UNIVERSITY OF COPENHAGEN

Københavns Universitet

Erhvervsøkonomiske gevinster ved anvendelse af præcisionslandbrug

Pedersen, Michael Friis; Pedersen, Søren Marcus

Publication date:
2018

Document version
Også kaldet Forlagets PDF

Citation for published version (APA):
Pedersen, M. F., & Pedersen, S. M., (2018). *Erhvervsøkonomiske gevinster ved anvendelse af præcisionslandbrug*, 49 s., IFRO Udredning Nr. 2018/02

Download date: 11. okt.. 2026

INSTITUT FOR FØDEVARE- OG RESSOURCEØKONOMI
KØBENHAVNS UNIVERSITET

IFRO Udredning

Erhvervsøkonomiske gevinster ved anvendelse af præcisionslandbrug

Michael Friis Pedersen
Søren Marcus Pedersen

2018 / 02

IFRO Udredning 2018 / 02

Erhvervsøkonomiske gevinster ved anvendelse af præcisionslandbrug

Forfattere: Michael Friis Pedersen, Søren Marcus Pedersen

Faglig kvalitetssikring: Jens-Martin Roikjer Bramsen

Udarbejdet i henhold til aftalen mellem Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi og Miljø- og Fødevareministeriet om forskningsbaseret myndighedsberedskab.

Udgivet februar 2018

Se flere myndighedsaftalte udredninger på www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro_serier/udredninger/

Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi
Københavns Universitet
Rolighedsvej 25
1958 Frederiksberg
www.ifro.ku.dk

Indholdsfortegnelse

1 Introduktion 2
Hvad er præcisionslandbrug? 2
Anvendelse af GPS-udstyr 3
Europæisk udvikling 5
2 Driftsøkonomiske gevinster 6
2.1 Potentielle gevinster 6
2.1.1 Præcision i tilførsel af kvælstofgødning 6
2.1.2 Præcision i tilførsel af kalk 14
2.1.3 Præcisionssåning 14
2.1.4 Præcision i tilførsel af pesticider 14
Markformer 23
2.1.5 *Controlled Traffic Farming* 25
2.1.6 Præcisionslandbrug som management/ledelsesredskab 29
2.1.7 Sammendrag 29
2.2 Omkostninger forbundet med præcisionslandbrug 31
2.2.1 Information 31
2.2.2 Præcision i tildelingen 33
2.3 Driftsøkonomiske omkostninger og *benefits* 35
2.4 Erhvervsøkonomisk potentiale ved større udbredelse af præcisionslandbrug 39
3 Præcisionslandbrug som virkemiddel 40
4 Diskussion 42
5 Konklusion 43
Referencer 45
Appendiks A: Oversigtstabel for bruttopotentiale 48
Appendiks B: Oversigt over forkortelser 49

1 Introduktion

Miljø- og Fødevareministeriet (MFVM) har anmodet Københavns Universitet, Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi (IFRO) om at belyse det erhvervsøkonomiske potentiale ved anvendelse af præcisionslandbrug i Danmark. Dels de umiddelbare eller direkte gevinster i form at øget udbytte og besparelser i form af reduceret input af næringsstoffer og pesticider. Dels de mere indirekte effekter ved anvendelsen af præcisionslandbrug som et virkemiddel i den målrettede miljøregulering.

Denne udredning har fokus på første del, de direkte effekter, idet en lang række forudsætninger vedrørende indirekte effekter ikke er tilgængelige. Da omkostningerne ved eksempelvis at dyrke efterafgrøder i sædskiftet er meget varierende fra bedrift til bedrift og i forhold til forskellige del-vandoplande og effekten fra præcisionsjordbrug også varierer, vil der være stor variation i den økonomiske effekt, som præcisionsjordbrug potentielt set vil kunne bidrage med som virkemiddel. Dette gælder særligt tildelingen af kvælstof, som afhænger af mange forskellige faktorer, herunder jordtypefordeling, forventet vejrforhold, kvælstofmineralisering i jorden, plantevækst og dræningsforhold.

I denne rapport fokuseres der primært på landbrugserhvervet med traditionelle hovedafgrøder som korn, frø og raps mens grovfoderafgrøder, kartofler og roer behandles i mindre omfang. Visse teknologier vil også kunne finde anvendelse inden for økologisk produktion i landbruget, men dette område vil ikke blive beskrevet særskilt.

Således vil rapporten ikke omhandle gartneriproduktion og plantagedrift samt andre højværdiafgrøder, selvom der også her er sket en betydelig udvikling inden for sted-specifik behandling. Ligeledes vil rapporten ikke omfatte husdyrproduktion, selvom begrebet *precision livestock farming* også er et område under udvikling i landbruget.

I rapporten vurderes det økonomiske potentiale inden for en kort tidshorisont (2-3 år) med den nuværende tilgængelige teknologi. På lidt længere sigt skønnes potentialet at være større, idet gevinsterne fra (sensorsystemer og beslutningsstøtte) formentlig først vil være modne om 3-5 år. Tillige skønnes det, at der på længere sigt potentielt set kan opnås udbyttestigninger fra bedre RTK-GPS-styring med faste kørespor og reduceret jordbehandling også kaldet *Controlled Traffic Farming* (CTF).

Rapporten er kvalitetssikret af Jens-Martin Roikjer Bramsen.

Hvad er præcisionslandbrug?

Væksten i planteavlen afhænger grundlæggende af jordbundsforhold, jordbehandling, planteværn samt tilførsel af vand, udsæd og næringsstoffer. For at opnå en bæredygtig planteproduktion bør tilførslen af næringsstoffer og andre hjælpestoffer ske i rette tid og så præcist som muligt i forhold til de sted-specifikke betingelser. Præcisionslandbrug er en samlebetegnelse, som dækker over metoder til at tilpasse markoperationerne og anvendelse af produktionsinput i forhold til lokale behov på marken. Præcisionsjordbrug bygger på det amerikanske satellitbaserede GPS-system (*Global Positioning System*). Ved hjælp af GPS-positionering og GIS-kortlægning (Geografisk Informations System) kan en given markoperation eller tildeling af hjælpestoffer udføres med få meters eller centimeters nøjagtighed. Her findes der GPS-modtagersystemer med forskellige grader af præcision i forhold til anvendelsen. Siden hen er der udviklet andre systemer til positionering baseret på russiske, europæiske og kinesiske satellit-systemer.

Præcisionslandbrug inkluderer beslutningsværktøjer til at forbedre anvendelsen af næringsstoffer og planteværnsmidler (pesticider) samt eventuelt vand på marken ved hjælp af sted-specifik positionering og tildeling. For at udføre en nøjagtig positionsbestemt behandling er det nødvendigt med rettidig information om vækstvilkår og planternes næringsstatus på et givent sted på marken. Oftest vil en beslutning om planternes lokale behov forudsætte, at en lang række digitale data om jordbundsforhold, tidligere udbytte, kvælstofstatus, ukrudtstryk med videre anvendes i kombination.

Ved præcisionslandbrug er udfordringen ikke så meget at kunne positionsbestemme behandlinger og mark-operationer. Udfordringen består i at forstå og "aflæse" markens og jordbundens egenskaber og dermed afgrødernes præcise behov det pågældende sted (Pedersen 2003). Dette kan blandt andet ske ved hjælp af udbyttemålere på mejetærskeren, reflektansmåling (for eksempel kvælstofsensor), satellitbilleder, sensorer på droner, EM-38-målinger (til bestemmelse af lerindhold ved hjælp af jordens elektriske ledningsevne) samt landmandens egne observationer. Med baggrund i denne information og ved hjælp af GPS- og GIS-systemer udarbejdes udbyttekort, ukrudtskort, kort over planteindeks samt sted-specifikke tildelingskort. Tildelingskortet skulle derfor gerne resultere i en forbedret produktion med hensyn til udbytte, økonomi og reduceret miljøbelastning.

Siden den første introduktion af udbyttemålere med GPS-positionering for 30 år siden er der kommet mere præcise GPS-systemer på markedet – de såkaldte RTK-GPS (*Real Time Kinematic*), hvor præcisionen er ned til 1-2 centimeters nøjagtighed. Med dette system er det muligt at reducere overlap på marken ved udførsel af forskellige operationer, og dermed er der kommet en ny måde at anvende GPS på i landbruget (autostyring). Med autostyring kan der spares både ressourcer og tid for landmanden. Der udvikles løbende nye systemer, hvor nogle også har delvis autonome egenskaber samt egentlige robotter, som styrer ved hjælp af sensorer og radarsystemer på marken. Hertil udvikles løbende små programmer til tablets med videre, som også kan bruges til bedre beslutningsstøtte på marken. Hele dette digitale område inden for landbruget kan dækkes ind under samlebetegnelsen "*Smart farming*".

Nedenfor er fremstillet en kort oversigt over udviklingen indenfor præcisionslandbrug i Danmark:

1970-1980:		GPS-teknologi introduceres
1984:		Første udbyttemåler monteres på Dronningborg mejetærsker (nu AGCO-koncernen)
1991-:		Første udbyttekort (med GPS) på Vindum Overgård
1995-1998:		Første anvendelse af kort til variabel tildeling
1999-2002:		Kvælstofsensor introduceres (for eksempel Yara-sensor, tidligere Hydro-sensor)
		Måling af jordens elektriske ledningsevne (EM-38) og luftfoto (for eksempel Kemira)
2000-2002:		RTK-systemer introduceres i landbruget – mest til forskning og udvikling
2000-	:	Forskning i systemer til ukrudtsgenkendelse og præcise såmaskiner
2003-	:	Introduktion af autostyring i landbruget
2008-	:	Introduktion af CTF (*Controlled Traffic Farming*) blandt landmænd
2012-	:	Første anvendelse af droner til monitering af marker
2015-	:	Gratis adgang til Sentinel satellitbilleder (CropSat og Vegetation Index).

Anvendelse af GPS-udstyr

I henhold til Danmarks Statistik (2017) har i alt 16 procent af alle landmænd anvendt RTK-GPS-systemer på deres traktorer eller mejetærskere i 2017. Men i forhold til arealet bliver RTK-GPS anvendt på 45 procent

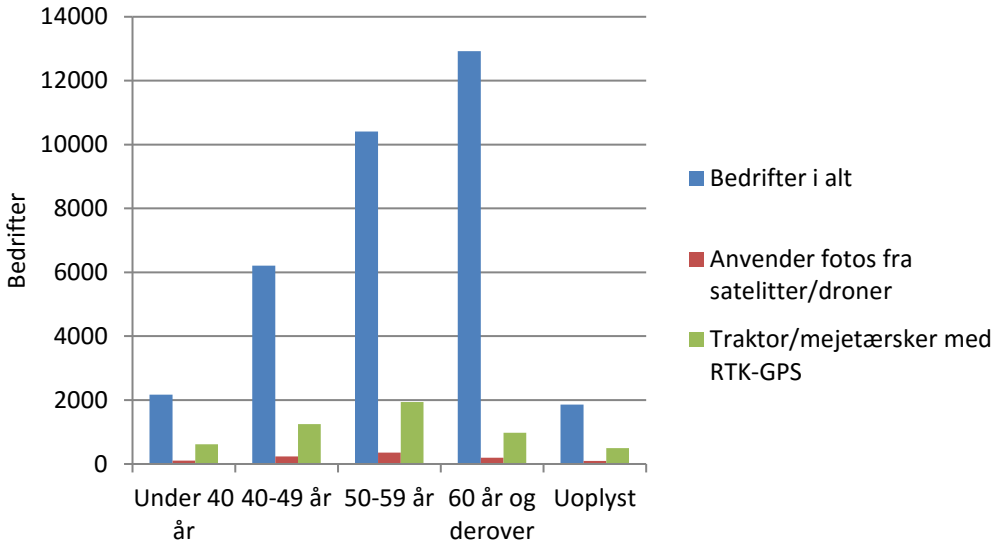
af det samlede landbrugsareal. Hertil er der 3 procent, som bruger droner eller satellitter til monitering af marken. Af dem som bruger droner og satellitbilleder bliver 44 procent anvendt til gødning og 16 procent til pesticider samt 6 procent til udsæd.

Der er dog også andre måder at udarbejde tildelingskort på. Eksempelvis fra udbyttekort, jordprøver med videre. I alt er det 7 procent af bedrifterne, som bruger tildelingskort.

Det er således en relativ lille andel af landmændene, som anvender GPS til tildelingskort og variabel tildeling af hjælpestoffer. Idet anvendelsen til variabel tildeling er forholdsvis lille, må det antages, at de fleste landmænd primært anvender RTK-GPS-systemet til autostyring med henblik på at reducere overlap ved kørsel med traktor og mejetærsker.

I henhold statistikken har landbrug som anvender RTK-GPS et gennemsnitligt areal på 224 hektar mod 78 hektar blandt alle bedrifter med afgrøder. Tilsvarende har landbrug som bruger satellit- eller dronefotos et gennemsnitligt areal på 226 hektar. Det er således primært de større landbrug, som anvender RTK-GPS-systemer og satellit-/dronefotos (Danmarks Statistisk 2017). Som der nedenfor vil blive redegjort nærmere for, hænger denne størrelseseffekt antagelig sammen med bedre kapacitetsudnyttelse af investeringerne i præcisionsteknologier på større landbrug.

Der er tillige en relativt stor andel af landmænd med længerevarende uddannelser, som anvender præcisionslandbrug, og det er også mere populært blandt yngre landmænd at bruge GPS sammenlignet med ældre landmænd. 29 procent af de landmænd, som er under 40 år, anvender RTK-GPS mod alene 8 procent af de landmænd, som er over 60 år (se figur 1). Resultaterne i undersøgelsen bygger på svar fra 6.281 bedrifter fra en spørgeundersøgelse som blev udsendt i maj 2017.



Figur 1. Anvendelse af droner og RTK-GPS på danske bedrifter
Kilde: Danmarks Statistik (2017)
Note: GPS-alternativer til RTK med mindre nøjagtighed (3-20 cm) indgår ikke i undersøgelsen.

I en tidligere undersøgelse blandt danske, britiske og amerikanske landmænd fra Nebraska (USA), hvor de fleste allerede anvender udbyttemålere med GPS, var der 26 procent danske landmænd, som praktiserede variabel kvælstoftildeling, og 10 procent som praktiserede variabel pesticidtildeling (Pedersen et al. 2001). Denne undersøgelse var baseret på 80 (primært større landbrug) i Danmark, som dengang anvendte udbyttemålere med GPS. I samme undersøgelse blandt 100 britiske landmænd, som anvender udbyttemålere med GPS, var der 58 procent, som også anvendte variabel kvælstoftildeling. I undersøgelsen fra 2001 var det under 5 procent af disse landmænd, som også anvendte satellitter eller luftfotos. Derimod var der en relativ stor andel af de amerikanske landmænd, som dengang også anvendte luftfotos (40 procent).

I en tilsvarende undersøgelse fra 2011 blandt danske, finske og tyske landmænd (som både anvender præcisionslandbrug og almindelig ensartet tildeling) ser vi et nogenlunde tilsvarende billede, men her var forskellen blot, at der var sket en mærkbar stigning i anvendelsen af autostyring og RTK-GPS-systemer i Danmark og Tyskland. Særligt på store tyske landbrug var anvendelsen udbredt (Lawson et al. 2011 og Pedersen et al. 2015).

Der har således været en relativ beskeden udvikling eller stagnation i anvendelsen af variabel tildeling de senere år på trods af en stigende anvendelse af GPS-systemer. I dag anvendes GPS-systemerne primært til autostyring med henblik på reduceret overlap i marken.

Den seneste tendens indenfor præcisionslandbrug er anvendelsen af faste kørespor i from af *Controlled Traffic Farming* (CTF), som har vundet en del udbredelse i England, men også anvendes af nogle få større bedrifter i Danmark. Her tilpasses kørslen på marken i de samme spor ved forskellige operationer, og dermed koncentreres pakningen af jorden til et afgrænset område. Gevinsterne ved denne teknik kan potentielt set være et højere udbytte ved reduceret pakning kombineret med reduceret overlap fra autostyring. Studier har vist, at udbyttet kan hæves efter en årrække med CTF (Jensen et al. 2012).

Europæisk udvikling

I en europæisk markedsrapport fra 2014 skønnes det, at GNSS-systemer (*Global Navigation Satellite System*), herunder GPS-systemer, i EU's traktorer vil stige fra 7,5 procent i 2012 til 35 procent i 2020. GPS-systemer (RTK) vil falde i pris med 30 procent fra 2012-2022 (European Parliament 2014). Firmaer som John Deere, Claas, New Holland og AGCO-koncernen arbejder med integrerede GPS-systemer på deres maskiner, ligesom mange andre firmaer arbejder parallelt med at udvikle og understøtte udviklingen. I Storbritannien er der en større udbredelse af CTF-systemer, ligesom flere universiteter og forskningsinstitutioner arbejder med udvikling af præcisionslandbrug. I EU afholdes hvert andet år en europæisk konference om præcisionslandbrug – *European Conference on Precision Agriculture* (ECPA), ligesom flere forskningsprogrammer er rettet mod udviklingen inden for præcisionslandbrugssystemer, herunder programmer med dansk deltagelse – eksempelvis ICT-Agri ERA-Net og Innovationsfonden — som aktuelt støtter www.futurecropping.dk-projektet med deltagelse af flere private firmaer og universiteter. Der er således en betydelig interesse for præcisionslandbrug i både Danmark og de øvrige europæiske lande.

2 Driftsøkonomiske gevinster

Det direkte driftsøkonomiske potentiale ved implementering af præcisionslandbrug kan bestemmes ud fra to overordnede forhold. Dels de potentielle gevinster, der skabes ved anvendelse af teknologien, og dels de eventuelle omkostninger, der er forbundet hermed. Gevinsterne kan dels opnås gennem et øget udbytte, øget produktion af korn og dels en reduktion af dyrkningsomkostninger, mindre forbrug af tid, brændstof, planteværnsmidler, nærringsstoffer med videre.

De omkostninger, som er forbundet med teknologien, kommer til udtryk i form af forrentning, vedligehold og afskrivninger på investeringer i teknologien samt eventuelt øget tidsforbrug, omkostninger til årlige licenser med videre.

Ud over disse forholdsvis direkte gevinster og omkostninger ved præcisionslandbrug, afføder anvendelsen af teknologien også nogle mere tvetydige forhold i form af *trade-offs*. For eksempel kan der, på grund af øget sektionsbrede, være et *trade-off* mellem arbejdsbrede på gødningsspreder, gyllevogn og -sprøjte, og den præcision, hvormed variabel tilførsel af for eksempel granulatgødning kan udføres. Man kan komme i situationer, hvor man må afveje fordelene ved stor arbejdsbredde op mod præcisionen i arbejdet.

I det følgende vil de direkte gevinster ved præcisionslandbrug blive gennemgået, hvorefter niveauerne for omkostningerne ved præcisionslandbrug vil blive opgjort, herunder refleksion over potentielle *trade-offs* som angivet ovenfor. Herefter vil den potentielle variation i markerne og dennes betydning blive berørt. Det driftsøkonomiske potentiale ved omfordeling af næringsstoffer og plantebeskyttelsesmidler inden for den enkelte mark er naturligvis afhængig af niveauet af variation i marken. I tilfælde af ingen eller beskeden variation i marken er behovet for omfordeling beskedent, og som følge heraf er der et beskedent driftsøkonomisk potentiale ved variabel tildeling. Er der derimod en væsentlig variation (som ikke allerede udnyttes) kan der være et væsentligt driftsøkonomisk potentiale i teknologien.

2.1 Potentielle gevinster

Præcisionslandbrug er som angivet ovenfor et relativt vidt begreb uden skarpt afgrænsede definitioner. Eksempelvis er graden af præcision ved brug af GPS (*Global Positioning System*) varierende og med betydelige prisforskelle. Avancerede og dyre systemer, men også meget præcise systemer, kan bruges til både autostyring, variabel tildeling af næringsstoffer og plantebeskyttelsesmidler og til udbyttekortlægning. Billigere GPS-systemer kan typisk ikke anvendes til autostyring, men kan anvendes til variabel tildeling af næringsstoffer og plantebeskyttelsesmidler samt udbyttekortlægning.

2.1.1 Præcision i tilførsel af kvælstofgødning

Med et GPS-system, et tildelingskort og en gødningsspreder med sektionskontrol (både centrifugalspreder, bomspreder eller flydende gødning i en sprøjte) er det muligt at opnå en øget præcision i tildelingen af kvælstofgødning (lettere at undgå overlap ved kiler og forager), og det er muligt at omfordele kvælstof fra områder af marken, hvor der forventes en relativ lav kvælstofudbytterespons til områder, hvor der forventes en relativt høj kvælstofudbytterespons.

Forventningerne til udbytteresponsen har tidligere været illustreret ved variation i jordbundsforholdene på tværs af marken (JB-nr.) (Pedersen 2003), men vurderes i dag mere at være baseret på baggrund af biomasseindeks (*Normalized Differential Vegetation Index*), forkortet NDVI. NDVI beregnes på baggrund af refleksion af rødt og ikke-synligt nærinfrarødt lys.

NDVI er som sagt et biomasseindeks og har derfor høj korrelation i forhold til bladmasse, kvælstofoptagelse, plantestress, udbytte med videre. Det er dog vigtigt at være opmærksom på, at der kun er tale om en korrelation og ikke nødvendigvis en kausal sammenhæng.

Et lavt NDVI-tal for et område af en mark kan således være udtryk for en relativ høj "kvælstofmangel", hvorfor der vil være en relativ høj kvælstofudbytterespons. Et lavt NDVI-tal for et område kan dog også være udtryk for andre former for plantestress, for eksempel kan området være vandlidende, mangle mangan, være plaget af kraftige snegleangreb, være dårligt etableret i efteråret eller have varierende jordbundsforhold i forhold til andre dele af den pågældende mark. Disse forhold kan betyde, at et område med lavt NDVI-tal har en meget flad kvælstofudbytteresponskurve (faldende nettoudbytterespons).

Ukritisk anvendelse af NDVI-tal til omfordeling af kvælstof kan derfor være uhensigtsmæssig. Rådgivningen til landmænd omkring omfordelingen af kvælstof baseret på biomasseindeks tager da også i nogen grad hensyn til denne lokale usikkerhed og variation omkring sammenhængen mellem responsen og NDVI.

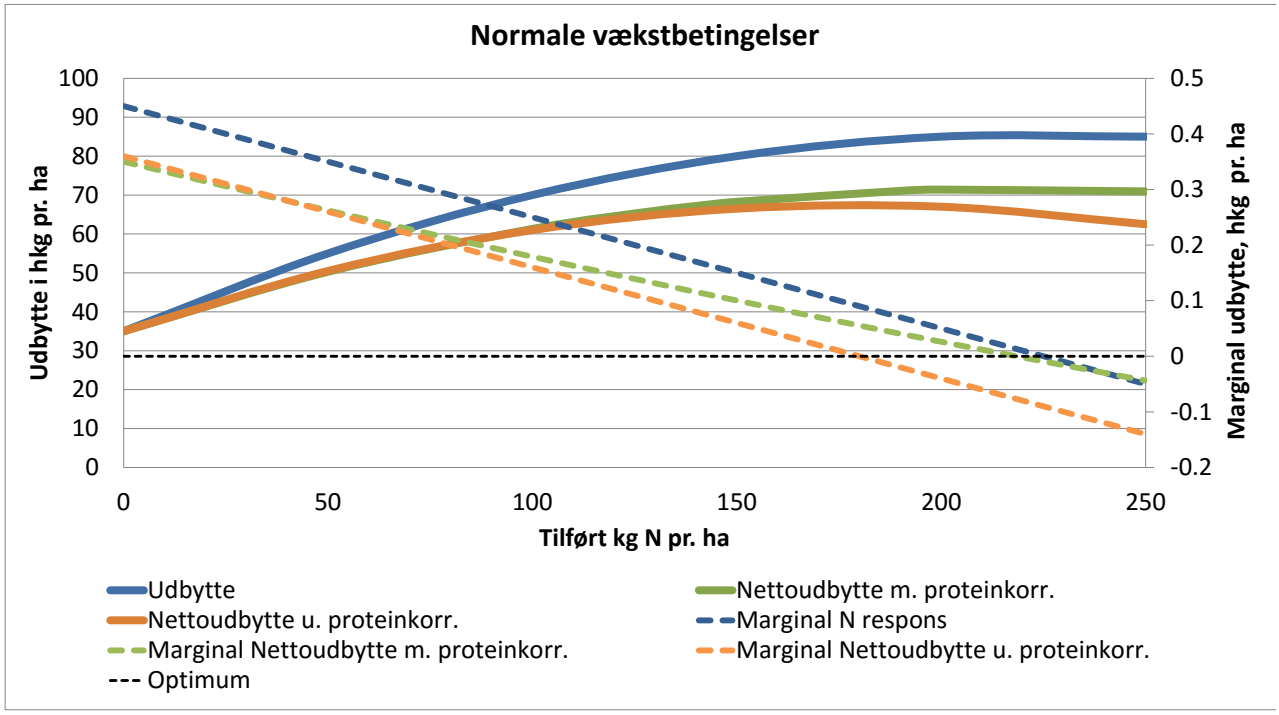
Dette udmønter sig i tre meget forskelligartede tildelingsprincipper: 1) højest tildeling til højt NDVI, 2) højest tildeling til lavest NDVI og 3) det "trekantede" princip med lav tildeling af kvælstof til arealer med højt og lavt NDVI. Det er formenligt det sidste princip, der vil blive mest udbredt. Men man kan ikke sige på forhånd, hvilket princip der er det rigtige i hvert enkelt tilfælde. Der vil altid være behov for en vurdering af de lokale forhold i marken (for eksempel en vurdering af om det er snegleangreb eller kvælstofbehov, der er skyld i et lavt NDVI) for at opnå en vis sikkerhed for, at omfordelingen af kvælstof i marken ikke får en modsatrettet effekt. For at illustrere princippet i omfordeling af kvælstof gives der nedenfor et eksempel på en mark med fem lige store delarealer. På tre af disse arealer vurderes vækstbetingelserne for normale, der er dog variation i den plantetilgængelige N inden sidste tildeling af kvælstof[1], på et areal vurderes vækstbetingelserne for at være gode, og på et af arealerne vurderes vækstbetingelserne for at være dårlige.

Figur 2, 3 og 4 nedenfor illustrerer den forventede kvælstofudbytterespons for de tre forskellige vækstbetingelsesniveauer. Funktionsformen under "normale forhold" er inspireret af Knudsen (2016), mens funktionsformerne for "gode vækstbetingelser" og "dårlige vækstbetingelser" er justeringer ud fra den oprindelige funktionsform med normale forhold. Det skal understreges, at der er tale om et konstrueret eksempel for forholdene på en hypotetisk mark, og at det ikke kan tages som udtryk for forholdene på landsgennemsnit.

Kurverne i figur 2, 3 og 4 repræsenterer dels det forventede (brutto)udbytte målt i hkg per hektar for en hvedemark, dels det forventede nettoudbytte uden proteinkorrektion i hkg per hektar og dels det forventede nettoudbytte med proteinkorrektion. Nettoudbyttet uden proteinkorrektion beregnes ud fra et fast bytteforhold mellem prisen på hvede og kvælstofgødning. Værdien af gødningsforbruget omregnes til en ækvivalent mængde hvede, som fratrækkes bruttoudbyttet. Nettoudbyttet med proteinkorrektion tager yderligere højde for, at proteinindholdet i hveden stiger ved øget tildeling af kvælstof, særligt på den flade del af udbyttekurven omkring toppunktet. Med en fast merværdi per kg protein justeres nettoudbyttet

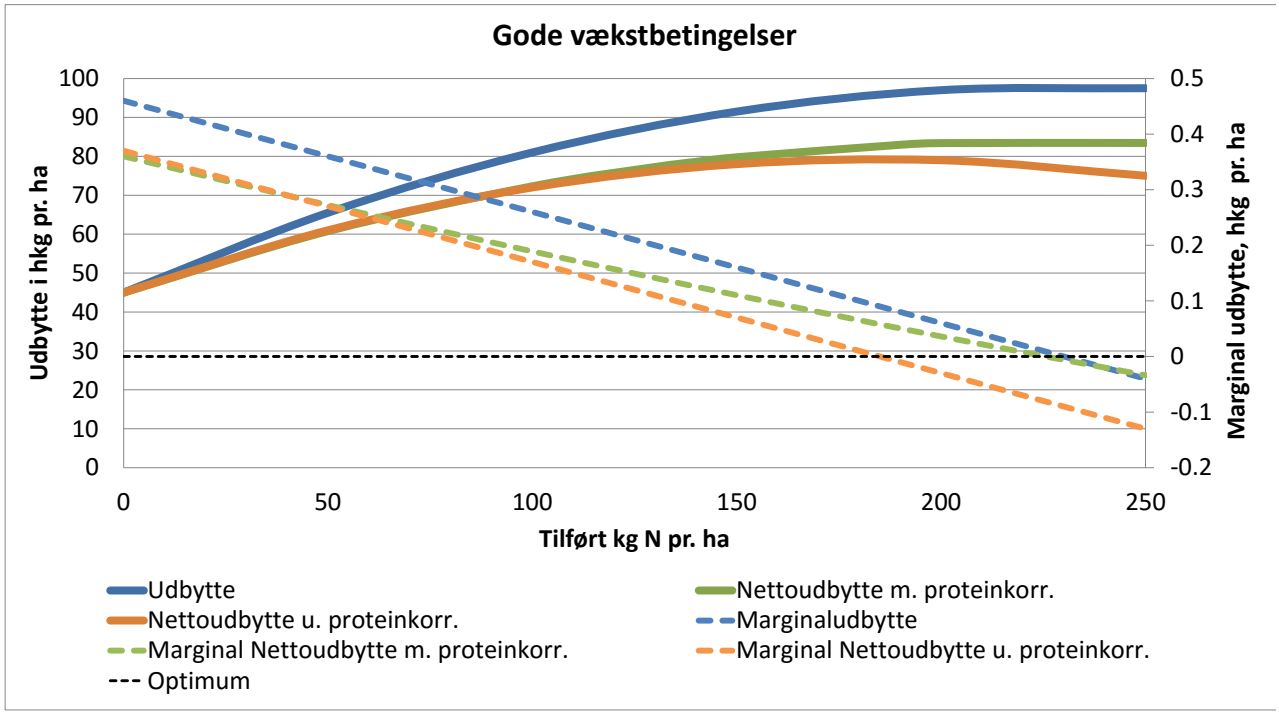
[1] Dette kan både være et udtryk for variation i den tidligere tildelte kvælstof og forskel i det plantetilgængelige kvælstof som følge af variation på baggrund af i nitrifikationsprocessen med videre.

uden proteinkorrektion med et kg hvede ækvivalent af værdien af det højere proteinindhold (Knudsen 2016).



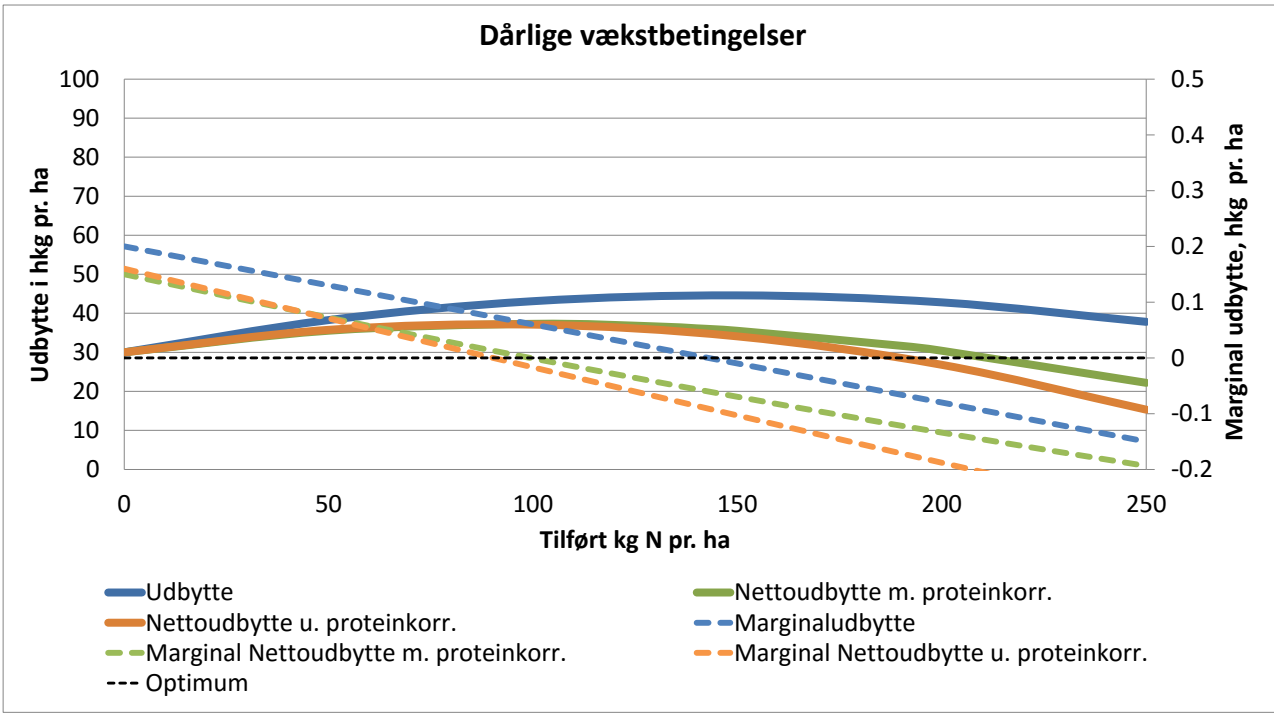
Figur 2. Kvælstof-udbytteresponskurver under normale vækstbetingelser, baseret på Knudsen (2016)

De tre nævnte kurver er andengradspolynomier, hvorfor deres afledte marginalfunktioner er lineære funktioner, disse er også afbildet i figur 2, 3 og 4. Optimum er, hvor marginalværdikurven er lig nul.



Figur 3. Kvælstof-udbytteresponskurver under gode vækstbetingelser, justeret op fra Knudsen (2016)

Udbytteresponsen ved tildeling af kvælstof er underlagt stor usikkerhed, kurverne i figur 2, 3 og 4 skal derfor opfattes som forventede kvælstof-udbytteresponskurver. Hvis for eksempel der bliver tørke efter sidste tildeling af gødning, vil det forventede udbytte ikke blive realiseret, og man kunne med fordel have sparet gødningen. Omvendt vil bedre vækstbetingelser end normalt medføre højere udbytter, men man kunne have opnået endnu højere udbytter ved øget kvælstoftildeling.



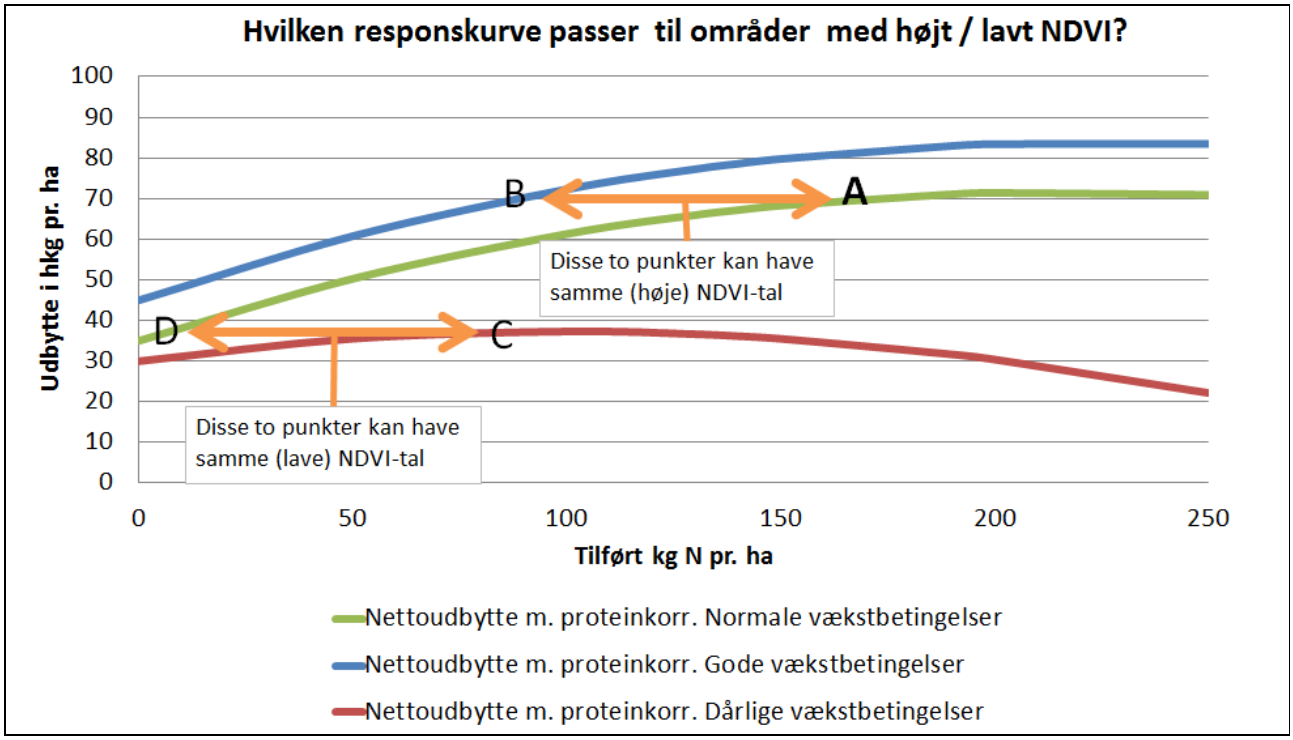
Figur 4. Kvælstof-udbytteresponskurver under dårlige vækstbetingelser, justeret ned fra Knudsen (2016)

Med udgangspunkt i nettoudbyttekurverne med proteinkorrektion fra figur 2, 3 og 4 kan problemstillingen med NDVI-tal illustreres grafisk. Figur 5 viser de tre nettoudbyttekurver med proteinkorrektion. Ud fra et højt NDVI-tal kan man ikke nødvendigvis skelne mellem: A) et område med "normale" vækstbetingelser og et højt aktuelt kvælstofniveau (plantetilgængeligt kvælstof i jorden, høj tidligere tildeling for eksempel med husdyrgødning og lignende); dette reflekteres af et punkt til højre på den "normale" kvælstof-udbytteresponskurve, og B) et andet område med gode vækstbetingelser og et relativt lavt aktuelt kvælstofniveau; dette reflekteres af et punkt til venstre på den "gode" kvælstof-udbytteresponskurve.

På samme måde kan man på baggrund af et NDVI-tal ikke nødvendigvis skelne mellem: C) et område med "dårlige" vækstbetingelser og et relativt højt aktuelt kvælstofniveau. Dette reflekteres af et punkt til højre på den "dårlige" kvælstof-udbytteresponskurve, og D) et andet område med normale vækstbetingelser og et relativt lavt aktuelt kvælstofniveau. Dette reflekteres af et punkt til venstre på den "normale" kvælstof-udbytteresponskurve.

I praksis vil det formenligt være lettest at identificere områder med meget dårlige vækstbetingelser ud fra visuel inspektion af markerne, mens identifikation af områder i marken, der har normale udbyttepotentialer, og områder, der har høje udbyttepotentialer, er mere vanskelige at vurdere. Her kan information fra blandt andet historiske udbyttekort og jordbundskortlægning være en støtte og bidrag til landmandens egne erfaringer.

Vælger man at flytte kvælstof fra et højt NDVI til et lavt NDVI, er der et stort udbyttepotentiale i at flytte kvælstof fra punkt A til punkt D. Omvendt er der også risiko for et tab, hvis det, man reelt set gør, er at flytte kvælstof fra punkt B til punkt C. Ud fra NDVI-tallet alene er det ikke entydigt, hvilken situationen man står i, og hvad man måler. Parrallet med ovenstående kan man vælge at flytte kvælstof fra et lavt til et højt NDVI. Her er der et stort potentiale i at flytte kvælstof fra punkt C til punkt B, men risiko for tab hvis det, man faktisk gør, er at flytte kvælstof fra punkt D til punkt A.



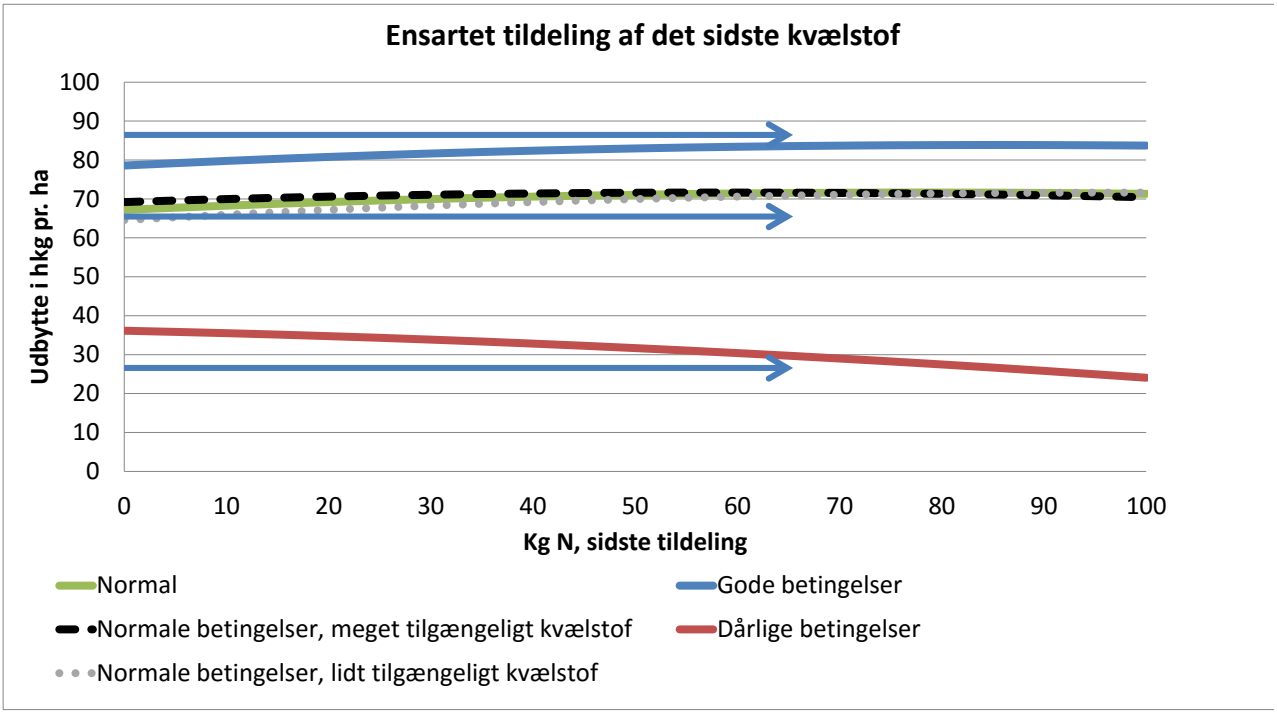
Figur 5. Nettoudbytte med proteinkorrektion fra figur 2, 3 og 4.
Note: NDVI-tal kan være tvetydige, med hensyn til hvilken udbytteresponskurve der er relevant, og hvor meget kvælstof der allerede er tilført/tilgængeligt for planterne på arealet.

I tabel 1 er angivet et regneeksempel, som viser forskellen ved en ensartet tildeling af kvælstof ved sidste gødskning i forhold til en varieret tildeling efter forholdene, med anvendelse af præcisionslandbrugsteknologier. Kolonnen ”Niveau inden sidste tildeling” angiver en vurdering af det aktuelle kvælstofniveau på de forskellige arealer, dette kunne for eksempel baseres på et biomasseindeks, ”Niveau inden sidste tildeling” angiver en horisontal forskydning af udbytteresponskurven for to delarealer med normale vækstbetingelser (udover variation i plantetilgængeligt kvælstof) ud af de fem arealer i tabel 1. Under overskriften ”Ensartet tildeling” angives en uniform tildeling af kvælstof ved sidste gødskning og nettoudbyttet med proteinkorrektion for denne tildeling baseret på kvælstofresponsfunktionerne angivet i figur 6. Under overskriften ”Præcisionslandbrug” angives en varieret tildeling og nettoudbyttet med proteinkorrektion for denne sidste tildeling baseret på kvælstofresponsfunktionerne angivet i figur 7.

Tabel 1. Eksempel på effekt af variabel tildeling af kvælstof

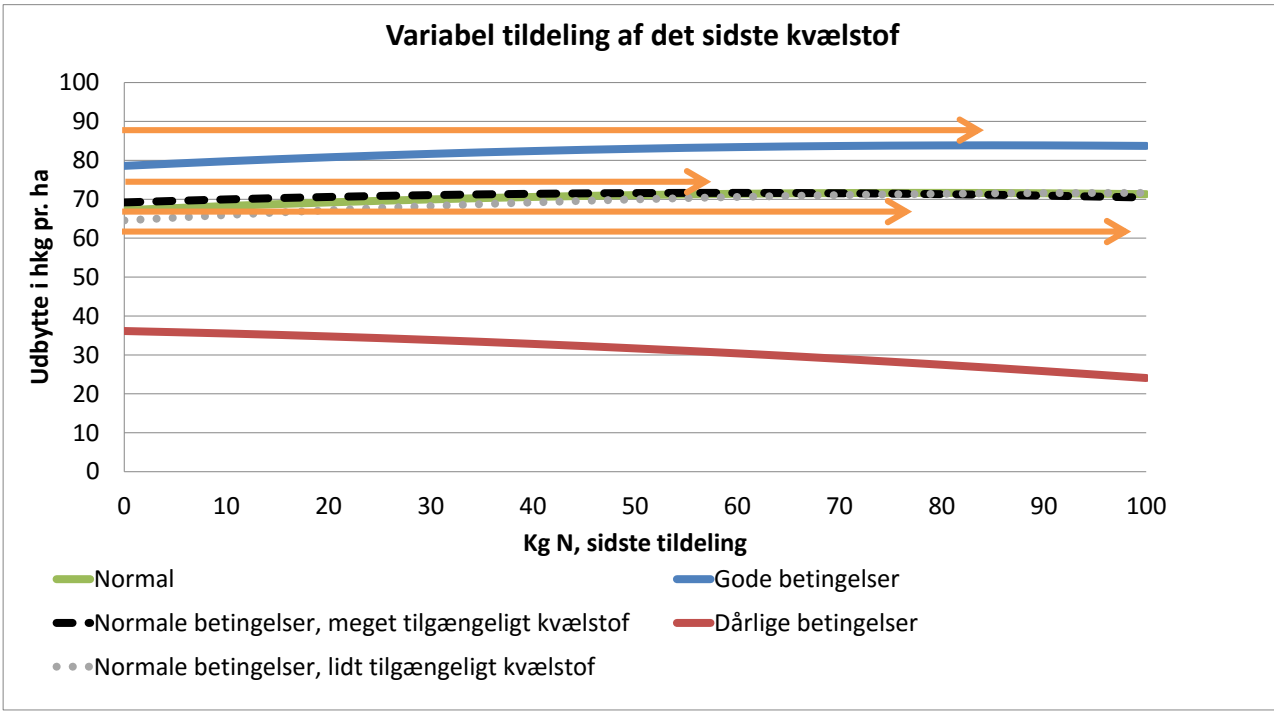
			Ensartet tildeling		Præcisionslandbrug		
Variation i marken	Vækst-betingelser	N-niveau inden sidste tildeling, kg N pr. ha	Sidste kvælstof-tildeling, kg N pr. ha	Nettoudbytte m. proteinkorrektion, hkg pr. ha	Sidste kvælstof-tildeling, kg N pr. ha	Nettoudbytte m. proteinkorrektion, hkg pr. ha	Nettomerudbytte: Forskel i nettoudbytte m. proteinkorrektion mellem ensartet tildeling og præcisionstildeling hkg pr. ha
20 %	Normal	140	64,0	71,49	78,0	71,64	0,14
20 %	Normal	160	64,0	71,61	58,0	71,64	0,02
20 %	Normal	120	64,0	70,80	98,0	71,64	0,84
20 %	Gode	140	64,0	83,53	85,0	83,85	0,32
20 %	Dårlige	140	64,0	29,85	0,0	36,14	6,29
Gns.			64,0	65,46	64,0	66,98	1,52

I dette regneeksempel giver omfordeling af kvælstof et gennemsnitligt nettomerudbytte med proteinkorrektion på 1,52 hkg per ha. Bemærk blandt andet, at nettoudbyttet stiger på arealer, hvor den samlede kvælstoftildeling reduceres (arealet med dårlige vækstbetingelser og arealet med normale vækstbetingelser og højt N-niveau inden sidste tildeling). Dette betyder ikke, at bruttoudbyttet stiger på disse arealer, men at værdien af den beskedne stigning i bruttoudbyttet er mindre end værdien af den kvælstof, der tilføres disse arealer ved en jævn fordeling af sidste tildeling. Ved en kornpris på for eksempel cirka 115 kroner per hkg vil værdien af en omfordeling som i eksemplet ovenfor være cirka 175 kroner per ha. Niveauet af variationen i marken er dog formenligt ganske højt i dette eksempel. Figur 6 og 7 illustrerer udgangspunkterne for sidste tildeling og henholdsvis den ensartede og den variable tildeling. Det bør endvidere bemærkes at området med dårlige vækstbetingelse ikke tildeles kvælstof i sidste tildeling ved variabel tildeling.



Figur 6. Illustration af ensartet tildeling af det sidste kvælstof jf. tabel 1

En stor del af effekten i dette regneeksempel opnås ved at fjerne kvælstoftildelingen fra et område med negativt marginalt nettoudbytte og i stedet tildele dette kvælstof til arealer med relativt fladt (svagt positivt) marginalt nettoudbytte.



Figur 7. Illustration af variabel tildeling af det sidste kvælstof jf. tabel 1

Tabel 2 illustrerer effekten ved et regneeksempel som i tabel 1, men med en mindre variation i arealerne (en stor del af arealet med homogen, normal vækst). I regneeksemplet i tabel 1 er der tale om en mark med fem lige store delarealer med forskellige karakteristika (det vil sige vækstbetingelser (kurve), plantetilgængeligt kvælstofniveau). I det tilsvarende eksempel i tabel 2 er fordelingen af arealernes beskaffenhed ændret således, at det første delareal dækker 60 procent af markens areal, mens de resterende fire delarealer dækker 10 procent af markens areal hver især. Denne mark er altså mere homogen relativt set. Dette medfører, at potentialet ved omfordeling af kvælstof reduceres fra 1,52 hkg per ha i eksemplet i tabel 1, til 0,79 hkg per ha i eksemplet i tabel 2. Potentialet i omfordeling er altså meget følsomt over for markens variation.

Tabel 2. Eksempel på effekt af variabel tildeling af kvælstof – lavere variation i marken

			Ensartet tildeling		Præcisionslandbrug		
Variation i marken	Vækst-betingelser	N-niveau inden sidste tildeling, kg N pr. ha	Sidste kvælstof-tildeling, kg N pr. ha	Nettoudbytte m. proteinkorrektion, hkg pr. ha	Sidste kvælstof tildeling, kg N pr. ha	Nettoudbytte m. proteinkorrektion, hkg pr. ha	Nettomerudbytte: Forskel i nettoudbytte m. proteinkorrektion mellem ensartet tildeling og præcisionstildeling hkg pr. ha
60 %	Normal	140	64,0	71,49	70,3	71,59	0,10
10 %	Normal	160	64,0	71,61	50,3	71,59	-0,02
10 %	Normal	120	64,0	70,80	90,3	71,59	0,79
10 %	Gode	140	64,0	83,53	77,3	83,81	0,28
10 %	Dårlige	140	64,0	29,85	0,0	36,14	6,29
Gns.			64,0	68,48	64,0	69,27	0,79

Ved en kornpris på cirka 115 kroner per hkg svarer dette til et fald i værdien af omfordeling af kvælstof fra 175 kroner per ha til 91 kroner per ha.

I et vist omfang vil præcisionslandbrug med bedre placering af gødning kunne reducere risikoen for lejesæd, måske særligt i forbindelse med reduktion af overlap ved kiler og forager. Reduktion af lejesæd vil ud over et merudbytte også medføre færre komplikationer i forbindelse med høst. Værdisætning af disse komplikationer er dog vanskeligt, primært fordi omfanget af lejesæd er ukendt.

En bedre placering af gødning giver ud over de relativt beskedne driftsøkonomiske gevinster en miljømæssig forbedring i form af en eventuel reduceret udvaskning af kvælstof fra rodzonen. I hvilket omfang denne udvaskning vil belaste vandmiljøet, er dog meget varierende alt afhængig af lokale forhold og retention. Bedre placering af gødning kan dog, særligt i områder med lav retention, have væsentlige positive eksternaliteter i forhold til vandmiljøet, og i forbindelse med målrettet kvælstofregulering, også potentielt have positive eksternaliteter i forhold til andre landmænd i det lokale delvandopland.

Ovennævnte forhold indikerer, at variabel kvælstoftildeling kan have et vist driftsøkonomisk potentiale. Der er dog væsentlige driftsmæssige udfordringer forbundet med variabel tildeling af kvælstof. Det kan dels være vanskeligt at identificere de korrekte lokale responsfunktioner i marken. Hertil skal variationen i marken være af en vis størrelse, for at der kan skabes et væsentligt driftsøkonomisk potentiale ved omfordeling af kvælstof. Der er for nuværende ikke en samlet kortlægning af variationen på danske marker over tid, og det er derfor ikke muligt at sige noget om fordelingen af potentialet ved omfordeling af kvælstof på tværs af landet. I det videre arbejde i denne udredning skønnes det, at potentialet ved omfordeling af kvælstof vil udgøre mellem 0 og 200 kroner per ha afhængig af markens variation. Fordelingen af denne variation er dog ukendt.

I det ovenstående er der taget udgangspunkt i, at landmandens kvælstofkvote er bindende, det vil sige at landmanden vil bruge hele sin kvote. Dette er dog ikke altid tilfældet. Visse landmænd vælger ikke at udnytte deres kvote fuldt ud, og visse landmænd ville formentlig ønske, at de havde mere kvælstof til rådighed. I det omfang en landmand er af den opfattelse, at den økonomisk optimale kvælstoftilførsel er lavere end den kvote landmanden har til rådighed, kan det ikke udelukkes, at denne opfattelse skyldes meget varierede marker, hvor kvælstof tildeles jævnt uden præcisionslandbrugsteknologi. Med præcisionslandbrugsteknologi kan en sådan landmand muligvis ændre opfattelse af økonomisk optimum (få

en mere arealspecifik opfattelse af økonomisk optimum), hvilket kan føre til en samlet set øget tilførsel af kvælstof, sandsynligvis med økonomisk gevinst. Det kan dog også være, at landmandens mere nuancerede opfattelse af den arealspecifikke, optimale tilførsel af kvælstof medfører en lavere tilførsel af kvælstof, samlet set. Disse forhold ændrer ikke ved vurderingen – at potentialet ved omfordeling af kvælstof ligger i niveauet 0 til 200 kroner per ha.

2.1.2 Præcision i tilførsel af kalk

Udbringning af jordbrugskalk er formentlig det område, hvor præcisionslandbrug, i form af positionsbestemt tildeling, er mest udbredt, og hvor de tidligste erfaringer med GPS-teknologien blev gjort. Dette skyldes formentlig, at der på grund af et meget varierende behov for kalk i den enkelte mark har været tradition for at variere tildelingen i marken. Hertil indgår det forhold, at udbringning af kalk overvejende har været maskinstationsarbejde, som typisk udføres hvert femte år, og at udtagning af positionsbestemte jordprøver og udarbejdelse af tildelingskort har været udført af planteavlskonsulenter på lokale landbrugscentre (Pedersen & Laursen 2002).

Arbejdet med kalk har således i høj grad været udliciteret fra den enkelte bedrift til maskinstationer, og operatørerne på området har kunnet investere i teknologien, fordi de havde en stor kapacitetsudnyttelse. Dette kan ses som et eksempel på de størrelsesøkonomiske aspekter, der er knyttet til potentialet i præcisionslandbrug. Teknologien er relativt dyr at anskaffe, men når den først er anskaffet, er den marginale omkostning ved at anvende teknologien begrænset. Dette betyder, at store bedrifter, eller operationer der udføres af maskinstationer, med høj kapacitetsudnyttelse kan have størst økonomisk fordel ved at anvende teknologien. Der kan ligeledes være en nedre grænse for størrelsen på bedrifter, hvor investeringer i præcisionslandbrugsteknologi ikke er rentabelt. I det omfang disse bedrifter benytter sig af maskinstationsydelser, kan teknologien i et vist omfang finde anvendelse på bedriften, selvom der ikke er foretaget en decideret investering.

2.1.3 Præcisionssåning

I de seneste år er der også sket en udvikling inden for præcisionssåning. Således er der for eksempel forsket i præcis placering af frø i sukkerroer med henblik på en mere præcis ukrudtsbekæmpelse mellem rækkerne. Sprøjtespor kan i dag etableres mere præcist i forbindelse med såning ved hjælp af autostyring og regulering af "såtænder/tuden". Tillige forskes der i anvendelsen af nye præcise såmønstre i stedet for traditionelle rækker i kornafgrøder. Ligeledes udvikles systemer til løbende regulering i sådybden i forhold til topografi og jordtype med henblik på at opnå et mere ensartet sådybde og bedre fremspiring. Alle disse tiltag skulle gerne på længere sigt forbedre udbyttet samt reducere behovet for ukrudtsbekæmpelse.

2.1.4 Præcision i tilførsel af pesticider

Teknologier vedrørende præcisionslandbrug kan også anvendes til reduktion i forbruget af pesticider. Teknologien kan eksempelvis anvendes til at identificere behandlingsbehov positionsbestemt og til at tildele den valgte behandling positionsbestemt.

Med præcision i tilførslen af pesticider forstås muligheden for at reducere pesticidomkostningerne og miljøpåvirkningen uden at gå for meget på kompromis med effekten mod skadevoldere.

Mulighederne for præcision i tilførslen af pesticider afhænger overordnet set af tre faktorer: præcis kortlægning (identifikationen) af skadevolderen (ukrudt, svamp, skadedyr, med videre), evnen til at

omsætte denne information til positionsbestemte beslutninger vedrørende behandling og sidst men ikke mindst evnen til at tilføre behandlingen præcist.

For alle tre faktorer er teknologien under udvikling, og der findes forskellige teknologier inden for hvert område med varierende grad af præcision. Omkostningerne stiger generelt med niveauet af præcision, og det rette samspil mellem de forskellige faktorer er afgørende for, at niveauet af præcision i den enkelte teknologi bliver omkostningseffektiv.

Af teknologier, der kan eller i fremtiden vil kunne reducere pesticidforbruget, kan nævnes:

Generel præcisionslandbrugsteknologi

RKT-GPS-autostyringsteknologi kan generelt reducere overlap i markerne, herunder overlap med sprøjter i kørselsretningen. Det vurderes, at der kan spares 1-5 procent af alle pesticider med denne teknologi (SEGES 2015).

Sprøjteteknologi

Sektionskontrol på sprøjtebommen kan i kombination med GPS-teknologi reducere overlap ved forager med videre. Det vurderes, at op til 1-5 procent af pesticidforbruget ved alle behandlinger kan spares (Petersen et al. 2017).

Sektionskontrol på sprøjtebommen kan i kombination med GPS-teknologi og tildelingskort reducere pesticidforbruget væsentligt (25-85 procent) ved visse specifikke behandlinger af ukrudt i kolonier som eksempelvis tidsler, dog meget afhængigt af lokale forhold og sædskifte (Franco et al. 2017).
Mikro- eller cellesprøjtning med et højt antal individuelt styrede dyser kan potentielt reducere herbicidforbruget med 50-70 procent i kombination med den rette identifikationsteknologi (Lund et al. 2006) og måske endnu mere (Mathiassen et al. 2016).

Med injektionssprøjter holder man pesticider og vand adskilt inden det bruges i marken, derved undgår man at blande for meget sammen, i tilfælde hvor behovet er ukendt, inden man kører i marken (for eksempel ved *real time*-identifikation af ukrudt). Ved varierende behandlingsbehov kan man med injektionssprøjter lave flere forskellige positionsbestemte behandlinger ved samme overkørsel af marken (Ørum et al. 2017). Uden injektionssprøjter vil man af tidshensyn kunne vælge en mindre nuanceret behandling. Kommercielle injektionssprøjter har typisk haft fem små enheder/containere til forskellige kemikalier, som blandes løbende med vand. Forskellige firmaer har anvendt injektionssprøjter, herunder Hardi International, Kyndestoft og Amazone. På længere sigt kan mikrosprøjtning formentlig kombineres med droner (på engelsk UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*) i kombination med den rette identifikationsteknologi (Franco et al. 2017; Ørum et al. 2017).

Identifikations- og kortlægningsteknologi

Manuel identifikation af pesticidbehandlingsbehov kan være forholdsvis omkostningstungt (tidskrævende) og samtidigt upræcist i forhold til indikation af skadevoldere. Det er ikke alle landmænd, som kan identificere for eksempel ukrudtsproblemer præcist nok i forhold til art, rummelig udbredelse og optimalt udviklingsstadie i forhold til bekæmpelse. Dette er dog den fremherskende ”teknologi” eller ”måde at gøre tingende på” eventuelt støttet af muligheder for at tage billeder med mobiltelefoner med videre.

Identifikation af ukrudt og behandling ved hjælp af kameraer, for eksempel monteret på sprøjtebommen under kørslen, kan spare tid, idet overkørsel og udarbejdelse af behandlingskort er overflødiggjort. Det kræver dog meget hurtige algoritmer til beslutning om behandling eller ej (DAT 2017), og man risikerer at have blandet mere vand og pesticider, end der var behov for, hvis der ikke anvendes en injektionssprøjte.

Ved hjælp af kameraer monteret på droner, ATV'er, traktorer eller lignende og avanceret billedanalysesoftware kan man kortlægge visse former for ukrudt med en vis nøjagtighed (Rasmussen et al. 2016). Særligt ved hjælp af droner kan man undgå yderligere overkørsler og samtidig opnå et bedre billede af forskellige ukrudtsarter på grund af et mindre areal per pixelenhed. Hertil arbejdes der med avanceret billedbehandling og billedgenkendelse til blandt andet identifikation af ukrudtsarter i den tidlige vækstfase.

Foreløbig er der ikke udviklet værktøjer til specifik bestemmelse af ukrudtsarter og tæthed, som er bredt kommercielt tilgængelige, men flere projekter til bestemmelse er under udvikling.

NDVI-biomasseindeks, for eksempel baseret på billeder fra Sentinel2-satellitterne (via CropSat), kan anvendes til at variere tildelingen af vækstregulering og svampebehandlinger. Ved et højt NDVI-niveau kan der være behov for en høj dosis, mens der ved et lavt NDVI er et mindre eller slet intet behov (CropSat 2017). Brug af biomasseindeks til herbicidbehandlinger er mindre sandsynligt som en umiddelbar løsning og vil afhænge af behandlingen og kendskabet til marken i øvrigt.

Beslutningsstøtte og informationsteknologi

Med baggrund i kortlægning af ukrudt er det ved hjælp af beslutningsstøtteværktøjer som Planteværn Online muligt at anvende og reducere doser af herbicider og/eller forbedre beslutningerne om, hvilke herbicider der skal anvendes. Ørum et al. (2017) viser et eksempel, hvor omkostningerne til herbicider i vinterhvede kan reduceres med 57 procent (fra cirka 425 kroner per ha til cirka 184 kroner per ha) og behandlingsindekset kan reduceres med 49 procent.

Præcisionslandbrugsteknologier i forhold til pesticidanvendelse er hovedsagligt målrettet brugen af herbicider. Der findes dog også beslutningsstøtteværktøjer i forhold til skadedyr og svampeangreb i forbindelse med varslings-/registreringsnettet fra SEGES. Præcisionen i disse værktøjer er på en anden skala (for eksempel postnummerniveau), men de kan ikke desto mindre hjælpe landmanden med at undgå unødvendige behandlinger og sikre rettidige behandlinger. I den henseende kan disse værktøjer også anses for at være "præcisionsteknologier".

I de ovennævnte punkter er der givet en kort beskrivelse af en række teknologier i forhold til reduktion af pesticidforbruget. Der er både relativt let tilgængelige og mindre tilgængelige teknologier i forhold til direkte anvendelse på den enkelte bedrift. En række af teknologierne vil først for alvor komme til sin ret ved en kombineret anvendelse med avancerede udgaver af de øvrige teknologier. Der er således stor forskel på det erhvervsøkonomiske potentiale på kort sigt, og de potentialer der formenligt vil blive udløst med tiden. Hvilke kombinationer af teknologier der vil vinde størst udbredelse i fremtiden er meget usikkert, men sandsynligt er det, at det vil blive muligt at reducere pesticidforbruget væsentligt i fremtiden. I det følgende vil visse aspekter af teknologierne blive uddybet yderligere.

Sprøjter med GPS-styring og sektionskontrol vurderes at have en vis udbredelse og har et generelt potentiale for reduktion af pesticidforbruget gennem reduktion af overlap ved præcis start og særlig stor ved forager og ved reduktion af overlap ved kiler.

Med autostyring kan man opnå en præcis såning og dermed placering af behandlingsspor, dette reducerer overlappet på tværs af marken uden behov for investeringer i selve sprøjten.

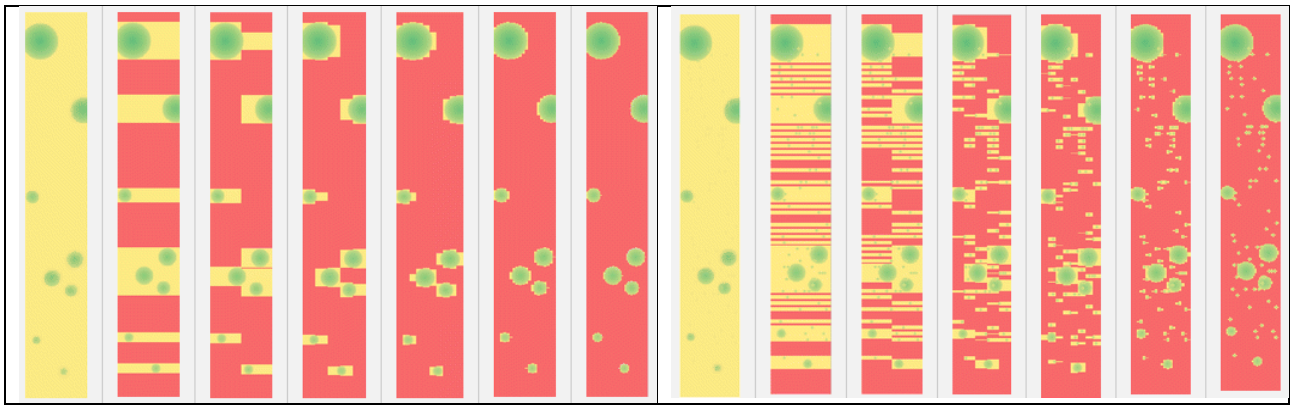
Præcisionen i sprøjteteknologien

Der er mulighed for forskellige former for variation i tilførslen med visse marksprøjter, dette medfører, at der kan tændes og slukkes for tilførslen af bekæmpelsesmidlet (injektionssprøjter) eller tilførsel af både vand og bekæmpelsesmiddel (sektionskontrol).

Længden af den enkelte sektion af sprøjtebommen, der kan åbnes og lukkes, har betydning for graden af præcision og reduktionen af pesticidforbruget. Fordeling og koncentration af ukrudtet i marken interagerer dog med sektionslængderne på sprøjten, i forhold til beregning af reduktionspotentialet.

Er der for eksempel tale om ukrudt, der er koncentreret i få kolonier med høj plantetæthed, kan der opnås store reduktioner i forbruget af herbicider, sammenlignet med tilfælde hvor ukrudtet er fordelt i flere mindre kolonier. Figur 8a og figur 8b nedenfor er taget fra Franco et al. (2017) og illustrerer effekten af sektionslængder og spredning af ukrudtet i marken. Grønne områder repræsenterer arealer *med* ukrudt der behandles, gule områder repræsenterer arealer *uden* ukrudt der behandles, og røde områder repræsenterer områder der ikke behandles.

Målet med præcisionslandbrug er i dette tilfælde at reducere pesticidforbruget på de gule arealer, for at opnå en økonomisk besparelse på indkøb af pesticider, hvis værdien af denne besparelse står mål med investeringens størrelse.



Figur 8a: Mark med få store kolonier af ukrudt **Figur 8b:** Mark med mange spredte kolonier af ukrudt
Kilde: Franco et al. (2017). Grønne områder repræsenterer arealer med ukrudt der behandles, gule områder repræsenterer arealer uden ukrudt der behandles, og røde områder repræsenterer områder der ikke behandles. Fra venstre mod højre er der henholdsvis en sektions længde på 40 m (uden kontrol), 40 m (med kontrol), 20 m, 10 m, 5 m, 2 m og 1 m.

Den marginale værdi af flere sektioner er således faldene, og værdien af en ekstra sektion er mindre ved marker med få koncentrerede ukrudtskolonier end i marker med mange spredte kolonier.

Potentiale for reduktion af tilførsel af herbicider

Potentialet ved reduktioner, udover reduceret overlap, afhænger af kortlægning og sprøjtens præcision. Der udvikles i øjeblikket på nye metoder til kortlægning/identifikation af ukrudt, som er en forudsætning for præcision i tilførslen af herbicider (for eksempel Rasmussen et al. 2016).

De teknologier, der er længst fremme, er teknologier til kortlægning af tidsler og lignende i kornafgrøder inden høst og kortlægning af ukrudt på bar jord, eventuelt med *real time*-sensorer[2]. I de fleste væsentlige ukrudtsbehandlinger om efteråret, i eksempelvis vinterafgrøder, er der ikke mulighed for at behandle positionsbestemt med den aktuelle teknologi, som er tilgængelig på markedet.

Ved en behandling mod tidsler som beskrevet i Franco et al. (2017) er der en reduktion i herbicidforbruget på 86,4 procent fra at behandle hele marken til at behandle dele af marken med fem meters sektioner. Dette vil medføre en reduktion i omkostningerne til herbicider fra 164 kroner per ha til 22 kroner per ha, hvilket svarer til en besparelse på 142 kroner per ha.

Hvis alternativet til ovennævnte præcisionssprøjtning med fem meters sektioner er en pletsprøjtning, hvor sprøjten åbnes i fuld bredde ved overkørsel af kolonier med ukrudt, er reduktionen i omkostningerne noget mindre. Man kan tale for, at en behandling svarende til den, der angives i anden kolonne af figur 8a, i et vist omfang kan gennemføres uden brug af præcisionsteknologi. I så fald er reduktionen ved anvendelse af præcisionsteknologi en reduktion fra 63 kroner per ha til 22 kroner per ha og dermed en besparelse på 41 kroner per ha. Ved denne fremgangsmåde er der en øget sandsynlighed for, at dele af kolonier ikke behandles, fordi traktorføreren ikke nødvendigvis kan se dem (måske er kun en tredjedel synlig fra jorden). Omvendt identificerer billedanalyseprogrammet Thistle Tool 90 procent af kvadrater med tidsler korrekt, uden at korn fejlbestemmes som tidsler (Rasmussen et al. 2016), det er altså ikke et spørgsmål om fuldkommen præcision, men et spørgsmål om graden af præcision med og uden teknologier.

Dette eksempel illustrerer usikkerheden omkring det driftsøkonomiske potentiale ved variabel herbicidtildeling. Med et spænd i den vurderede besparelse på 41-142 kroner per ha i et relativt simpelt eksempel er der grundlæggende en stor usikkerhed omkring det driftsøkonomiske potentiale for den enkelte bedrift.

Der er yderligere en vis sandsynlighed for, at mange landmænd vil kunne se flere fordele end ulemper ved en fuld behandling af marken med glyfosat, hvis de har besluttet sig for at behandle pletter med for eksempel tidsler i marken. For eksempel kan en behandling med glyfosat være en fordel i forhold til bjærgning af halm, da halmen kan blive hurtigere tør i nedvisnet korn, og i forhold til tidligere, ensartet modning. Desuden vil andet ukrudt end det, der detekteres, måske også blive påvirket af en fuld behandling.

Kortlægning af tidsler som i eksemplet ovenfor vil ifølge Rasmussen et al. (2016) koste i størrelsesordenen 100 kroner per ha. Det vil sige, at potentialet efter omkostninger til kortlægning er fra -59 kroner per ha til +42 kroner per ha, inden udstyret til den positionsbestemte behandling er forrentet og afskrevet.

[2] Der findes en række systemer, der på bagrund af sensorer kan tilføre herbicider *real time* på bar jord. Det vurderes ikke, at denne teknologi er rentabel i almindelige landbrugssædskifter, men den kan være relevant ved special- og rækkeafgrøder.

Omkostningerne til kortlægning vil formenligt reduceres yderligere, inden gevinsten fra variabel tilførsel kan opveje investeringer i præcisionslandbrugsteknologi. Bedrifter, der af andre årsager finder det rentabelt at investere i sprøjte- og GPS-teknologi, kan måske efterspørge kortlægningsydelser, men dette vil formenligt udgøre et så tilpas beskedent marked, at denne ydelse ikke vil blive tilgængelig på kommercielle vilkår inden for den nærmeste fremtid.

Rasmussen et al. (2016) bygger deres skøn på omkostningerne til kortlægning på 100 kroner per ha. Her antages det, at en specialkonsulent til en timepris på 1000 kroner i timen bruger 1 minut per ha til fotografering og 5 minutter per ha til billedanalyse. Dette svarer til 10 ha i timen og 100 kroner per ha.

I fremtiden skal omkostningen til kortlægning ned og værdien af kortlægningen op for at skabe en væsentlig udbredelse af variabel herbicidtildeling. Det skal altså være relativt dyre behandlinger, der skal spares på, og kortlægningsomkostningen skal reduceres væsentligt, hvilket formentlig også bliver muligt. For eksempel kan det forventes, at dronefører og billedanalytiker ikke nødvendigvis er samme person med samme løn.

Positionsbestemt fungicid tildeling

Behandlinger med svampemidler (fungicider) koster i størrelsesordenen 100 til 400 kroner per ha i vinterkorn og kan i andre afgrøder være væsentligt dyrere og kræve flere behandlinger. I vinterkorn ligger behandlingshyppigheden på 1,29 jævnfør sprøjtejournaldata fra 2015 (Ørum & Holtze 2017). Denne behandlingshyppighed fortolkes her som udtryk for, at stort set alle marker med vinterkorn behandles to gange med en halv standard dosis, og cirka en tredjedel af arealerne behandles en gang til med yderligere én standard dosis. Dette er givetvis en forenkling af det virkelige billede. Med udgangspunkt i denne behandlingshyppighed og en forventet omkostning på 250 kroner per ha (farmtal online 2017, 1. års vinterhvede) er der tale om cirka 194 kroner per ha per behandling.

På basis af NDVI-biomasseindeks fra eksempelvis SEGES' støtteværktøj (CropSat) er der mulighed for at behandle de dele af marken, der forventes at have et øget behov for behandling, med en øget dosis, og mulighed for at bruge en reduceret dosis på de arealer, hvor der forventes et mindre behov. Der forventes at være et udbyttepotentiale ved en sådan stedspecifik graduering (Jensen & Jørgensen 2016). Dette betyder i praksis, at man anvender en lav mængde vand per ha på arealer med lavt NDVI og en høj mængde vand per ha på arealer med højt NDVI, derved øges mængden af aktivstof per ha med en sprøjte, der ikke kan ændre doseringen løbende. Ved anvendelse af injektionssprøjter er der andre muligheder for graduering.

CropSat graduerer tildelingen efter NDVI inden for specifikke intervaller. Det vil sige, at hvis man sætter tildelingen til 0 liter vand per ha ved laveste NDVI-interval og for eksempel 150 liter vand per ha ved næstlaveste NDVI, vil der for arealer med en værdi lidt over laveste NDVI-interval blive tildelt en lav vandmængde. Dette er et problem for de fleste sprøjter, da de ikke kan håndtere et lavt vandtryk.

Dette betyder samtidig, at der er grænser for, hvor meget der kan gradueres på pesticider på basis af NDVI-kort. Størrelsesordenen +/- 25 procent på tværs af marken skønnes dog at være muligt. For eksempel ved 150 liter vand per ha ved laveste NDVI-niveau og 200 liter vand ved mellemste NDVI-niveau og 250 liter vand ved højeste NDVI-niveau.

De danske dosseringer af fungicider er relativt lave, hvorfor det ikke forventes, at der kan reduceres på mængden. Derimod forventes det, at der kan opnås et merudbytte angivet til 0,5-1 procent (SEGES 2017a) i marker med en vis variation, mens meget homogene marker har et meget lille potentiale.

Det skønnes, at potentialet i form af merudbytte ved gradueret fungicidbehandling er i størrelsesordenen 0-100 kroner per ha med vintersæd.

I en afgrøde som kartofler er der store omkostninger til fungicidbehandlinger. Hvis der ved hjælp af præcisionsteknologi kan spares på fungiciderne i disse afgrøder, er der store potentialer både på mark og bedriftsniveau. Omvendt er der også meget stor risiko i forhold til at sprøjte med fuld dosis og ensartet i afgrøden. Der er derfor ikke nødvendigvis sammenhæng mellem omkostningerne til fungicidbehandlinger og anvendelse af variabel tildeling. Det driftsøkonomiske potentiale i form af reduktion af overlap er dog stor i sig selv i denne type afgrøder med mange overkørsler og dyre behandlinger.

Positionsbestemt vækstregulering

Behandlinger med vækstregulering koster omkring 50-372 kroner per ha (Middeldatabasen 2017). På basis af NDVI-biomasseindeks fra eksempelvis CropSat er der mulighed for kun at behandle de dele af marken, der har behov, hvilket vil være arealer med højt NDVI.

Behandlingshyppigheden for vækstregulering var jævnfør sprøjtejournaldata højest i vinterkorn (korn, vintersæd) og andre frøafgrøder med et behandlingsindeks på henholdsvis 0,33 (korn) og 1,06 (frø) per ha (Ørum & Holtze 2017). Vinterkorn er den dominerende afgrødekategori med et samlet dyrket konventionelt areal på 857.000 ha, mens arealet med andre frøafgrøder udgjorde 69.000 ha.

Behandlingshyppigheden på 0,33 fortolkes her som udtryk for, at cirka en tredjedel af arealerne behandles en gang.

Hvis man forudsætter en vækstreguleringsbehandling til 100 kroner per ha som kan reduceres med 5-10 procent inden for den enkelte mark med vinterkorn (SEGES 2017a), er der en potentiel besparelse på 5-10 kroner per ha. Herudover vurderes der at være et potentielt merudbytte på 0,5-1 procent svarende til en værdi på 30 – 100 kroner per ha med gradueret vækstregulering. I de marker, der behandles med vækstregulering, er der altså et samlet potentiale på 35-110 kroner per ha. Men det er ikke givet, at alle bedrifter der anvender præcisionslandbrug, og har mulighed for at graduere tilførslen af pesticider, vil anvende vækstregulering, idet udbredelsen af behandlingen i forvejen er moderat.

Med en størrelsesorden på cirka 900.000 ha og en behandlingshyppighed på 0,33 er der grundlag for en besparelse i størrelsesordenen 10,5-33,0 millioner kroner på erhvervsniveau og et gennemsnitligt potentiale på 12-37 kroner per ha med vintersæd.

Med målrettet kvælstofregulering er det i højere grad muligt at gøde til det økonomiske optimum, dette vil muligvis øge anvendelsen af vækstregulering visse steder i fremtiden, idet øget kvælstoftilførsel alt andet lige vil øge risikoen for lejesæd. Tidlig såning af vintersæd som et kvælstofvirkemiddel kan også medvirke til en øget brug af vækstregulering. Disse forhold betyder isoleret set, at behandlingshyppigheden for vækstregulering vil kunne stige. Omvendt kan gradueret tildeling af handelsgødning og reduceret overlap ved forager og kiler i markerne ved hjælp af præcisionsteknologi relateret til handelsgødning potentielt set reducere behovet for vækstregulering, ligesom præcisionsteknologi relateret til tilførsel af vækstregulering

kan medføre et mindre forbrug. Dette er et eksempel på, at flere præcisionslandbrugsteknologier konkurrerer om det samme potentiale, og at man skal passe på med at tælle effekterne med to gange.

Som angivet ovenfor er der således et potentiale for besparelser af pesticider ved anvendelse af præcisionslandbrug. Omkostningerne til herbicidbehandlinger udgør den største del af de samlede omkostninger til pesticider i traditionelle korn- og rapssædskifter. Derfor er det også her, at det største potentiale for besparelser ligger. Omkostningsniveauet til at tilvejebringe den nødvendige information, som danner grundlag for en reduktion, er dog p.t. meget højt sammenlignet med besparelsespotentialet.

Omkostningerne til fungicid og vækstreguleringsbehandlinger er noget lavere end herbicidomkostningerne i de samme sædskifter: Det relative reduktionspotentiale er potentielt set også mere beskedent. Omvendt er omkostningerne til den information, der danner grundlag for varieret tilførsel, gratis via eksempelvis CropSat.

2.1.4 Reducerede driftsomkostninger

Autostyring

Ved brug af meget præcise GPS-systemer, de såkaldte RKT-GPS-systemer (*Real Time Kinematic*), er det muligt at styre landbrugsredskaber med en præcision på ned til 1-3 cm. Med denne præcision kan overlap formenlig reduceres i de fleste tilfælde, men omfanget af reduktioner vil dog variere i forhold til den præcision hvormed arbejdet hidtil er blevet udført – uden teknologien.

I et regneeksempel for en 700 ha bedrift opstillet af SEGES (2015) reduceres overlappet fra 5 procent til 1 procent, hvilket medfører en samlet besparelse af input på i alt 94.247 kroner eller 134,65 kroner per ha.

Nedenfor er opstillet et regneeksempel, som i stor udstrækning bygger på de forudsætninger, som ligger til grund for ovennævnte regneeksempel, og anvendte forudsætninger (se tabel 3), men med en række justeringer i forhold til forudsætningerne. Der er ikke indregnet en direkte besparelse på gødning, idet mængden ikke nødvendigvis reduceres ved autostyring, men i stedet omfordeles på arealet.

Tabel 3. Arealafhængige omkostninger (kroner per overkørt ha)

Diesel	362	13 %
Tid	855	31 %
Vedligehold	350	13 %
Udsæd	450	16 %
Plantebeskyttelse	750	27 %
I alt	2.767	100 %

Ved en reduktion af det overkørte areal på 4 procent kan der opnås en besparelse på 111 kroner per ha. Med en bedriftsstørrelse på 700 ha vurderes der således at være et potentiale på 77.700 kroner. I tabel 4 nedenfor er angivet det årlige direkte besparelsespotentiale ved anvendelse af autostyring for forskellige bedriftsstørrelser.

Investeringen i autostyringsudstyr er en fast omkostning, hvorfor der er størrelsesøkonomiske aspekter ved anvendelse af udstyret. For mindre bedrifter vil besparelserne ikke kunne nå den årlige omkostning, der følger af investeringen, mens dette i højere grad vil være muligt på større bedrifter. Tabel 4 angiver den

årlige bruttobesparelse, det vil sige besparelsen inden de omkostningerne, som er forbundet med investeringerne, er fratrukket.

Tabel 4. Årlig bruttobesparelse ved autostyring

Areal, antal ha	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Årligt brutto besparelse ved autostyring, 1.000 kr.	11,1	22,2	33,3	44,4	55,5	66,6	77,7	88,8	99,9	111,0

Autostyring medfører en væsentlig arbejdslettelse for traktor-/mejetærskerføreren, som dels kan omsættes til bedre overvågning af redskabernes funktion og dels til et mindre anstrengende og monotont arbejde. Hvorvidt dette kan omsættes til en værdi for landmanden er usikkert, men det kan givetvis have en form for værdi i forbindelse med rekruttering af medarbejdere – og i det omfang landmanden selv er traktorfører – kan det også have en ikke-pengemæssig værdi, som dog er svær at fastsætte.

Traktoren, som arbejdsplads, ændrer karakter, når der tilføjes autostyring, og der stilles nye krav til traktorføreren. Mange IT-kyndige vil formenligt opleve det som en lettelse på mange punkter, mens andre kan opleve det som en udfordring. I henhold til resultater fra en brugeranalyse af RTK-systemer blandt danske landmænd viser det sig også, at det overvejende er yngre landmænd som har investeret i RTK-systemer (Danmarks Statistik 2017).

Sektionskontrol

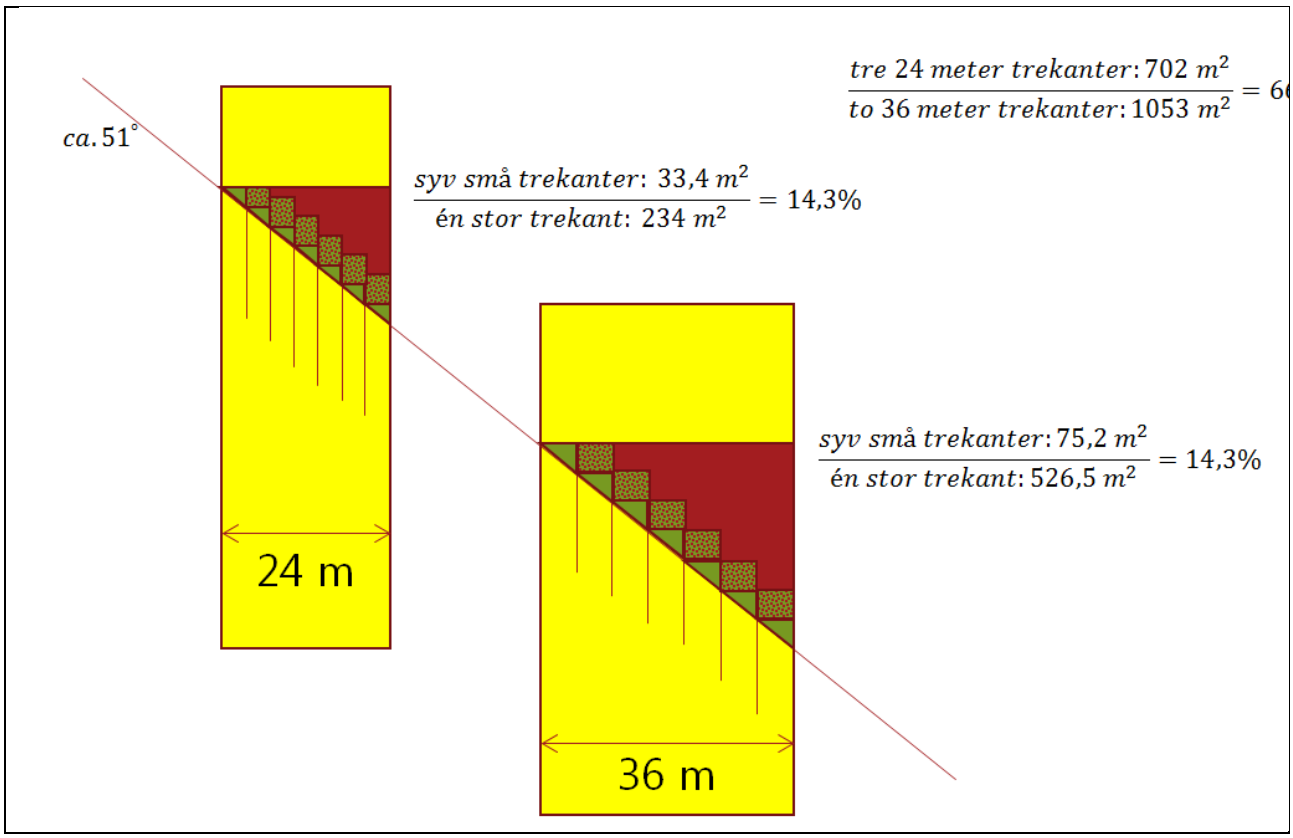
Med automatisk sektionskontrol på marksprøjten og gødningsspredereren og et GPS-system på traktoren (som ikke nødvendigvis behøver at være RTK-GPS) kan man reducere overlap ved kiler i forageren og sikre mere præcis åbning og lukning ved forageren.

Potentialet i denne form for besparelse er meget usikkert og afhænger delvist af den arbejdsbredde, der bliver anvendt i forvejen, og bredden af de sektioner, der kan kontrolleres. I nogle studier anføres det, at der kan spares op til 5 procent af input, for eksempel pesticider ved automatisk sektionskontrol (HARDI 2017). Lyngvig et al. (2013) og Petersen et al. (2006) angiver overlappet til 5-10 procent, hvoraf 60 procent er forager, og de resterende 40 procent vedrører overlap i længderetningen, som kan reduceres med RTK-autostyring. Besparelser i de ovenfor angivne niveauer vurderes dog at være relativt højt sat. Den faktiske besparelse vil blandt andet afhænge af markform og arbejdsbredde, sektionsbrede og sprøjteførerens evne til at lukke sektionerne manuelt. Under visse forhold kan overlap i størrelsesordenen 10 procent formenligt godt være tilfældet, men det vurderes også at kunne være væsentligt mindre.

Figur 9 nedenfor viser en illustration af effekten af sektionskontrol. Med en 24 meters marksprøjte vil man, hvis man kører ud over en forager med en vinkel, som i dette eksempel er på cirka 51 grader, og ikke anvender den manuelle sektionskontrol, lave et overlap på en kile med et areal på 234 m^2. Hvis man i stedet har syv sektioner, der kan lukkes enkeltvis, kan man reducere overlappet til 33 m^2, svarende til 14,3 procent af overlappet uden sektionskontrol. Med en 36 meters marksprøjte vil man, hvis man kører ud over samme forager, lave et overlap på en kile med et areal på 526,5 m^2. Hvis man igen har syv sektioner, der kan lukkes enkeltvis, kan man reducere overlappet til cirka 75 m^2, svarende til samme relative reduktion på 14,3 procent af overlappet uden sektionskontrol.

Det er et krav til marksprøjter, at der er en (manuel) sektionskontrol (Miljøstyrelsen 2014). Det reelle reduktionspotentiale består i at man med GPS-styret automatisk sektionskontrol kan lukke mere præcist. Det reelle reduktionspotentiale er vanskeligt at fastsætte, men den illustrerede reduktion i figur 9 er et *worst case scenario*, som ikke skal fortolkes som et reelt potentiale. Arbejdsbredden med og uden sektionskontrol har betydning for overlappet, tre parallelle kørsler (træk) med en 24 meters sprøjte svarer til to kørsler (træk) med en 36 meters sprøjte.

Overlappet uden sektionskontrol bliver med en 24 meters sprøjte på 3 x 234 m2 = 702 m^2, imod 2 x 526,5 m^2 = 1053 m^2 med en 36 meters sprøjte. Det samlede overlap ved tre parallelle kørsler med en 24 meters sprøjte svarer således til 66,7 procent af overlappet på en 36 meters sprøjte ved forageren. Med det samme antal sektioner vil den relative reduktion i overlappet også gøre sig gældende med sektionskontrol.



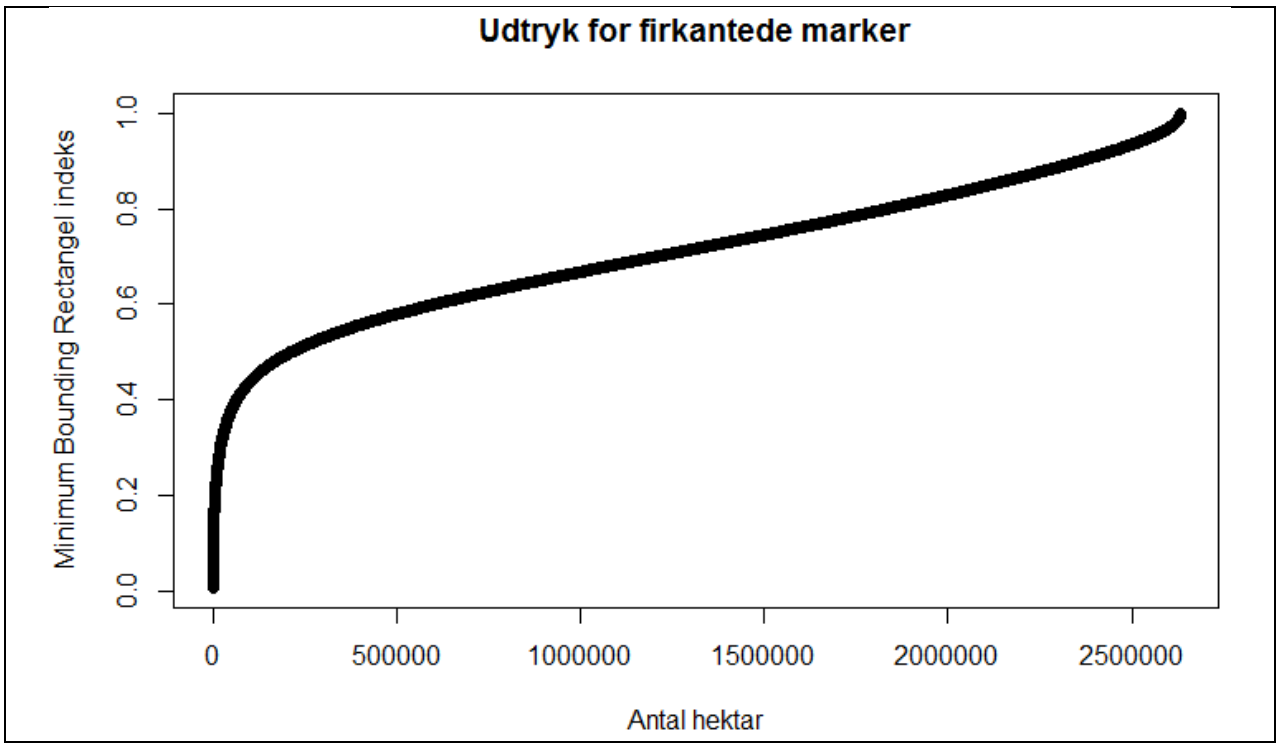
Figur 9. Illustration af effekten af sektionskontrol

Markformer

Der er relativ lille viden om markformerne i Danmark, og der er ikke nødvendigvis nogen perfekte mål. Olsen og Schou (2017) introducerer begrebet *Minimum Bounding Rectangle* (MBR), der er et udtryk for arealet af en mark divideret med arealet af det mindste rektangel, der kan omslutte denne mark. En firkantet mark med fire rette vinkler i hjørnerne vil altså have et indeks på 1, mens en trekantet mark vil have et indeks 0,5.

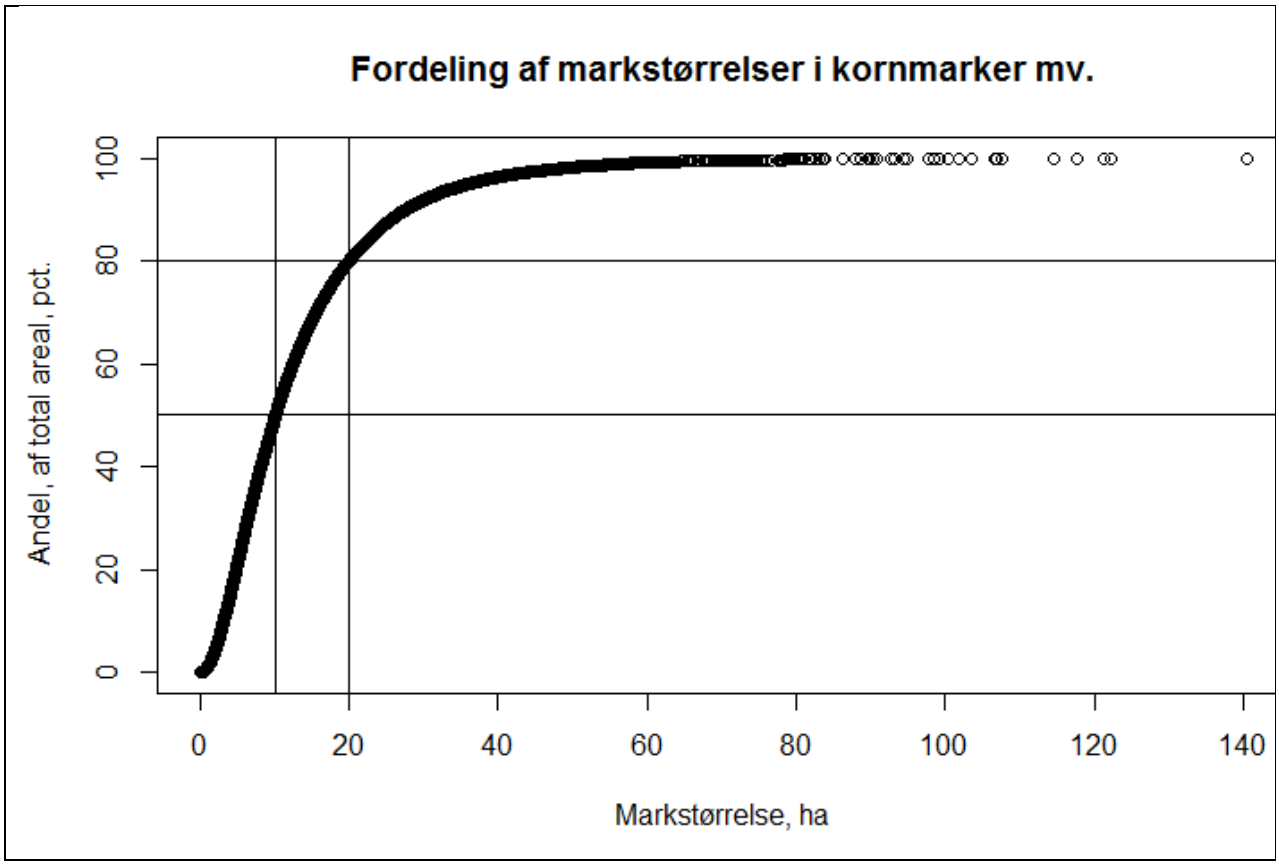
Figur 10 viser fordelingen af MBR på cirka 2,6 millioner ha i danske marker i 2014. Blandt markerne havde 211.000 ha et MBR på under 0,5, mens omkring 272.000 ha havde et MBR på over 0,9. Den gennemsnitlige markstørrelse er 4,2 ha mens medianen er 2,5 ha.

I denne opgørelse indgår der for eksempel brakmarker og permanente græsmarker, der kan formodes at have relativt små arealer.



Figur 10. Fordeling af MBR på alle marker i 2014.
Kilde: Jordbrugsanalyser, marker (2014).

Hvis man ser på arealet med korn, oliefrø, græsfrø med videre, er det samlede areal i Danmark på knapt 1,7 millioner ha. Her er den gennemsnitlige markstørrelse på 6,5 ha, og medianen er på 4,5 ha. Ser man på andelen af det totale areal på 1,7 millioner ha i forhold til markstørrelsen, viser det sig, at 50 procent af arealet med korn med videre dyrkes på marker, der er over 10,17 ha, mens 20 procent af arealet med korn med videre dyrkes på marker, der er over 20 ha. Figur 11 nedenfor viser denne fordeling. Halvdelen af arealet med korn med videre er altså på relativt store marker, hvor forageren må formodes at udgøre en relativt mindre andel af arealet, og hvor det potentielle overlap derfor også er mindre. Disse marker findes i øvrigt primært på større bedrifter, hvor omkostningen til præcisionsteknologi er relativt lav per ha, mens potentialet for overlap også må formodes at være relativt mindre på grund af større marker.



Figur 11. Fordeling af arealer på mark størrelser for kornmarker mv.
Kilde: Jordbrugsanalyser, marker (2014).

2.1.5 *Controlled Traffic Farming*

Autostyring medfører ud over reduktion af overlap ved kørsel med markredskaber også et potentiale for øget udbytte som følge af reduktion af strukturskader i jorden ved at sikre, at sprøjtespor samt andre markoperationer (tung trafik) udføres i samme spor i marken år efter år.

Controlled Traffic Farming (CTF) er en dyrkningsmetode, der fokuserer yderligere på reduktion af strukturskader ved at kombinere faste kørespor for eksempel via RTK-GPS med nøje koordinering af arbejdsbredden og sporvidden på maskinerne. Herved kan markerne opdeles i permanente dyrkningszoner og trafikzoner.

Der er en række potentielle fordele ved denne dyrkningsform, men typisk kræver det også en væsentlig tilpasning af maskinparken, som det kan kræve en del overbevisning for landmanden at gennemføre. Ønsker til bredde og sporvidde af traktorer og maskiner kan derudover være i konflikt med færdselsreglerne, hvis for eksempel samme traktor/vogn ønskes anvendt til transportopgaver mellem for eksempel mark og grovvareselskab. Landmanden kan derfor i praksis opleve, at visse maskiner kan anvendes til færre opgaver, når de er tilpasset til CTF.

Der er en meget beskeden viden om de økonomiske potentialer i CTF under danske forhold. Der er et mindre antal større landbrug, der praktiserer CTF i Danmark i kornsædskifter, og der er visse steder en praksis for CTF i græsmarker (slæt) på maskinstationsbasis, hvor CTF skønnes at være særligt velegnet

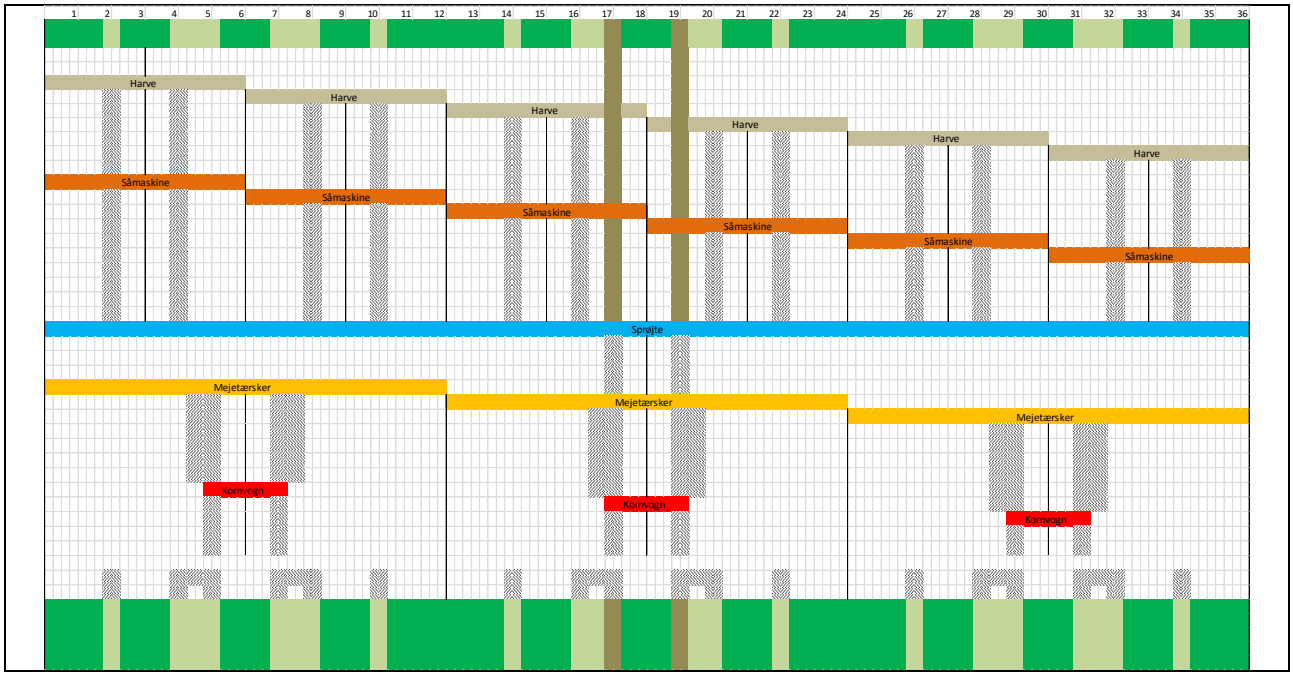
(Økologisk Landsforening UÅ). Fordelen ved CTF, foruden overlap fra autostyring, kommer til udtryk ved på sigt at øge udbytter og reducere maskin- og arbejdsomkostninger. I Storbritannien er der en forholdsvis stor udbredelse af CTF blandt de større bedrifter.

Generelt set kan CTF være med til at reducere strukturskader og bringe jorden tilbage til sin naturlige tilstand efter en årrække med faste kørespor (McHugh et al. 2009; Tullberg et al. 2007). Forsøg fra Kina har vist, at CTF kan hæve udbytterne med 6,9 procent (Qingjie et al. 2009). McPhee (2009) har vist stigninger i udbytter på 10-15 procent. CTF minimerer tillige behovet for pløjning. Studier fra bedrifter i Australien har vist udbyttestigninger på 10-23 procent ved at kombinere CTF med reduceret jordbehandling (Tullberg et al. 2007). Der er således flere studier, som viser et betydeligt potentiale ved CTF. Hertil er der etableret et netværk i Europa, hvor landmænd kan udveksle erfaringer om brugen af CTF (www.ctfeurope.dk).

CTF kan reducere behovet for pløjning, fordi der typisk er en meget lille arbejdsbredde på en plov, og store dele af marken derfor overkøres ved denne operation. Hertil kan der tillige over tid opnås reduktioner i dieselforbruget ved harvning af markerne.

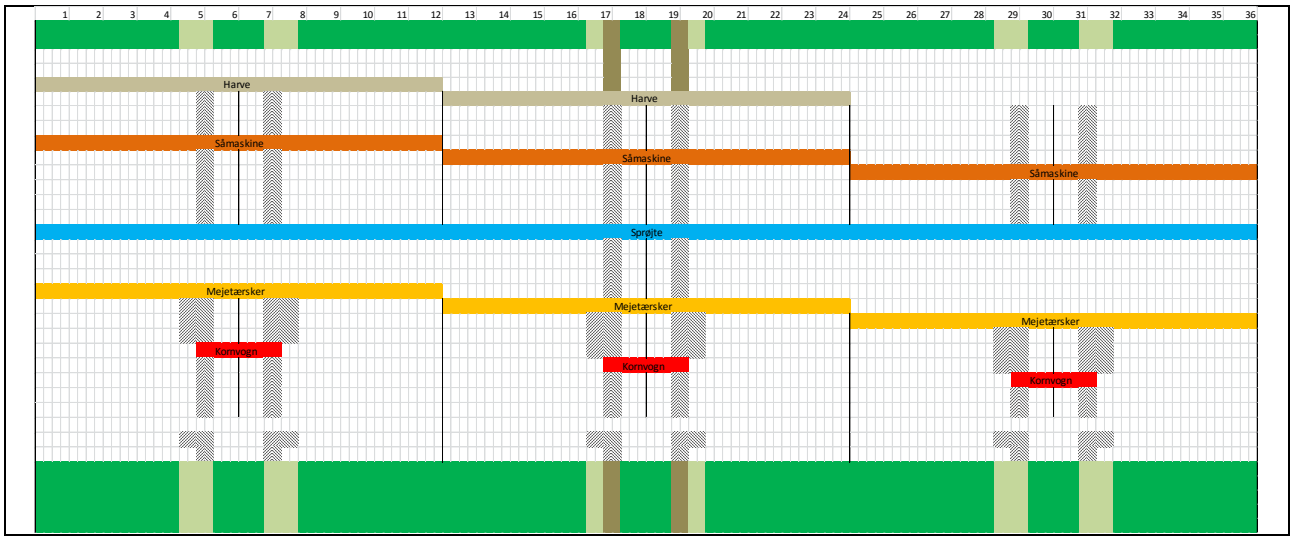
Nedenfor er angivet tre illustrative eksempler med arbejdsbredder i CTF.

I figur 12 illustreres et 12 meters system, hvor der overkøres cirka 4 ud af 12 meter i marken, svarende til at 67 procent af dyrkningsfladen er uberørt af hjul.



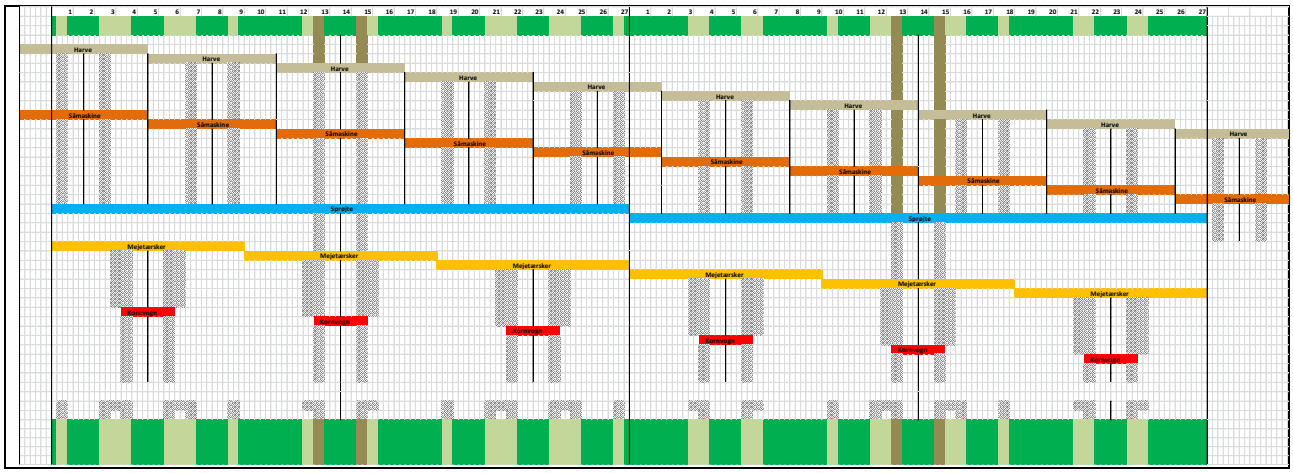
Figur 12: CTF med 12 meters system baseret på 12 m mejetærsker (40 fod), 36 m sprøjte, 6 m harve og 6 m såmaskine.
Forklaring: Grøn = dyrket, uberørt; lysegrøn = dyrket, overkørt; brun = udyrket sprøjtespor.

I figur 13 illustreres et 12 meters system, hvor der overkøres cirka 2 ud af 12 meter i marken, svarende til at 83 procent af dyrkningsfladen er uberørt af hjul (gælder ikke forageren).



Figur 13: CTF med 12 meters system baseret på 12 m mejetærsker (40 fod), 36 m sprøjte, 12 m harve og 12 m såmaskine.
Forklaring: Grøn = dyrket, uberørt; lysegrøn = dyrket, overkørt; brun = udyrket.

Figur 14 illustrerer et 9 meters system, hvor der overkøres cirka 3 ud af 9 meter (18 ud af 54 meter i illustrationen).



Figur 14: CTF med 9 meters system baseret på 9 m mejetærsker (30 fod), 27 m sprøjte, 6 m harve og 6 m såmaskine. Systemet medfører et vist overlap i yderste omgang (med lukkede sektioner).
Forklaring: Grøn = dyrket, uberørt; lysegrøn = dyrket, overkørt; brun = udyrket sprøjtespor.

Effekten af CTF må forventes at være korreleret med den arbejdsbredde, der anvendes, eller rettere den andel af jorden, der ikke overkøres. Omvendt vil investeringerne i maskinerne også stige med arbejdsbredden. Der er for tiden ikke noget grundlag for at sige noget om optimum i forholdet mellem arbejdsbredde og bruttopotentialet i CTF. Dette medfører, at grundlaget for at vurdere det erhvervsøkonomiske potentiale i CTF er usikkert.

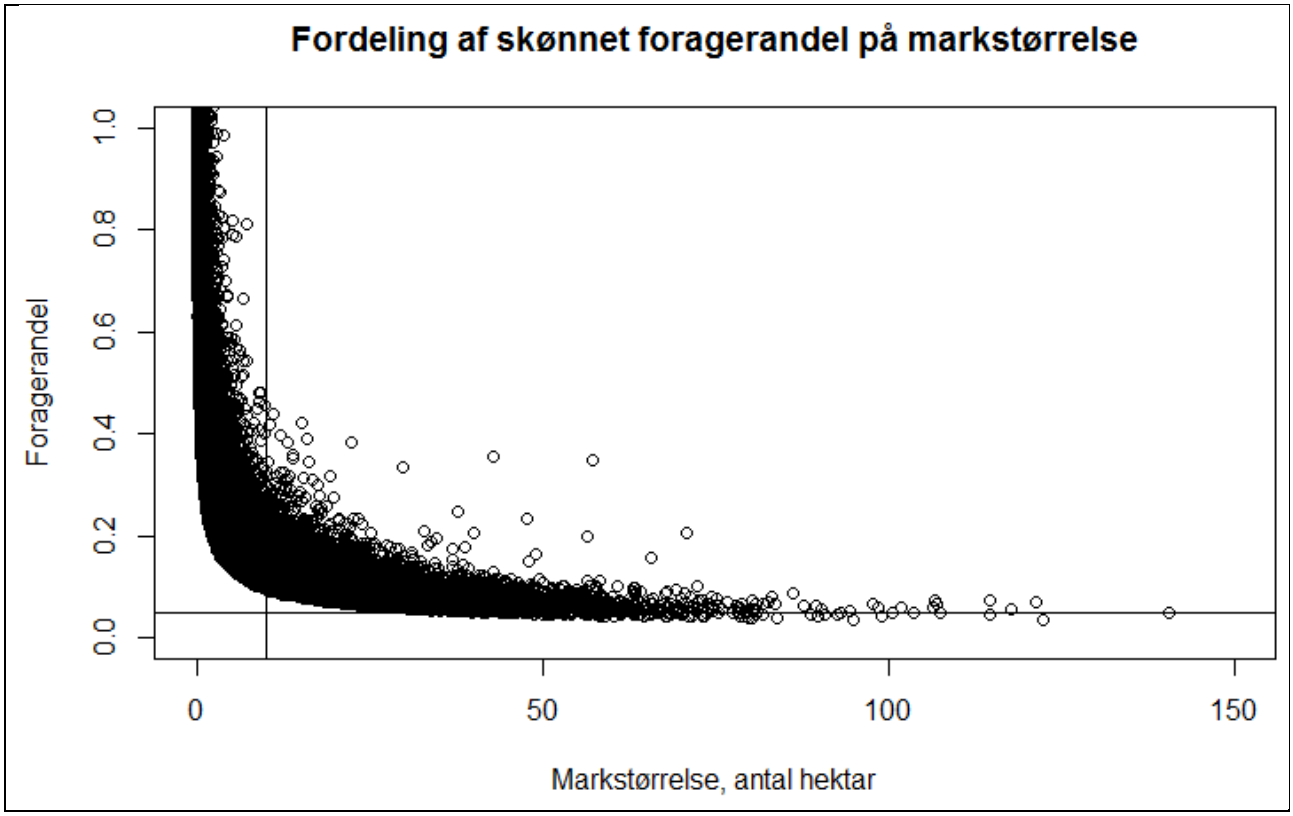
Markstørrelserne og markformerne på den enkelte bedrift har formenlig en væsentlig betydning for potentialet i CTF. Med en idealiseret rektangulær markform vil foragerens andel af markens samlede areal blive halveret, hver gang markens længde fordobles.

Der er lavet et groft skøn over foragerens andel af markens samlede areal på basis af følgende formel:

$$Skønnet\ forager andel = \frac{Markens\ omkreds * 16\ meter * 50\ \%}{Markens\ areal}$$

Ideen i dette regnestykke er, at en andel af markens omkreds er forager (her anslået til 50 procent), og i denne forager er der et højt niveau af trafik i en vis bredde (her anslået til 16 meter). Hvis andelen af dette foragerareal er højt i forhold til markens samlede areal, taler det for et relativt lavt potentiale i CTF, mens der ved marker med en lav foragerandel må formodes at være et relativt højere potentiale i CTF.

Skønnet er begrænset af, at det kun er markens areal og omkreds der er tilgængelig, og der kan derfor ikke tages højde for, om der er tale om lange rektangulære marker (hvor det må formodes, at en lille andel af markens omkreds er forager), eller meget irregulære marker, hvor det må formodes, at en meget stor del af markens omkreds er forager. Figur 15 viser denne sammenhæng baseret på de sammen cirka 1,7 millioner ha med kornmarker med videre, som ligger til grund for figur 11.



Figur 15: Sammenhæng mellem skønnet foragerandel og markens areal på 1,7 mio. ha kornmarker m.v. Kilde: Jordbrugsanalyser, marker (2014).

Mens det driftsøkonomiske potentiale i CTF formenligt er ganske stort på store bedrifter med store marker, så er der omvendt en stor andel af de danske marker, der er relativt små og derfor ikke repræsenterer et stort potentiale for CTF.

Bjærgning af halm kan være en udfordring i forhold til CTF. Der findes løsninger, hvor halmballerne kan efterlades i forageren, og der derfor ikke er behov for at køre med halmvogn og læssetraktor i dyrkningszonerne, men ved meget lange marker kan kapaciteten i disse systemer blive udfordret, dette er

typisk den form for marker, der ellers ville være ideelle til CTF på grund af lille foragerandel. Bjærgning af halm og CTF kan kombineres, men det er ikke nødvendigvis en problemfri kombination.

Kvantificering af dette potentiale fra danske forsøg er endnu ikke til gængeligt, men der er projekter i gang, der vil kunne belyse potentialet bedre, eksempelvis ICT-AGRI-projektet CTF-Optimove, hvor der ses på potentialet ved CTF under europæiske forhold. I Jensen et al. (2012) skønnes det eksempelvis, at stigningen i udbyttepotentialet på sigt kan udgøre mellem 5-10 procent i korn under danske forhold.

Det bør desuden anføres, at CTF ligger i grænselandet mellem reduceret jordbehandling og præcisionslandbrug. Hvorvidt et eventuelt erhvervsøkonomisk potentiale ved CTF skal tilskrives præcisionslandbrug eller reduceret jordbehandling, er således et åbent spørgsmål.

2.1.6 Præcisionslandbrug som management/ledelsesredskab

Præcisionslandbrug indeholder som koncept en række planlægnings-, koordinerings- og kommunikationsmuligheder, som kan have værdi i form af management- eller ledelsesværktøjer.

Det er tidligere set – og før anvendelsen af GPS-systemer – at landmanden pletsprøjtede for ukrudt i særlige områder af en mark. I takt med den strukturelle udvikling mod større og større bedrifter kan der dog være opstået problemer vedrørende planlægning og koordinering af disse typer af opgaver. Alene kommunikationen omkring, hvor og hvordan en specifik "pletsprøjtning" skal foretages, kan være vanskelig på store bedrifter med mange medarbejdere og store arealer. Her kan redskaberne til præcisionslandbrug supplere eller erstatte komplicerede instrukser.

På sigt kan man forestille sig, at der på grundlag af positionsbestemte udbyttemålinger, positionsbestemt variation i omfanget af stykomkostninger og eventuelt opsamling af tidsforbruget for den enkelte maskinoperation i den enkelte mark kan laves en driftsøkonomisk kortlægning af marker og delarealer for den enkelte bedrift. Dette kan understøtte bedre driftsøkonomiske beslutninger og være med til at bestemme eventuelle marginalarealer bedre og eventuelt give mere nuancerede beslutningsgrundlag i forbindelse med forhandlinger om forpagtninger med videre.

2.1.7 Sammendrag

Ovennævnte afsnit beskriver de potentielle gevinster ved anvendelse af stedspecifik tildeling af forskellige hjælpestoffer på bedriftsniveau samt potentialet ved besparelser i øvrige driftsomkostninger. Som angivet ovenfor kan der opnås gevinster gennem et øget udbytte (øget produktion af korn) ved bedre fordeling af for eksempel kvælstof samt en reduktion af dyrkningsomkostninger herunder mindre forbrug af planteværnsmidler. Der kan også spares brændstof, tid og slitage i forbindelse med markoperationer, ligesom der potentielt kan opnås øgede udbytter som følge af mindre strukturskader i jorden ved CTF.

Flere af teknologierne er stadig i modningsfasen, og derfor er der en vis usikkerhed omkring effekten. Dette gælder særligt kvælstof, hvor effekten afhænger af mange faktorer. For herbicider og kalktildeling skønnes det, at præcisionslandbrug med relativ stor sikkerhed kan være med til at enten at hæve udbyttet (stedspecifik kalkning) eller reducere forbruget af aktivstoffer. Ved kalkning vurderes det dog, at frugten så at sige allerede er høstet, idet det vurderes, at stedspecifik tildeling allerede har en høj grad af udbredelse.

Tabel 5 nedenfor opsummerer vurderingerne af potentialerne ved de enkelte tiltag.

Tabel 5. Oversigt over skønnet økonomisk potentiale ved forskellige præcisionslandbrugsteknologier ved henholdsvis lavt, forventet og højt niveau, kroner per ha

Tiltag, skønnet økonomisk brutto potentiale i kr. pr. ha Lavt-Forventet-Højt	Reduceret overlap		Gradueret tildeling		Info.-omk.	Bemærkning
	Sparet omk., RKT	Sparet omk., Sek. kontrol	Øget udbytte	Sparet omk.		
	---------- kr. pr. ha ----------					
Brændstof	4-9-14	-	-	-	-	Relativ sikker
Tid	9-21-34	-	-	-	-	Relativ sikker
Vedligehold	4-9-14	-	-	-	-	Relativ sikker
Handelsgødning	-	-	0-66-200	-	-	Afhængig af variation mv.
Kalk 1)	-	-	-	-	-	Gevinst er allerede hentet
Udsæd 2)	5-11-18	5-11-18	?	?	-	Relativ sikker
Pesticider						
- Herbicider	3-8-13	3-8-13	-	0-23-170	-100	Høj omkostning til nødvendig info medfører usikkerhed omkring økonomi
- Fungicider	3-9-14	3-9-14	0-33-100	-	-	Usikkert
- Insekticider	0-1-1	0-1-1	-	-	-	Pt. beskedent potentiale
- Vækstregulering	1-1-2	1-1-2	0-33-100	0-3-10	-	Mange bruger ikke vækstreg. i forvejen
CTF (faste kørespor og tilpasning af sporvidde) 3)	-	-	-	-	-	Usikker men potentiel stor gevinst
I alt	28-69-111	12-30-48	0-132-400	0-26-180	-100*	

1) Udbyttegevinsten skønnes at ligge i niveauet 1-2 procent, men hvor gevinsten i hovedtræk er hentet.

2) Relativ sikker besparelse ved reduceret overlap. Sandsynligvis stort fremtidigt potentiale ved gradueret udsædsmængde, både i form af merudbytte og besparelser, men det er for tidligt at vurdere potentialet.

3) Udbyttegevinsten er ikke angivet, men udbyttepotentialet kan på længere sigt være betydeligt (5-10 procent) ved kombineret anvendelse af CTF og reduceret jordbehandling.

2.2 Omkostninger forbundet med præcisionslandbrug

Ovenfor har fokus været på beskrivelse af teknologier og deres tekniske muligheder og begrænsninger. I det følgende vil fokus være mere rettet på de omkostninger, der er forbundet præcisionslandbrug. Først vil der være fokus på omkostningerne vedrørende den information, der danner grundlag for variation i tilførslen, dette emne er delvist berørt ovenfor. Derefter vil der være fokus på de omkostninger og investeringer, som er nødvendige for at kunne tilføre diverse input variabelt.

2.2.1 Information

Informationsgrundlaget for variabel tildeling af input i planteavlen baserer sig overordnet set på tre kilder eller kombinationer af disse:

- Satellitinformation
- Sensorinformation (traktormonterede droner med videre)
- Manuel observation og registrering.

Satellitinformation

Med Sentinel2-satellitterne har danske landmænd via CropSat gratis adgang til NDVI-biomasseindeks på deres marker og mulighed for at danne tildelingskort. Alle steder i Danmark bliver fotograferet af satellitterne hver 4-5 dag, men desværre kan alle billederne fra overflyvninger ikke bruges på grund af skydække. Der er dog stor sandsynlighed for, at danske landmænd vil få et gratis NDVI-kort til rådighed flere gange i gennem vækstsæsonen.

Ud over muligheden for at lave tildelingskort med CropSat bliver Sentinel2 data blandt andet også brugt til produktet Biomasse Benchmark fra SEGES, der sammenligner NDVI-indeks på den enkelte mark med NDVI-indekset for marker med samme afgrøde inden for en 10 km radius.

Den gratis adgang til information er en stor fordel ved satellitterne. Usikkerhed vedrørende tilgængelighed er en ulempe, og ofte vil informationen om NDVI kræve yderligere information om jordtype for at kunne give et retvisende billede af kvælstofbehovet.

Sensorinformation-N

Der findes en række traktor-/maskin-/ATV-monterede sensorsystemer, der ligesom Sentinel2-satellitterne giver biomasseniveauet i marken til brug for variabel tildeling af N og planteværn, blandt andet:

- N-sensor (Yara)
- GreenSeeker (Trimble).

Disse systemer er relativt dyre sammenlignet med den gratis information, der er til rådighed. Yara N-sensor koster for eksempel 140.000 kroner plus et årligt serviceabonnement, mens GreenSeeker koster i størrelsesordenen 90.000 til 110.000 kroner afhængig af antallet af sensorer (Henneberg 2017). Fordelen ved disse systemer er, at de kan operere i *real time*, det vil sige, at for eksempel gødningstildelingen kan justeres løbende, mens man kører gødning i marken, med information om, hvordan marken ser ud i øjeblikket.

Der findes også håndholdte systemer, der kan give information om N-behov i marken, der kan danne grundlag for variabel tildeling. For eksempel Yara ImageIT, der er et billedeanalyseværktøj, hvor man med

billeder fra smartphone eller en tablet kan få lavet analyser af N-behovet. Yara N-Tester™ er et andet eksempel på et håndholdt analyseværktøj til bestemmelse af N-behovet i marken.

Jordbonitet

EM-38-sensorer og DualEM kan bruges til kortlægning af jordens elektriske ledningsevne, som har stor sammenhæng med lerindholdet i jorden og dermed også dyrkningspotentialet. Kortlægning af lerindholdet i jorden skal kun gøres én gang, idet forandringer i jorden sker meget langsomt. Omkostningen er forholdsvis beskeden, men denne kortlægning vurderes dog ikke at være almindelig praksis, men hyppigt anvendt i forbindelse med forsøg og lignende. Indtil videre har det været mere almindeligt at supplere standard jordbundsanalyser (Reaktionstal (Rt), Fosfortal (Pt), Kaliumtal (Kt) og Magnesiumtal (Mgt)) med lerindholdet i procent. Dette kan enten gøres i systematiske mønstre (*grid*-sampling) eller i managementzoner. I Sverige er der erfaringer med bestemmelse af jordens lerindhold på baggrund af målinger af den naturlige gammastråling baseret på flere radioaktive isotoper. Disse målinger kan foretages med fly. I Sverige kan disse målinger kalibres til lokale forhold i den samme platform som CropSat ud fra almindelige jordbundsanalyser. På denne baggrund kan der dannes tildelingskort til traktorterminaler til variabel tildeling af kalk og variabel udsædsmængde.

Udbyttemåling

Udbyttemålere er almindeligt på nyere mejetærskere og er reelt set den første måling og teknologi, som blev kombineret med GPS i landbruget. Målenøjagtigheden er under normale forhold i niveauet +/- 2-4 procent, hvilket kan give et godt indtryk af udbyttevariationen i marken. Målenøjagtigheden kan være dårligere i kuperet terræn. Der har dog også været eksempler på egentlige fejlmålinger "*outliers*", hvor mejetærskernes udbyttemålere har angivet forkerte udbytter.

Omkostningerne til udbyttemåling vil i praksis være givet ved adgangen til GPS på mejetærskeren og et mindre tidsforbrug til kalibrering af måleren. Dette er naturligvis under forudsætning af, at der er en udbyttemåler på mejetærskeren i forvejen.

Kortlægning af ukrudt med sensorer

Som beskrevet ovenfor er der forsøg med kortlægning af ukrudt med droner og avanceret billedanalyse. I Rasmussen et al. (2016) angives omkostningen til kortlægningen af tidsler og græs i modne kornmarker til at være cirka 100 kroner per ha, hvilket vurderes at være en relativ høj omkostning for informationen i relation til den potentielle besparelse på herbicider.

I et samarbejde mellem virksomhederne Datalogisk og Agrointelli introduceres systemet WeedMAPS, som kan genkende rækkerne og derved måle tætheden af planter mellem rækkerne. Dette system kan potentielt reducere herbicidforbruget i efterårsbehandlinger af vinterafgrøder, men det er ikke et system, der er kommercielt tilgængeligt endnu.

Der findes tillige specifikke produkter til identifikation og behandling af ukrudt på bar jord og belægninger (veje, jernbaner med videre) blandt andet WeedSeeker fra Trimble. Dette udstyr vurderes i landbruget primært at være relevant i rækkeafgrøder. Hertil er der udviklet semiautomatiserede lugerobotter, som primært anvendes i rækkeafgrøder som for eksempel det engelske system Garford (www.garford.com) og danske F. Poulsen (www.visionweeding.com). I Danmark anvendes systemerne kommercielt i

salatproduktion og andre højværdiafgrøder, men vil i princippet også kunne finde en bredere anvendelse i rækkeafgrøder.

2.2.2 Præcision i tildelingen

Tidligere skete den første anvendelse af præcisionslandbrug normalt ved, at landmanden investerede i en ny mejetærsker med udbyttemåling, og herefter forsøgte man at aflæse variationen inden for den enkelte mark eventuelt kombineret med jordprøver.

I dag følger investeringer i præcisionslandbrug typisk en række faser, hvor landmanden ofte begynder med autostyring på den nye traktor, der kører med såmaskinen. Dette danner grundlag for en reduktion af overlap i arbejdsbredden. Anden fase vedrører investeringer i sprøjter med automatisk sektionskontrol, der kan reducere overlappet i længderetningen. Tredje fase vedrører investeringer i gødningsspreder med automatisk sektionskontrol.

Når der er opnået fortrolighed med teknologien, bliver de næste faser anvendelse af teknologierne til variabel tildeling af gødning og visse pesticider. Dette har et relativt begrænset omfang i dag (Lawson et. al 2011), men senest har den lette og gratis adgang til information via CropSat genereret en stor interesse for variabel tildeling (Henneberg 2017).

Faserne er ikke nagelfaste, og det kan for eksempel godt lade sig gøre at have automatisk sektionskontrol på sprøjte og gødningsspreder med en billig og mindre præcis GPS, uden at have autostyring på traktoren.

Omkostninger til autostyring

De fleste nyere traktorer er forberedt til autostyring. Hvis dette er tilfældet koster det typisk i størrelsesordenen 90.000 til 170.000 kroner at erhverve og installere autostyring på en traktor. Hvis traktoren ikke er forberedt til autostyring koster det typisk 25.000 til 50.000 kroner at installere en autostyringsløsning.

Ud over forrentning og afskrivning på de ovenstående investeringer er der typisk en omkostning til en licens på GPS-signalet (præcist RTK-signal) på 5.000 til 8.000 kroner per år for den første licens; ved flere enheder med autostyring kan der typisk opnås en vis flåderabat på licenserne.

Baseret på en kalkulationsrente på 4 procent og en levetid på 10 år bliver de årlige omkostninger til autostyringskapaciteten i størrelsesordenen 16.000 til 29.000 kroner med et forventet niveau på cirka 23.000 kroner per år. Dette svarer til en omkostning på 460 kroner per ha ved 50 ha, 230 kroner per ha ved 100 ha og 23 kroner per ha ved 1.000 ha.

Det er ikke udstyr, der slides op på kort sigt, hvorfor det er rimeligt at betragte det som en omkostning, der er forholdsvis uafhængig af antallet af ha, inden for rimelighedens grænser. Det er dog meget sandsynligt, at store bedrifter vil vælge at have flere enheder, idet omkostningerne per enhed per ha er lave.

Omkostninger til automatisk sektionskontrol på sprøjter og gødningsspreder

Merprisen for en marksprøjte med automatisk sektionsafblænding vurderes at være 15-30.000 kroner (Hansen et al. 2013), hvilket svarer til en årlig omkostning på op mod 3.700 kroner ved en kalkulationsrente på 4 procent og en levetid på 10 år. Dette svarer til 74 kroner per ha ved 50 ha, 37 kroner per ha ved 100 ha og 3,7 kroner per ha ved 1.000 ha. Levetiden på 10 år er formentlig højt sat ved bedrifter på 1.000 ha, men

den årlige meromkostning per ha til at oppebære kapaciteten for gradueret tilførsel og sektionskontrol er under alle omstændigheder lav ved høj kapacitetsudnyttelse.

Merprisen for en gødningsspreder (centrifugal) med automatisk sektionsafblænding vurderes at være cirka 30.000 kroner, hvilket svarer til en årlig omkostning på niveau med sektionskontrol på marksprøjten på cirka 3.700 kroner ved en kalkulationsrente på 4 procent og en levetid på 10 år. Dette svarer til 74 kroner per ha ved 50 ha, 37 kroner per ha ved 100 ha og 3,7 kroner per ha ved 1.000 ha.

Alternativer for mindre bedrifter

Ved at opbygge kapacitet til autostyring, automatisk sektionskontrol på sprøjte og gødningsspreder samt gradueret tilførsel af kunstgødning og pesticider binder det enkelte landbrug sig til en årlig omkostning af størrelsesordenen cirka 30.000 kroner i følge opgørelserne ovenfor. Dette bygger på, at kapaciteten opbygges gradvist i forbindelse med udskiftning af eksisterende materiel, hvilket medfører en gradvis indfasning over en periode på cirka 10 år.

Særligt for mindre bedrifter kan omkostningerne, der er beskrevet ovenfor, være begrænsende for implementeringen af teknologien. Der er dog en række muligheder for, at teknologien også anvendes på arealerne for små og mellemstore bedrifter.

Den første mulighed er anvendelse af teknologien i forbindelse med maskinstationsarbejde og lignende. Mange mindre bedrifter gør stor brug af maskinstationer eller lejer naboer ind til dele af markarbejdet. Dette er typisk maskiner med høj kapacitetsudnyttelse, hvorfor præcisionsteknologien kan være relativ billig på disse maskiner.

Der findes også løsninger, hvor man med få midler kan opnå en vis graduering af tilførslen af indsatsfaktorer med bedriftens egne maskiner. I tabel 6 nedenfor er der illustreret fire forskellige eksempler på investeringer og omkostninger til gradueret N-tildeling.

Der findes gratis adgang til CropSat-appen, som med GPS i en smartphone eller en tablet viser, hvor man befinder sig på et tildelingskort (SEGES 2017b). Dette giver traktorføreren mulighed for manuelt at justere på for eksempel gødningssprederen og derved regulere mængden.

Potentialet for omfordeling med denne løsning er givetvis lavere end de dyrere løsninger, omvendt er den stort set gratis og medfører stort set kun, at landmanden bruger lidt tid på forberedelse plus lidt mere tid/arbejde under kørslen i marken.

En anden løsning mellem brugen af CropSat-appen og de mere avancerede løsninger er en løsning baseret på en løs GPS-antenne, et kommunikationsmodul og en tablet, der markedsføres af Bøgballe under navnet Calibrator Free. Her kan man via en gratis app indlæse tildelingskort for eksempel fra CropSat i en almindelig tablet, som er koblet til en GPS-antenne. Via appen kan tabletenheden kommunikere med gødningssprederens styreenhed, og der kan udføres variabel tildeling af gødning på samme måde som ved dyrere systemer.

Tabel 6. Eksempler på variation i investeringer i præcisionsteknologier til variabel tildeling af gødning

CropSat app-løsning Manual justering af gødningsspreder – tænd sluk mekanisme		***Calibrator Free*-løsning**		**RTK-traktor terminalløsning**		**Yara N-sensorløsning monteret på traktor**	
Element	Pris	Element	Pris	Element	Pris	Element	Pris
Info: CropSat	0	Info: CropSat	0	Info: CropSat	0	Info: Yara Sensor	140.000
Merpris gødningsspreder	0	Merpris gødningsspreder	30.000	Merpris gødningsspreder	30.000	Merpris gødningsspreder	30.000
Smartphone	0	Tablet	3.000	RKT-GPS	130.000	Licens og Support (pr. år)	4.000
-	-	GPS antenne	3.000	Licens (pr. år)	7.000		
Samlet årlig omkostning (forrentning og afskrivning), ca.	0		4.500		27.000		25.000
Bemærkning: Lav præcision, krævende i brug		Bemærkning: Meget specifik løsning, kan ikke bruges til andet		Meget generel løsning, kan bruges til andre markoperationer		Høj præcision, relativ specifik i anvendelse men kan dog også bruges til marksprøjte	

Med RTK-GPS på traktoren er der tale om en dyr løsning, hvis den kun anvendes til variabel tildeling af gødning, dette vil dog sjældent være tilfældet, og hvis RTK-løsningen allerede er på bedriften, er det oplagt også at bruge den til gødskning.

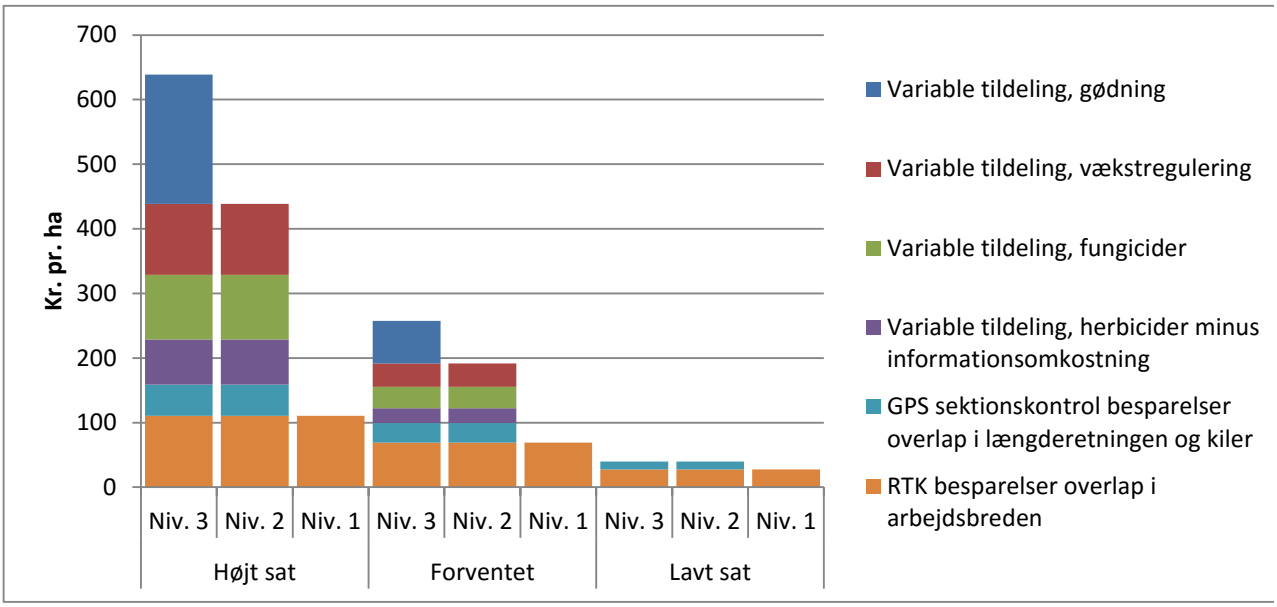
Sensor-løsninger er dyrere men til gengæld ikke afhængige af satellitinformation. Informationen er formenligt mere præcis, idet den tager udgangspunkt i markens aktuelle tilstand. Der er dog tale om relativt høje investeringer til udstyr med relativ begrænset anvendelse.

2.3 Driftsøkonomiske omkostninger og *benefits*

I det ovenstående er der blevet redegjort for en lang række teknologiske kombinationsmuligheder, dels i forhold til potentielle *benefits*, dels med hensyn til omkostninger. I det følgende vil de potentielle *benefits* og omkostninger ved tre forskellige niveauer af præcisionslandbrug blive beskrevet og sat i forhold til bedriftsstørrelse.

Niveau 1. Autostyring med RTK
Niveau 2. Autostyring med RTK og sektionsopdelt sprøjte
Niveau 3. Autostyring med RTK, sektionsopdelt sprøjte og gødningsspreder.

Figur 16 viser de skønnede *benefits* for de tre implementeringsniveauer, henholdsvis højt sat, forventet og lavt sat for at repræsentere den store usikkerhed og den store variation mellem bedrifter og marker, der er i potentialerne for præcisionslandbrug. Tallene bag figur 16 er baseret på tabel 5 og præsenteret i tabelform i Appendiks A.



Figur 16. Skønnet *benefit* ved tre forskellige implementeringensniveauer for præcisionslandbrug, hhv. højt sat, forventet og lavt sat.

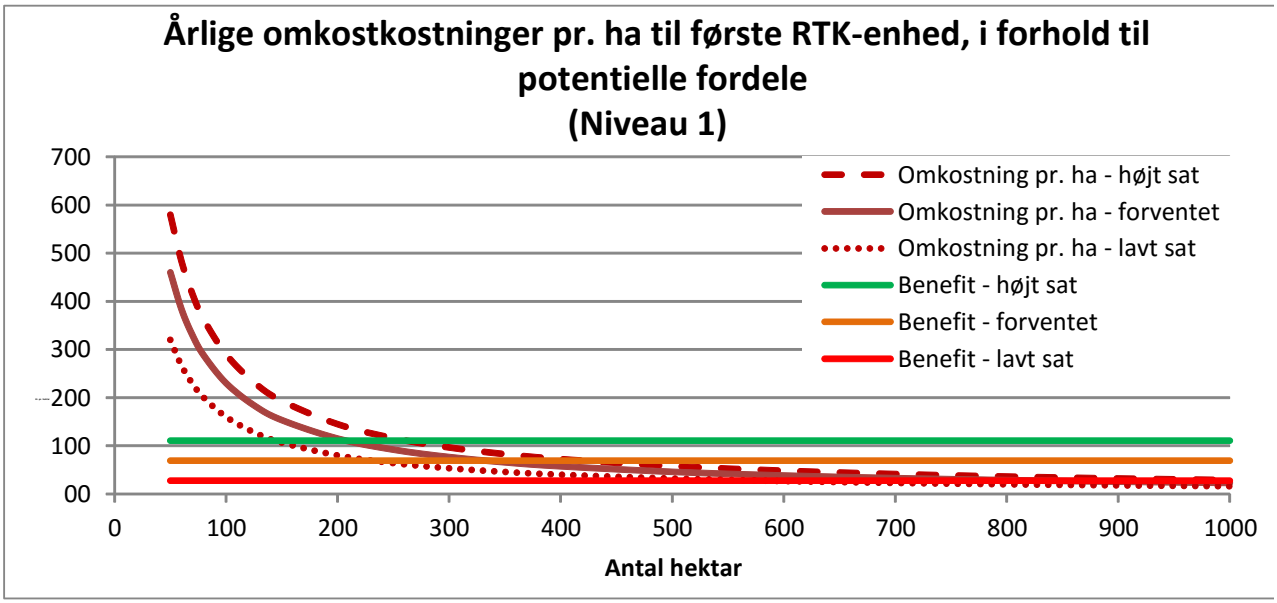
De årlige omkostninger forbundet med at opnå kapaciteten til at høste de ovenstående gevinster er ligeledes forbundet med en vis usikkerhed. Tabel 7 viser de skønnede årlige omkostninger ved præcisionslandbrug på de tre implementeringsniveauer, henholdsvis højt sat, forventet og lavt sat. Disse omkostninger skal fordeles ud over det areal, der dyrkes, hvorved der opnås en størrelsesøkonomisk effekt som beskrevet i afsnit 2.2.2.

Tabel 7. Skønnede årlige omkostninger ved tre implementeringsniveauer af præcisionslandbrug

	Højt sat	Forventet	Lavt sat
Niveau 1, kr.	29.000	23.000	16.000
Niveau 2, kr.	32.700	26.700	19.700
Niveau 3, kr.	36.400	30.400	23.400

I det følgende sættes omkostninger og *benefits* ved de tre implementeringsniveauer sammen og sættes i forhold til bedriftsstørrelsen.

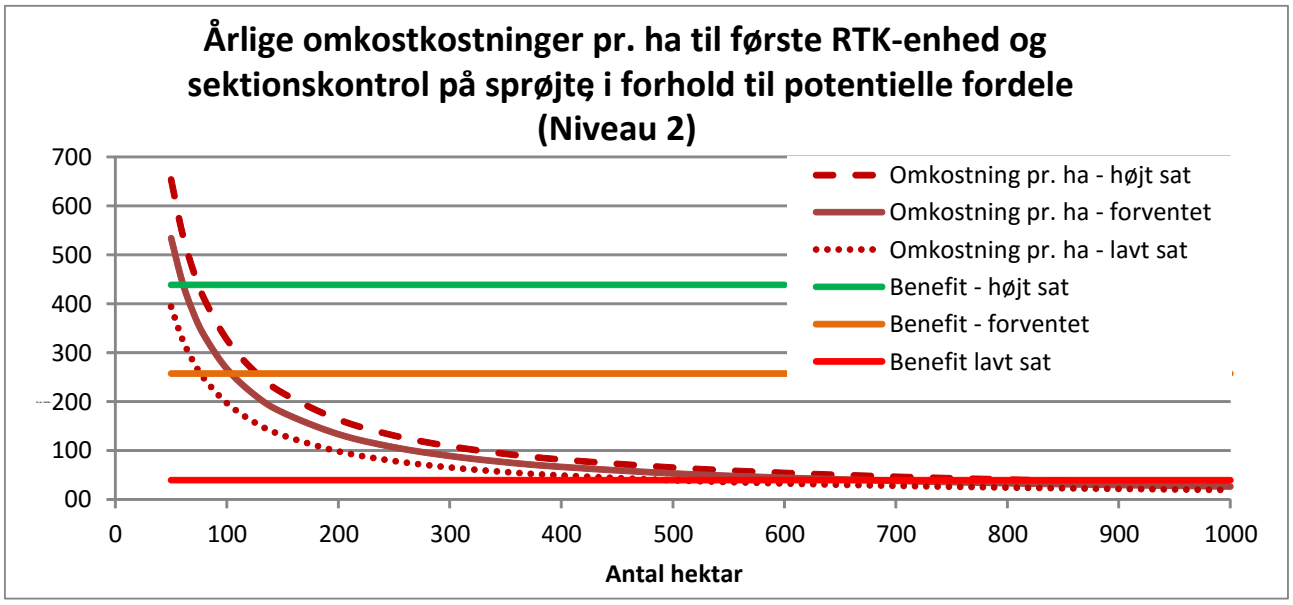
Første teknologiske implementeringsniveau er alene autostyring med RTK, der sikrer, at der undgås overlap i arbejdsbredden. Figur 17 nedenfor illustrerer de årlige omkostninger i forhold til arealstørrelse og i forhold til forskellige niveauer af *benefits* (besparelser ved reduceret overlap i form af brændstof, udsæd, pesticider, arbejdstid med videre) beskrevet i afsnit 2.1.4 ovenfor.



Figur 17. Sammenhæng mellem *benefit* og omkostning per ha ved autostyring i forhold til antal ha.

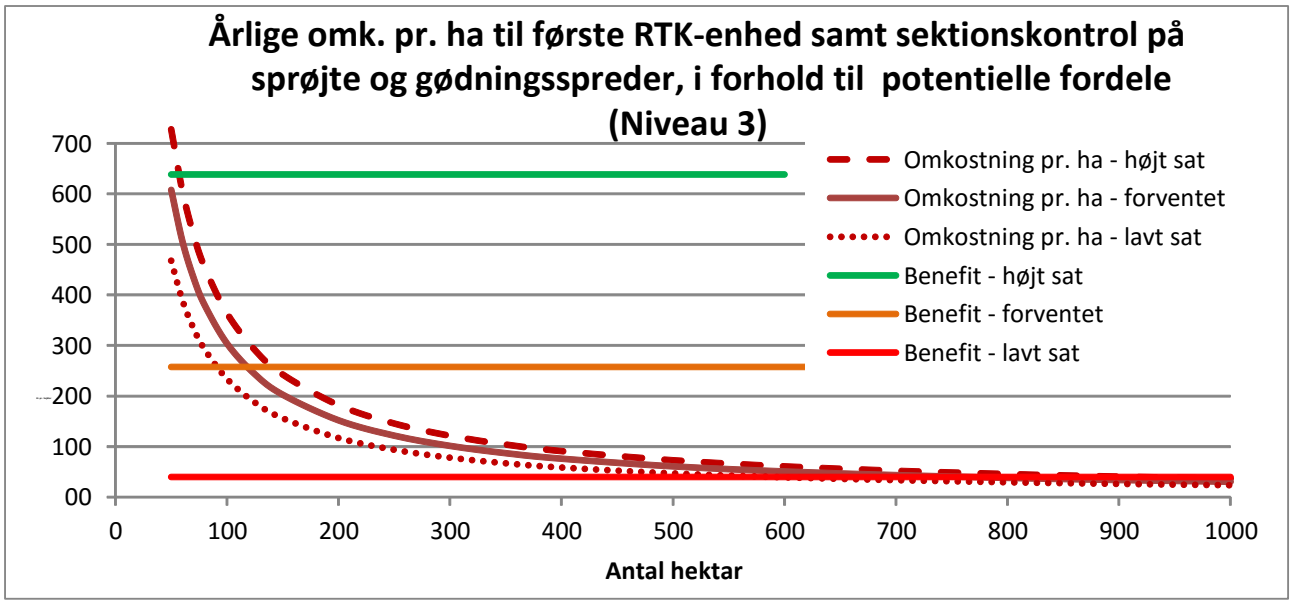
Her vurderes det således meget sandsynligt, at der kan opnås en driftsøkonomisk gevinst for bedrifter i størrelsen over 850 ha. Det vurderes sandsynligt, at bedrifter over 300-350 ha vil have en driftsøkonomisk gevinst, og det kan ikke udelukkes, at bedrifter ned til en størrelse på cirka 150 ha kan have en driftsøkonomisk gevinst. Under denne størrelse bliver den driftsøkonomiske gevinst tvivlsom for almindelige bedrifter.

Andet teknologiske implementeringsniveau illustreres i figur 18 og bygger på autostyring med RTK, med en sprøjte med automatisk sektionskontrol til reduktion af overlap i længderetningen samt variabel tildeling af pesticider. Her vurderes det meget sandsynligt at der kan opnås en driftsøkonomisk gevinst for bedrifter i størrelsen over 700 ha. Det vurderes sandsynligt, at bedrifter over 200-250 ha vil have en driftsøkonomisk gevinst, og det kan ikke udelukkes, at selv ret små bedrifter kan have en driftsøkonomisk gevinst. For små bedrifter bliver sikkerheden af den driftsøkonomiske gevinst dog tvivlsom.



Figur 18. Sammenhæng mellem *benefit* og omkostning ved autostyring, og præcisionssprøjtning i forhold til antal ha.

Tredje teknologiske implementeringsniveau illustreres i figur 19 og bygger på andet niveau med automatisk sektionskontrol på gødningsspredere og variabel tildeling af kunstgødning. Her vurderes det meget sandsynligt, at der kan opnås en driftsøkonomisk gevinst for bedrifter i størrelsen over 800 ha. Det vurderes sandsynligt, at bedrifter over 100-150 ha vil have en driftsøkonomisk gevinst, og det kan igen ikke udelukkes, at selv ret små bedrifter kan have en driftsøkonomisk gevinst.



Figur 19. Sammenhæng mellem *benefit* og omkostning ved autostyring, og præcisionssprøjtning og gødskning i forhold til antal ha.

Forskellen mellem de skønnede *benefits* og de skønnede omkostninger udtrykker nettopotentialet ved præcisionslandbrug. Nettopotentialet udtrykker den forventede resultatændring per ha, som følge af anvendelse af præcisionslandbrug. Dette er jævnfør ovenstående meget størrelsesafhængigt. I det følgende afsnit ganges dette nettopotentiale op til sektorniveau, ud fra størrelsesfordelingen af danske bedrifter.

2.4 Erhvervsøkonomisk potentiale ved større udbredelse af præcisionslandbrug

I det ovenstående er der redegjort for en række teknologier, der enten er på markedet i dag eller forventes påbegyndt implementeret i dansk landbrug inden for en kortere årrække. Samlet set vurderes der at være driftsøkonomiske potentialer i præcisionslandbrug i Danmark.

Mange forhold spiller dog ind i forhold til størrelsen på dette potentiale. De væsentligste forhold er niveauet af variation i markerne (potentialet i omfordeling af for eksempel kvælstof), markernes form og størrelse (potentialet i reduceret overlap). Hertil kapacitetsudnyttelsen i forhold til investeringer i præcisionslandbrugsudstyr, som delvist er givet ved bedriftsstørrelsen.

Vi kender endnu relativt lidt til markvariationen, men det er et område, hvor der blandt andet på baggrund af let tilgængeligt satellitdata formenligt vil være stor læring i de kommende år.

Markernes form og størrelse spiller ind på den potentielle reduktion af overlap, mens bedriftens størrelse spiller ind på kapacitetsudnyttelsen af præcisionsudstyret. Det er dog formenligt sådan, at de største bedrifter også har de største marker. Det betyder også, at de bedrifter, der har de laveste omkostninger til præcisionsudstyret per ha, formenligt også har de laveste potentielle gevinster i form af reduceret overlap. Omfanget af dette fænomen er dog ukendt. Det ændrer formenligt ikke på, at de største bedrifter har det største nettopotentiale ved præcisionslandbrug, men det illustrerer også, at man skal passe på med at overvurdere potentialet.

Tabel 8 viser det samlede areal fordelt blandt otte størrelsesgrupper. Baseret på beregningerne bag figur 19 (Niveau 3) fremgår det skønnede nettopotentiale ved præcisionslandbrug for hver størrelsesgruppe. Ved en udbredelse på cirka 72 procent af det dyrkede areal vurderes det samlet set, at der er et gennemsnitligt nettopotentiale på cirka 134 kroner per ha, der anvender præcisionslandbrug. Dette svarer til et sektorpotentiale på 255 millioner kroner årligt. Fordeles dette potentiale over hele arealet, svarer det til et gennemsnit på cirka 97 kroner per ha. Hvis hele det dyrkede areal blev dyrket med præcisionslandbrug, ville det samlede potentiale blive reduceret, fordi det skønnes, at omkostningerne ved præcisionslandbrug ikke vil blive dækket på cirka 28 procent af arealet, der dyrkes i Danmark.

Hvis man sætter potentialet højt, bliver potentialet højt i alle størrelsesgrupper, dette skal dog ikke tolkes, som om der vil blive en 100 procent implementering. Realistisk set vil der altid være arealer, hvor potentialet ved præcisionslandbrug ikke kan opveje omkostningerne.

Tabel 8. Økonomisk potentiale ved anvendelse af præcisionslandbrug for forskellige størrelsesgrupper

Bedriftsstørrelse, ha	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-400	> 400	I alt	Bedrifter > 100 ha
Antal bedrifter i 2016, 1.000 stk.	21,6	4,7	2,6	1,6	1,0	0,7	0,8	1,0	34,0	7,7
Samlet antal ha i størrelsesgruppen, 1.000 ha	385	340	318	283	234	180	273	613	2.625	1.901
Forventet potentiale i gruppen, kr. pr. ha	-350	-150	14	80	121	146	171	207		
Samlet årligt forventet potentiale, mio. kr.	-135	-51	5	23	28	26	47	127	70	255
Potentiale i gruppen, højt sat, kr. pr. ha	171	325	452	502	533	553	572	600		
Samlet årligt potentiale, højt sat, mio. kr.	66	110	144	142	125	100	156	367	1.210	
Potentiale i gruppen, lavt sat, kr. pr. ha	-688	-448	-252	-173	-124	-94	-64	-21		
Samlet årligt potentiale, lavt sat, mio. kr. 1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

1) Det samlede årlige potentiale er sat til 0 kroner, idet det antages, at disse bedrifter ikke vil indføre præcisionslandbrug.

Potentialet, højt sat, kan fortolkes som et skøn for potentialet i præcisionslandbrug på længere sigt. Her er potentialet samlet set på 1.210 millioner kroner årligt for hele landbrugserhvervet svarende til cirka 460 kroner per ha fordelt over hele arealet. På længere sigt vil den teknologiske udvikling hæve potentialet, ligesom en fortsat strukturel udvikling mod større bedrifter vil kunne hæve potentialet yderligere.

Der er dog også andre mulige udviklingsretninger. Det kan for eksempel være, hvis teknologierne falder betydeligt i pris, hvormed udviklingen vender i retning af mindre robotter i markbruget frem for den nuværende tendens mod større maskiner. I tilfælde heraf kan det ikke udelukkes, at en sådan teknologisk udvikling kan få indflydelse på strukturudviklingen i landbruget og bremse eller reversere udviklingen mod færre bedrifter. Det mest sandsynlige vurderes dog at være den nuværende udviklingstendens.

Vurderingerne af potentialerne ved præcisionslandbrug har fortrinsvist været baseret på kornsædskifter, en del af de større bedrifter i Danmark er mælkekvægbrug med et noget anderledes sædskifte. De opgjorte gevinster ovenfor bygger på implementering af tilgængelige teknologier på kort sigt. Herunder stedspecifik tildeling af pesticider og kvælstof samt autostyring, men ikke CTF-systemer, hvor der på længere sigt formentlig vil kunne opnås yderligere gevinster i form af højere udbytter og reduceret jordbehandling. Det skønnes tillige, at potentialerne ved præcisionslandbrug ikke er mindre i grovfodersædskifter, hvor også faste kørespor med CTF kan have særlige fordele ved produktion af eksempelvis græsensilage.

3 Præcisionslandbrug som virkemiddel

I det omfang præcisionslandbrug via reduktion af overlap og variabel tildeling af kunstgødning vil reducere kvælstofudvaskningen fra rodzonen, kan det være et potentielt virkemiddel i den fremtidige kvælstofregulering.

Den konkrete udformning af præcisionslandbrug som kvælstofvirkemiddel er ukendt, hvorfor det derfor også er vanskeligt at give en eksakt vurdering af det erhvervsøkonomiske potentiale. Selv givet en konkret definition af, hvordan præcisionslandbrug som kvælstofvirkemiddel ville virke, vil det erhvervsøkonomiske potentiale være forbundet med stor usikkerhed, fordi der er meget varierende forhold fra vandopland til

vandopland. For eksempel vil det erhvervsøkonomiske potentiale ved præcisionslandbrug som virkemiddel afhænge af de lokale omkostninger ved de virkemidler, der måtte blive afløftet, hvilket igen vil variere på tværs af bedrifter indenfor det enkelte delvandopland og vil variere meget på tværs af delvandoplande.

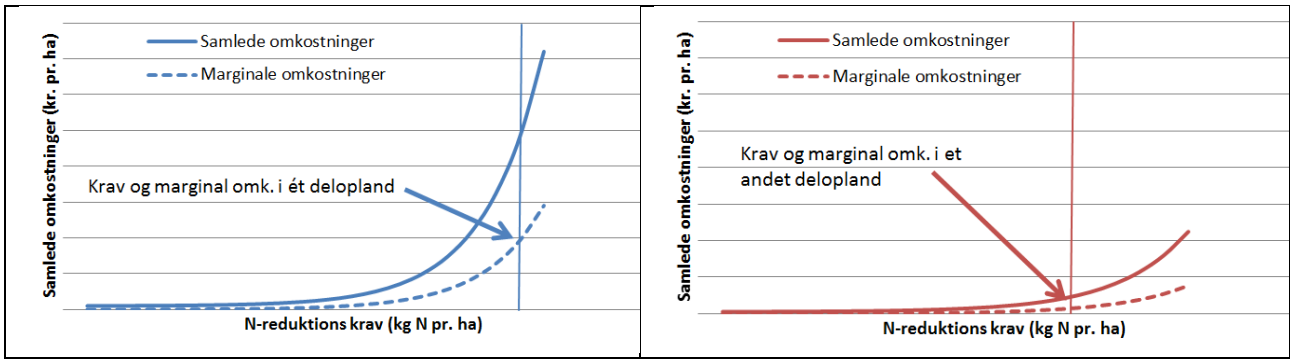
I en specifik analyse af omkostningerne ved en række scenarier for reduktion i N-udvaskningen til en specifik recipient (Norsminde Fjord) viste Ørum et al. (2017), at omkostningerne til reduktion i N-udvaskningen er eksponentielt stigende i reduktionen af udledningen.

Det er sandsynligt, at omkostningerne ved reduktion i N-udvaskningen vil have en lignende funktionel form i andre delvandopland, om end på andre niveauer. Hertil er det givet, at reduktionskravet er varierende på tværs af delvandoplande.

Det er den marginale omkostning ved det virkemiddel, der afløftes af præcisionslandbrug, som er relevant i forhold til vurdering af præcisionslandbrugs erhvervsøkonomiske potentiale som virkemiddel. Hvis man antager, at dette virkemiddel er efterafgrøder, er det altså den marginale omkostning til efterafgrøder, der er interessant. Denne omkostning afhænger dog af, hvilke andre (kollektive og flade) virkemidler, som efterafgrøder kombineres med, hvilket vil være varierende på tværs af delvandoplande.

Når de samlede omkostninger til reduktion af N-udledningen er eksponentielt stigende i reduktionen af N-udledningen, vil de marginale omkostninger også være eksponentielt stigende. Dette betyder, at reduktionskravet i det enkelte delvandopland vil have stor betydning for det erhvervsøkonomiske potentiale i præcisionslandbrug som virkemiddel, og at gennemsnitsbetragtninger i dette tilfælde kan være mere misvisende end retvisende.

I figur 20 nedenfor er illustreret to tænkte eksempler, som viser forskellen mellem to delvandoplande i både reduktionskrav og marginale omkostninger ved reduktion af N-udledning. Til venstre er et eksempel med et vandopland med relativt høje omkostninger og et relativt højt reduktionskrav. Til højre er et eksempel med relativt lave omkostninger og relativt lave reduktionskrav.



Figur 20. Illustration af forskelle i marginale omkostninger ved N-virkemidler på tværs af vandoplande

Det er ikke utænkeligt, at der kan være forskelle i en størrelsesorden på op imod én faktor 10 i de marginale omkostninger ved reduktion i N-udledningen på tværs af delvandoplande. For at kunne give et mere nuanceret billede af det erhvervsøkonomiske potentiale, er der derfor behov for en kortlægning af omkostningerne ved de eksisterende virkemidler på delvandoplandsniveau. Denne kortlægning foreligger ikke for nuværende og ligger tillige uden for denne opgave.

Det vurderes, at potentialet for anvendelse af præcisionslandbrug som et målrettet N-virkemiddel kan være meget stort i visse delvandsoplande og særligt for store bedrifter, som vil kunne opnå relativt lave omkostninger ved anvendelse af præcisionslandbrug som virkemiddel, jævnfør figur 19. Dette afhænger naturligvis meget af den konkrete udformning af virkemidlet. Et potentielt virkemiddel kunne være muligheden for at reducere efterafgrødearealkravet, under forudsætning af at man kan dokumentere en form for præcision i tildelingen af kunstgødning.

Der er dog en række spørgsmål vedrørende design af virkemiddel, som det kan være relevant at forholde sig til tidligt i processen, herunder:

- Hvad forstår man ved præcisionslandbrug – og i hvilken udstrækning skal forskellige systemer anvendes på bedriften, for at det kan erstatte et andet virkemiddel?
- Hvordan skal det dokumenteres, at systemet bruges rigtigt?
- Hvordan håndteres husdyrgødningen på bedriften – skal bedrifter der anvender husdyrgødning opnå samme forholdsmæssige reduktion i efterafgrødekrav som ved anvendelse af kunstgødning?
- Hvordan håndteres et manglende behov for variabel tildeling? – er bedrifter med meget homogene afgrøder afskåret fra at anvende virkemidlet? (Dette kan give kontraproduktive incitamenter).

Der er således en række forhold, som kan være vanskelige at implementere i praksis, og det bør således nøje overvejes, hvordan præcisionslandbrug skal anvendes som et fremtidigt virkemiddel til reduktion af eksempelvis kvælstofbelastningen på bedriftsniveau.

4 Diskussion

Som angivet ovenfor er der udviklet en lang række forskellige teknologier til monitering og udbringning af hjælpestoffer positionsbestemt på marken ved hjælp af forskellige GPS-systemer. På nuværende tidspunkt er det primært RTK-GPS med autostyring, som har fundet en bredere anvendelse i landbruget og primært på de større landbrugsbedrifter, hvor næsten halvdelen af landbrugsarealet håndteres med RTK-GPS. Det er også indenfor dette område, at de største økonomiske gevinster kan opnås på kort sigt. Tillige er det udbredt blandt maskinstationer at fordele kalk positionsbestemt. Teknologier til variabel og positionsbestemt tildeling af hjælpestoffer som kvælstof og pesticider har endnu en forholdsvis beskeden udbredelse, og gevinsterne afhænger i høj grad af den lokale variation og jordbundsforhold.

I de senere år er der kommet nye teknologier på markedet, heriblandt gratis adgang til Sentinel2-satellitfotos med mulighed for ugentlige opdateringer, små prisbillige droner monteret med kameraer til monitering af ukrudtspletter med videre. Hertil er udstyr som GPS-modtagere, PC'er og styresystemer generelt blevet billigere eller præinstalleret på nyere landbrugsmaskiner.

Nogle teknologier er forholdsvis nemme at implementere, mens andre teknologier kræver mere tid til indkøring. Reglerne for droneflyvning kan således hæmme potentialet for præcisionstilførsel af plantebeskyttelsesmidler med applikationsdroner og/eller på baggrund af data fra planteovervågningsdroner. En generel tilladelse til flyvning med autonome overvågningsdroner i lav højde i landzone kunne formenligt være med til at reducere pesticidanvendelsen på sigt.

Der er i det ovenstående ikke blevet talt om håndtering af husdyrgødning. Automatisk (GPS-styret) sektionskontrol på gyllevogne er så vidt vides ikke kommercielt tilgængeligt. På moderne gyllevogne er der

ofte to til fire manuelt styrede sektioner på vogne med brede slæbeslangebomme. På mindre bomme (op til 24 meter) er der mulighed for øget kontrol for eksempel med sektionsfordeler fra Samson Agro (Jensen 2017). Der er dog ikke nogen større udbredelse af disse systemer her i landet. Begrænsede muligheder for sektionskontrol med gyllevogne vil resultere i et vist overlap i gylletildelingen ved kiler og forager. En videre udvikling og implementering af bedre sektionskontrol kunne være et område med et vist potentiale til bedre styring af husdyrgødningen.

Præcision i såning med variabelt skæretryk (præcision i sådybden) og præcision i form af variabel udsædsmængde for eksempel i forhold til jordbundsforhold er ikke behandlet grundigt i det ovenstående. Dette er en teknologi, som endnu ikke er (først lige er på vej) på markedet, men som blandt andet undersøges i det danske udviklingsprojekt Future Cropping (www.futurecropping.dk), som støttes af Innovationsfonden.

Intelligent såning og jordbehandling vil formentlig være kommercielt tilgængeligt inden for en årrække, når systemerne er testet og yderligere valideret. Udviklingen af de tilgængelige kommercielle systemer har i mange år været fokuseret på specifikke tekniske løsninger mere end på generelle kompatible systemer, som kan implementeres bredt. Hertil har udviklingen af beslutningsstøtte i forbindelse med kvælstoftildeling endnu ikke integreret den nødvendige information for at kunne skabe en optimal kvælstoftildeling på trods af den fremskredne teknologiske udvikling.

Som det ser ud i dag, er præcisionslandbrug overvejende lønsomt for relativt store ejendomme. Alternativt skal maskinstationerne udføre mange af opgaverne. Dette vil dog i mange tilfælde skabe et dilemma, fordi præcisionslandbrug i høj grad kræver at informationsindsamling er fleksibel og sker løbende gennem hele vækstperioden.

De tilfælde, hvor der har været størst succes med systemerne, har typisk været, hvor behandlingsstrategien og beslutningsstøtten har været enkel og klar. Dette gælder for eksempelvis autostyring og varieret kalktildeling (Pedersen 2003).

5 Konklusion

Anvendelsen af GPS-systemer og specielt autostyring med RTK-GPS er steget betydeligt indenfor de senere år. I dag anvendes RTK-GPS-systemer på næsten halvdelen af det danske landbrugsareal. Det er primært de større landbrug, som anvender teknologien, som kan være med til at reducere overlap og samtidig lette arbejdsgangen på bedriften. Anvendelsen af GPS-teknologi til stedspecifik behandling af marken og variabel tildeling af kvælstof og pesticider er fortsat på et relativt beskedent niveau, selvom flere teknologier til indsamling af information om markens tilstand er blevet tilgængelige indenfor de senere år. Variabel tildeling af kalk har dog været udbredt gennem en årrække, hvilket typisk håndteres ved hjælp af maskinstation. Lønsomheden ved præcisionslandbrug afhænger af markens variation og de ekstra omkostninger, som er forbundet med investering i GPS-udstyr og til monitering af marken. Foreløbig har de driftsøkonomiske gevinster været beskedne på bedrifter med et gennemsnitligt produktionsareal, men der er mulighed for opnåelse af økonomiske gevinster ved autostyring, variabel tildeling af kalk, pesticider og i flere tilfælde kvælstof på mellemstore og større bedrifter.

Teknologien kan fremadrettet hjælpe til bedre logistik, planlægning og forbedring af afgrødekvaliteten (for eksempel proteinindhold). Endnu er investeringsomkostningerne relativt høje, men der er betydelige stordriftsfordele forbundet med teknologien. Teknisk pålidelighed for nogle systemer og indkøring er også en barriere for mange landmænd.

I nærværende analyse er beregnet det forventede erhvervsøkonomiske potentiale ved implementering af en række præcisionslandbrugsteknologier i landbruget. Samlet set viser analysen, at implementering af præcisionslandbrug inden for en tidshorisont på omkring 2-3 år kan forventes at skabe en erhvervsøkonomisk gevinst for landbruget. Det vurderes, at der er et gennemsnitligt (forventet) potentiale på cirka 134 kroner per ha ved præcisionslandbrug ved en udbredelse på cirka 72 procent af det dyrkede areal. Dette svarer til et sektorpotentiale på 255 millioner kroner årligt. Hvis potentialet sættes højt i alle størrelsesgrupper, og ved en 100 procent implementering, skønnes den samlede erhvervsøkonomiske gevinst at blive på 1.210 millioner kroner årligt for hele landbrugserhvervet svarende til cirka 460 kroner per ha fordelt over hele arealet.

Parallelt med de erhvervsøkonomiske gevinster og bedre fordeling af kvælstof og andre hjælpestoffer vil der i flere tilfælde kunne opnås en miljømæssig gevinst i form af reduceret pesticidforbrug og bedre optagelse af kvælstof i planterne. Dermed vil der kunne opnås en yderligere gevinst for det omgivende samfund.

Anvendelsen af præcisionslandbrug som virkemiddel kan således være en mulighed til erstatning af andre miljøforbedrende teknologier. Som virkemiddel og erstatning af andre teknologier vil potentialet dog afhænge af de lokale omkostninger ved de virkemidler, der måtte blive afløftet, hvilket igen vil variere på tværs af bedrifter inden for det enkelte delvandopland og vil variere meget på tværs af delvandoplande.

I det omfang præcisionslandbrug via reduktion af overlap og variabel tildeling af kunstgødning vil reducere kvælstofudvaskningen fra rodzonen og reducere mængden af pesticider, kan det være et potentielt virkemiddel i den fremtidige regulering. Men det skønnes at være vanskeligt at give en eksakt vurdering af det samlede potentiale.

Referencer

CropSat (2017) https://cropsat.dk/

Danmarks Statistik (2017) Præcisionslandbrug 2017, Nyt fra Danmarks Statistik nr. 381,

DAT (2017) Dimensions Agri Technologies. http://www.dimensionsagri.no/product/

European Parliament (2014) Precision Agriculture: An opportunity for EU farmers – potential support with the CAP.

Franco C., S.M. Pedersen, H. Papaharalampos & J.E. Ørum (2017) The value of precision for image-based decision support in weed management. Precision Agriculture, 18 (3): 366-382.

Hansen, Michael Jørgen, Tavs Nyord, Line Block Hansen, Louise Martinsen, Berit Hasler, Peter Kryger Jensen, Bo Melander, Anton Gårde Thomsen, Hanne Damgaard Poulsen og Peter Lund, Jørn Nygaard Sørensen, Carl-Otto Ottosen & Lillie Andersen (2013) Miljøteknologier i det primære jordbrug: Driftsøkonomi og miljøeffektivitet. DCA rapport Nr.: 029. Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.

Jensen, H.G., L.-B. Jacobsen, S.M. Pedersen & E. Tavella (2012) Socioeconomic impact of widespread adoption of precision farming and controlled traffic systems in Denmark. Precision Agriculture, 13: 661-677.

Jensen, Søren Mejlstrup (2017) Personlig meddelelse fra Product Manager for Gylle, Samson Agro.

Jensen, Peter Kryger & Lise Nistrup Jørgensen (2016) Interactions between crop biomass and development of foliar diseases in winter wheat and the potential to graduate the fungicide dose according to crop biomass. Crop Protection, 81: 92-98.

Jordbrugsanalyser (2017) Miljø- og Fødevareministeriet.
http://miljoegis.mim.dk/cbkort?profile=jordbrugsanalyse

HARDI (2017) http://www.hardi.dk/dk/produkter/trailed/navigator/egenskaber/booms/#

Henneberg, B. (2017) Personlig meddelelse. Salgschef, Præcisionslandbrug, GEOTEAM A/S.

Knudsen, Leif (2016) Gødskning, kapitel i Oversigt over landsforsøgene 2016, SEGES P/S.

Lawson, L.G., S.M. Pedersen, C.G. Sørensen, L. Pesonen, S. Fountas, A. Werner, F.W. Oudshoorn, L. Herold, T. Chatzinikos, I.M. Kirketerp, & S. Blackmore (2011) A four nation survey of farm information management and advanced farming systems: A descriptive analysis of survey responses. Computers and Electronics in Agriculture, 77: 7-20.

Lund, I., H.T. Søgaard & E. Graglia (2006) Microspraying with one drop per weed plant. Proceedings of Plantekongres 2006, Århus, Denmark, January 10–11, 2006

Lyngvig, Henning Sjørslev, Rita Hørfarter & Leif Knudsen (2013) FarmTest, Centrifugalspredere med sektionskontrol, Videncentret for Landbrug (SEGES). https://www.landbrugsinfo.dk/Tvaerfaglige-emner/FarmTest/Maskiner-og-planteavl/Sider/FarmTest-centrifugalspredere-med-sektionskontrol_pl_13_1528.aspx

Mathiassen, S.K., I. Lund & P. Kudsk (2016) Adjuvants for single droplet application of glyphosate. Proceedings ISAA 2016. https://www.researchgate.net/publication/304497893_ADJUVANTS_FOR_SINGLE_DROPLET_APPLICATION_OF_GLYPHOSATE

McHugh, A.D., J.N. Tullberg & D.M. Freebairn (2009) Controlled traffic farming restores soil structure. Soil & Tillage Research, 104: 164-172.

McPhee, J. (2009) The benefits of controlled traffic farming to assist adaptation to climate change for Australian crop production industries. Submission to House Standing Committee on Primary Industries and Resources. http://www.aph.gov.au/house/committee/pir/australianfarmers/subs/sub015.pdf. Accessed 08 September 2011.

Middeldatabasen (2017) SEGES. https://middeldatabasen.dk/

Miljøstyrelsen (2014) Vejledning om syn af sprøjter: Marksprøjter og tågesprøjter til udbringning af pesticider. Vejledning fra Miljøstyrelsen Nr. 2, 2014. http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2014/02/978-87-93178-15-1.pdf

Olsen, Jakob Vesterlund & Jesper Sølver Schou (2017) Measuring the effect of field viability on wheat yield. Congress proceedings IFMA 21st Congress Edinburgh, Scotland.

Pedersen, S.M. (2003) Precision farming-Technology assessment of site-specific input application in cereals, Ph.D dissertation, DTU, IPL, 343.

Pedersen S.M., R.B. Ferguson & R.M. Lark (2001) A Comparison of Producer Adoption of Precision Agricultural Practises in Denmark, the United Kingdom and the United States. SJFI – Working Paper no. 2/2001.

Pedersen, Hans Henrik & Carl Høj Laursen (2002) Kalkspredning med GPS. Landskontoret for Bygninger og Maskiner, Landbrugets Rådgivningscenter.

Pedersen, S.M., S. Fountas, B.S. Blackmore, M. Gylling & J.L. Pedersen (2004) Adoption and perspectives of precision farming in Denmark. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science 54 (1): 2-8.

Pedersen, S.M., K.M. Lind & S. Fountas (2015) Adoption and Perspectives of auto-guidance in Northern Europe. In Precision Agriculture '15: Papers Presented at the 10th European Conference on Precision Agriculture Volcani Center, Israel 12-16 July 2015, Vol. 15, 727-732 (Ed. J.V. Stafford). The Netherlands: Wageningen Academic Publishers

Petersen, Hans Henrik, Jens Prior Hansen & Thomas Øllgaard (2006) Økonomiske og miljømæssige fordele ved autostyring!, NordVest Agro. https://www.landbrugsinfo.dk/planteavl/praecisionsjordbrug-og-gis/sider/1537_bilag3.pdf

Petersen, P.H., M. Nørremark, P.K. Jensen, A.M. Thierry, R. Hørfarter, J.E. Jensen, J. Elbæk & H.S. Lyngvig (2017) (in prep) *Notat om Intelligent sprøjteudstyr/ præcisionssprøjtning i jordbruget, der kan medvirke til minimering af brugen af pesticider.* Report on the potential of intelligent spraying equipment and

precession spraying to minimize pesticide use in Danish agriculture (Draft April 2017). SEGES P/S and Aarhus University

Qingjie, W., Hao, C., Hongwen, L., Wenying, L., Xiaoyan, W., McHugh, A. D., et al. (2009). Controlled traffic farming with no tillage for improved fallow water storage and crop yield on the Chinese Loess Plateau. Soil & Tillage Research, 104 (1): 192-197.

Rasmussen, Jesper, Jon Nielsen, Jens Carl Streibig, Søren Ingvor Olsen, Kim Steenstrup Pedersen & Jens Erik Jensen (2016) Droner til monitering af flerårigt ukrudt i korn. Bekæmpelsesmiddelforskning nr. 165, Miljøstyrelsen. http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2016/10/978-87-93529-12-0.pdf

SEGES (2015) Reduktion i brændstofforbrug med RTK-GPS. https://www.landbrugsinfo.dk/Maskiner-markteknik/Traktorer/Sider/reduktion-af-braendsstofforbruget-med-rtk-gps_pl_15_2194_2439.aspx

SEGES (2017a) Afgrødesensorer til planteværn. https://www.landbrugsinfo.dk/planteavl/plantevaern/ipm/sider/afgroedesensorer-til-plantevaern_pl_13_1332.aspx

SEGES (2017b) Gratis CropSAT-app https://www.landbrugsinfo.dk/Planteavl/Praecisionsjordbrug-og-GIS/Sider/pl_17_3142_3842.aspx

Tullberg, J.N., D.F. Yule & D. McGarry (2007) Controlled traffic farming-from research to adoption in Australia. Soil & Tillage Research, 97 (2): 272-281.

Økologisk Landsforening (Uden årstal) Faste kørespor (CTF) i økologisk græs. http://okologi.dk/media/1453475/kvaeg-fakark-0117-a4-korr4.pdf

Ørum, J.E., C. Kjærgaard & I.K. Thomsen (2017) Landbruget og vandområdeplanerne: omkostninger og implementering af virkemidler i oplandet til Norsminde Fjord. Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet. IFRO Rapport; Nr. 258. https://curis.ku.dk/ws/files/178737610/IFRO_Rapport_258.pdf

Ørum, Jens Erik & Maria Sommer Holtze (2017) Bekæmpelsesmiddelstatistik 2015: Behandlingshyppighed og pesticidbelastning, baseret på salgsstatistik og sprøjtejournaldata. Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 17, Miljøstyrelsen. http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2017/jan/bekaempelsesmiddelstatistik-2015/

Appendiks A: Oversigtstabel for bruttopotentiale

Skønnet *benefit* ved tre forskellige implementeringsniveauer for præcisionslandbrug, hhv. højt sat, forventet og lavt sat.	Niv. 3	Niv. 2	Niv. 1	Niv. 3	Niv. 2	Niv. 1	Niv. 3	Niv. 2	Niv. 1
	Højt sat			Forventet			Lavt sat		
Variabel tildeling, gødning, kr. pr. ha	200			66			0		
Variabel tildeling, vækstregulering, kr. pr. ha	110	110		36	36		0	0	
Variabel tildeling, fungicider, kr. pr. ha	100	100		33	33		0	0	
Variabel tildeling, herbicider minus informationsomkostning, kr. pr. ha	70	70		23	23		0	0	
GPS-sektionskontrolbesparelser overlap i længderetning og kiler, kr. pr. ha (pesticider og kunstgødning)	48	48		30	30		12	12	
RTK-besparelser overlap i arbejdsbredden, kr. pr. ha (pesticider og kunstgødning)	111	111	111	69	69	69	28	28	28

Note: Niv1, Niv2 og Niv3 angiver følgende:

Niveau 1. Autostyring med RTK

Niveau 2. Autostyring med RTK og sektionsopdelt sprøjte

Niveau 3. Autostyring med RTK, sektionsopdelt sprøjte og gødningsspreder.

Appendiks B: Oversigt over forkortelser

ATV (All Terrain Vehicles)

CTF (Controlled Traffic Farming)

GIS (Geografisk Informations System)

GNSS (Global Navigation Satellite System)

GPS (Global Positioning System)

MBR (Minimum Bounding Rectangle)

NDVI (Normalized Differential Vegetation Index)

RTK-GPS (Real Time Kinematic)-(Global Positioning System)

UAV (Unmanned Aerial Vehicles)