viser en tilsvarende trend som i de tilført husdyrgjødsel (Figur 4-7), med en topp tidlig i vekstsesongen, etterfulgt av en nedgang, og en avslutning med mer stabilt lave konsentrasjoner fra juli til september. Igjen er tidsvariasjonen som observeres i innhold KCl-ekstrahert NO_3^- lik den observert for NO_3^- bestemt med NSE, men NSE-verdiene er høyere (Figur 4-8).



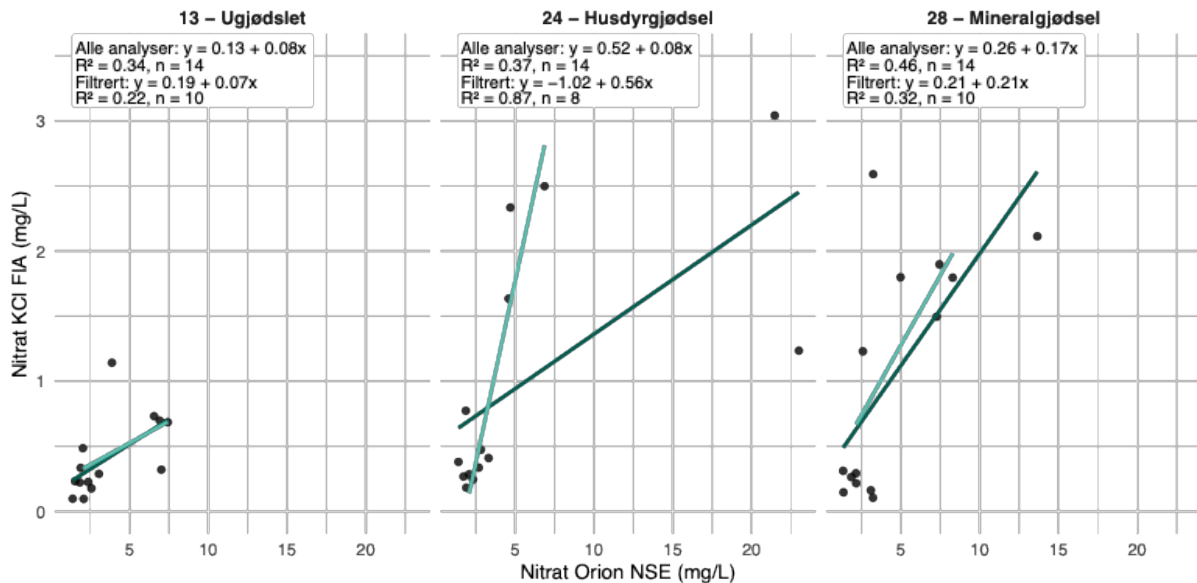
Figur 4-7 Tidsserie av innhold av NO_3^- og NH_4^+ , analysert med FIA, for de rutene på E166 gjødslet med mineralgjødning.



Figur 4-8 Sammenligning av utvikling av innhold av nitrat gjennom vekstsesongen, bestemt med Orion nitratselektiv elektrode (NSE) og KCl/FIA for feltene gjødslet med mineralgjødning på E166.

Sammenligning av KCl ekstrahert nitrat (FIA) og nitrat bestemt med orion NSE

Mørk grønn = Alle analyser, Turkis = Filtret (kun verdier fra Orion NSE fra 2 – 10 mg/l)



Figur 4-9 Lineær regresjon mellom nitratkonsentrasjon bestemt med Orion nitratselektiv elektrode (NSE) og KCl ekstraherbart nitrat bestemt med FIA. Figuren inneholder plots fra tre felt ved E166, med ulik behandling. Det er i tillegg to regresjonslinjer per felt, en for hele datasettet og en med et utvalg verdier (2 – 10 mg/L NO_3^- bestemt med Orion NSE).

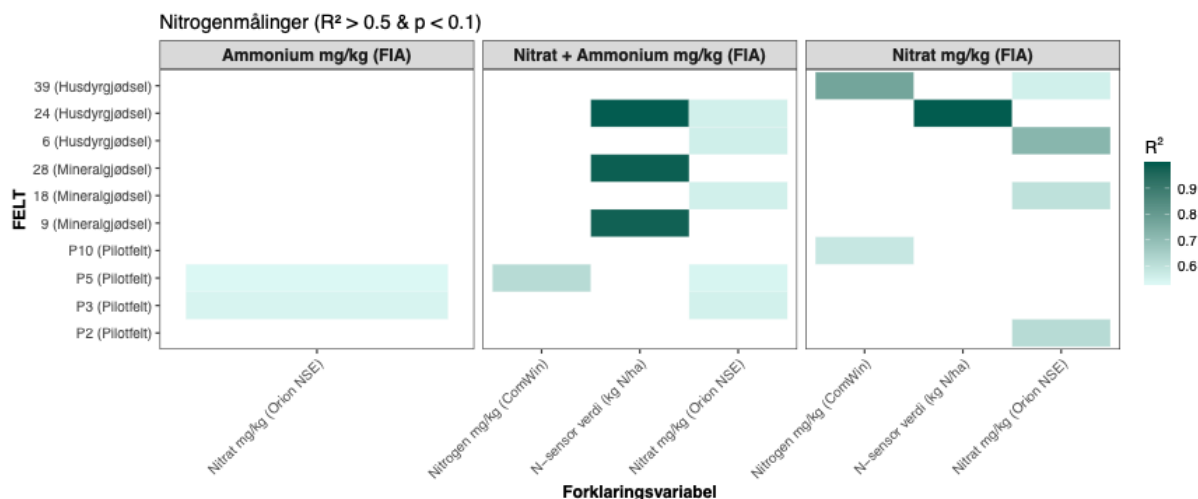
4.2 Sensorer for måling av N i planter og jord

Ved sammenligning av de ulike nitrogensensorenes forklaringsevne av innhold av N (mineral N, NO_3^- og NH_4^+ bestemt ved KCl ekstraksjon) i jord, synliggjøres stor variasjon mellom sensorene (Figur 4-10). Det sammenlignes også med innhold NO_3^- bestemt med Orion NSE. Det er variasjon mellom de ulike sensorens forklaringsevne og i antall felt som oppfyller kriteriene $R^2 > 0.5$ og p-verdi < 0.1 . Kriteriet for p-verdi blir ofte begrensende, da det for flere felt er et lavt antall registreringer (lav n). Spesielt blir det utfordrende m.h.p. antall registreringer ved de lavere konsentrasjoner av N. For eksempel inngår ingen av feltene som ikke har fått tildelt gjødsel i Figur 4-10. Dette tyder på at sensorens forklaringsevne blir betydelig redusert ved lave konsentrasjoner av N i jord. Forklaringsevnen til sensorene m.h.p. innhold av NH_4^+ er generelt dårlig. Ingen av sensorene klarer å oppfylle kravene for NH_4^+ (Figur 4-10).

Yara N-Sensor har den høyeste forklaringsevnen for mineral N og NO_3^- for noen felt (Figur 4-10). For NO_3^- er korrelasjonen mellom Yara N-Sensor og KCl-ekstraherbart bedre enn mellom KCl-ekstraherbart og NSE. Yara N-Sensor møter kriteriene ($R^2 > 0.5$ og p-verdi < 0.1) for tre felt ved sammenligning av mineral N, og for et felt ved sammenligning av kun NO_3^- .

Nitrogen målt med ComWin-sensoren oppfyller kravene for et felt for mineral N og to felt for NO_3^- . Forklaringsevnen er imidlertid betydelig lavere enn for Yara N-Sensor.

AgriSenze sin nitratsensor inngår ikke i figuren da den ikke møter kriteriene for R^2 og p-verdi. Registreringer med AgriSenze ble imidlertid kun gjennomført for prøvepunkt P2 på Pilotfeltet.

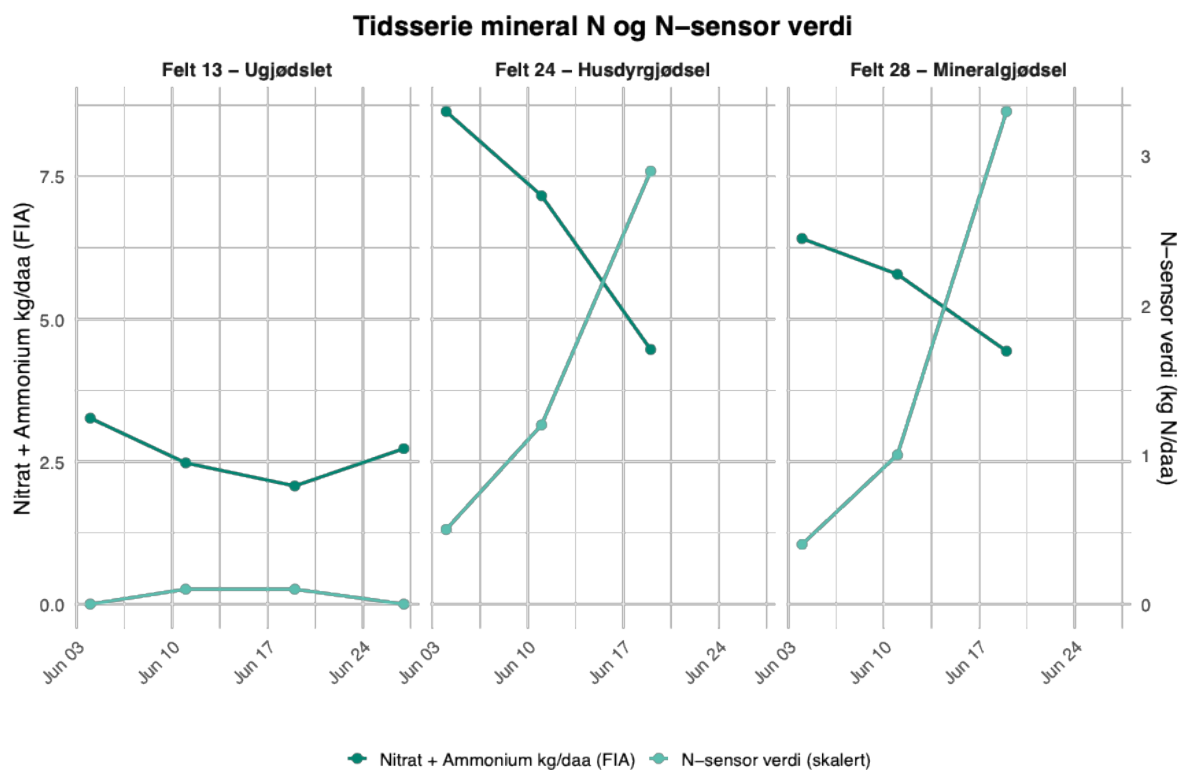


Figur 4-10 «Heatmap» med oversikt over R^2 -verdier fra lineære regresjoner mellom ulike nitrogen sensorer og tre kategorier mineral N (ammonium, nitrat + ammonium, nitrat) i jord. Kun modeller med $R^2 > 0.5$ og $p < 0.1$ er vist.

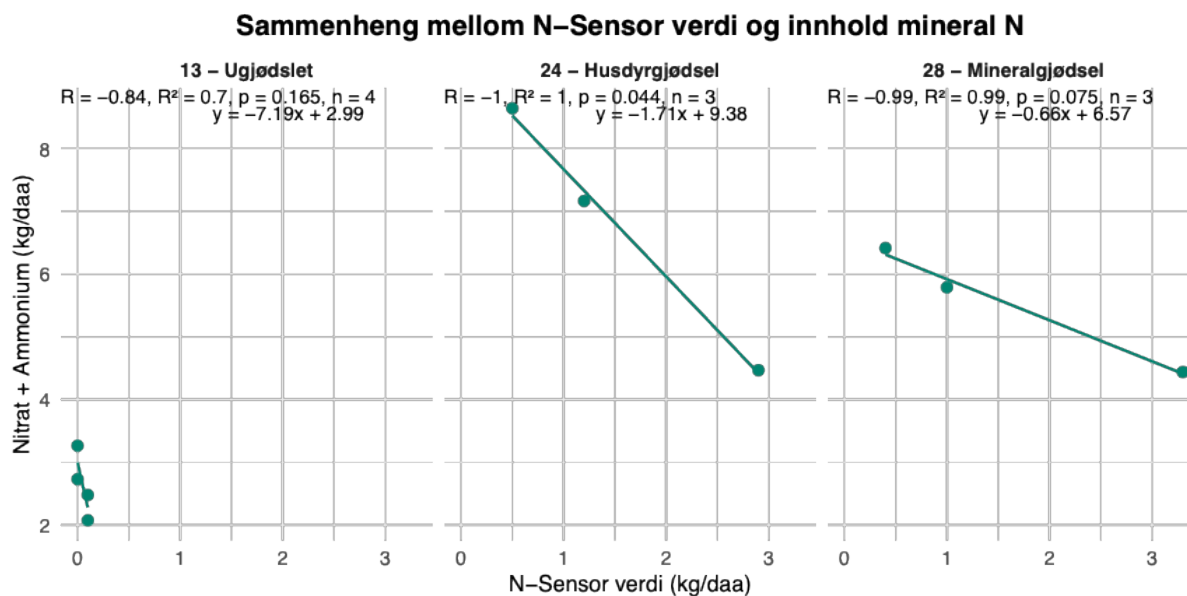
4.2.1 Yara N-Sensor

I den korte tidsperioden (busking frem til skyting) hvor Yara N-Sensor kan benyttes i bygg for estimering av N-opptak i biomassen, var sammenhengen med innhold mineral N i jord negativt, d.v.s. omvendt korrelert med N-opptak i planten (Figur 4-11). Korrelasjonen gjelder kun for de feltene hvor det er tildelt gjødse.

Sammenhengen som kommer frem i Figur 4-11 er gjort tydeligere i Figur 4-12, og viser en tydelig negativ korrelasjon og god forklaringsevne for begge gjødsebehandlingene.



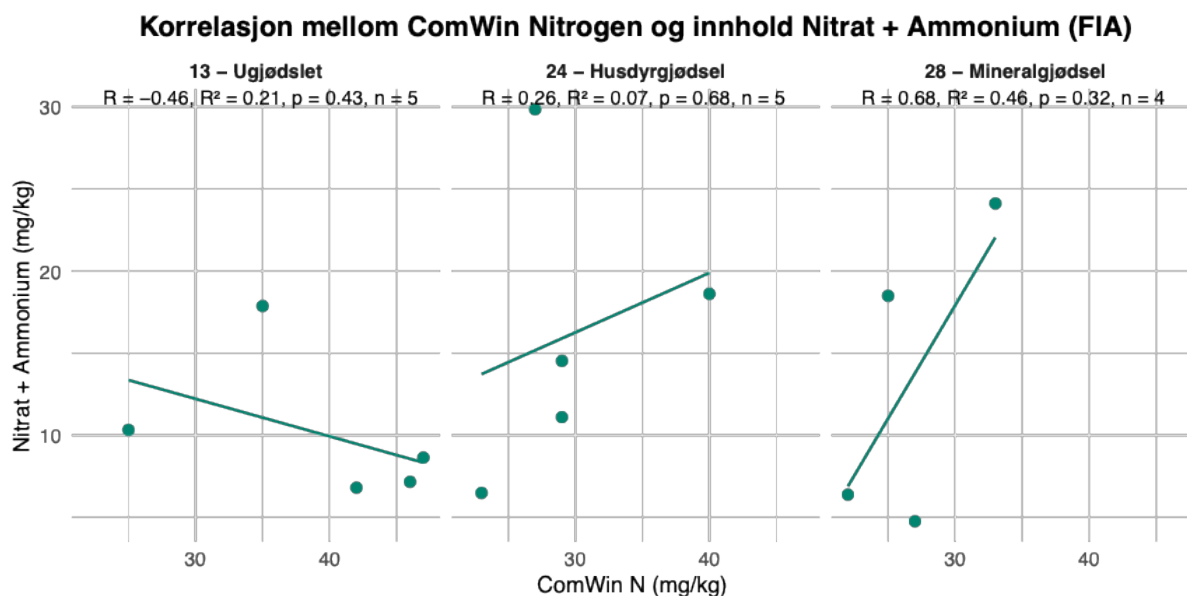
Figur 4-11 Tidsserie innhold mineral N i jord og estimat N tatt opp i biomasse (SN-verdi) registrert med Yara N-Sensor for et utvalg felt ved E166 med ulik behandling.



Figur 4-12 Lineær regresjon mellom innhold mineral N i jorda, og N opptak i biomassen (SN-verdi) registrert med Yara N-Sensor. Figuren inneholder et utvalg av felt med ulik behandling ved E166.

4.2.2 ComWin NPK-sensor

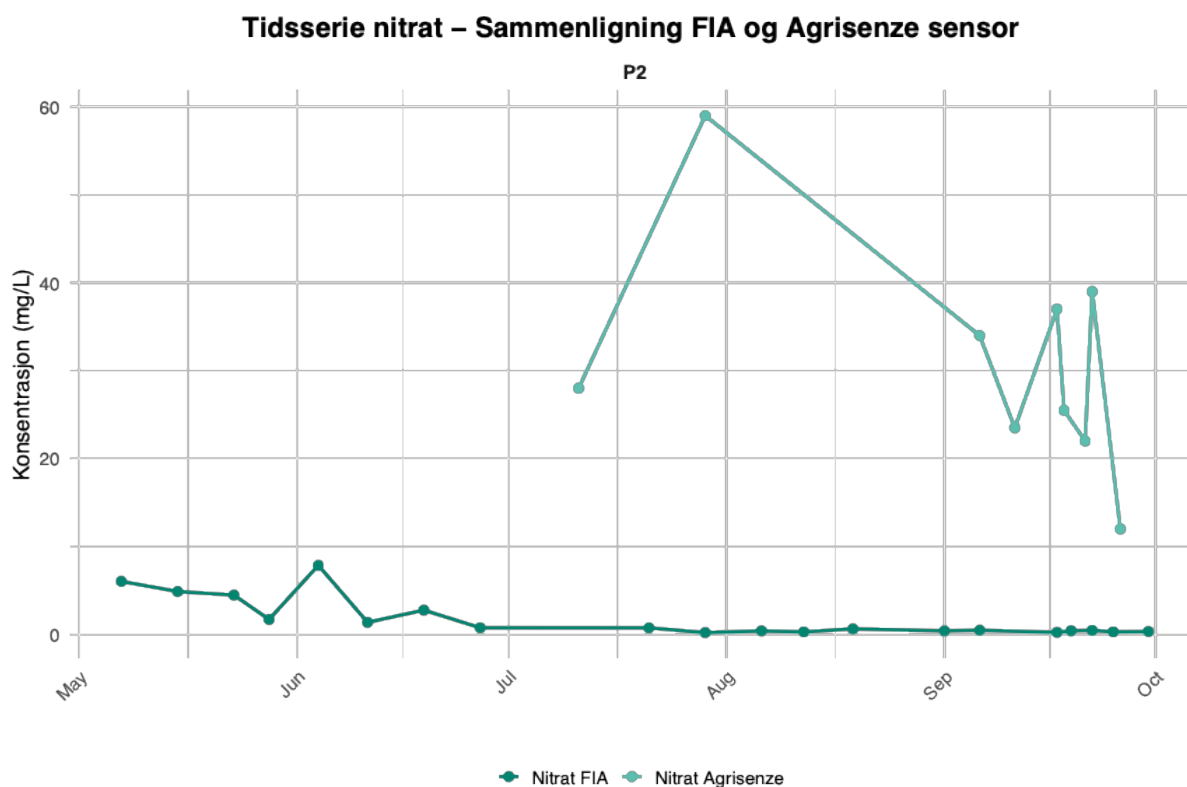
Korrelasjon og forklaringsevnen mellom mineral N i jord og N i jord registrert med ComWin sensoren er varierende (Figur 4-13). R^2 -verdiene varierer, og sensormålingene virker tilfeldige. Det er ofte høyere N-verdier målt med ComWin sensoren sammenlignet med mineral N (basert på målinger i KCl-ekstrakt).



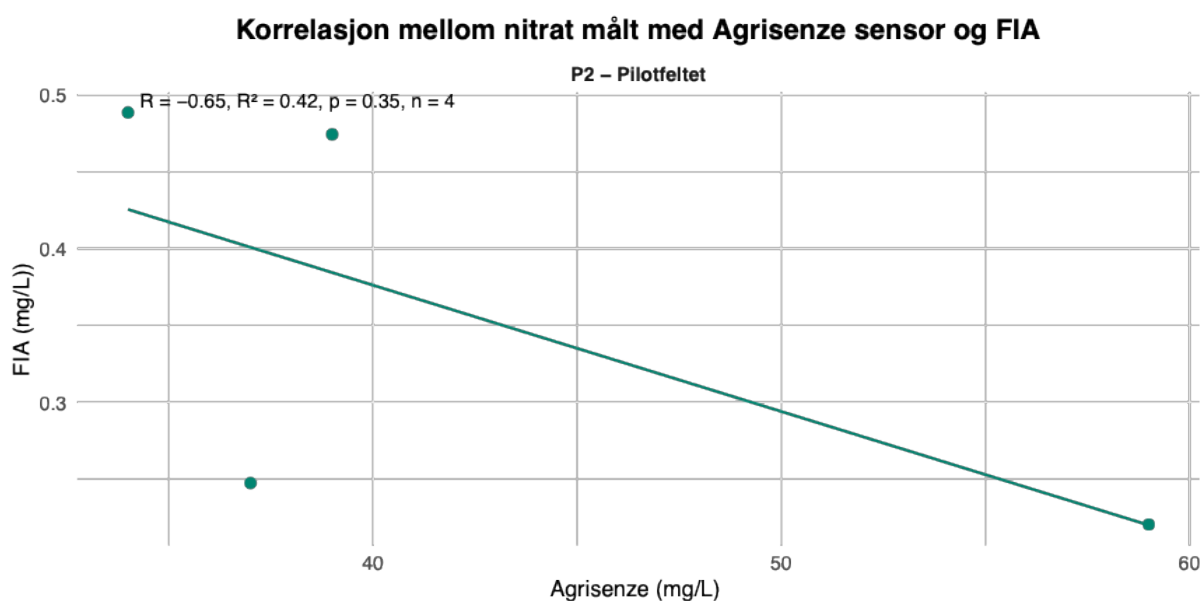
Figur 4-13 Lineær regresjon mineral N bestemt fra KCl ekstrakt med FIA og N i mg/kg bestemt med ComWin NPK-sensor. Figuren viser tre felt fra E166 med ulik behandling.

4.2.3 AgriSenze

Det er liten sammenheng mellom NO_3^- målt i KCl ekstrakt og NO_3^- bestemt med AgriSenze sin nitratsensors analyser fra porevann (Figur 4-15). AgriSenze sine målinger er vesentlig høyere enn konsentrasjonen målt i KCl-ekstrakt (Figur 4-14).



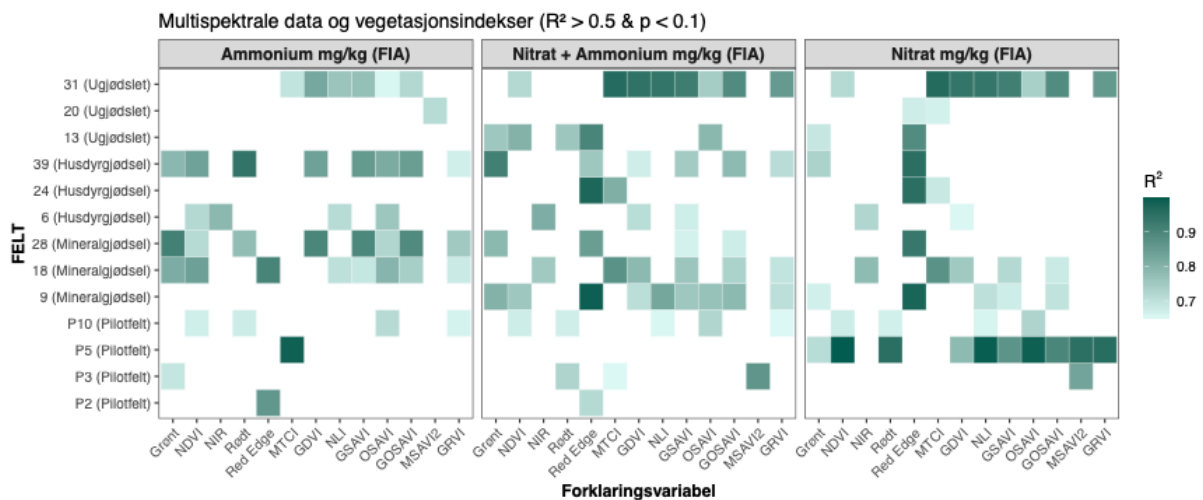
Figur 4-14 Tidsseriegraf med utvikling av konsentrasjon nitrat bestemt i KCl ekstrakt med FIA, samt nitrat bestemt med AgriSenze nitratsensor fra porevann.



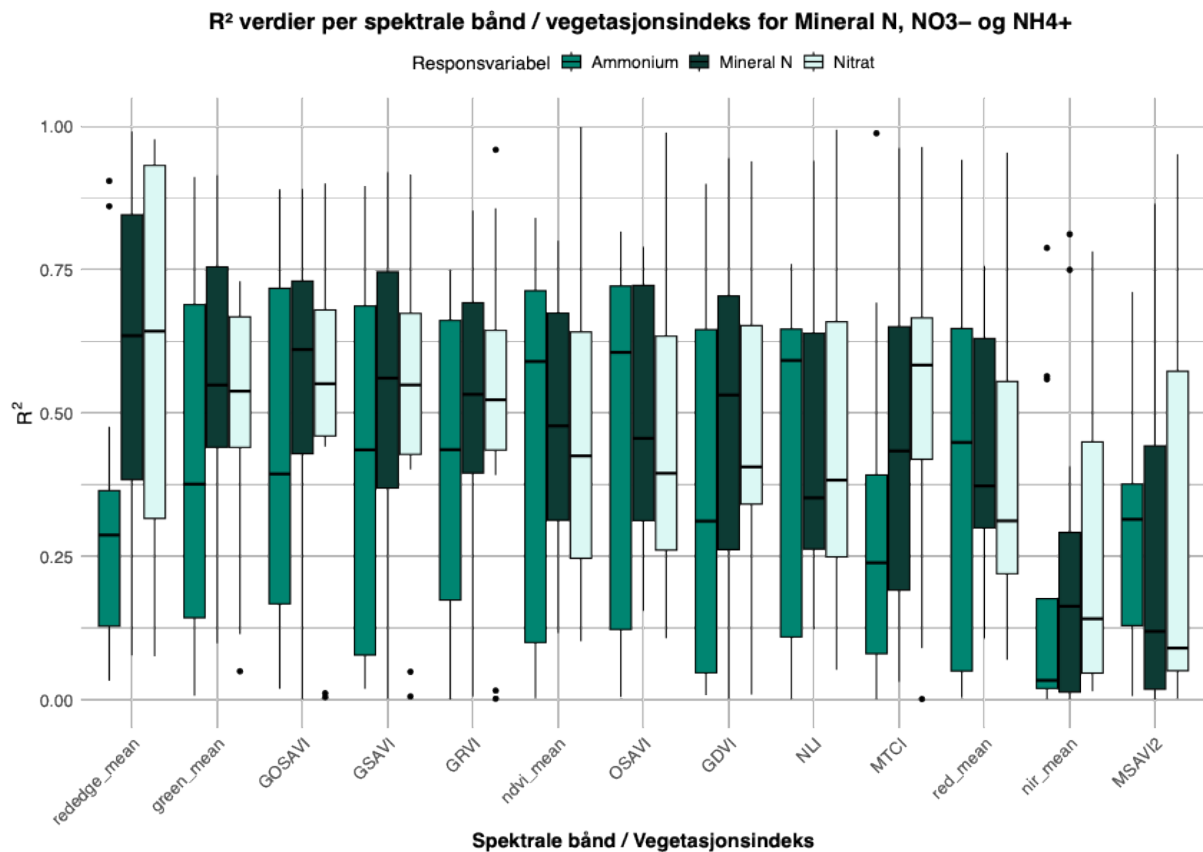
Figur 4-15 Regresjonsplot med sammenheng nitrat målt i KCl ekstrakt og nitrat bestemt med AgriSenze sensor i porevann.

4.3 Multispektrale bilder

Ved sammenligning av ulike spektrale bånd og vegetasjonsindekser forklaringsevne for innhold av N i jord (mineral N, NO_3^- og NH_4^+ bestemt ved KCl-ekstraksjon), vises en stor variasjon mellom forklaringsevnen til de ulike indeksene og båndene (Figur 4-16). Det er variasjon mellom ulike bånd, mellom ulike indeksers forklaringsevne, og i antall felt som oppfyller kriteriene med $R^2 > 0.5$ og p-verdi < 0.1 . Det er også varierende forklaringsevne på tvers av de ulike målingene av N i jord. Det er generelt best forklaringsevne for mineral N og NO_3^- på tvers av behandling (Figur 4-17).



Figur 4-16 «Heatmap» med oversikt over R^2 -verdier fra lineære regresjoner mellom ulike spektrale bånd og vegetasjonsindekser og tre kategorier mineral N (ammonium, nitrat + ammonium, nitrat) i jord. Kun modeller med $R^2 > 0.5$ og $p < 0.1$ er vist i figuren.



Figur 4-17 Boksploot som viser fordelingen av R²-verdier for forholdet mellom spektrale bånd og vegetasjon indekser og tre former for nitrogen i jorda: mineral N, NO₃⁻ og NH₄⁺. R²-verdiene ble beregnet for hvert enkelt felt, og gir en indikasjon på hvor godt de ulike vegetasjonsindeksene kan forklare variasjon i nitrogeninnholdet i jord.

4.3.1 Spektrale bånd

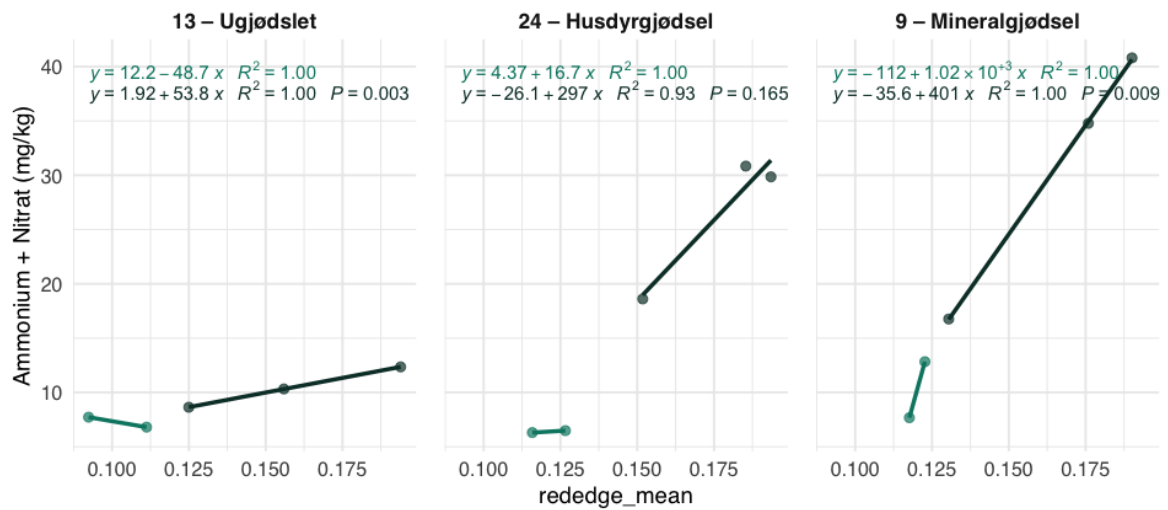
Red Edge

Red Egde har god forklaring for innhold av mineral N og NO₃⁻ og er det spektrale båndet med best forklaringsevne på tvers av felt (Figur 4-17). Forklaringsevnen for NH₄⁺ er dårlig. Forklaringsevnen er bedre for felt tildelt N-gjødsel, enn felt uten (Figur 4-18). Forklaringsevnen er betydelig høyere før skyting sammenlignet med etter skyting, da det observeres høyere stigningstall før skyting, både for mineral N og NO₃⁻ (Figur 4-18 og Figur 4-19). Dette indikerer at Red Edge båndet bedre fanger opp variasjon i N-innhold i jord før skyting enn etter (med unntak av felt 9 som kan skyldes noen unøyaktighet i bestemmelse av dato for skyting).

Sammenheng mellom innhold mineral N i jord og rededge_mean

Regresjonslinjer - før og etter skyting

Tidspunkt ● Etter skyting ● Før skyting

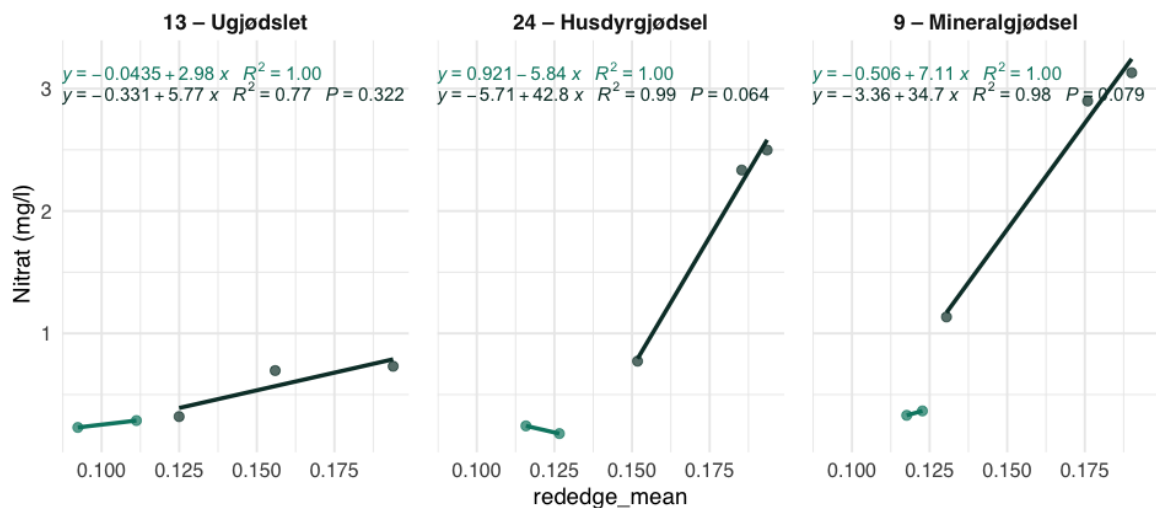


Figur 4-18 Regresjonsplot for sammenhengen mellom Red Edge båndet og innhold av mineral N i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

Sammenheng mellom innhold nitrat i jord og rededge_mean

Regresjonslinjer - før og etter skyting

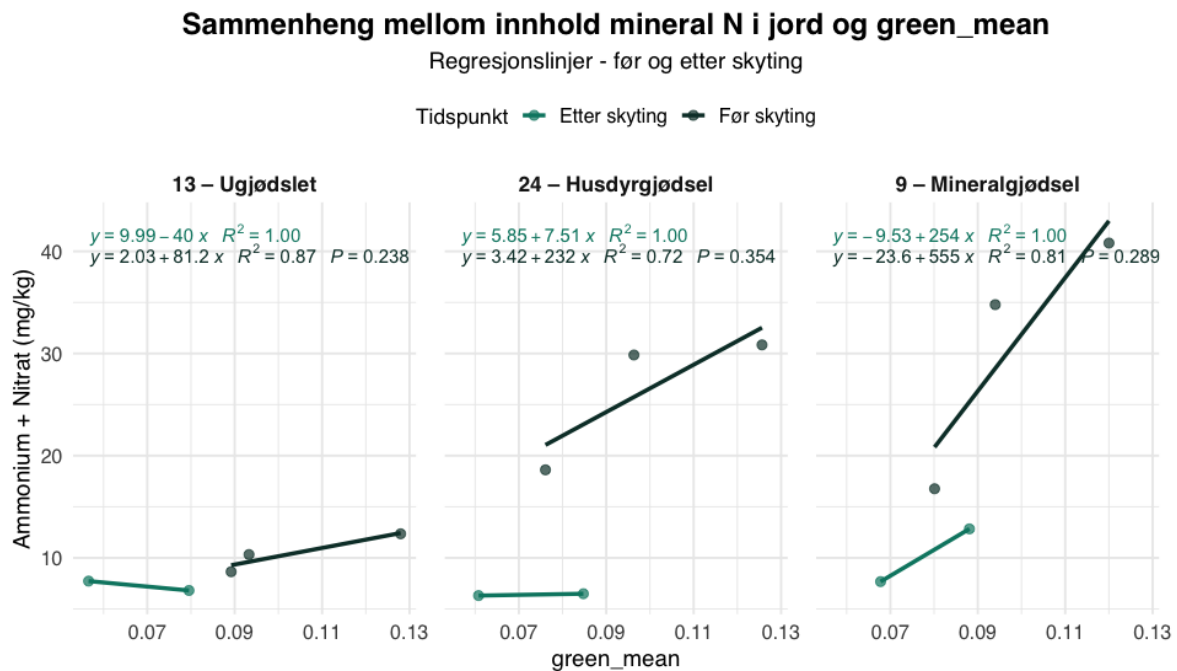
Tidspunkt ● Etter skyting ● Før skyting



Figur 4-19 Regresjonsplot for sammenhengen mellom Red Edge båndet og innhold av nitrat i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

Green

Green-båndet viser også en relativt god forklaringsevne av mineral N på tvers av felt (Figur 4-17). Forklaringsevnen er også ganske god for NO_3^- , men dårlig for NH_4^+ . Selv om R^2 er lavere før skyting enn etter skyting, for rutene tildelt N, er stigningstallet vesentlig høyere før skyting. Det betyr at likt Red Edge, er evnen til å fange opp variasjon bedre før skyting enn etter (Figur 4-20).



Figur 4-20 Regresjonsplot for sammenhengen mellom Green båndet og innhold av mineral N i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

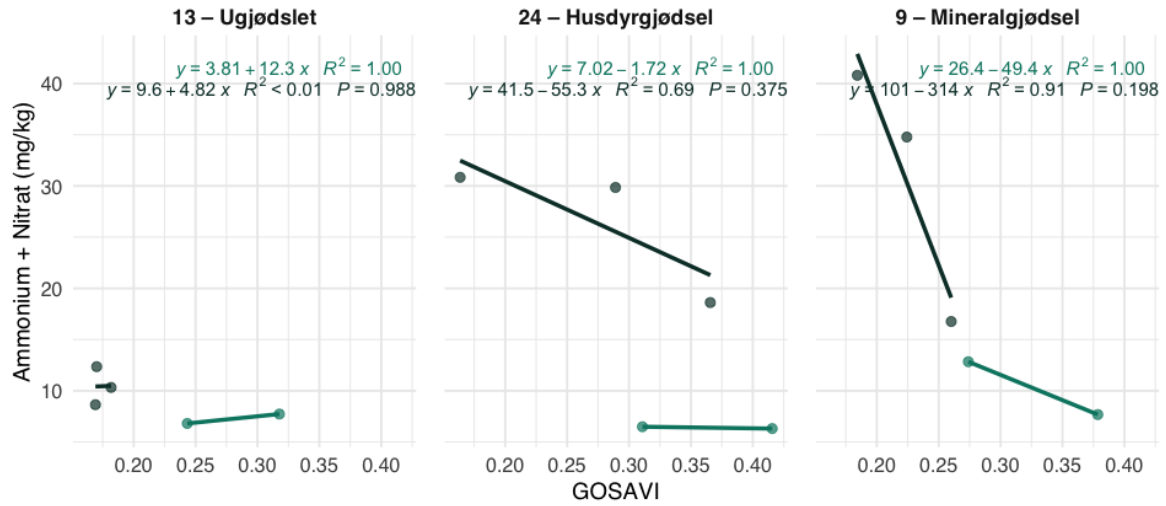
4.3.2 Vegetasjonsindekser

Vegetasjonsindeksen Green Optimized Soil Adjusted Index (GOSAVI) er den av de undersøkte VI-ene som har best forklaringsevne for mineral N på tvers av alle felt (Figur 4-17). GOSAVI har god forklaringsevne for NO_3^- , men dårlig for NH_4^+ . For GOSAVI er det også dårlig sammenheng for de feltene hvor det ikke er tildelt N, men god sammenheng for felt tildelt N. Tilsvarende som for spektralbåndene er også stigningstallet vesentlig høyere i vekstperioden før skyting enn etter. Det igjen indikerer en større sensitivitet for endringer i innhold mineral N og NO_3^- i jord før skyting enn etter (Figur 4-21 og Figur 4-22).

Sammenheng mellom innhold mineral N i jord og GOSAVI

Regresjonslinjer - før og etter skyting

Tidspunkt ● Etter skyting ● Før skyting

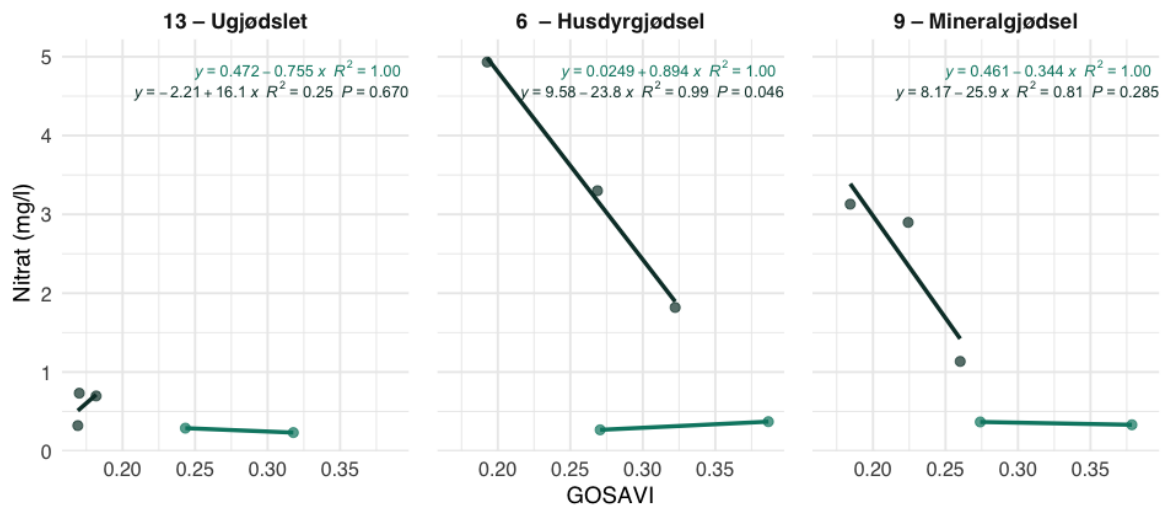


Figur 4-21 Regresjonsplot for sammenhengen mellom vegetasjonsindeksen GOSAVI og innhold av mineral N i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

Sammenheng mellom innhold nitrat i jord og GOSAVI

Regresjonslinjer - før og etter skyting

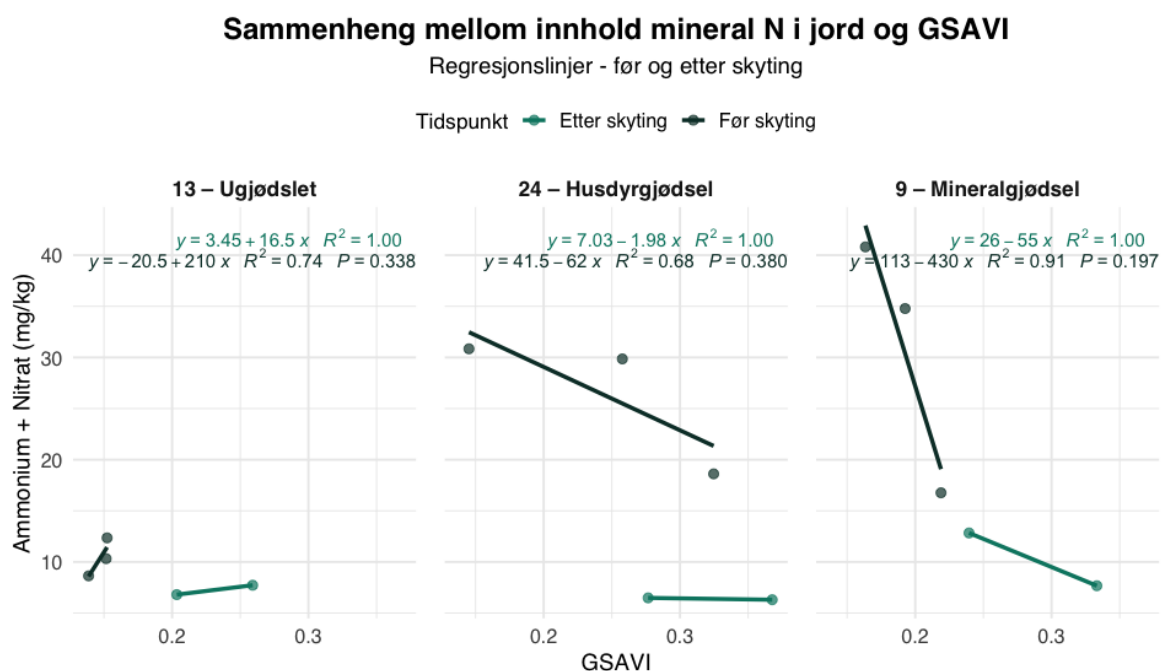
Tidspunkt ● Etter skyting ● Før skyting



Figur 4-22 Regresjonsplot for sammenhengen mellom vegetasjonsindeksen GOSAVI og innhold av nitrat i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

Vegetasjonsindeksene Green Soil Adjusted Vegetation Index (GSAVI) og Green Red Vegetation Index (GRVI) oppfører seg ganske likt GOSAVI og har relativt god forklaringsevne for Mineral N og NO_3^- , men dårligere for NH_4^+ alene (Figur 4-17). Også for disse indeksene observeres det en endring i stigningstall før og etter skyting (Figur 4-23 til og med Figur 4-26). Igjen er det en tendens til høyere stigningstall før skyting enn etter. Etter skyting er stigningstallet til regresjonsgrafene nær null i flere felt. Dette tyder på at indeksene ikke klarer å registrere variasjon i innhold N i jord etter skyting.

MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) er vegetasjonsindeksen som best måler NO_3^- på tvers av alle felt (Figur 4-17). Også for MTCI reduseres igjen stigningstallet betraktelig etter skyting (Figur 4-27). Forklaringsevnen (R^2) varierer også mellom ulike gjødslingsbehandlinger.

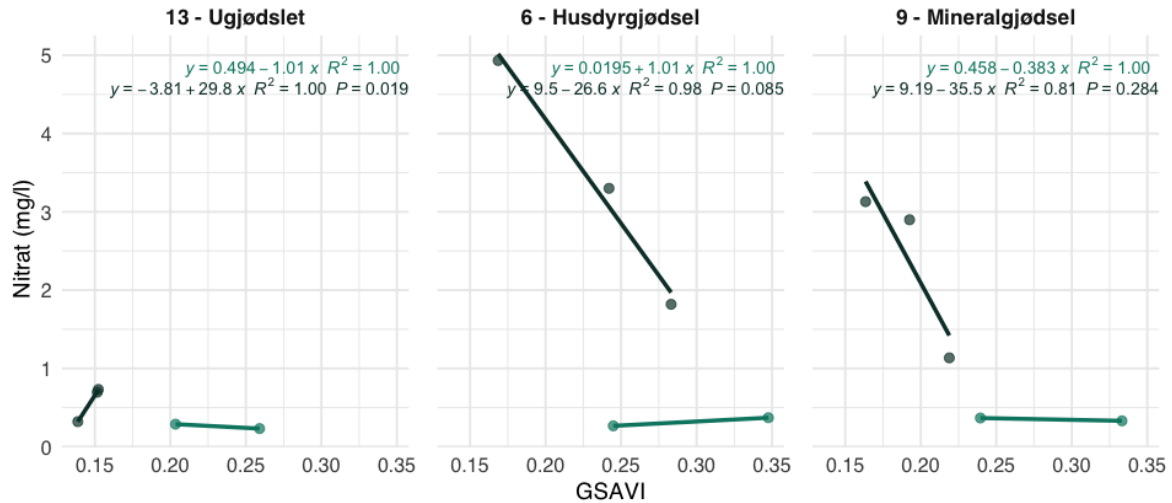


Figur 4-23 Regresjonsplot for sammenhengen mellom vegetasjonsindeksen GSAVI og innhold av mineral N i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

Sammenheng mellom innhold nitrat i jord og GSAVI

Regresjonslinjer - før og etter skyting

Tidspunkt ● Etter skyting ● Før skyting

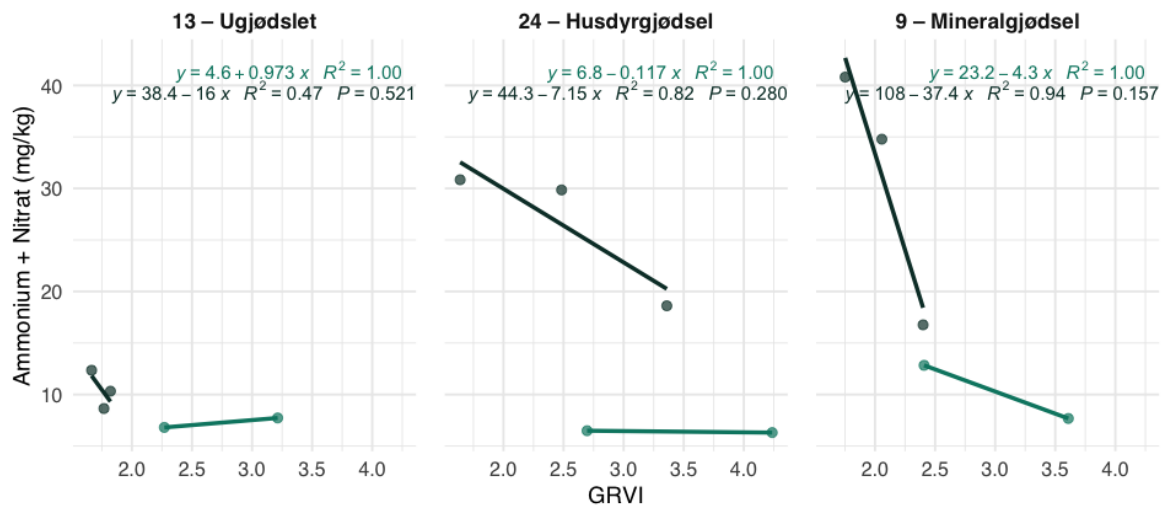


Figur 4-24 Regresjonsplot for sammenhengen mellom vegetasjonsindeksen GSAVI og innhold av nitrat i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

Sammenheng mellom innhold mineral N i jord og GRVI

Regresjonslinjer - før og etter skyting

Tidspunkt ● Etter skyting ● Før skyting

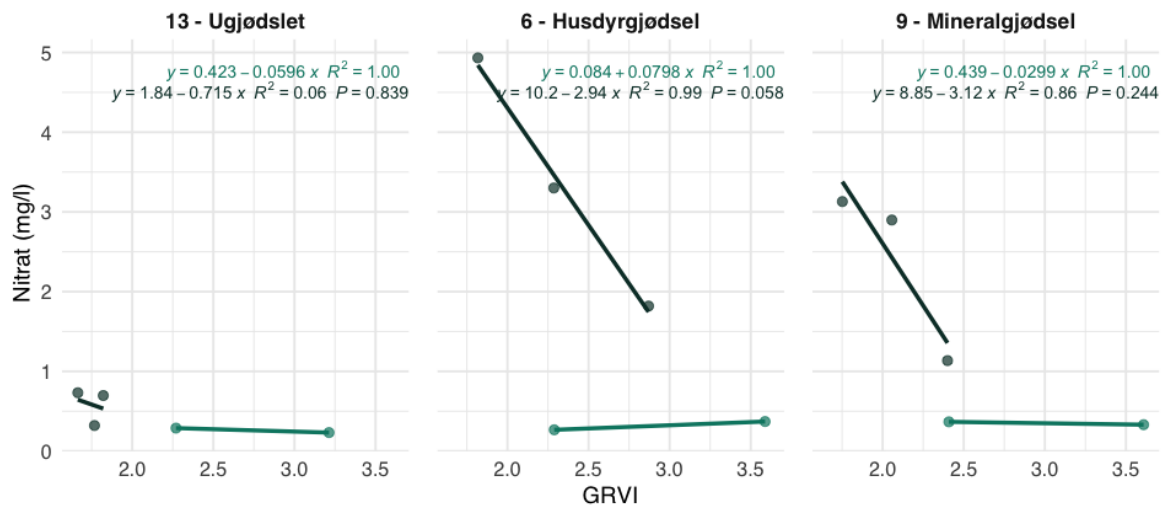


Figur 4-25 Regresjonsplot for sammenhengen mellom vegetasjonsindeksen GRVI og innhold av mineral N i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

Sammenheng mellom innhold nitrat i jord og GRVI

Regresjonslinjer - før og etter skyting

Tidspunkt ● Etter skyting ● Før skyting

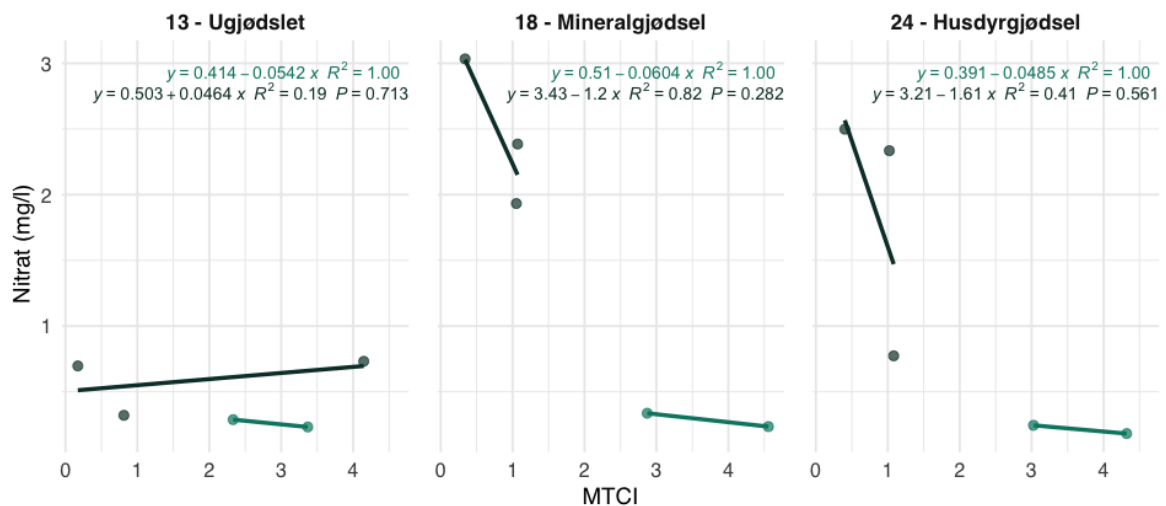


Figur 4-26 Regresjonsplot for sammenhengen mellom vegetasjonsindeksen GRVI og innhold av nitrat i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

Sammenheng mellom innhold nitrat i jord og MTCI

Regresjonslinjer - før og etter skyting

Tidspunkt ● Etter skyting ● Før skyting



Figur 4-27 Regresjonsplot for sammenhengen mellom vegetasjonsindeksen MTCI og innhold av nitrat i jord. Figuren har med tre felt fra E166 med ulike gjødslingsbehandlinger. Figuren viser endring i sammenheng før og etter skyting.

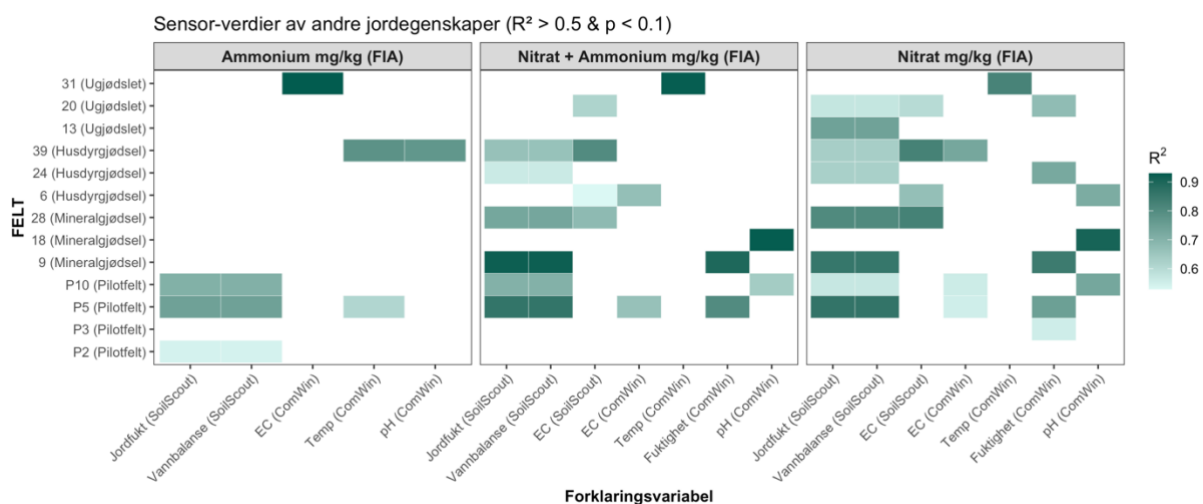
4.4 Sensormålinger av andre jordegenskaper

Ved sammenligning av sensorregistreringer av ulike jordegenskaper (temperatur, fuktighet og ledningsevne) og korrelasjon med jordas N-innhold (mineral N, NO_3^- og NH_4^+ bestemt ved KCl ekstraksjon), vises stor variasjon i forklaringsevnen mellom sensorene, og mellom de ulike parametre som er registrert (Figur 4-28). Det er generelt en bedre forklaringsevne mellom sensormålingene og Mineral N og NO_3^- , enn for NH_4^+ . Det er variasjon mellom disse sensorene også, i forhold til hvilke felt som oppfyller kriteriet $R^2 > 0.5$ og $p\text{-verdi} < 0.1$.

Sensorregistrert vanninnhold i jord, d.v.s. jordfuktighet og vannbalanse målt med Agdirs Soil Scout, samt delvis jordfuktighet målt med ComWin sensoren, registrerer verdier som samvarierer godt med innhold av og NO_3^- og mineral N i jord.

Jordfuktighet og vannbalanse målt med Soil Scout forklarer også noe av variasjonen i innhold av NH_4^+ for flere av prøvepunktene på Pilotfeltet. Registreringer av EC (elektrisk ledningsevne) fra Agdirs Soil Scout viser bedre sammenhenger enn EC målinger fra ComWin sensoren som kun har lave og kun en mer tilfeldig forklaringsevne på tvers av felt, N-tilførsel og N i jord.

For Agdirs Soil Scout og ComWin sensoren er det igjen bedre sammenheng mellom sensormålinger og N i jord for rutene gjødslet med N enn de uten. Det vil si at det observeres bedre sammenheng ved høyere N-konsentrasjoner.

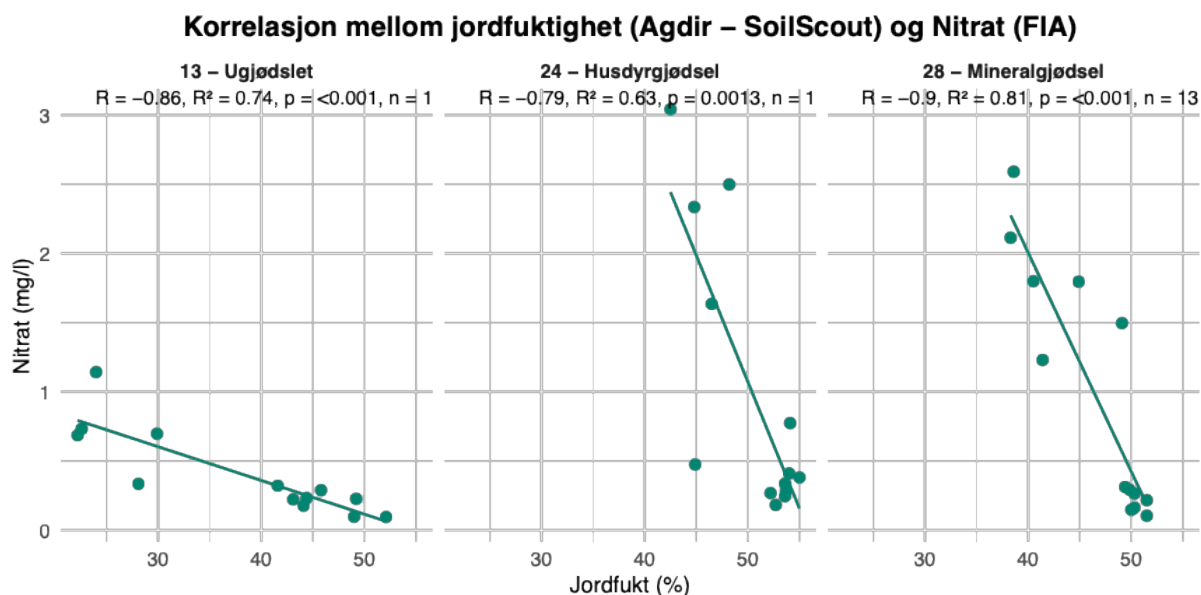


Figur 4-28 «Heatmap» med oversikt over R^2 -verdier fra lineære regresjoner mellom ulike jordegenskaper registrert med sensorer og tre kategorier mineral N (ammonium, nitrat + ammonium, nitrat) i jord. Kun modeller med $R^2 > 0.5$ og $p < 0.1$ er vist i figuren.

Agdir Soil Scout

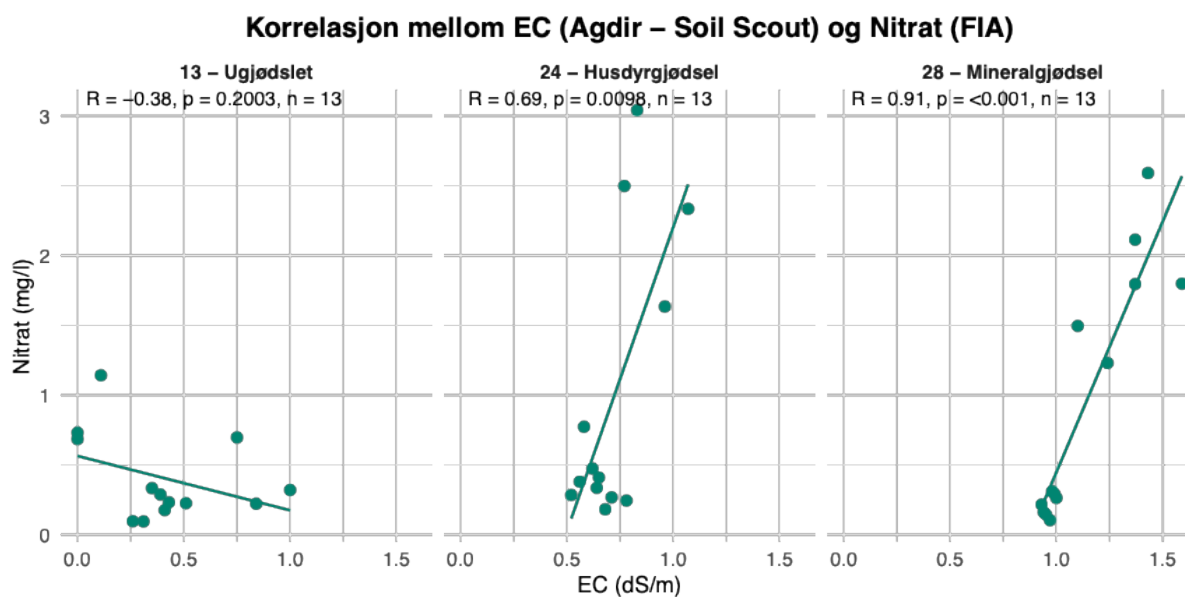
For de kontinuerlige registreringene med Agdirs Soil Scout var vanninnhold og EC, best korrelert med jordas innhold av NO_3^- . Det var best sammenheng med NO_3^- sammenlignet med NH_4^+ og mineral N.

For alle gjødselbehandlingene er det en god og tydelig negativ korrelasjon mellom Agdirs jordfuktighet og jordas innhold av NO_3^- (Figur 4-29). Regresjonslinjen har lavere stigningstall for ugjødslet felt, d.v.s. lavere sensorsensitivitet ved lavere N-konsentrasjoner.



Figur 4-29 Regresjonsplot som viser sammenhengen mellom jordfuktighet målt med Agdir sine Soil Scout og innhold nitrat bestemt fra KCl-ekstrakt med FIA. Figuren viser tre felt fra E166 med ulike behandlinger.

Det er positiv korrelasjon mellom Agdirs registreringer av EC målt med Soil Scout og innhold av NO_3^- i jord for feltene tildelt gjødsel (Figur 4-30). Forklaringsevnen (R^2) er også bedre ved høyere konsentrasjoner av NO_3^- enn ved lave.



Figur 4-30 Regresjonsplot som viser sammenhengen mellom EC målt med Agdir sine Soil Scout og innhold nitrat bestemt fra KCl ekstrakt med FIA. Figuren viser tre felt fra E166 med ulike behandlinger.

5 Diskusjon

For å understreke behovet for større presisjon i gjødselplanlegging m.h.p. N, blir variasjonen i plantetilgjengelig N målt i jordprøver fra punkter og ruter i felt gjennom en vekstsesong diskutert. Videre diskuteres samvariasjonen mellom de to metodene for nitratbestemmelse: FIA i KCl ekstrakt og den raskere og enklere alternative nitratselektive elektroden fra Orion.

Som beskrevet innledningsvis er imidlertid hovedspørsmålet i dette studiet: ***Kan sensorer gi bonden pålitelig informasjon om variasjoner i plantevekst og innholdet av plantetilgjengelig nitrogen i jorda gjennom en vekstsesong?*** Et godt sensorverktøy vil kunne hjelpe bonden til bedre å kunne tilpasse N-gjødslingen etter plantens behov. Ulike sensorverktøy er testet mot målinger av plantetilgjengelig N i jord i de to forsøksfeltene E166 og Pilotfeltet, hvor det i begge ble dyrket bygg. Sammenhenger mellom målt plantetilgjengelig N i jord og endringer registrert av de ulike sensorverktøyene er vist i resultatkapittelet og vil bli diskutert her.

I dette studiet ble det i liten grad funnet sammenhenger mellom sensormålinger og jordas innhold av ammonium. Dette kan ha ulike årsaker. Ammonium er, sammenlignet med nitrat, mindre mobilt i jorda, da molekylets positive ladning fører til at ammonium bindes til overflaten av negativt ladede leirpartiklene eller organisk materiale (ref. Ammoniumfiksering kap. 2.1). I tillegg kan ammonium fikseres i leirminerale. Ved økt konsentrasjon av nitrat i jorda, vil ionestyrken øke da nitrat ligger løst i porevannet. En tilsvarende økning for ammonium ville ikke gitt samme utslag på EC da en stor andel vil være bundet.

5.1 Sesongvariasjon i plantetilgjengelig N og gjødselplanlegging

Målingene av jordas nitrat- og ammoniuminnhold, fra jordprøver som er hentet gjennom vekstsesongen og målt i KCl-ekstrakt med FIA, viser variasjon både stedvis innen feltene (Pilotfeltet og E166) og over tid (Figur 4-1 til og med Figur 4-8).

Variasjonen mellom punkter (Pilotfeltet) og plott (E166) skyldes i hovedsak forskjeller i innholdet organisk materiale innad i feltene (Tabell 3-1 og Tabell 3-2). For E166 gjenspeiler variasjonen mellom rutene både forskjeller i jordas organiske innhold (Tabell 3-1), men i hovedsak gjødselbehandling, både mengde og type gjødsel.

Tallene fra Pilotfeltet (Figur 4-1 og Figur 4-2) viser hvordan innholdet av organisk materiale (Tabell 3-1 og Tabell 3-2) og da mineraliseringen har stor innvirkning på innhold av plantetilgjengelig N gjennom vekstsesongen. Når en bonde skal planlegge sin N-gjødsling brukes korreksjonstabeller basert på moldklasse (NIBIO, u.å.-a) og beregning av en forgrødeeffekt, men dette benyttes vanligvis ikke til planlegging av en eventuell variabel tildeling av gjødsel innen et skifte eller til delgjødsling.

Tendensen til en senere «nitrogentopp» der jordas innhold av organisk materiale er lavere, kan indikere en sammenheng mellom tilgang på føde, d.v.s. mengde organisk materiale, temperatur og mikrobiell aktivitet. Et høyt innhold av organisk materiale kan se ut til å kunne gi god mikrobiell aktivitet (mineralisering), og mer plantetilgjengelig N også under noe kjøligere forhold, tidlig i vekstsesongen sammenlignet med situasjonen hvor det organiske innholdet er lavt.

Det varierende innholdet av plantetilgjengelig N i Pilotfeltet, både mellom målepunkter og over tid, viser at det vil være hensiktsmessig å gjennomføre variabel gjødsling i et felt som dette. Gjennom vekstsesongen ble det i hvert punkt, visuelt, observert variasjon i plantenes vekst og utvikling. En ujevn åker gir bonden utfordringer. Det ujevne i vekst, modning og kvalitet må bli forsøkt jevnet ut med hjelp av variabel og presis gjødsling. Ved en variabel gjødsling vil det være lettere å oppnå de ulike områdenes individuelle avlingspotensial (Hedley, 2015) og dermed sikre bondens avling og utbytte, samt hindre overskuddsgjødsling og uønsket avrenning.

5.2 Nitrat med NSE sammenlignet med KCl/FIA.

Selv om det generelt måles høyere nitratverdier med NSE enn i KCl/FIA, fanger begge metodene opp hovedtrendene i utviklingen av innhold gjennom vekstsesongen, mellom punkter og ruter, samt forskjellene i gjødseltilførsel (E166). Samvariasjonen (Figur 4-9) for NO_3^- bestemt med NSE og KCl ekstraksjon/ FIA er imidlertid lavere enn forventet ($R^2 < 0.5$). Bedre samvariasjon er vist i studiet til Øien og Selmer (Øien & Selmer-Olsen, 1969). Det kan være ulike årsaker til manglende sammenfall. Det er vist at NSE er mindre pålitelig ved lave konsentrasjoner (Krogstad, 2009). De laveste verdiene ($< 2 \text{ mg/L}$ bestemt med NSE) ble utelatt. Samvariasjonen i konsentrasjonsintervallet $2 - 10 \text{ mg/L NO}_3^-$ bestemt med NSE ble høyere for feltet tildelt husdyrgjødsel, men det var ikke tilfellet for de øvrige feltene. At elektroden viste store variasjoner i sensitivitet mellom ulike måletidspunkt, kan også være et tegn på at den var litt gammel. Membranen og elektroden må stå i en kalibreringsvæske. Kalibreringsvæsken var på plass, men den kan ha tørket ut i perioder. Dette kan ha påvirket sensitiviteten til elektroden.

Noe av variasjonen i NO_3^- konsentrasjonene, kan også skyldes naturlig variasjon i jordprøvene. Nitrat bestemt med NSE og KCl ekstraksjon/FIA ble utført på samme jordprøve. Hver jordprøve ble godt blandet og behandlet likt før det ble tatt ut materiale til de to analysene. Tross dette kan det ha vært noe variasjon i prøven mellom de ulike uttakene, men trolig ikke nok til å forklare den manglende samvariasjonen.

Metoden med nitratselektiv elektrode til bestemmelse av NO_3^- kan likevel ha et potensiale (Najdenko et al., 2024) og NSE er blitt brukt til prøveuttak av jord og direkte analyse av nitrat i felt (Sibley et al., 2010). Både standard metode (KCl/FIA) og bestemmelse med NSE har utfordringer m.h.p. oppbevaring av jord før ekstraksjon og analyse av NO_3^- . For å unngå endringer i tilstandsformer av N under lagring må jordprøven fryses ned raskt etter uttak. Når prøven tines opp før ekstraksjon er det igjen fare for mineralisering og endringer i tilstandsformer. NSE-metoden er raskere, enklere og billigere sammenlignet med KCl-ekstraksjon og FIA.

5.3 Yara N-Sensor

Yara N-Sensor har i denne undersøkelsen vist god forklaringsevne for innholdet av mineral N i jord (Figur 4-12). Yara N-Sensorens beregninger av plantenes N-opptak (SN-verdi), basert på reflektansmålinger fra biomassen, hadde god sammenheng med innholdet av mineral N i jord. Som forventet er korrelasjonen negativ. Det vil si at ved en økning i N i plantene, går innholdet av mineral N i jord ned.

Ved å benytte Yara N-sensors estimerer på innhold av N i biomassen (SN-verdi), samt fra en nullrute like ved, kombinert med kunnskap om tidligere N-utvasking og tilført mengde N-gjødsel vil verdier på innhold av mineral N i jord kunne beregnes (se likningen nedenfor). Nullrute er en rute på skiftet hvor det ikke har blitt gjødslet med nitrogen.

$$\text{N i jord} = \text{Tildelt gjødsel} + \text{nullrute SN} - \text{SN} - \text{Utvasking}$$

Tildelt gjødsel: Mengde N tildelt

Nullrute SN: Yara N-Sensor verdi registrert i nullrute

SN: Yara N-Sensor verdi registrert i områder tildelt gjødsel

Utvasking: Estimat på N tap fra NIBIOs utvaskingskalkulator

For bestemmelse av plantenes N-opptak for bygg og jordas mineral-N-innhold, er imidlertid bruksområdet noe begrenset. For vårbygg, som har blitt dyrket i dette studiet, er vekstsesongen svært kort. Tidsrommet mellom busking og skyting er bare noen få uker. Det betyr at virkningsområdet til Yara N-Sensor for bestemmelse av N-opptak i biomasse, og dermed tidsrommet den er et egnet hjelpemiddel for estimering av N i jord, her var kort.

Resultatene i dette studiet underbygger likevel sensorens potensiale som et beslutningsverktøy for delgjødslingsstrategier og presisjongjødsling. Yara N-Sensor viste evne til å registrere variasjon innad i felt og mellom ulike gjødselbehandlinger over tid.

Sanntidsregistrering av og gjødsling med N, basert på Yaras N-sensor målinger har vist deg å kunne bidra til både en økonomisk og en miljømessig gevinst ved å maksimere avlingspotensialet og samtidig redusere unødvendig høy N-gjødsling og risiko for uønsket tap av N til miljøet (Korsæth et al., 2019; Lindblom et al., 2017). Yara N-Sensor har et større potensiale i andre vekster enn bygg, vekster med lengre tidsperiode mellom busking og skyting, og kan for disse være et godt verktøy som basis for proteingjødsling ved senere vekststadier.

Innkjøp av Yara N-Sensor vil imidlertid være en ganske stor investering for de fleste bønder.

5.4 Vegetasjonsindekser og spektrale bånd

Det ble undersøkt hvorvidt de ulike spektrale båndene og vegetasjonsindekser kan benyttes for å predikere eller beskrive variasjon i jordas N-innhold. Resultatene viser at flere av de spektrale båndene og indeksene viste god evne til å forklare variasjon av jordens innhold av nitrat og mineral N basert på fjernmålinger av biomassen. Tidligere studier har vist at VI-er kan benyttes til å beskrive nitrogeninnhold i biomassen (Hansen & Schjoerring, 2003), og at innhold av nitrogen i biomassen er korrelert med innhold nitrogen i jord.

Flere spektrale bånd og VI-er har i denne undersøkelsen vist god forklaringsevne for innholdet av mineral N og NO_3^- i jorda. Blant de spektrale båndene er det Red Edge og Green som viser best sammenheng med innhold av nitrat og mineral N i jord (Figur 4-18 og Figur 4-19). Tilsvarende gode sammenhenger med Red Edge og Green for N-innhold i plantenes biomasse er også funnet i andre studier (Clevers & Gitelson, 2013; González-Piqueras et al., 2017). Også andre vegetasjonsindekser viste relativt god sammenheng med innhold nitrat og mineral N i jord.

Sammenhengen mellom ulike spektrale bånd og VI-er er ofte god, men det ble observert en variasjon i stigningstallet mellom ulike vekststadier og ulike gjødslingsregimer. Et lavere stigningstall indikerer lavere sensitivitet for endringer i mineral N eller nitrat i jord. Det ble ofte observert lavere stigningstall for de ugjødslede rutene, altså hvor N konsentrasjonen var lav. Den tydeligste endringen i stigningstall var imidlertid mellom vekststadiene før og etter skyting. Generelt var det betydelig lavere stigningstall etter skyting sammenlignet med før skyting. Paralleller kan trekkes til Yara N-Sensor som også er en spektral sensor. Yara N-Sensor var for bygg kun egnet før skyting. Etter skyting forstyrrer snerpen på aksene bildene og gjør sensitiviteten for endringer i N-innhold lavere. For noen av feltene ble det til og med registrert en endring i fortegn, fra positiv til negativ, til stigningstallet fra før til etter skyting, selv om R^2 holdt seg høy gjennom begge vekststadier.

5.5 Agdir – Soil Scout

Det var en sammenheng både mellom EC og vanninnhold registrert med Agdir Soil Scout, og innhold av nitrat i jord. Den observerte sammenhengen mellom EC målinger og innhold av nitrat i jord er forventet da NO_3^- er et løst salt og vil direkte påvirke den elektriske ledningsevnen til jorda (Zhang & Wienhold, 2002). Den negative korrelasjonen mellom vanninnhold og konsentrasjon av nitrat er heller ikke uventet, da økt vanninnhold vil gi en fortynning (Zhang & Wienhold, 2002).

For sammenhengen mellom jordas nitrat-innhold og EC, er det både lavere forklaringsevne, R^2 , og en endring i fortegn på korrelasjonen, R , for ugjødslet felt sammenlignet med gjødslet (Figur 4-30). Det er altså en tydelig endring i sammenheng mellom EC og jord-nitrat i ulike gjødslingsbehandlinger. Dette tyder på at Agdirs Soil Scout EC målinger alene ikke vil være en god indikator på innhold NO_3^- i jord, men kan likevel være en indikator som registrerer endring i innhold av NO_3^- gjennom en vekstsesong.

Agdir sine Soil Scout har en tydelig anvendbarhet ved at de nedgravde sensorene gir kontinuerlig informasjon gjennom en vekstsesong. Spesielt er informasjon om jordas vanninnhold nyttig når det f.eks. kommer til agronomiske avgjørelser knyttet til behov for vanning i tørkeperioder. Hvis sensoren registrerer en stor nedgang i EC som sammenfaller med nedbørperiode, vil det kunne være en indikasjon på tap av N ved utvasking.

5.6 ComWin NPK-sensor

Målingene med ComWin sensoren viste kun sporadisk sammenheng mellom de ulike måleparameterne og innhold mineral N og nitrat i jord (Figur 4-10 og Figur 4-28). Hvilke metoder ComWin sensoren baseres på er ikke dokumentert. Da måleparameterne er korrelerte virker det som sensoren bruker lineære sammenhenger mellom EC, og N, P, K og pH. Det er mulig å gjøre en slags kalibrering av ComWin sensoren basert på en lineær sammenheng. En slik kalibrering ble imidlertid ikke gjennomført i denne undersøkelsen.

Selv om sensoren er rimelig, lett å skaffe og enkel å bruke, vurderes den som lite anvendbar. Det var ingen god sammenheng mellom målinger fra ComWin sensoren og N i jord. Dette verktøyet kan ikke gi god informasjon til bønder for hjelp til presisjonsgjødsling. Selv om ComWin sensoren måler EC, slik Agdirs Soil Scout også gjør, var det ingen sammenheng mellom ComWin-målt EC og nitrat i jord.

Det er en utfordring at en sensor som denne er lett tilgjengelig, i salg på internett, og det til en lav pris. Det reklameres med rask og enkel bestemmelse av pH og viktige næringsstoffer som N, P og K, men metoden er ikke gjort rede for. Ukritisk bruk av denne sensoren kan gi negative konsekvenser for bondens avling og økonomi, og også for miljøet.

5.7 AgriSenze

I utprøvingen av AgriSenze sin prototyp ble sammenhengen mellom innhold nitrat i jord (KCl-ekstrakt målt med FIA), og nitrat bestemt i oppsamlet porevann med AgriSenze prøvetaker. Det var ingen sammenheng mellom disse målingene. Siden analysene med AgriSenze ble gjennomført med porevann, mens sammenligningsgrunnlaget var jordprøver og standard analyse med KCl-ekstraksjon og FIA, forventes ikke et sammenfall, men en samvariasjon hadde ikke vært urealistisk. Testen utført her er altså ingen god test av AgriSenze sin porevannsanalyse av nitrat.

Knyttet til uttak av porevann var det en del utfordringer med installasjonen, og drift av AgriSenze-utstyret. Utstyrets evne til å samle inn porevann var varierende, og den var ute av drift i lengre perioder enten pga. manglende sug eller lite vann i jorda. Beholderen med oppsamlet porevann bør tømmes daglig. Dette ble forsøkt gjennomført. Det er bl.a. utfordringer med utstyrets evne til oppsamling av porevann, installasjonens størrelse, strømtilgang, kontaktflaten mot jordpartiklene. Utstyret er imidlertid i en tidlig utviklingsfase.

Kontinuerlig måling av nitrat i porevann kan være svært nyttig i forbindelse med måling og kontroll av uønsket avrenning, men kan ha begrenset verdi for en bonde og i agronomiske systemer. Bønder må forholde seg til arealenheter (kg N per dekar) når gjødselmengder og NUE skal beregnes. Porevannsmålinger av nitrat-konsentrasjonen med AgriSenze er ingen totalmåling av mengden NO_3^- for arealet og kan ikke enkelt overføres til N-behov på en arealenhet og kan derfor ikke direkte brukes til presisjongjødsling.

En enkel justering for å gjøre AgriSenze-metoden mer anvendbart kan være utvikling av en enkel ekstraksjon, som kan gjøres i felt på fuktig jord. Det vil da bli lettere å relatere konsentrasjonen bestemt med sensoren til areal, og dermed være bedre egnet som verktøy i presisjongjødsling.

5.8 Oppsummering

Blant sensorene som er undersøkt i dette studiet har sensorene basert på spektrale data, dvs. Yara N-sensor og multispektrale dronebilder, gitt best sammenheng med innhold av mineral N og nitrat i jord. Dette indikerer at registreringer på vegetasjonen kan være en tilstrekkelig god metode for raskt å predikere innhold av N i jord da dataene fra de spektrale målemetoder direkte kan benyttes til beregning av nitrogeninnhold i jord (ref. kap. 5.3). Som nevnt, registrerer de spektrale metodene best variasjon i innhold nitrat og mineral N i jord, men dårlig ammonium alene. Plantene tar lettere opp nitrat enn ammonium, da det er mer mobilt i jorda. Innholdet av nitrat gjenspeiles derfor tydeligere i biomassen.

Videre er ser vi at det for de spektrale metodene er en betydelig bedre sammenheng mellom registrering og jordas N-innhold i vekststadiet før skyting. Vårbygg er en kornsort med kort vekstsesong, og det er som oftest kort tid mellom vekststadiene busking og skyting. Det er i dette korte tidsrommet spektrale sensorer, slike som Yara N-Sensor, har sitt virkningsområde. Om dette gjelder alle kornsorter er uvisst, da det her ble undersøkt kun på bygg. Det er trolig den lysere fargen til snerpen på bygget, som forstyrrer bildene. For spektrale metoder kan det også være en mer generell utfordring med forstyrrelse på registreringene ved sykdom, tørkestress eller andre stressfaktorer og mangler som påvirker fargen til plantene. For å få et bedre innblikk i virkningen til disse sensorene bør det da gjennomføres lignende undersøkelser, og helst over flere vekstsesonger, slik at en bedre kan få et inntrykk av evnen til å registrere variasjon av nitrogen i jord gjennom ulike forhold. Sorter som anlegges på høsten, slike som f.eks. høsthvete, vil trolig ha et større tidsspenn for undersøkelse.

Generelt var det bedre sammenheng mellom sensormålinger og jordas N-innhold ved høyere konsentrasjoner av nitrogen, altså hvis N-gjødsel var tilført. I et agronomisk system er som oftest tilført N-gjødsel (event. kompost, nitrogenfikserende bakterier, osv.), og ligger i konsentrasjonsområdet som her beskrives som “høyere” og sensorverktøyene er altså, ikke overraskende, bedre tilpasset et slikt system enn et naturlig.

6 Konklusjon

I dette studiet er ulike sensorers evne til å forklare variasjon i innhold av plantetilgjengelig nitrogen i jord undersøkt. Utprøvingen av sensorene har foregått gjennom en vekstsesong i to felt hvor det ble dyrket bygg. Til sammenligning ble det brukt data fra nitrogenanalyser på jordprøver innsamlet gjennom hele vekstsesongen, på de ulike forsøksfeltene.

Yara N-Sensor gav god sammenheng med plantetilgjengelig N i jord, på tvers av felt og gjødslingsbehandling, og vurderes som et godt hjelpemiddel for å estimere innhold av nitrogen i jord i vekstperioden, busking til skyting i bygg.

Det var også gode sammenhenger mellom et utvalg spektrale bånd (Green og Red Edge) og vegetasjonsindekser (GOSAVI, GSAVI, GSAVI og MTCI) og innhold av plantetilgjengelig N i jord. Multispektrale bilder kan også være et godt hjelpemiddel for å estimere innhold av plantetilgjengelig N i jord i vekstperioden fra busking til skyting i bygg.

Å bestemme nitratkonsentrasjon i jord ved bruk av nitratselektiv elektrode er enklere og raskere enn standardmetoden med KCl-ekstraksjon og FIA. I denne undersøkelsen var imidlertid sammenhengen mellom nitrat målt med selektiv elektrode og nitrat målt med FIA i KCl-ekstrakt dårligere enn det som er funnet i andre studier. Selv om resultatene ikke var lovende i denne undersøkelsen anbefales fortsatt bruk av nitratselektiv elektrode som et mer kostnadseffektivt og tidsbesparende alternativ til standard nitrat analyse i jord.

Agdires Soil Scouts måler jordegenskaper som EC, temperatur og vanninnhold. De kontinuerlige registreringene av EC (ledningsevne) og vanninnhold var korrelert med målte endringer i nitrat i jord gjennom vekstsesongen. Selv om disse enkle registreringene ikke direkte kan predikere innholdet av plantetilgjengelig N i jord kan de gi nyttig informasjon om N-status i jord og dermed til agronomiske vurderinger og beslutninger knyttet til gjødsling og vanning.

ComWin sensoren viste kun sporadisk en sammenheng med innhold av plantetilgjengelig nitrogen i jord, og vurderes ikke som et egnet beslutningsverktøy for gjødsling.

AgriSenze er i oppstartsfasen og lite utviklet. Testen ble begrenset og de få porevannsprøvene viste ingen god sammenheng med innhold av nitrat i jord. AgriSenze er under utvikling, og kan etter tid, og muligens med et større fokus på hurtigtesting i fuktig jord framfor i porevann, ha et potensiale som verktøy for estimering av plantetilgjengelig nitrogen i jord og presisjonsgjødsling.

7 Videre forskning

Det finnes i dag mange ulike sensorer for å bestemme eller estimere nitrogeninnhold i jord og planter, og som seniorforsker Audun Korsæth ved NIBIO uttrykker det: «Dagens gårdbrukere står overfor en «jungel» av digitale tilbud, og risikoen for feilinvesteringer i ny teknologi og programvare kan virke større enn noensinne. De færreste løsningene som tilbys kan vise til uavhengig kvalitets-sikring eller veldokumenterte tilpasninger til norske særegenheter. Nøytrale råd om bruk av nye teknologiske løsninger er mangelvare» (NIBIO, u.å.-b).

Denne undersøkelsen utgjør et lite bidrag i arbeidet med utprøving og vurdering av ulike sensorteknologier, og understreker behovet for uavhengig testing i norske forhold. Det er avgjørende at teknologien som tilbys bønder faktisk holder det de lover – slik at en unngår å bli villedet av billige og udokumenterte løsninger som ComWin NPK-sensoren. Dette arbeidet har vært med på å tydeliggjøre at det er viktig med tett samarbeid mellom næring, forskning og bønder, slik at teknologien utvikles og testes med forståelse for både virkning og praktisk nytte, slik at sensortechnologien kan komme landbruket til gode.

8 Referanser

- Alahi, M. E. E. & Mukhopadhyay, S. C. (2018). Detection methods of nitrate in water: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 280: 210-221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.07.026>.
- Bechmann, M., Frøseth, R. B., Rivedal, S., Brod, E., Fischer, F., Seehusen, T. & Øgaard, A. F. (2023). Tiltak for bedre nitrogenforvaltning i norsk jordbruk: NIBIO.
- Bechmann, M., Lang, K. & Ugstad, H. (2024). Erosjon og tap av næringsstoffer og plantevernmidler fra jordbruksdominerte nedbørfelt - Sammendragsrapport fra Program for jord- og vannovervåking i landbruket (JOVA) for 1992-2022. NIBIO RAPPORT VOL.10 NR.138 Tilgjengelig fra: https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/bitstream/handle/11250/3169850/NIBIO_RAPPORT_2024_10_138.pdf?sequence=1&isAllowed=y (lest 09.03.2024).
- Bochtis, D. (2022). Information and communication technologies for agriculture - Theme I : Sensors, b. v.182. Cham, Switzerland: Springer.
- Brady, N. C. & Weil, R. R. (2013). *Elements of the Nature and Properties of Soils*: Pearson New International Edition: Pearson Education.
- Clevers, J. G. P. W. & Gitelson, A. A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23: 344-351. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>.
- Colaço, A. F. & Bramley, R. G. V. (2018). Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *Field Crops Research*, 218: 126-140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>.
- Corwin, D. L. & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46 (1): 11-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>.
- Courty, P. E., Smith, P., Koegel, S., Redecker, D. & Wipf, D. (2015). Inorganic Nitrogen Uptake and Transport in Beneficial Plant Root-Microbe Interactions. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34 (1-3): 4-16. doi: 10.1080/07352689.2014.897897.
- Dattatreya, S., Khan, A. N., Jena, K. & Chatterjee, G. (2024). Conventional to Modern Methods of Soil NPK Sensing: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 24 (3): 2367-2380. doi: 10.1109/JSEN.2023.3334243.
- Engesmo, A., Gran, S., Beylich, B., Kaste, Ø., Saesin, P., Valestrand, L., Harvey, E. T. & Sørensen, K. (2024). Overvåking av Ytre Oslofjord 2019-2023 - Årsrapport 2023: Norsk institutt for vannforskning.
- Eurofins. (u.å). Rutineprøver jord. Tilgjengelig fra: <https://www.eurofins-agro.com/no/rutineprover-jord#downloads> (lest 09.03.2025).
- Farella, M. M., Barnes, M. L., Breshears, D. D., Mitchell, J., van Leeuwen, W. J. D. & Gallery, R. E. (2022). Evaluation of vegetation indices and imaging spectroscopy to estimate foliar nitrogen across disparate biomes. *Ecosphere*, 13 (3): e3992. doi: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3992>.
- Forskrift om gjødselplanlegging. (1999). Forskrift om gjødselplanlegging av 29 jan 2025 nr. 106. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/forskrift/1999-07-01-791> (lest 09.03.2025).

- FOSS. (2008a). Determination of ammonium in 2M KCl soil extracts by FIAStar5000, Application Note 5226 Rev 4.
- FOSS. (2008b). Determination of nitrate in 2M KCl soil extracts by FIAStar 5000 Application Note 5206 Rev 4.
- González-Piqueras, J., Lopez-Corcoles, H., Sánchez, S., Villodre, J., Bodas, V., Campos, I., Osann, A. & Calera, A. (2017). Monitoring crop N status by using red edge-based indices. *Advances in Animal Biosciences*, 8 (2): 338-342. doi: <https://doi.org/10.1017/S2040470017000243>.
- Guerrero, J.-L. & Sample, J. E. (2021). Kildefordelte tilførsler av nitrogen og fosfor til norske kystområder I 2019 –tabeller, figurer og kart.
- Hansen, P. M. & Schjoerring, J. K. (2003). Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 86 (4): 542-553. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00131-7).
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L. & Beaton, J. D. (2016). Soil fertility and fertilizers: Pearson Education India.
- Hedley, C. (2015). The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95 (1): 12-19. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.6734>.
- Kilden - Jordsmonn (2025). NIBIO Tilgjengelig fra: <https://kilden.nibio.no/?topic=jordsmonn> (lest 29.04.2025).
- Kim, H.-J., Hummel, J. W., Sudduth, K. A. & Motavalli, P. P. (2007). Simultaneous Analysis of Soil Macronutrients Using Ion-Selective Electrodes. *Soil Science Society of America Journal*, 71 (6): 1867-1877. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0002>.
- Korsæth, A., Lindgaard, H. J., Veidal, A. & Asheim, L. J. (2019). Utbredelse og potensiell økonomisk og miljømessig nytteverdi med presisjonsjordbruk i Norge. NIBIO RAPPORT VOL. 5 NR. 41. Tilgjengelig fra: http://nibio.brage.unit.no/nibio-xmllui/bitstream/handle/11250/2591261/NIBIO_RAPPORT_2019_5_41_v2.pdf?sequence=4&isAllowed=y.
- Krogstad, T. (2009). Laboratoriemetoder til emnet JORD212, Jordanalyse. UMB.
- Lindblom, J., Lundström, C., Ljung, M. & Jonsson, A. (2017). Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. *Precision Agriculture*, 18 (3): 309-331. doi: 10.1007/s11119-016-9491-4.
- Løvås, G. G. (2013). Statistikk for universiteter og høyskoler. 3. utg. utg. Statistikk. Oslo: Universitetsforl.
- Meld. St. 11 (2023-2024). Strategi for auka sjølvforsyning av jordbruksvarer og plan for opptrapping av inntektsmogleighetene i jordbruket. Oslo: Landbruks- og matdepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-11-20232024/id3028626/> (lest 28.04.2025).
- Meld. St. 35 (2023–2024). Bærekraftig bruk og bevaring av natur - Norsk handlingsplan for naturmangfold. Oslo: Klima- og miljødepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-35-20232024/id3054780/?ch=1> (lest 28.04.2025).
- Miao, Y., Mulla, D. J. & Khosla, R. (2022). Remote Sensing for Precision Nitrogen Management. Basel: Basel: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

- Najdenko, E., Lorenz, F., Dittert, K. & Olfs, H.-W. (2024). Rapid in-field soil analysis of plant-available nutrients and pH for precision agriculture—a review. *Precision Agriculture*, 25 (6): 3189-3218. doi: 10.1007/s11119-024-10181-6.
- Nedrebø, O. & Nome, A. (1972). *Jordkultur og kort om plantevern* Oslo: Landbruksforlaget.
- NIBIO. (u.å.-a). Nitrogen - Korreksjonstabeller Tilgjengelig fra: <https://www.nibio.no/tema/jord/gjodslingshandbok/korreksjonstabeller/nitrogen> (lest 08.03.2025).
- NIBIO. (u.å.-b). PRESIS. Tilgjengelig fra: <https://www.nibio.no/prosjekter/presis> (lest 28.04.2025).
- NMBU. (2025). Retningslinjer for bruk av kunstig intelligens (KI) ved NMBU. Tilgjengelig fra: <https://www.nmbu.no/retningslinjer-bruk-av-kunstig-intelligens-ki-ved-nmbu> (lest 30.04.2025).
- Norgeskart (2025). Kartverket. Tilgjengelig fra: <https://www.norgeskart.no/> (lest 04.03.2025).
- Open AI. (2025). Chat GPT 4o. Tilgjengelig fra: <https://chatgpt.com/>.
- RStudio, T. (2024). RStudio (Versjon 2024.12.0+467). Programvare. Tilgjengelig fra: <http://www.rstudio.com/>. (lest 05.02.2025).
- Schlesinger, W. H. & Bernhardt, E. S. (2020). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*: Academic Press.
- Sibley, K., Brewster, G., Astatkie, T., Adsett, J. & Struik, P. (2010). In-Field Measurement of Soil Nitrate Using an Ion-Selective Electrode. I.
- Skøien, S., Øygaard, A. F. & Nesheim, L. (2011). *Miljøriktig bruk av husdyrgjødsel*. Bioforsk TEMA: NIBIO.
- Smil, V. (2004). *Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production*: MIT press.
- SSB. (u.å.). Utslipp til luft Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/statbank/table/08940/>.
- Söderström, M., Nissen, K., Gustafsson, K., Börjesson, T., Jonsson, A., Wijkmark, L. & Mulla, D. J. (2004). Swedish farmers' experiences with the Yara N-Sensor 1998-2003.
- Walday, M. G., Gitmark, J. K., Naustvoll, L. J. & Selvik, J. R. (2015). *Overvåking av Ytre Oslofjord 2014-2018. Årsrapport for 2016*.
- Wang, X., Zeng, H., Yang, X., Shu, J., Wu, Q., Que, Y., Yang, X., Yi, X., Khalil, I. & Zomaya, A. Y. (2025). Remote sensing revolutionizing agriculture: Toward a new frontier. *Future Generation Computer Systems*, 166: 107691. doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.107691>.
- Yara. (2019). Operating instructions for the HandySpec Field NG. Software release 4.5: © 2019 YARA International ASA.
- Yara. (u.å.). Yara N-Sensor - User manual V.15. Tilgjengelig fra: <https://www.yara.no/siteassets/crop-nutrition/toolboxsmart-farming/n-sensor/supportside/n-sensor-als2-user-manual-v015-web.pdf>.
- Yara Norge. (u.å.-a). Gjødslingsråd - N-målinger. Tilgjengelig fra: https://www.yara.no/gjoedssel/presisjonsverktoy/n-malinger_2024_uke_17/ (lest 10.03.2025).
- Yara Norge. (u.å.-b). Hvordan bruke Atfram i korn? Tilgjengelig fra: <https://www.yara.no/gjoedssel/presisjonsverktoy/atfarm/atfarm-i-korn/> (lest 09.03.2025).
- Yara Norge. (u.å.-c). Presisjonsverktøy - Atfarm Tilgjengelig fra: <https://www.yara.no/gjoedssel/presisjonsverktoy/atfarm/> (lest 09.03.2025).

- Yara Norge. (u.å.-d). Presisjonsverktøy - Yara N-Sensor Tilgjengelig fra:
<https://www.yara.no/gjoedsel/presisjonsverktoy/n-sensor/>.
- Zhang, R. & Wienhold, B. J. (2002). The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity, and pH. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 63 (2): 251-254. doi: 10.1023/A:1021115227884.
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P. & Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528 (7580): 51-59. doi: 10.1038/nature15743.
- Øien, A. & Selmer-Olsen, A. R. (1969). Nitrate determination in soil extracts with the nitrate electrode. *Analyst*, 94 (1123): 888-894. doi: 10.1039/AN9699400888.

9 Vedlegg

9.1 Vedlegg 1 – Tidsseriegrafer

Dette scriptet er et forenklet eksempel på hvordan det har blitt laget tidsseriegrafer i RStudio for visuell fremstilling av endring av nitrogen eller andre sensorregistreringer over tid. Dette forenklede scriptet er basert på scriptet benyttet for å lage tidsseriegrafene for utvikling av nitrat og ammonium over tid.

```
library(readxl)
library(ggplot2)
library(dplyr)
library(tidyr)

data$DATO <- as.Date(data$DATO)
data_long <- data %>%
  pivot_longer(cols = c(NO3_FIA, NH4_FIA), names_to = "Parameter", values_to =
"Verdi") %>%
  drop_na(Verdi) %>%
  arrange(FELT, Parameter, DATO)

lagre_fig <- function(felt_liste, tittel, filnavn) {
  ggplot(data_long %>% filter(FELT %in% felt_liste),
    aes(x = DATO, y = Verdi, color = Parameter, group = interaction(FELT,
Parameter))) +
    geom_line(size = 1.2) +
    geom_point(size = 3) +
    facet_wrap(~FELT) +
    scale_color_manual(values = nmbu_farger, labels = c("Ammonium", "Nitrat")) +
    labs(title = tittel, y = "Konsentrasjon (mg/L)", color = "") +
    theme_minimal(base_size = 16) +
    theme(plot.title = element_text(size = 20, face = "bold", hjust = 0.5),
      axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),
      legend.position = "bottom",
      strip.text = element_text(size = 14, face = "bold")) -> figur
  print(figur)
  ggsave(filnavn, figur, width = 12, height = 8)
}
```

9.2 Vedlegg 2 - Regresjonsplot

Dette scriptet er et forenklet eksempel på hvordan det har blitt laget regresjonsgrafer i RStudio. Dette tar utgangspunkt i scriptet som ble brukt for å analysere korrelasjonen mellom Yara N-Sensor verdier (SN) og nitrat i ulike forsøksfelt. Lignende script ble benyttet til produksjon av lignende figurer for andre parametere.

```
library(dplyr)
library(purrr)
library(broom)
library(ggplot2)

korrelasjonsdata <- data %>%
  filter(!FELT %in% c("P2", "P3", "P5", "P10"), !is.na(NO3_FIA), !is.na(SN)) %>%
  select(FELT, NO3_FIA, SN)

korrelasjoner <- korrelasjonsdata %>%
  group_by(FELT) %>%
  filter(n() >= 2) %>%
  group_modify(~ {
    test <- tryCatch(cor.test(.x$NO3_FIA, .x$SN), error = function(e) NULL)
    if (!is.null(test)) tibble(r = test$estimate, p_value = test$p.value, n =
nrow(.x))
    else tibble(r = NA, p_value = NA, n = nrow(.x))
  }) %>%
  arrange(desc(abs(r)))

print(korrelasjoner)

plotdata <- data %>%
  filter(FELT %in% c("13", "24", "28"), !is.na(NO3_FIA), !is.na(SN)) %>%
  mutate(PlotNavn = recode(FELT, "13" = "13 - Ugjødset", "24" = "24 -
Husdyrgjødset", "28" = "28 - Mineralgjødset"))

korrelasjons_tekst <- plotdata %>%
  group_by(PlotNavn) %>%
  summarise(r = cor(SN, NO3_FIA), p = cor.test(SN, NO3_FIA)$p.value, n = n()) %>%
  mutate(tekst = paste0("R = ", round(r, 2), ", p = ", format.pval(p, digits = 2),
", n = ", n),
        x = -Inf, y = Inf)

ggplot(plotdata, aes(x = SN, y = NO3_FIA)) +
  geom_point(color = "#008571", size = 3.5) +
  geom_smooth(method = "lm", se = FALSE, color = "#008571") +
  facet_wrap(~PlotNavn) +
  geom_text(data = korrelasjons_tekst, aes(x = x, y = y, label = tekst),
          hjust = -0.1, vjust = 1.1, size = 5, inherit.aes = FALSE) +
  labs(title = "Korrelasjon mellom N-sensor og nitrat (FIA)",
        x = "N-sensor verdi", y = "Nitrat (mg/L)") +
  theme_minimal(base_size = 16)
```

9.3 Vedlegg 3 – Boksplot spektrale data

Dette scriptet er en forenklet versjon av scriptet som ble brukt i RStudio for å analysere forklaringskraften (R^2) til ulike spektrale indekser med hensyn nitrat, ammonium og mineral N. Resultatene visualiseres som et samlet boksplot med R^2 -verdier per indeks.

```
library(tidyverse)
library(broom)

indekser <- c("MTCI", "GDVI", "NLI", "GSAVI", "OSAVI", "GOSAVI", "MSAVI2", "GRVI",
             "green_mean", "ndvi_mean", "nir_mean", "red_mean", "rededge_mean")
responsvariabler <- c("NH4_FIA", "TOTN", "NO3_FIA")

r2_data <- map_dfr(responsvariabler, function(resp) {
  map_dfr(indekser, function(indeks) {
    data %>%
      group_by(FELT) %>%
      summarise(R2 = summary(lm(reformulate(indeks, resp), data =
cur_data()))$r.squared,
                .groups = "drop") %>%
      mutate(Indeks = indeks, Respons = resp)
  })
})

indeks_rekkefolge <- r2_data %>%
  filter(Respons == "TOTN") %>%
  group_by(Indeks) %>%
  summarise(mean_r2 = mean(R2, na.rm = TRUE)) %>%
  arrange(desc(mean_r2)) %>%
  pull(Indeks)

r2_data <- r2_data %>%
  mutate(Indeks = factor(Indeks, levels = indeks_rekkefolge),
         Respons = factor(Respons, levels = responsvariabler))

ggplot(r2_data, aes(x = Indeks, y = R2, fill = Respons)) +
  geom_boxplot(color = "black", position = position_dodge(0.8)) +
  scale_fill_manual(values = c("NH4_FIA" = "#008571", "TOTN" = "#0D3B34",
"NO3_FIA" = "#DBF8F4"),
                    labels = c("Ammonium", "Mineral N", "Nitrat")) +
  labs(title = "R2 per spektral indeks for NH4+, NO3- og Mineral N",
       x = "Spektral indeks", y = expression(R2), fill = "Respons") +
  theme_minimal(base_size = 14) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1), legend.position =
"top")
```

9.4 Vedlegg 4 – Heatmap

Dette scriptet er en forenklet versjon av scriptet som ble benyttet i RStudio for å gjennomføre regresjonsanalyse, samt å produsere heatmaps med kriterier for R^2 og p-verdi.

```
library(readxl); library(dplyr); library(broom); library(purrr); library(tidyr)
library(writexl); library(ggplot2); library(glue)

responsvars <- c("NO3_FIA", "NO3_FIA_kg", "NH4_FIA", "NH4_FIA_kg", "TOTN",
"TOTN_kgd")
forklaringsvars <- c("EC_NPK", "N_NPK", "P_NPK", "K_NPK", "TEMP_NPK", "HUMID_NPK",
"PH_NPK",
                      "AF_N_UP", "SN", "green_mean", "ndvi_mean", "nir_mean",
"red_mean",
                      "rededge_mean", "NO3_OE_kg", "NO3_HORIBA", "NO3_ZP",
"AVG_TEMP", "AVG_SOILMOIST", "AVG_WATERB", "AVG_SALINITY",
"AVG_EC",
                      "MTCI", "GDVI", "NLI", "GSAVI", "OSAVI", "GOSAVI", "MSAVI2",
"GRVI")

signifikans_symbol <- function(p) {
  case_when(
    is.na(p) ~ "", p < 0.001 ~ "****", p < 0.01 ~ "***",
    p < 0.05 ~ "**", p < 0.1 ~ ".", TRUE ~ ""
  )
}

kjør_regresjon <- function(y, x) {
  tryCatch({
    data %>% select(FELT, all_of(y), all_of(x)) %>%
      filter(!is.na(.data[[y]]), !is.na(.data[[x]])) %>%
      group_by(FELT) %>%
      nest() %>%
      mutate(
        model = map(data, ~ lm(reformulate(x, y), data = .x)),
        r2 = map_dbl(model, ~ summary(.x)$r.squared),
        p_model = map_dbl(model, ~ glance(.x)$p.value),
        n = map_int(data, nrow),
        coef = map(model, tidy)
      ) %>%
      unnest(coef) %>%
      filter(term == x) %>%
      mutate(respons = y, forklaringsvar = x, signifikans =
signifikans_symbol(p.value)) %>%
      select(FELT, respons, forklaringsvar, estimate, std.error, statistic,
              p.value, signifikans, r2, p_model, n)
    }, error = function(e) tibble())
}

kombinasjoner <- expand_grid(y = responsvars, x = forklaringsvars)
alle_resultater <- pmap_dfr(kombinasjoner, kjør_regresjon)
write_xlsx(alle_resultater, "regresjonsresultater_FELT.xlsx")

signifikante <- alle_resultater %>%
  filter(!respons %in% c("NH4_FIA", "NO3_FIA", "TOTN_kgd"), p.value < 0.1)
```

```

nmbu_farger <- c("****" = "#025C4F", "***" = "#008571", "**" = "#DBF8F4", "." =
"#F6F6EE")

ggplot(signifikante, aes(x = forklaringsvar, y = FELT, fill = signifikans)) +
  geom_tile(color = "white") +
  scale_fill_manual(values = nmbu_farger) +
  facet_wrap(~respons, scales = "free_x") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, hjust = 1)) +
  labs(title = "Forklaringsvariabler med signifikant effekt (p < 0.1)",
       x = "Forklaringsvariabel", y = "Felt", fill = "Signifikans")

lag_r2_heatmap <- function(data, variabler, tittel) {
  data %>%
    filter(forklaringsvar %in% variabler, p.value < 0.1, r2 > 0.5) %>%
    ggplot(aes(x = forklaringsvar, y = FELT, fill = r2)) +
    geom_tile(color = "white") +
    scale_fill_gradient(low = "#DBF8F4", high = "#025C4F", name = expression(R^2))
+
  facet_wrap(~respons, scales = "free_x") +
  theme_bw() +
  labs(title = tittel, x = "Forklaringsvariabel", y = "Felt")
}

heatmap1 <- lag_r2_heatmap(alles_resultater, c("green_mean", "ndvi_mean",
"nir_mean"),
                        "Vegetasjonsindekser")
print(heatmap1)

```




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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway