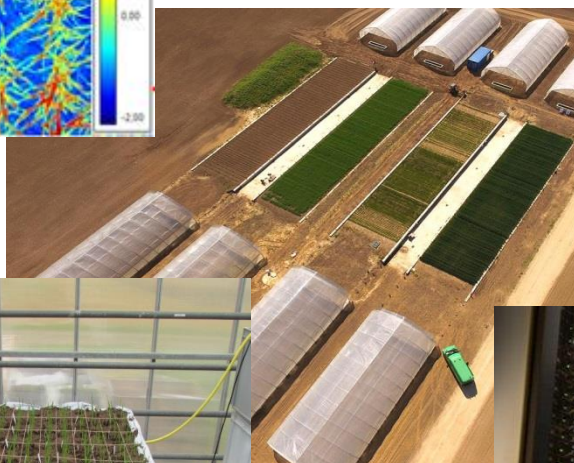
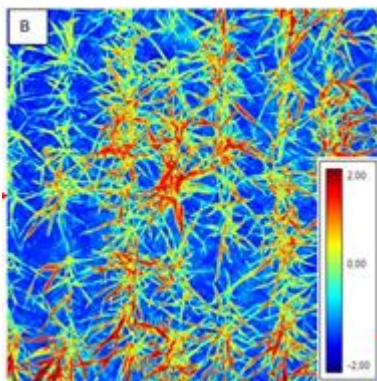


Forbedring af afgrødernes udbytte og produktionsmæssige egenskaber (FAUPE), 2014 - 2016

- projektets indhold og hovedresultater



STØTTET AF
promilleafgiftsfonden
for landbrug

1. Forord

FAUPE projektet er gennemført med støtte fra Promilleafgiftsfonden for Landbrug.

I landbruget er der bred og stor opbakning til arbejdet med at styrke udviklingen af nye forbedrede sorter til dansk planteproduktion. FAUPE har således fået fagligt støtte fra en bred kreds af de vigtigste aktører, herunder Bæredygtigt Landbrug, Landbrug & Fødevarer, SEGES, Crop Innovation Denmark, de danske planteforædlere og forskningsmiljøerne på Aarhus Universitet, Institut for Molekylærbiologi og Genetik - Afgrødegenetik og Bioteknologi og Københavns Universitet, Institut for Plante- og Miljøvidenskab.

2. Resume

Alle tiltag der styrker bæredygtig og konkurrencedygtig planteproduktion vil bidrage til at imødekomme store samfundsmæssige udfordringer i forhold til at sikre forsyning af biomasse til foder, fødevarer og andre non-food formål. Klimaforandringerne vil stille nye krav til de afgrøder vi dyrker. Der er derfor et fortsat behov for at udvikle nye mere robuste, mere produktive og dyrkningssikre sorter.

I FAUPE projektet er gennemført et omfattende forsknings- og innovationsarbejde, hvor der er udviklet nye metoder til, og opnået ny viden om hvordan man kan identificere og forædle korn græs og kartofler, som har en bedre udnyttelse af næringsstoffer og vand. Konkret har projektet seks store resultater:

- GenomeBrowser – et meget stort fremskridt for planteforskningen og planteforædlerne
- Udvikling af en analyseplatform (GenomeDK) til storskala DNA analyser og genomisk prædiktions, som er en vigtig forudsætning for implementering af genomisk selektion i dansk planteforædling, med henblik på at udvikle nye mere robuste, produktive og dyrkningssikre sorter.
- Metoder, sensorer og kameraer - > som sideløbende med FAUPE er implementeret i stor skala i et anlæg til screening af rodvækst (RadiMax)
- Udvikling af en række semifield- og drivhus-metoder til hurtig screening for rodvækst
- Påvisning af forskelle i rodvækst mellem sorter af vårbyg, vinterhvede og græsser
- Udvikling af protokoller og metoder til indsamling af store datamængder fra fænotypning

Projektet er gennemført som et strategisk planteforskningsprojekt mellem Aarhus Universitet og Københavns universitet, hvor der er satset markant på at udvikle metoder og opnå ny viden om røddernes betydning for afgrødernes udnyttelse af vand og næringsstoffer og produktivitet.

2. Indledning

Ny mere præcis viden om genetikken der er afgørende for afgrødernes rodudvikling og betydningen af denne afgrødeegenskab, i forhold til også i fremtiden at kunne levere endnu mere robuste og produktive afgrøder har længe stået på både planteforskeres og planteforædleres ønskeliste. I 2013 blev der derfor taget initiativ til en national koordineret forskningsindsats (FAUPE projektet), som dels skulle styrke dette væsentlige forskningsområde og dels skulle levere konkrete resultater, som kunne anvendes af planteforædlerne til at levere nye forbedrede sorter til dansk landbrug.

FAUPE-projektet er gennemført som et 3-årigt forskningsprojekt i perioden 2014-16. Projektet er støttet af Promilleafgiftsfonden for Landbrug. Hovedaktiviteterne er udført af forskergrupper fra henholdsvis Aarhus Universitet og Københavns Universitet, mens SEGES har været projektleder.

Projektets formål var at udvikle ny, markant hurtigere og mere effektiv praksis til forædling af afgrøder/sorter med bedre produktionsegenskaber, som styrker konkurrenceevnen i planteproduktionen. FAUPE tog udgangspunkt i manglen på viden om og mulighed for at selekttere forædlingsmateriale med forbedret rodvækst.

Projektets aktiviteter omfattede i hovedtræk udvikling af:

- 1) Nye, hurtige og effektive screeningsmetoder, der kan identificere forædlingsmateriale med den bedste udnyttelse af tildelt kvælstof (Nitrogen Use Efficiency, NUE) og forbedret tørketolerance.
- 2) Nye softwareprotokoller, der kan opsamle og analysere screeningsdata i kombination med meget omfattende fænotypiske og genomiske datasæt for senere udvikling af genomiske markører til forædlingen.

Den første del af projektet var fokuseret på metodeudvikling, mens den sidste del af projektet fokuserede på at validere og raffinere og opskalere metoder til studier af rodvækst. Endvidere har projektet sikret udvikling og opbygning af en GenomeBrowser, som kan anvendes af både forskere og planteforædlere til at søge i generne i sorter og nyt forædlingsmateriale med henblik på at identificere værdifuld genetik, såvel hvad angår rødder som på sigt også at kunne anvendes til andre komplekse egenskaber

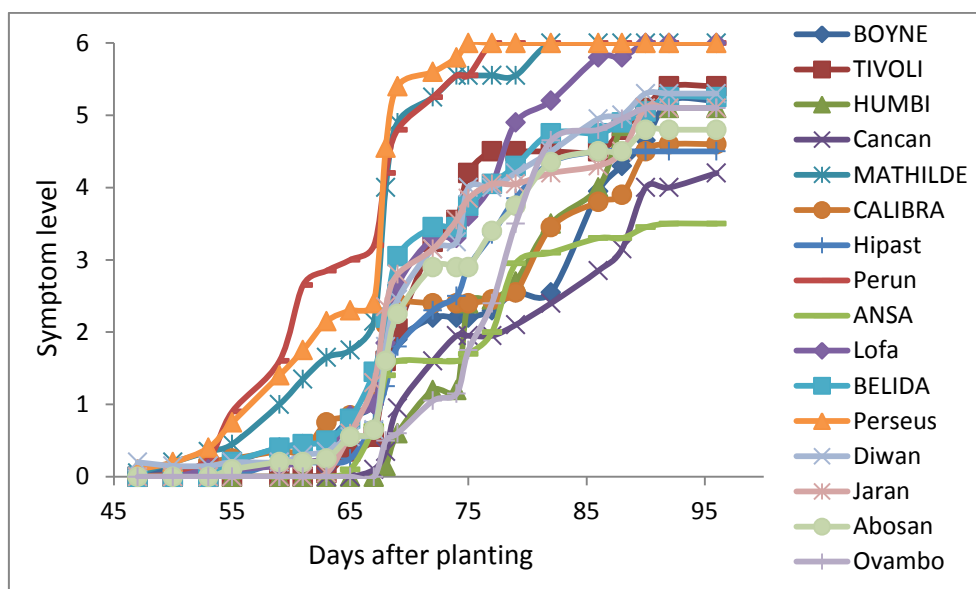
I denne rapport er en række af de vigtigste resultater trukket frem i afsnit 3. I tillæg til nærværende afslutningsrapport er der udarbejdet flere delrapporter, hvor der gives en afrapportering for de arbejdsplaner og teknologier, der er arbejdet med i projektet. I appendix B er angivet en publikationsliste, over en række rapporter der beskriver projektets mange resultater.

3. Udvalgte resultater

Målinger på rødder og overjordiske plantedele (fænotypning)

I løbet af projektet er der udviklet og afprøvet en række metoder til måling af planterodvækst i forskellige opsætninger i væksthushus. Disse metoder muliggør sammenligning af et større antal sorter eller krydsningsafkom, hvilket er nødvendigt når genetikken bag rodvæksten skal kortlægges. Metoderne består dels af direkte observation af rødderne gennem transparente rør, og indirekte ved at måle på optagelse af ^{15}N eller observere bladdød forårsaget af et herbicid placeret i et bestemt jordlag.

Metoderne blev demonstreret på sorter af græs og vinterhvede, hvor det var muligt klart at adskille sorternes rodvækst. De indirekte metoder med placering af ^{15}N og herbicid i jorden gav de mest robuste resultater. Resultaterne af af rapporteret i: "Forsøg og resultater fra rodscreening i væksthushus og semifield".



Eksempel på resultat af rodscreening i sorter af græs. Sorterne gror i en kasse hvor der er placeret herbicid i bunden, bladsymptomer på herbicidet ses først på sorter med hurtig rodvækst.

Forsøg og observationer i marken

I alle tre år er der udført markforsøg i vårbyg og i 2015 og 2016 i vinterhvede. Formålet er at validere målinger under drivhus og semifield forhold med målinger under mere naturlige betingelser i marken, hvor det kun er muligt at måle på et begrænset antal sorter. I marken er rodudvikling og rodaktivitet karakteriseret ved direkte observation med et kamera nedsænket i nedborede transparente plastrør (minirhizotroter) og måling af vandforbrug i dybere jordlag med sensorer. Samtidig er væksten over jorden karakteriseret ved brug af forskellige billedteknologier. Optagelserne er foretaget med kamera monteret på traktor eller drone. Der er ydermere taget prøver af de overjordiske plantedele til kvantificering af kvælstofoptaget. Resultaterne viser at det er muligt at adskille rodvæksten mellem sorter af vinterhvede og vårbyg med metoderne, samt beskrive forskellene i den overjordiske vækst. Se rapporterne

"Markforsøg med rodvækst og kvælstofeffektivitet" og "Forsøg og resultater fra screening af bladmateriale i markforsøg og i RadiMax".

Genomics (genotypning)

I forædlingen arbejdes der med et meget stort antal genotyper, der på trods af udviklingen af simple metoder til fænotypning af rod- og topbiomasse umuliggør fænotypning af alt forædlingsmateriale. Genomics delen af FAUPE er derfor afgørende for at udnytte projektets resultater til at forædle sorter af korn, græs og kartofler med en bedre kvælstofudnyttelse og tørketolerance. Derfor er der udviklet metoder, der muliggør forædling for komplicerede egenskaber som rodvækst ved at selektere direkte på genomet vha. molekulære markører (genotypning). Metoderne indebærer, at man på basis af et reduceret antal sorter/linjer, hvor der udføres komplet fæno- og genotypning, kan forudsige egenskaberne i et meget stort antal forædlingslinjer, udelukkende på basis af en genotypning i laboratoriet.

Metoderne stilles til rådighed for de danske forædlere via. genomebrowsere for græs, hvede, byg og kartofler, hvortil forædlerne har netadgang. På genomebrowserne kan der uploades og arbejdes med egne data, ligesom der kan trækkes på data i den tilknyttede database. Genomebrowserne er beskrevet i rapporten: "Genome browsers for the FAUPE project".

Metoderne er integreret i GenomeDK, der er Aarhus Universitets High-Performance Computing (HPC) platform for storskala sekvensanalyser og bioinformatik. Blandt brugerne af GenomeDK er universiteter, hospitaler og private firmaer. Integreringen med GenomDK fremtidssikrer dataanalyseplatformen, der kan anvendes af både forskere og forædlere til analyse af genomiske data og til integrering af genotype og fænotype data.

GenomeDK HPC-platformen har givet de danske forædlingsfirmaer en hidtil uset mulighed for at implementere og udnytte de nyeste teknologier og bioinformatiske dataanalysestrategier, og er en forudsætning for at kunne udvikle og implementere nye forædlingsprogrammer baseret på genomisk selektion, hvor der forædles målrettet mod forbedring af en række komplekse egenskaber.

Der er over 20 brugere blandt forædlingsfirmaer og universiteter, og der har været afholdt et kursus i systemerne for brugerne på Aarhus Universitet, forskningscenter Flakkebjerg.



GenomeDK, Aarhus universitets High-Performance Computing (HPC) platform for storskala sekvensanalyse og bioinformatik.

GenomeDK, Aarhus universitets High-Performance Computing (HPC) platform for storskala sekvensanalyse og bioinformatik.

4. Diskussion og perspektiver

Gennem de seneste 20 år er markørteknologien i stigende grad taget i anvendelse i den praktiske planteforædling. Ofte er det dog relativt simpelt nedarvede karakterer som specifikke sygdomsresistens, der typisk også kan selekteres for i markforsøg, eller visse mutationer der vedrører kvaliteten af kornet. Genomisk forædling er en forlængelse af denne teknologi, hvor der selekteres på store dele af genomet, hvilket giver mulighed for at forædle mere målrettet for langt mere komplicerede egenskaber. Det kan være nærringstofudnyttelse og tørketolerance, som er målet med metodeudviklingen i dette projekt.

Projektet har tilvejebragt de nødvendige værktøjer for at undersøge overjordisk og underjordisk biomasse med henblik på en forbedring af afgrødernes vand- og næringsstofudnyttelse. Samtidig er der udviklet værktøjer til genomisk selektion, der er en forudsætning for målrettet at forbedre komplicerede kvantitative egenskaber som f.eks. vand- og næringsstofudnyttelse. Disse værktøjer er som en del af projektet implementeret hos forædlerne. Perspektiverne for den fremtidige forædling er at anvendelse af disse værktøjer vil muliggøre en langt mere målrettet forædling for en række kvantitative egenskaber herunder rodudvikling.

For dansk landbrug er perspektiverne i projektet her og nu bedre information om de enkelte markedsførte sorters egenskaber hvad angår udvikling og vækst af rod og top, og på sigt nye sorter med en bedre ressourceudnyttelse. Dette vil medvirke til at sikre en fortsat robust, produktiv og bæredygtig planteproduktionen i en fremtid, hvor bl.a. klimaændringer vil give nye udfordringer for planteproduktionen. Dette medfører en bedre indtjening og konkurrenceevne i planteproduktionen, samtidig med at tabene af næringsstoffer til omgivelserne minimeres.

En mere effektiv planteproduktion medfører lavere omkostninger til foder, og særligt dette vil medvirke til en forbedret økonomi i husdyrproduktionen med de afledte positive effekter for hele samfundet i form af øget eksport, valutaindtjening og beskæftigelse.

Appendix A. Vurdering af FAUPE projektet fra de danske planteforædlere

FAUPE – en afgørende milepæl i dansk planteforædling

Planteforædlingen i Danmark har i mange år leveret sorter til det danske marked. Dette marked adskiller sig i forskellige henseender ret markant fra øvrige markeder i EU og Norden. Klimaet er væsentlig lunere end i de øvrige nordiske lande og samtidig mere kystklimatisk end i det centrale EU. Ud over de klimatiske forhold har dansk planteproduktion opereret under meget faste reguleringer, hvoraf de mest gennemgribende kom med de tre vandmiljøplaner.

Mens disse reguleringer påførte planteproduktionen ret markante udfordringer, drev de samtidig en sortsudvikling, der i stigende grad har kunnet imødekomme de danske produktionsbetingelser. Det betyder, at de danske sorter i dag udgør et voksende segment af den samlede danske planteproduktion.

Denne proces skal styrkes af flere grunde: 1) Flere lande må før eller siden gennemføre produktions- og miljøreformer tilsvarende de danske, og her vil vi gerne være parate med sorter, der allerede er tilpassede sådanne reformer. 2) Vi har tydelige indikationer på, at processen ikke fortsætter i det uendelige, og udbyttegevinster sker oftere på bekostning af kvaliteten. Vi bliver derfor nødt til at tænke nye veje for at finde og udvikle den bedste genetik til de danske planteproducenter. 3) Både i primærproduktionen såvel som i forædlingen oplever vi, at klimatiske forandringer sætter sine spor. Kravene til at kunne modstå længere perioder uden nedbør – eller al for meget nedbør, øges dag for dag.

Derfor hilste forædlingsfirmaerne FAUPE projektet meget velkommen, da det i sin tid blev annonceret og skudt i gang. FAUPE adresserer helt præcist de ovenfor-skitsede udfordringer, og med stor tilfredshed konstaterer vi, at der ikke blot har været fuld konsensus blandt parterne om målene, men også et ivrigt engagement for at nå i hus dermed. Derfor er der også igangsat flere nye initiativer, som tager udgangspunkt i de resultater og metoder FAUPE har genereret.

Dybdegående forskning – omsat i praksis

Al forædling har indtil i dag stort set kun fokuseret på planternes overjordiske dele. Derfor ligger der sandsynligvis et uudnyttet potentiale gemt under jorden, som det er på tide at få klarlagt og anvendt. Den gængse rodforskning har oftest begrænset sig til studier under meget kontrollerede forhold i laboratorier eller klimakamre. Det har ført til identifikation af forskellige genetiske komponenter i rodudviklingen. Men efter vores opfattelse, er der stadig meget langt fra sådanne studier til de virkelige forhold under markbetingelser, hvor de enkelte planter står i en stærk konkurrencesituation.

Det forhold har FAUPE forsøgt at gøre noget ved. Først og fremmest er FAUPE lykkedes utrolig godt med at samle spidskompetencer i verdensklasse indenfor plantebiologi, plantefysiologi, kvantitativ genetik, bioinformatik, statistik, forædling og high performance computing om det samlede mål at forbedre rodudviklingen i danske afgrøder. Det har skabt den nødvendige platform for at teste og udvikle strategier med henblik på at opskalere rodforskningen. Det har desuden betydet, at man har kunnet optimere og udforske både på den biologiske del og den genetiske del af rodudvikling fra starten. Man har som én af de første opgaver med stor succes gennemført tests for rødders udviklingshastighed i herbicid-kasser specielt udviklet til formålet. Det har ikke blot ført til identifikation af sorter med de hurtigst voksende rødder, men har også givet helt ny indsigt i rødders udvikling under forskellige vandforhold i marken. Under disse forsøg har man endvidere tilstræbt at udvikle de bedste metoder og finde de bedste materialer til screening for roddeybde i stor-skala format. Derved har FAUPE opnået en viden, som har været til uvurderlig nytte for stor-

skala anlægget [RadiMax](#). RadiMax står i dag som et fuldt færdigt rodscreeningsanlæg, med et unikt undervandingssystem, der helt baserer sig på de resultater man opnåede i FAUPE. Alle sensorer i anlægget er udvalgt på baggrund af FAUPE resultater, lige såvel som det undervandingsprincip der anvendes i RadiMax. Det er de samme arter FAUPE fokuserede på, der nu tager pladsen op i RadiMax, og dermed kan vi trække en lige linje fra små/mellem-skala forsøgene i FAUPE til de massive stor-skala forsøg, der nu gennemføres i RadiMax, og som derfra i nye forsøg vil brede sig ud til reelle markforhold. Vi er ikke bekendt med et tilsvarende setup andetsteds, og vi ser med stor forventning frem til de resultater som hele denne akse vil give i afkast.

Fælles platform – fælles fodslag

FAUPE, RadiMax og andre tilsvarende projekter generer store mængder data, der kun lader sig dissekere og udnytte vha. stærke bioinformatiske analyseredskaber. Samme redskaber er strengt nødvendige for at udnytte de genetiske potentialer, parternes sortsmateriale gemmer på. FAUPE har udviklet en særdeles effektiv udviklingsplatform med fælles standarder, analyseværktøjer, og genomiske databaser, der udstyrer de danske planteforædlere- og forskere med et helt nye funktionaliteter. Den akkumulerede viden, der opbygges på denne platform, vil udgøre et fantastisk udgangspunkt for fremtidig planteforskning. Flere plantegenomer er allerede tilgængelige i den nye platform "[Genome Browser DK – planter](#)", hvilket giver de enkelte brugere muligheder for hurtigt at finde genetiske markører for forskellige egenskaber eller specifikke gener i bestemte pathways. På denne platform vil forskere og forædlere sammen kunne udvikle nye modeller for forbedret forudsigelse af de agronomiske egenskaber i planterne. Det er vores overbevisning, at platformen er tilstrækkeligt dimensioneret til at kunne afdække de genetiske faktorer, der ligger bag de sidste årtiers danske forædlingssuccesser.

Lokalt samarbejde om lokale- og globale udfordringer

FAUPE har ikke blot samlet forskere fra forskellige danske institutioner, men har også forenet konkurrerende forædlingsfirmaer i det samme mål om at gøre fremtidens sorter mere robuste, højere ydende, og af en bedre kvalitet. Bedre udgangspunkt kunne vi ikke have ønsket os. Det samarbejde er kommet for at blive, og allerede nu planlægger og gennemfører parterne hos hinanden forsøg, der ikke er en del af FAUPE, men stadig relevante for FAUPE målene. Tørkeforsøg ved KU og AU er eksempler på disse, et Public-Private-Partnership projekt på remote imaging af forædlings- og markforsøg er et andet, der giver helt nye muligheder for at observere vækst-dynamikker over tid. Derfor går vi fremtiden i møde helt anderledes påklædt end før FAUPE kom til. Det er en stor gevinst for os alle; for forædlerne, forskerne, den enkelte landmand og for vort ry i internationale omgivelser, hvor den første oftest også tager det største stik.

Meget vil vide mere

Planteproduktionen i Danmark såvel som i den globale verden står overfor markante udfordringer: Der skal produceres mere, for vigende input, og under stadigt mere usikre vejrforhold. For at imødekomme dette scenarie, må vi tage utraditionelle metoder i brug. Det gælder i planteforskningen. Det gælder i planteforædlingen. FAUPE er det første konkrete og vellykkede initiativ i denne retning, og meget mere er på vej.

Med FAUPE har vi taget de første spadestik til at belyse, hvad der rent faktisk sker under jorden, når det gælder rodvækst. Men der er endnu meget viden at erobre. For eksempel ved vi kun lidt om, hvor stor en rolle miljøet spiller for rodgenetikken; og endnu mindre om hvor store vekselvirkningerne er mellem disse. For det andet ved vi endnu ikke, om den optimale rodvækst er styret af

få eller mange genetiske komponenter. For det tredje ved vi ikke, om den optimale rodprofil for tørketolerance er ens med den optimale rodprofil for kvælstofudnyttelse. Men det er vi med garanti blevet væsentlig klogere på om blot få år, når nye forsøg med genomisk selektion begynder at afdække genetikken bag rodegenskaber; når sorter, der er afprøvet i FAUPE og RadiMax også bliver testet og målt i landsforsøg; når tørkeforsøg i RadiMax afdækker, hvilke sorter, der faktisk præsterer de bedste udbytter; eller når N^{15} -forsøg viser hvilke rodprofiler, der har givet det største N-optag.

Mange spændende opdagelser ligger forude, og når vi når dem, vil FAUPE kunne bryste sig af som et af de første projekter, at have sat kursen for nye forædlingsmål, forenet kræfterne i det fælles anliggende, og bragt nødvendig viden og funktion til veje, for alle der har spillet en aktiv rolle i denne proces.”

Appendix B: Publikationsliste

Gennem projektet er der udarbejdet en række delrapporter, oplæg og videnskabelige rapporter. Disse materialer kan findes på projektets hjemmeside de enkelte år: [2014](#), [2015](#), [2016](#). Endvidere arbejdes i skrivende på at afrapportere centrale resultater fra Projektet i videnskabelig tidskrifter.

Delrapporter med projektets resultater ved afslutningen af andet projektår 2015:

Generelt om FAUPE - arbejdsplan 1 og 3 2014 og 2015. Af Simon Fiil Svane, Jesper Svendsgaard og Svend Christensen, Københavns Universitet.

Markforsøg generelt - arbejdsplan 1 og 3, 2014 og 2015. Af Simon Fiil Svane og Jesper Svendsgaard, Københavns Universitet.

Forsøg og resultater fra rodscreening i markforsøg og udvikling af kamera - arbejdsplan 1 og 3 2014 og 2015. Af Simon Fiil Svane, Kristian Thorup-Kristensen og Jesper Svendsgaard, Københavns Universitet.

Forsøg og resultater fra rodscreening i væksthuse og semifield - arbejdsplan 1 og 3, 2014 og 2015. Af Eric van der Graaff, Simon Fiil Svane, Kristian Thorup-Kristensen og Jesper Svendsgaard, Københavns Universitet.

Forsøg og resultater fra screening af bladmateriale i markforsøg - arbejdsplan 1 og 3, 2014 og 2015. Af Jesper Svendsgaard og Svend Christensen, Københavns Universitet.

RadiMax. Af Simon Fiil Svane og Jesper Svendsgaard. Københavns Universitet.

Delrapporter med projektets resultater december 2016:

GenomeDK platformen. Af Torben Asp, Aarhus Universitet.

Genome browsers for the FAUPE project. Af Istvan Nagy, Aarhus Universitet.

Transcriptome analysis in drought-sensitive and tolerant lines in perennial ryegrass (*Lolium perenne*). Maria De la O Leyva Pérez, Aarhus Universitet.

Transcriptomic response to nitrogen application in barley. Af Maria De la O Leyva Pérez, Aarhus Universitet.

Generelt om FAUPE - arbejdsplan 1 og 3, 2014 – 2016. Af Simon Fiil Svane, Jesper Svendsgaard og Svend Christensen. Københavns Universitet.

Generel beskrivelse af markforsøg 2014, 2015 og 2016. Af Simon Fiil Svane og Jesper Svendsgaard. Københavns Universitet.

Markforsøg med rodvækst og kvælstofeffektivitet, 2015 og 2016. Af Simon Fiil Svane og Kristian Thorup-Kristensen. Københavns Universitet.

Forsøg og resultater fra screening af bladmateriale i markforsøg og i RadiMax, 2015 og 2016. Af Jesper Svendsgaard, Signe Marie Jensen, Jesper Cairo Westergaard og Svend Christensen. Københavns Universitet.

Forsøg og resultater fra rodscreening i væksthuse og semifield, 2014, 2015 og 2016. Af Eric van der Graaff, Simon Fiil Svane, Kristian Thorup-Kristensen, Si Chen og Jesper Svendsgaard. Københavns Universitet.

Videnskabelige publikationer

A synteny-based draft genome sequence of the forage grass *Lolium perenne*. Byrne SL, Nagy I, Pfeifer M, Armstead I, Swain S, Studer B, Mayer K, Campbell JD, Czaban A, Hentrup S, Panitz F, Bendixen C, Hedegaard J, Caccamo M, Asp T. Plant J. 2015 Nov;84(4):816-26. doi: 10.1111/tpj.13037. FAUPE-projektet har bidraget til udviklingen af genome browseren i denne artikel.