

**KRYSTYNA RYBKA**

Zakład Biochemii i Fizjologii Roślin

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin IHAR — PIB w Radzikowie

## Fenotypowanie roślin. Konferencja EPPN 2020 w Tartu/ Estonia\*

### Plant phenotyping. The EPPN 2020 Conference in Tartu/ Estonia

Utrzymanie tempa wzrostu produkcji żywności proporcjonalnego do wzrostu liczby ludzi na świecie jest wyzwaniem dla hodowli. Rozwój nowoczesnych metod i komputeryzacja przetwarzania danych umożliwiają zwiększenie przepustowości programów hodowlanych. Jednakże ponieważ to fenotyp, czyli determinowany przez środowisko genotyp, jest wyznacznikiem ostatecznej wartości użytkowej nowych odmian, ocena fenotypów w sposób przystający do numerycznego przetwarzania danych zaczyna determinować tempo prac. Dlatego też w ramach Programu Ramowego UE, HORIZON 2020, finansowany jest projekt EPPN 2020 (European Plant Phenotyping Network), w celu zapewnienia dostępu do najnowocześniejszych obiektów, technik i metod oraz do wiedzy na temat gromadzenia i przetwarzania danych. W artykule omówiono konferencję EPPN 2020, która odbyła się w Estonii w listopadzie 2017 oraz przedstawiono ośrodki należące do sieci EPPN, do których można aplikować w celu zrealizowania doświadczeń na własnym materiale, własnymi siłami, z pomocą miejscowych pracowników. Nabory będą odbywały się sześciokrotnie, co pół roku, począwszy od 11 grudnia 2017.

**Słowa kluczowe:** szklarnia, zboża, pszenica, jęczmień, pszenżyto, żyto, *Poaceae*

Keeping the growth rate of food production proportional to the increase in the number of people in the world is a challenge for breeding. The development of modern methods and computerization of data processing can increase the capacity of breeding programs. However, due to the fact that the phenotype, that means a genotype determined by an environment, prevails about the final utility value of new cultivars, phenotypic assessment in a manner consistent with numerical data processing begins to determine the speed of breeding programs. Therefore, under the EU Framework Program, HORIZON 2020 the European Plant Phenotyping (EPPN 2020) project is funded, to provide access to state-of-the-art facilities, techniques and methods as well as knowledge about the data collection and processing needed in modern breeding. The article discusses the EPPN 2020 conference held in Estonia in November 2017 and presents the centers of the EPPN network, to which outsiders of that network can apply in order to carry out the experiments on own materials, with the help of local staff. Calls to the program will be announced six times, every six months, starting on December 11<sup>th</sup> 2017.

**Key words:** greenhouse, cereals, wheat, barley, triticale, rye, *Poaceae*

\* Udział w Konferencji EPPN 2020 został sfinansowany z grantu NCBiR nr PBS3/B8/19/2015. Na Konferencji zaprezentowano poster: „Machine learning in determination of water saturation deficit in wheat leaves on basis of Chl *a* fluorescence parameters”.

Rośliny uprawne znajdują się w centrum uwagi nowoczesnej gospodarki w związku ze wzrastającymi wymaganiami ilościowymi i jakościowymi, zarówno w stosunku do żywności jak i pasz oraz surowców. W ostatnich dekadach dokonano znacznego postępu w rozwoju technik biologii molekularnej a nowe metody szybkiego sekwencjonowania całych genomów spowodowały, że genotypowanie nie stanowi istotnej trudności technicznej w pracach hodowlanych (Rybka, 2009). W tej sytuacji fenotypowanie, w celu wyboru genotypów o największym potencjale wytwarzania plonu o określonej wartości rynkowej, w danych warunkach środowiskowych i jednocześnie zapewniające efektywne wykorzystanie zasobów naturalnych, przede wszystkim wody, stało się wąskim gardłem prac hodowlanych. Gromadzenie, przetwarzanie i analiza numeryczna danych zbieranych na masową skalę jest następną trudnością wymagającą systemowego rozwiązania (Rybka i Nita, 2014).

Dlatego też w ramach Programu Ramowego UE dla Badań i Innowacji, HORIZON 2020, jest finansowana europejska sieć ośrodków zajmujących się fenotypowaniem roślin, EPPN 2020. Do tej sieci należy obecnie 13 placówek naukowych: Forschungszentrum Jülich, Germany (koordynator); Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung, Germany; Helmholtz Zentrum München, Germany; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Germany; Institut National de la Recherche Agronomique, France; Aarhus University, Denmark; University of Nottingham, United Kingdom; Wageningen University and Research, The Netherlands; Hungarian Academy of Sciences, Hungary; Australian Plant Phenomics Facility, Australia; Global Change Research Centre, Czech Republic; Aberystwyth University, United Kingdom; Phenom-Networks, Israel oraz 1 korporacja: Keygene Inc., The Netherlands (<https://eppn2020.plant-phenotyping.eu/EPPN>, data dostępu: 27.11.2017). Cztery z nich są zlokalizowane na terenie Niemiec, 2 w Wielkiej Brytanii, 2 w Holandii, a pozostałe kraje: Francja, Dania, Węgry i Czechy są reprezentowane przez jedną placówkę. Do sieci należą 2 kraje spoza Europy: Australia i Izrael. Placówki te, w ramach wymagań finansowych programu HORIZON 2020 udostępniają, do czasu zakończenia projektu w 2020, swoje zaplecze badawcze, w ramach 6 naborów na zasadzie konkursów, z pierwszym do 11. 12. 2017 i następnymi ogłaszanymi co pół roku. Ilość dostępnych w ramach EPPN 2020 platform badawczych jest inna niż krajów, czy też instytucji (tab. 1). Z 36 placówek otwartych dla badań spoza sieci EPPN, 11 należy do instytucji Niemieckich: 2 do IPK w Gaterslaben, 3 do Helmholtz University w Monachium i pozostałe do Centrum Badawczego Uniwersytetu Bońskiego w Juelich, po 7 do różnych ośrodków INRA na terenie Francji oraz do Uniwersytetów Nottingham i Aberystwyth w Wielkiej Brytanii, 4 do uniwersytetów belgijskich (1 — Louvain, pozostałe — Gent), 2 do Uniwersytetu w Helsinkach i po 1 placówce z pozostałych krajów. Z tym, że Australia i Izrael nie są wymienione jako kraje udostępniające swoje placówki do badań w ramach EPPN, natomiast są na tej liście, dodatkowo, poza instytucjami partycypującymi, po 2 placówki z Finlandii i po 1 placówce ze Słowacji i z Włoch.

Oferowane do użytku platformy (tab. 1), to głównie obiekty szklarniowe, z kontrolowanymi warunkami, wyposażone w automatyczne transportery, stanowiska

ważenia i podlewania oraz komory z sensorami/rejestratorami obrazu: RGB (red, green, blue), IR (infrared), hyperspektralnymi światła rozproszonego, fluorescencyjnymi, trójwymiarowymi skanerami laserowymi.

Tabela 1

**Zestawienie platform dostępnych do wykorzystania w ramach sieci EPPN 2020, w ramach finansowania HORIZON 2020. Obiekty (36 platform) dostępne w ramach sieci EPPN2020 pogrupowano ze względu na lokalizację**

**List of platforms available for use as part of the EPPN 2020 network, financed in frames of HORIZON 2020. Facilities (36 platforms) available as part of the EPPN2020 network are grouped by location**

Pełna nazwa Object name	Specjalizacja Specialization	Wyposażenie Equipment	Lider, adres web, reprezentatywna publikacja Lider, link, representative paper
<b>NIEMCY: 11 obiektów — GERMANY</b>			
1	2	3	4
APPP-A (małe rośliny)	Ocena dynamiki rozwoju roślin i tworzenia biomasy, architektury rośliny, zabarwienia liści, zawartości wody w tkankach a także ocena zawartości chlorofilu i efektywności fotosyntezy na podstawie ok. 200 parametrów rejestrowanych przez zestaw detektorów, w doświadczeniu szklarniowym.	System LemnaTec Scanalyzer (LemnaTec AG, Aachen, Niemcy) dla małych roślin do badań faz wzrostu w kontrolowanych warunkach: temp. 10-40°C, wilgotność względnej 40-75%, PAR (fotosyntetycznie czynnej radiancji) 120-500 [ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ]. W zależności od systemu uprawy i wielkości badanych obiektów, możliwość oceny w jednym doświadczeniu: system A do 4600 roślin, systemy B i C do 520. Rejestracja obrazu: CCD kamera górna + boczne z obiektami w zakresie: VIS (390-750 nm) oraz czujniki NIR (1450-1550 nm), fluorescencji (wiązka wzbudzająca: 400-500 nm/ zakres emisji 520-750 nm), 3D LaserScanner (Phenospex, Heerlen, Netherlands) a także FluorCam device (Photon Systems Instruments (PSI), Brno, Czechy). Wewnętrznie zintegrowana platforma analityczna (IAP) w oparciu o algorytmy analizy obrazu jest rutynowo stosowana do automatycznego wyodrębniania cech. Fenotypowanie roślin i wszystkie powiązane procesy analizy obrazu są dokumentowane w systemie LIMS przy użyciu standardowych formatów metadanych, zgodnie z wytycznymi MIAPPE. Dane finalne są zintegrowane z danymi surowymi.	Thomas Altmann IPK, Gatersleben  <a href="http://www.ipk-gatersleben.de/en/dept-molecular-genetics/heterosis/">http://www.ipk-gatersleben.de/en/dept-molecular-genetics/heterosis/</a>  (Junker et al., 2015; Neumann et al., 2015)
APPP-B (rośliny średniej wielkości)			
APPP-C (duże rośliny)	System A- małe rośliny, np. <i>Arabidopsis</i> . System B- średnie rośliny do 150 cm System C- duże rośliny do 220 cm		
Metabolomics Platform	Fenotypowanie metabolomu i wskaźników molekularnych	Platforma składa się z systemu chromatografów GC-MS oraz LC-MS przystosowanych do analizy związków polarnych i semi-polarnych w dużej liczbie próbek. Zazwyczaj w czasie analizy jest oznaczanych 60-100 znanych metabolitów takich jak: aminokwasy, poliaminy, cukry, fosforany cukrów oraz dwukrotnie większa liczba niezidentyfikowanych metabolitów. Laboratorium umożliwia przygotowanie prób do analiz i analizę oraz opracowanie danych na serwerze Linux z wykorzystaniem oprogramowania zaprojektowanego w środowisku R. Od operatora jest wymagana dobra znajomość środowiska R.	David Riewe, IPK-Gatersleben <a href="http://www.ipk-gatersleben.de">http://www.ipk-gatersleben.de</a>  (Riewe et al., 2017)

1	2	3	4
Breed-FACE	Badania polowe wpływu CO <sub>2</sub> na rozwój roślin	System FACE to ośmiokątna instalacja polowa laserowo nawierzonych rur, w których przepływ CO <sub>2</sub> jest sterowany komputerowo. CO <sub>2</sub> jest uwalniany w kierunku wiatru i przepływa przez łąn w stężeniu ok. 550-590 ppm. Doświadczenia są prowadzone przez cały cykl wegetacyjny w łącznie 3 ośmiokątach o średnicy 18 m. zawierających 252 poletek o wymiarach 1,5 x 1,5 m. Przeznaczone do badań genetycznych i molekularnych podstaw adaptacji do podwyższonego stężenia CO <sub>2</sub> , zgodnie ze scenariuszami klimatycznymi, bądź do badań populacyjnych reakcji roślin na podwyższone stężenie CO <sub>2</sub> .	Onno Muller, University of Bonn, Centrum Juelich <a href="http://www.fz-juelich.de/portal/DE/Home/home_node.html">http://www.fz-juelich.de/portal/DE/Home/home_node.html</a> (Cohu et al., 2013)
Grow-screen Chamber	Platforma do badania wzrostu i rozwoju, struktury i architektury roślin, fotosyntezy i uwodnienia tkanek w warunkach kontrolowanych	Dwie komory o kontrolowanych warunkach temperatury, CO <sub>2</sub> , wilgotności, natężenia światła. Wyposażone w roboty do przenoszenia roślin z jednej komory do drugiej (zmiana warunku wzrostu) oraz do kamer pomiarowych. Do badania mutantów i poszukiwania rolniczo wydajnych genotypów. Na stronie EPPN 2020 brak informacji o detektorach. Przepustowość systemu zależy od wielkości roślin, od 400 do 4000 szt./dośw.	Fabio Fiorani University of Bonn, Juelich <a href="http://www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/DE/Mitarbeiter/JPPC/Fiorani_Fabio/Fiorani.html?nn=548888">http://www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/DE/Mitarbeiter/JPPC/Fiorani_Fabio/Fiorani.html?nn=548888</a> (Avramova et al., 2016)
Grow-screen-Rhizo	Platforma do jednoczesnego określania rozwoju pędów oraz korzeni w warunkach kontrolowanych	W warunkach kontrolowanych rośliny są uprawiane w przezroczystych "rhizoboxes" o specjalnej konstrukcji umożliwiającej rejestrację obrazu korzeni w czasie wzrostu. Możliwość oznaczania: typu (korzenie główne i boczne), długości każdego z typów, rozgałęzień, rozmieszczenia w glebie. Możliwość oznaczania dla części nadziemnej: wysokości powierzchni liści, fotosyntezy, wymiany gazowej. Mikroskopowe analizy korzeni i części nadziemnej są możliwe.	Fabio Fiorani University of Bonn, Juelich <a href="http://www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/DE/Mitarbeiter/JPPC/Fiorani_Fabio/Fiorani.html?nn=548888">http://www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/DE/Mitarbeiter/JPPC/Fiorani_Fabio/Fiorani.html?nn=548888</a> (Gioia et al., 2015)
PlantMRI	Platforma do oceny wpływu warunków środowiskowych (biotyczne oddziaływania na korzenie, struktura/architektura roślin) w warunkach kontrolowanych	Platforma umieszczona w szklarni z temperaturą kontrolowaną w zakresie 22–26°C i oświetleniem LED-owym. Wyposażona w MRI (Magnetic Resonance Imaging), który umożliwia dynamiczny, nieinwazyjny pomiar zmian strukturalnych w roślinach. Możliwe jest obrazowanie 3D korzeni w ziemi do oceny: masy i długości systemu korzeniowego, liczby korzeni i ich rozgałęzień. Dla podziemnych organów magazynujących np. u buraka cukrowego, możliwość oceny zmian struktury wewnętrznej i kształtu w czasie. Korzenie badane w cylindrach 8,1 x 20–40 cm a część naziemna może mieć wysokość do 50 cm. Szybkość rejestracji obrazów MRI: do 20 roślin/dzień.	Dagmar van Dusschoten University of Bonn, Juelich <a href="http://www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/DE/Mitarbeiter/EnableTechnology%20(PlantMRI)/Dusschoten_Dagmarvan/van%20Dusschoten.html?nn=1010264">http://www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/DE/Mitarbeiter/EnableTechnology%20(PlantMRI)/Dusschoten_Dagmarvan/van%20Dusschoten.html?nn=1010264</a> (van Dusschoten et al., 2016)
Expo-SCREEN	Platforma do badania wzrostu i rozwoju roślin zbożowych i warzyw, a także sadzonek drzew w warunkach kontrolowanych	Cztery komory fitotronowe z kontrolowanymi warunkami: stężenia pożywek, zawartości wody w podłożu, temperatury i wilgotności powietrza, zawartości CO <sub>2</sub> , natężenia i widma światła. Każdą komorę można podzielić na 4 niezależne kompartmenty. Przystosowana do badania zbóż (np. pszenica, jęczmień) warzyw (np. pomidory, ziemniaki) roślin bioenergetycznych (np. wierzba). Na stronie EPPN 2020 brak danych nt. detektorów.	Jörg-Peter Schnitzler, Helmholtz University, München <a href="http://www.helmholtz-muenchen.de/en/eus/facilities/phytotron/index.html">http://www.helmholtz-muenchen.de/en/eus/facilities/phytotron/index.html</a> (Luedemann et al., 2009)

1	2	3	4
Signal-SCREEN	Platforma do badania w warunkach kontrolowanych, wpływu stresów biotycznych na korzenie i część naziemną siewek roślin	Platforma umożliwia automatyczne mikroskopowe obrazowanie siewek w wielodołkowych płytkach, w mikroskopie odwrótnym, umożliwiającym obrazowanie wszystkich fluoroforów dostępnych na rynku. Platforma SignalScreen daje techniczną możliwość ilościowej oceny wpływu patogena na roślinę dzięki zastosowaniu patogenów znakowanych fluorescencyjnie. zaplecze stanowi kolekcja 38 patogenów bakteryjnych, w tym 22 znakowanych fluorescencyjnie oraz >100 patogenów grzybowych.	Corina Vlot, Helmholtz University, Muenchen, <a href="http://www.helmholtz-muenchen.de/institute-biochemical-plant-pathologie/research-groups-units/inducible-resistance-signalling/index.html">http://www.helmholtz-muenchen.de/institute-biochemical-plant-pathologie/research-groups-units/inducible-resistance-signalling/index.html</a> (liczne publikacje dostępne w linku)
Sun-SCREEN	Platforma do badań w warunkach kontrolowanych (odziaływania biotyczne z korzeniami, stężenie substancji pokarmowych, dostępność wody, temperatura powietrza)	Platforma składa się z dwóch symulatorów światła słonecznego: średnich rozmiarów (1,4 x 1,4 x 1,0 [m]) oraz małego (1,2 x 1,2 x 0,3 [m]) z temperaturą kontrolowaną w zakresie 15-30°C oraz względną wilgotnością w zakresie 20-90%. Światło o spektrum światła słonecznego może osiągać natężenie do 1500 W/m <sup>2</sup> przy natężeniu UV-B do 6 W/m <sup>2</sup> . Rozmiary komór umożliwiają fenotypowanie małych roślin, zbóż i sadzonek drzew.	Jörg-Peter Schnitzler Helmholtz University, Muenchen <a href="http://www.helmholtz-muenchen.de/en/eus/facilities/simulators/index.html">http://www.helmholtz-muenchen.de/en/eus/facilities/simulators/index.html</a> (Thiel et al., 1996)
<b>FRANCJA: 7 obiektów — FRANCE</b>			
HiTMe	Platforma do fenotypowania na poziomie komórkowym i tkankowym metabolomu (metabolizm węgla i azotu)	Platforma składa się z systemu zautomatyzowanego przygotowania próbek i wykonania analiz na mikropłytkach z detekcją UV, VIS, fluorescencji i luminescencji oraz LI-MS. Średnio użytkownik HiTMe prowadzi analizy przez 33 dni robocze rejestrując 13000 rekordów danych.	Yves Gibon, INRA, Bordeaux <a href="https://www6.bordeaux-aquitaine.inra.fr/bfp_eng/Research/Metabolism-Team">https://www6.bordeaux-aquitaine.inra.fr/bfp_eng/Research/Metabolism-Team</a> (Bénard and Gibon, 2016)
PhenoPlant	Platforma do oceny wpływu stresów biotycznych na rośliny oraz porównywania agresywności różnych szczepów patogenów na podstawie obrazowania	Platforma zainstalowana w szklarniach o stopniu bezpieczeństwa biologicznego 2 i 3 umożliwia pracę z organizmami kwarantannowymi i GM. Obrazowanie przy użyciu 3 skanerów fluorescencyjnych i 1 hiperspektralnego. Zbieranie obrazów nie jest jeszcze zautomatyzowane, natomiast przetwarzanie jest automatyczne i automatyczna ocena symptomów chorobowych jest możliwa. Możliwa ocena 200 roślin/dzień.	Tristan Boureau INRA, Beaucauze <a href="mailto:tristan.boureau@univ-angers.fr">tristan.boureau@univ-angers.fr</a> (Rousseau et al., 2013; Rousseau et al., 2015)
4PMI Plant Phenotyping Platform for Plant - Micro-organism Interactions	Badanie interakcji roślina-mikroorganizm	Cztery różne szklarnie z kontrolowanymi niezależnie warunkami: temperatury, światła, wilgotności oraz podlewania. Doniczki przesuwane do stanowisk ważenia i podlewania, bądź obrazowania pędów i korzeni. Pędy: zdjęcia z kamery górnej + bocznej/ przesuwanie kamery bocznej w czasie obrazowania. Dla korzeni: zdjęcia w specjalistycznych RhizoTubes. Urządzenia do obrazowania 4PMI pozwalają na fenotypowanie architektury korzeni, architektury strzelania w źdźbło, powierzchni liści, fotosyntezy, temperatury powierzchni liści w 1700 pędów roślin oraz 1200 korzeni w RhizoTubes w ciągu dnia.	Christophe Salon INRA, Dijon <a href="https://www6.dijon.inra.fr/umragroecologie">https://www6.dijon.inra.fr/umragroecologie</a> (Cointault et al., 2017)

1	2	3	4
Pheno3C	Platforma polowa, wyposażona w system precyzyjnego podlewania, do badań agronomicznych, wpływu stresów biotycznych, struktury/architektury roślin i łanu, zawartości białka i efektywności wykorzystania wody	Pheno3C jest wyposażony w 4 automatyczne wysięgniki z systemem do precyzyjnego podlewania, każdy pracuje na powierzchni 400 m <sup>2</sup> podzielonej na 96 poletek. Jest prowadzona rejestracja danych meteorologicznych w skali mikro, na polu. Pole jest wyposażone w tensjometry, do pomiaru zawartości wody w glebie. Planowana okresowa ocena fenotypowa jest wykonywana przy użyciu PHENOMOBILE, robota wyposażonego w kamerę RGB, multispektralną oraz LIDAR. Od roku 2018 zostaną zamontowane 2 systemy FACE do kontrolowanego dozowania CO <sub>2</sub> .	Boris Adam INRA, Clermont-Ferrand <a href="mailto:boris.adam@inra.fr">boris.adam@inra.fr</a>
PHENOARCH	Platforma do oceny wzrostu, biomasy, struktury/architektury roślin, efektywności wykorzystania światła i wody w warunkach kontrolowanych	Platforma jest przystosowana do badań 1680 (będzie rozszerzona do 2200) roślin w doświadczeniach szklarniowych nad wpływem suszy i scenariuszy klimatycznych na rozwój i plonowanie roślin. Wyposażona w automatyczne transportery i komory rejestracji obrazu wszelkimi dostępnymi sensorami oraz w precyzyjne sensory klimatyczne i algorytmy do modelowania rozkładu temperatury i wilgotności w szklarni. Dane są zbierane na serwerze i przetwarzane w sposób automatyczny lub pół-automatyczny. Przystosowane do pracy z GMO. W systemie tym, w ciągu ostatnich 4 lat, badano gatunki: kukurydza, pszenica, winorośl, bawełna. Materiał roślinny do dalszych badań jest mrożony na miejscu w zamrażarkach „deep freezer”	Claude Welcker INRA, Montpellier <a href="https://www6.montpellier.inra.fr/lepse">https://www6.montpellier.inra.fr/lepse</a> (Cabrera-Bosquet et al., 2016; Tardieu et al., 2018)
PHENODYN	Platforma do oceny wzrostu, biomasy, struktury/architektury roślin, efektywności wykorzystania światła i wody w warunkach kontrolowanych	Platforma wykonuje pomiary wzrostu elongacyjnego oraz transpiracji i ewapotranspiracji w tempie 3 min/roślinę dla 500 roślin w ramach eksperymentu. Prowadzona jest ocena zawartości wody w glebie. System opiera się na automatycznych transporterach i wagach. Przeznaczony do badań populacji MAGIC, linii introgressywnych, mutantów (w tym GM)	Boris Parent INRA, Montpellier <a href="https://www6.montpellier.inra.fr/lepse_eng/Presentation">https://www6.montpellier.inra.fr/lepse_eng/Presentation</a> (Caldeira et al., 2014; Coupel-Ledru et al., 2016; Parent and Tardieu, 2012; Turc et al., 2016)
PHENOPSIS	Platforma do oceny wpływu warunków środowiskowych (składniki pokarmowe, woda, temperatura, natężenie światła) na rośliny, w warunkach kontrolowanych. wchodzi w skład Montpellier Plant Phenotyping Platforms (M3P)	Platforma zainstalowana w 3 fitotronach, do badań na 500 obiektach, jednorazowo. Początkowo opracowana dla <i>Arabidopsis</i> , obecnie przystosowana do roślin o różnym pokroju, typu: rzepak, pomidor czy <i>Brachypodium</i> . Obrazowanie: RGB (z góry i z boków) oraz IR i fluorescencja. Umożliwia poszukiwanie QTL np. rozwoju liści w różnych reżimach wilgotności gleby oraz jednoczesnego wpływu różnych stresów na rośliny. Była wykorzystana do oceny fenotypów badanych później metodami metabolomicznymi, transkryptomocznymi, proteomicznymi. Sprzężona z bioinformatycznym przetwarzaniem danych.	Denis Vile INRA, Montpellier <a href="https://www6.montpellier.inra.fr/lepse_eng/Research-groups/SPIC/Scientists/Denis-Vile">https://www6.montpellier.inra.fr/lepse_eng/Research-groups/SPIC/Scientists/Denis-Vile</a> (Granier et al., 2006)

1	2	3	4
<b>WIELKA BRYTANIA: 7 obiektów — GREAT BRITAIN</b>			
Small Plant Platform	Platforma do badań małych roślin w warunkach kontrolowanych (odziaływania biotyczne z korzeniami, stężenie substancji pokarmowych, kompaktacja podłoża, zawartość wody, temperatura powietrza)	Platforma zlokalizowana w szklarni z kontrolą temperatury i światła, umożliwiającą jednoczesne badanie do 2000 małych roślin (siewki i trawy do 50 cm wysokości) wyposażona w transportery umożliwiające automatyczne podlewanie i obrazowanie w oparciu o system czujników wytworzonych przez PSI (Brno, Czechy) do rejestracji obrazów RGB i fluorescencji. Możliwość dodania innych czujników. Maksymalna częstota rejestracji obrazu, co 15 min.	John Doonan Aberystwyth University  <a href="mailto:phenomics-enquiries@aber.ac.uk">phenomics-enquiries@aber.ac.uk</a> (Camargo et al., 2014)
Large Plant Platform	Platforma do fenotypowania w warunkach kontrolowanych. Ocena: wzrostu, zawartości chlorofilu, fotosyntezy, temperatury rośliny/łanu, struktury/architektury rośliny, korzeni, właściwości nasion, efektywności wykorzystania wody	Platforma składa się z dwóch przedziałów w szklarni, każdy o kontrolowanych warunkach temperatury i światła, posiadających pasy transportowe z 440 uchwytami na 1-5 roślin o wysokości do 2 m, z możliwością analizy struktury korzeni do głębokości 50 cm. Czujniki do rejestracji obrazu 2 x dziennie, z góry i z boku, to: wysokorozdzielcze kamery NIR i RGB, skaner laserowy 3D do oceny architektury roślin. Pomiar fluorescencji chlorofilu może być wykonany ręcznie. Zużycie wody również jest rejestrowane w cyklu dobowym.	John Doonan, Aberystwyth University National Plant Phenomics Cent. <a href="mailto:phenomics-enquiries@aber.ac.uk">phenomics-enquiries@aber.ac.uk</a> (Fisher et al., 2016)
Nutrient Flow	Platforma do badań w warunkach kontrolowanych, tempa wzrostu, wykorzystania składników odżywczych, właściwości korzeni	Automatyczny system 8 niezależnych stanowisk o pojemności 300 l pożywkę po 24 kontenery na rośliny + 1 stanowisko kontrolne, do oceny poboru jonów (azotanowych, amonowych, fosforanowych, potasowych) w cyklach co 15 min (minimum), zlokalizowany w szklarniach o kontrolowanych warunkach temperatury i światła. Możliwość prowadzenia eksperymentu do 3 miesięcy. Rośliny monitorowane przez zdjęcia w RGB oraz w czasie zbioru — destrukcyjnie (np. oznaczanie zawartości popiołu).	John Doonan Aberystwyth University National Plant Phenomics Cent. <a href="mailto:phenomics-enquiries@aber.ac.uk">phenomics-enquiries@aber.ac.uk</a> (Rossato et al., 2002)
2D-RSAT	RootTrace- obrazowanie korzeni  RootNav- obrazowanie siewek większych roślin (np. rzepaku)	Komory wzrostu z kontrolowanymi warunkami, zautomatyzowany i pół-automatyczny system rejestracji obrazu, analiza obrazu i system wizualizacji architektury korzeni w oparciu o kolorowe zdjęcia. Obydwa systemy generują dane w formacie RSML (Root System Markup Language). 1. RootTrace- wysokoprzepustowy system obrazowania korzeni (do 400 szt./dośw.). Badania w funkcji czasu bądź w populacjach mapujących 2. RootNav - półautomatyczny system obrazowania siewek większych roślin (np. rzepaku) korzeni i pędów w dośw. do 2 tyg., siewki prowadzone w hydroponice, (do 600 szt./dośw.) Kwantyfikacja głównych cech architektonicznych w mapowaniu populacji, do wykrywania loci cech ilościowych.	Darren Wells, University of Nottingham <a href="https://www.nottingham.ac.uk/biosciences/people/darren.wells">https://www.nottingham.ac.uk/biosciences/people/darren.wells</a> (Lobet et al., 2015)
Nottingham HTP Ionomics	Fenotypowanie metabolomu i badania molekularne	Sprzężone spektrometry plazmowe i masowe (ICP-MS) z ablacją laserową do analizy pierwiastkowej próbek. Aparatura znajduje się w sterylnych pomieszczeniach. System obejmuje bioinformatyczne przetwarzanie danych i umożliwia pobieranie danych przez ionomicsHUB (iHUB), który funkcjonuje jak portal społecznościowy do badań jonowych.	Paulina Flis, University of Nottingham <a href="https://www.nottingham.ac.uk/biosciences/people/paulina.flis">https://www.nottingham.ac.uk/biosciences/people/paulina.flis</a> (Huang and Salt, 2016)

1	2	3	4
The Hounsfield Facility	Platforma do badań w warunkach kontrolowanych (składniki odżywcze, dostępność wody, temperatura, natężenie światła, sposób uprawy) struktury/architektury roślin i systemu korzeniowego.	Platforma w szklarni o kontrolowanych warunkach, składa się z systemu obrazowania promieniami rentgenowskimi umożliwiającymi obrazowanie 4D (przestrzenne w czasie) korzeni oraz gleby. Systemy obrazowania, wspomagane przez automatyczne transportery: 1. Phoenix Nanotom 180NF (rozdzielczość 1–20 mikronów, próbki o średnicy < 40 mm); 2. GE V TOMEX M 240kV (rozdzielczość 10–120 mikronów, próbki o średnicy 15-150 mm); 3. GE V TOMEX L (rozdzielczość możliwa do ustawienia od 150 mikronów w „mini focus 320kV X-ray tube”, dla próbek 20 x 100 [cm]).	Craig Sturrock University of Nottingham <a href="http://www.nottingham.ac.uk/microet">http://www.nottingham.ac.uk/microet</a>  (Mairhofer et al., 2012)
<b>BELGIA: 4 obiekty — BELGIUM</b>			
Aeroponics	Badania dynamiki wzrostu, struktury i architektury roślin, właściwości systemu korzeniowego.	Platforma doświadczeń w kontrolowanych warunkach aeroponicznych. Kontrola składu pożywek, temperatury i wilgotności, natężenia i widma światła. Dwie przestrzenie w aeroponie na 495 roślin każda z wymiennym co 2 h składem pożywki. Precyzyjny skaner 2D do obrazowania pędów i korzeni do 60 cm długości (ok. 2-3 tyg. wzrostu siewek). Kompletny zestaw zarejestrowanych współrzędnych położenia końców korzeni dla każdej rośliny jest numerycznie przetwarzany do rekonstrukcji trajektorii cząstkowych i oszacowania kierunku i dynamiki wzrostu korzeni.	Xavier Draye Universite Catholique de Louvain <a href="http://www.uclouvain.be/elia">http://www.uclouvain.be/elia</a>  (de Dorlodot et al., 2007; Meunier et al., 2017)
WIWAM <i>Arabidopsis</i>	Platforma do badań w warunkach kontrolowanych (składniki odżywcze, dostępność wody, temperatura, wilgotność powietrza, wpływ związków chemicznych). Możliwość badań metabolomu i transkryptomu	Platforma przystosowana do analizy do 396 małych roślin tworzących rozetę (np. <i>Arabidopsis</i> ), umieszczona w fitotronie wyposażonym w transportery i automatyczny system podlewania i obrazowania. Dane z obrazowania są gromadzone i przetwarzane przez lokalny serwer i dedykowane oprogramowanie (PIPPA). Opracowano również metody analiz destrukcyjnych: metabolomu i transkryptomu.	Stijn Dhondt Gent University <a href="http://www.psb.ugent.be">http://www.psb.ugent.be</a>  (Clauw et al., 2015; Skiryecz et al., 2011)
WIWAM Conveyor PHENOVISION	Platforma do badań w warunkach kontrolowanych (temperatura, wilgotność powietrza, natężenie światła) do badania parametrów wzrostu, fotosyntezy, struktury/architektury roślin, uwodnienia	Wysokoprzepustowa platforma do fenotypowania zbóż w warunkach szklarniowych, o pojemności do 392 roślin/doświadczenie wyposażona w automatyczny system transportu roślin, ważenia i nawadniania oraz obrazowania. Rośliny obracają się względem kamery RGB w celu uzyskania obrazu 3D. Inne detektory to: IR, hyperspektralny dla światła odbitego, w zakresie VNIR (400-1000 nm) oraz SWIR (1000-2500 nm). Dane z obrazowania są gromadzone i przetwarzane przez lokalny serwer i dedykowane oprogramowanie (PIPPA).	Nathalie Wuyts Gent University <a href="http://www.psb.ugent.be">http://www.psb.ugent.be</a>
WIWAM Maize	Platforma do badań w warunkach kontrolowanych (temperatura, wilgotność powietrza, natężenie światła) do badania parametrów wzrostu, struktury/architektury roślin.	Wysokoprzepustowa platforma do fenotypowania zbóż, głównie kukurydzy. (do 156 roślin/doświadczenie) w warunkach szklarniowych, wyposażona w automatyczny system transportu roślin, ważenia i nawadniania oraz obrazowania. Rośliny obracają się względem kamery RGB w celu uzyskania obrazu 3D. Dane z obrazowania są gromadzone i przetwarzane przez lokalny serwer i dedykowane oprogramowanie (PIPPA).	Hilde Nelissen Gent University <a href="http://www.psb.ugent.be">http://www.psb.ugent.be</a>



<b>FINLANDIA: 2 obiekty — FINLAND</b>			
1	2	3	4
NaPPI large plant unit	Platforma do fenotypowania roślin w warunkach kontrolowanych. Ocena wzrostu, fotosyntezy, struktury/architektury roślin	Platforma jest zainstalowana w szklarni z kontrolowanym klimatem. Może pomieścić do 270 roślin o wysokości do 120 cm, przesuwanymi na automatycznych transporterach, w jednym doświadczeniu. Sensory VIS i fluorescencji pozwalają na ciągły monitoring roślin. System automatycznego podlewania wyposażony w wagi umożliwia ocenę WUE.	Kristiina Himanen University of Helsinki <a href="https://www.helsinki.fi/en">https://www.helsinki.fi/en</a> (Pavicic et al., 2017)
NaPPI small plant unit	Platforma do badania wpływu czynników biotycznych oraz abiotycznych na małe rośliny z równoczesnym oznaczeniem składu metabolomu	Platforma umożliwia badania morfologiczne i fizjologiczne z równoczesnym oznaczaniem składu metabolomu dla 360-1080 małych roślin w jednym doświadczeniu. Czujniki: kamery CCD, czujniki IR, VIS, ImagingPam (fluorescencja). Automatyczne ważenie i podlewanie w celu określenia WUE. Dodatkowo FluorCam jest stosowana do badania odpowiedzi na stesy takie jak: susza, światło, niedobór składników pokarmowych, infekcje grzybowe, wpływ elicytorów, probiotyków, zranień. Czas trwania doświadczeń ± 2 tygodnie.	Kristiina Himanen University of Helsinki <a href="https://www.helsinki.fi/en">https://www.helsinki.fi/en</a> (Pavicic et al., 2017)
<b>DANIA: 1 obiekt — DANMARK</b>			
Gibon	Platforma do badania wzrostu i rozwoju roślin w kontrolowanych warunkach	Komory klimatyczne z 6 wariantami kontroli klimatu (temperatury, wilgotności, światła) wyposażone w stanowiska automatycznego ważenia i podlewania w celu oceny wykorzystania wody przez rośliny oraz 3D laser skaner do oceny architektury roślin. Zaplecze stanowi w pełni wyposażone laboratorium fizjologiczne.	Carl-Otto Ottosen Aarhus University, Copenhagen <a href="http://pure.au.dk/portal/en/persons/carlotto-ottosen(61b29de7-e282-491a-b3e0-a58ab530b807).html">http://pure.au.dk/portal/en/persons/carlotto-ottosen(61b29de7-e282-491a-b3e0-a58ab530b807).html</a> (Kjaer and Ottosen, 2015)
<b>HOLANDIA: 1 obiekt — NETHERLANDS</b>			
Phenovator	Platforma do oceny wpływu warunków środowiskowych na małe rośliny (do 6 cm) w warunkach kontrolowanych połączona z fenotypowaniem na poziomie komórkowym i tkankowym	Platforma zainstalowana w pokoju hodowlanym, który zapewnia maksymalną iradiację do 600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ oraz minimalną temperaturę +6°C. Wyposażona w automatyczne transportery z miejscami na palety z roślinami. Rośliny są uprawiane w hydroponice na wełnie mineralnej, co pozwala na ocenę odporności roślin na niedobory wody i składników mineralnych (ew. nadmiaru jonów metali ciężkich). Umożliwia badanie do 1400 małych roślin jednorazowo, w doświadczeniach trwających do 5 tygodni. Była wykorzystywana do badań <i>Arabidopsis</i> , siewek jęczmienia i pomidora. Rejestracja obrazu prowadzona jest przez system ruchomych kamer rejestrujących widmo odbite (reflectance) w zakresie 400-850 nm, jako RGB oraz IR dla zdjęć nocą. System umożliwia rejestrację fluorescencji chlorofilu, co można wykorzystać do oceny efektywności fotosytemu II. Można również oznaczać zawartość chlorofilu i antocyjanów. Zazwyczaj obrazowanie wszystkich roślin trwa ok. 1 h. Zarejestrowane obrazy są przetwarzane przez dedykowane oprogramowanie. Dane umożliwiają badanie rozwoju roślin w celach mapowania bądź badań fizjologicznych	Mark Aarts Wageningen University <a href="mailto:mark.aarts@wur.nl">mark.aarts@wur.nl</a> (Flood et al., 2016; van Rooijen et al., 2015)

<b>SŁOWACJA: 1 obiekt — SLOVAKIA</b>			
1	2	3	4
Slovak Plant Screen Phenotyping Unit (SPPU)	Platforma do badań w warunkach kontrolowanych (składniki odżywcze, dostępność wody, widmo i natężenie światła) fotosyntezy, metabolitów, efektywności pobierania składników mineralnych, zawartości chlorofilu, struktury/architektury roślin	Platforma umożliwia pomiary w pokoju hodowlanym wyposażonym w automatyczne transportery mogące transferować 6 tac o pojemności do 18 doniczek a' 3-5 kg każda, czyli w sumie 108 roślin do 120 cm wysokości w jednym doświadczeniu. Posiada stanowiska automatycznego podlewania i ważenia. W zaciemnionych kamerach wykonuje się rejestrację: fluorescencji chlorofilu, zdjęć w RGB i hyperspektrum światła odbitego. Umożliwia ocenę parametrów fotosyntezy, wydajności fotosyntezy, struktury/architektury roślin i dynamiki wzrostu.	Marian Brestic Slovak University of Agriculture Nitra <a href="mailto:marian.brestic@uniag.sk">marian.brestic@uniag.sk</a>
<b>WĘGRY: 1 obiekt — HUNGARY</b>			
HAS-RSDS (middle size plants)	Platforma do badania części naziemnej i korzeni w warunkach kontrolowanych.	Platforma składa się z 2 części: 1. RSDS – do badania korzeni roślin uprawianych w transparentnych cylindrach z osłonami (10 x 40 cm). Rejestracja obrazu RGB w 4 ujęciach z boku oraz z dołu; 2. SSDS – do badania części naziemnej roślin uprawianych w określonym reżimie wodnym i dostępności składników w pożywce. Rejestracja obrazu RGB oraz fluorescencji chlorofilu, parametrów wzrostu, temperatury powierzchni roślin, właściwości korzeni, efektywności wykorzystania wody.	Imre Vass Biological Research Centre, Szeged <a href="http://www.brc.hu/">http://www.brc.hu/</a> (Paul et al., 2016)
<b>WŁOCHY: 1 obiekt — ITALY</b>			
ALSIA/Agrobios Plant Scanalyzer (APS)	Fizjologiczne i genetyczne modelowanie roślin w celu identyfikacji i kwantyfikacji parametrów determinujących rozwój.	Platforma do modelowania wzrostu i rozwoju roślin w warunkach kontrolowanych w oparciu o Lemnatec 3D Scanalyzer do oceny 500 roślin/dośw. przesuwanych na transporterach do komór rejestracji obrazu oraz nawadniania z ważeniem. Wyposażona w czytnik kodów paskowych. Rejestracja trójwymiarowego obrazu przez 4 kamery w zakresie NIR, UV, RGB oraz specjalny NIR dla rejestracji obrazu korzeni. Sprzężono z oprogramowaniem do zbierania i opracowywania danych wraz zarządzaniem bazą danych. Mierzone parametry, m.in.: powierzchnia liścia, zawartość i fluorescencja chlorofilu, średnica źdźbła, wysokość i szerokość rośliny, zawartość antocyjanów, zmiany w czasie/przyrosty.	Francesco Cellini ALSIA (Agenzia Lucana di Sviluppo di Innovazione in Agricoltura), Metaponto di Bernalda, Matera, Basilicata <a href="https://www.researchgate.net/institution/ALSIA_Agenzia_Lucana_di_Sviluppo_e_di_Innovazione_in_Agricoltura">https://www.researchgate.net/institution/ALSIA_Agenzia_Lucana_di_Sviluppo_e_di_Innovazione_in_Agricoltura</a> (Petrozza et al., 2014)

Platformy te, ogólnie, umożliwiają badania wpływu składników odżywczych, dostępności wody, widma i natężenia światła, temperatury na procesy życiowe roślin: fotosyntezę, skład metabolitów, efektywność pobierania składników mineralnych, zawartość chlorofilu, efektywność wykorzystania wody, strukturę/architekturę roślin i finalnie plon. Kilka platform oferuje możliwość analizy wzrostu korzeni i badania wpływu mikroorganizmów w oparciu o obrazowania: zdjęcia rentgenowskie — platforma GrowscreenRhizo (Juelich) i The Hounsfield Facility (Uniwersytet w Nottingham), rezonans magnetyczny — PlantMRI (Juelich), mikroskopowe (SignalSCREEN w Helmholtz University w Monachium), laserowe (4PMI w INRA, Dijon), w świetle widzialnym (platformy Uniwersytetu w Aberystwyth i w Nottingham), RGB (HAS-RSDS, stacja badawcza w Szeged) oraz w NIR (near infrared) (ALSIA, Włochy). Do pracy z organizmami genetycznie modyfikowanymi przystosowane są: PhenoPlant (INRA, Beaucouze), PHENOARCH i PHENODYN (INRA, Montpellier). Platformy

badawcze: BreedFACE (Juelich, ze specjalizacją w badaniu wpływu stężenia CO<sub>2</sub>) oraz Pheno3C (INRA, Clermont-Ferrand) oferują możliwość prowadzenia badań w warunkach polowych. Mała liczba platform do badań polowych dostępnych w ramach EPPN 2020 nie wynika z faktu braku takich platform w Europie, jednakże jest faktem niezaprzeczalnym, iż prowadzenie obserwacji polowych stanowi większe wyzwanie metodyczne, gdyż zbierane dane powinny być analizowane równolegle z lokalnymi danymi meteorologicznymi i modelowane w systemach uczenia maszynowego (Araus i Cairns, 2014; Sadeghi-Tehran i in., 2017; Virlet i in., 2017). Również dynamika oceny polowej wymaga całego sezonu wegetacyjnego, w przeciwieństwie do analiz w warunkach kontrolowanych, które są prowadzone przez możliwie najkrótszy czas.

W czasie konferencji w Tartu głównymi wykładowcami byli przedstawiciele palcówek sieci EPPN 2020. Uczestnicy mogli się zapoznać z zakresem badań prowadzonych w poszczególnych ośrodkach. Onno Muller, lider platformy BreedFACE z Juelich prezentował wyniki badań polowych nad wpływem podwyższonego stężenia CO<sub>2</sub> na rośliny uprawne. Carl-Otto Ottosen, lider Dynapheno z Uniwersytetu w Kopenhadze prezentował wpływ kombinacji różnych stresów na szereg roślin uprawianych w kontrolowanych warunkach w szklarni a Thomas Roitsch, z tego samego uniwersytetu, wyniki badań łączących analizę wzrostu i fenotypowanie roślin w warunkach kontrolowanych z oznaczeniami aktywności enzymów metabolizmu cukrów w systemie przystosowanym do masowych oznaczeń. Platformę oceny metabolizmu cukrów prezentował też Yves Gibon, lider HiTMe (INRA, Bordeaux) a Jorg-Peter Schnitzler, lider platform ExpoSCREEN oraz SunSCREEN z Monachium, mówił o fenotypowaniu opartym o związki lotne wydzielane przez rośliny. Tom Pridmore dzielił się doświadczeniami z 10 lat badań systemu korzeniowego za pomocą promieni rentgena w ramach platform 2D-RSAT na Uniwersytecie w Nottingham, a Xavier Draye mówił o badaniach korzeni roślin hodowanych w aeroponice. Fenotypowanie z wykorzystaniem zarejestrowanego obrazu omówił Mark Zivcak ze Słowacji (platforma SPPU), Kristiine Himanen z Finlandii (platforma NAPPI) oraz John Doonana z Aberystwyth, który prezentował szeroki zestaw wykorzystywanych sensorów.

Jedną z sesji była poświęcona problemom przetwarzania danych, w której wiodący głos należał do Francois Tardieu z INRA w Montpellier, gdzie są zainstalowane platformy PHENO -ARCH, -DYN i -PSIS. Stijn Dhont prezentował oprogramowanie PIPPA, wytworzone i wykorzystywane na platformach WIWAM w Gent a Wiktor Jurkowski prezentował portal „Brassica Information Portal” jako środowisko integrujące dane fenotypowe i genotypowe rzepaku.

Wykładowcami w czasie sesji byli również gospodarze, pomimo iż Estonia nie należy jeszcze do sieci EPPN. Interesującą prezentację przedstawił Hannes Kollist, mówiąc, że badania wymiany gazowej roślin prowadzone w Estonii mają swój początek w badaniach kosmicznych Związku Radzieckiego. Byli obecni również przedstawiciele platformy HZAU (Wanneng Yang) z Chin, którzy przedstawili dane z fenotypowania polowego w interpretacji z wykorzystaniem uczenia maszynowego.

Fenotypowanie roślin jest rodzącą się nauką, która łączy genomikę z ekofizjologią roślin i agronomią. Fenotyp, który obserwujemy w polu, to efekt dynamicznych

oddziaływań pomiędzy genotypem a środowiskiem. Interakcje te determinują produktywność roślin, która jest wypadkową całkowitej ilości biomasy, plonu handlowego oraz efektywności wykorzystania zasobów naturalnych i dostarczanych przez zasilanie gleby, a także szeroko pojętego ekosystemu rolniczego. Informacje na temat konferencji przedstawiono z nadzieją, że dane szczegółowe pomogą w rozwinięciu analogicznych infrastruktur w Polsce.

## LITERATURA

- Araus J. L., Cairns J. E. 2014. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends Plant Sci.* 19: 52 — 61.
- Avramova V., Nagel K. A., Abdelgawad H., Bustos D., DuPlessis M., Fiorani F., Beemster G. T. S. 2016. Screening for drought tolerance of maize hybrids by multi-scale analysis of root and shoot traits at the seedling stage. *J. Exp. Bot.* 67: 2453 — 2466.
- Bénard C., Gibon Y. 2016. Measurement of enzyme activities and optimization of continuous and discontinuous assays, current protocols in plant biology. John Wiley & Sons, Inc.
- Cabrera-Bosquet L., Fournier C., Bricchet N., Welcker C., Suard B., Tardieu F. 2016. High-throughput estimation of incident light, light interception and radiation-use efficiency of thousands of plants in a phenotyping platform. *New Phytol.* 212: 269 — 281.
- Caldeira C. F., Jeanguenin L., Chaumont F., Tardieu F. 2014. Circadian rhythms of hydraulic conductance and growth are enhanced by drought and improve plant performance. *Nature Communications* 5: 5365.
- Camargo A., Papadopoulou D., Spyropoulou Z., Vlachonassios K., Doonan J.H., Gay, A.P. 2014. Objective definition of rosette shape variation using a combined computer vision and data mining approach. *PLoS ONE* 9 (5): e96889.
- Clauw P., Coppens F., De Beuf K., Dhondt S., Van Daele T., Maleux, K., Storme, V., Clement L., Gonzalez N., Inze D. 2015. Leaf responses to mild drought stress in natural variants of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology* 167: 800 — 816.
- Cohu C. M., Muller O., Stewart J. J., Demmig-Adams, B., Adams W. W. 2013. Association between minor loading vein architecture and light- and CO<sub>2</sub>-saturated rates of photosynthetic oxygen evolution among *Arabidopsis thaliana* ecotypes from different latitudes. *Frontiers in Plant Science* 4: 264.
- Cointault F., Han S., Rabatel G., Jay S., Rousseau D., Billiot B., Simon J.-C., Salon C. 2017. 3D Imaging Systems for Agricultural Applications: Characterization of Crop and Root Phenotyping, in: Sergiyenko, O., Rodriguez-Quinonez, J.C. (Eds.), *Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision*. IGI Global, Hershey, PA, USA: 236 — 272.
- CoupeL-Ledru A., Lebon E., Christophe A., Gallo A., Gago P., Pantin F., Doligez A., Simonneau T. 2016. Reduced nighttime transpiration is a relevant breeding target for high water-use efficiency in grapevine. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113: 8963 — 8968.
- de Dorlodot S., Forster B., Pagès L., Price A., Tuberosa R., Draye X. 2007. Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends in Plant Science* 12: 474 — 481.
- Dusschoten van D., Metzner R., Kochs J., Postma J., Pflugfelder D., Buhler J., Schurr U., Jahnke S. 2016. Quantitative 3D analysis of plant roots growing in soil using magnetic resonance imaging. *Plant Physiol.* 170: 1176 — 1188., DOI 1110.1104/ 1115.01388. Epub 02016 Jan 01384.
- Fisher L. H. C., Han J., Corke F. M. K., Akinyemi A., Didion T., Nielsen K. K., Doonan J. H., Mur L. A. J., Bosch M. 2016. Linking dynamic phenotyping with metabolite analysis to study natural variation in drought responses of *Brachypodium distachyon*. *Frontiers in Plant Science* 7: 1751.
- Flood P. J., Kruijer W., Schnabel S. K., van der Schoor R., Jalink H., Snel J. F., Harbinson J., Aarts M. G. 2016. Phenomics for photosynthesis, growth and reflectance in *Arabidopsis thaliana* reveals circadian and long-term fluctuations in heritability. *Plant Methods* 12: 16 — 113.
- Gioia T., Nagel K. A., Beleggia R., Fragasso M., Ficco D. B. M., Pieruschka R., De Vita P., Fiorani F., Papa R. 2015. Impact of domestication on the phenotypic architecture of durum wheat under contrasting nitrogen fertilization. *Journal of Experimental Botany* 66: 5519 — 5530.

- Granier C., Aguirrezabal L., Chenu K., Cookson S. J., Dauzat, M., Hamard P., Thioux J. J., Rolland G., Bouchier-Combaud S., Lebaudy A., Muller B., Simonneau T., Tardieu F. 2006. Phenopsis, an automated platform for reproducible phenotyping of plant responses to soil water deficit in *Arabidopsis thaliana* permitted the identification of an accession with low sensitivity to soil water deficit. *New Phytol* 169: 623 — 635.
- Huang X. Y., Salt D. E. 2016. Plant Ionomics: from elemental profiling to environmental adaptation. *Mol Plant* 9: 787 — 797.
- Junker A., Muraya M. M., Weigelt-Fischer K., Arana-Ceballos F., Klukas C., Melchinger A. E., Meyer R. C., Riewe D., Altmann T. 2015. Optimizing experimental procedures for quantitative evaluation of crop plant performance in high throughput phenotyping systems. *Frontiers in Plant Science* 5.
- Kjaer K., Ottosen C.-O. 2015. 3D Laser triangulation for plant phenotyping in challenging environments. *Sensors* 15: 13533.
- Lobet G., Pound M. P., Diener J., Pradal C., Draye X., Godin C., Javaux M., Leitner D., Meunier F., Nacry P., Pridmore T. P., Schnepf A. 2015. Root system markup language: toward a unified root architecture description language. *Plant Physiology* 167: 617 — 627.
- Luedemann, G., Matyssek, R., Winkler, J.B., Grams, T.E.E., 2009. Contrasting ozone × pathogen interaction as mediated through competition between juvenile European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*). *Plant and Soil* 323: 47 — 60.
- Mairhofer S., Zappala S., Tracy S. R., Sturrock C., Bennett M., Mooney S. J., Pridmore T. 2012. RooTrak: automated recovery of three-dimensional plant root architecture in soil from x-ray microcomputed tomography images using visual tracking. *Plant Physiology* 158: 561 — 569.
- Meunier, F., Couvreur, V., Draye, X., Vanderborght, J., Javaux, M. 2017. Towards quantitative root hydraulic phenotyping: novel mathematical functions to calculate plant-scale hydraulic parameters from root system functional and structural traits. *J. Math. Biol.* 2: 017 — 1111.
- Neumann K., Klukas C., Friedel S., Rischbeck P., Chen D., Entzian A., Stein N., Graner A., Kilian B. 2015. Dissecting spatiotemporal biomass accumulation in barley under different water regimes using high-throughput image analysis. *Plant, Cell & Environment* 38: 1980 — 1996.
- Parent B., Tardieu F. 2012. Temperature responses of developmental processes have not been affected by breeding in different ecological areas for 17 crop species. *New Phytol.* 194: 760 — 774.
- Paul K., Pauk J., Deak Z., Sass L., Vass I. 2016. Contrasting response of biomass and grain yield to severe drought in Cappelle Desprez and plainsman V wheat cultivars. *Peerj* 18.
- Pavicic M., Mouhu K., Wang F., Bilicka M., Chovanček E., Himanen K. 2017. Genomic and phenomic screens for flower related ring type ubiquitin e3 ligases in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science* 8.
- Petrozza A., Santaniello A., Summerer S., Di Tommaso G., Di Tommaso D., Paparelli E., Piaggese A., Perata P., Cellini F. 2014. Physiological responses to Megafol® treatments in tomato plants under drought stress: A phenomic and molecular approach. *Scientia Horticulturae* 174: 185 — 192.
- Riewe D., Wiebach J., Altmann T. 2017. Structure annotation and quantification of wheat seed oxidized lipids by high-resolution LC-MS/MS. *Plant Physiol* 175: 600 — 618.
- Rooijen van R., Aarts M. G., Harbinson J. 2015. Natural genetic variation for acclimation of photosynthetic light use efficiency to growth irradiance in *Arabidopsis*. *Plant Physiol* 167: 1412 — 1429.
- Rossato L., MacDuff J. H., Laine P., Le Deunff E., Ourry A. 2002. Nitrogen storage and remobilization in *Brassica napus* L. during the growth cycle: effects of methyl jasmonate on nitrate uptake, senescence, growth, and VSP accumulation. *Journal of Experimental Botany* 53: 1131 — 1141.
- Rousseau C., Belin E., Bove E., Rousseau D., Fabre F., Berruyer R., Guillaumès J., Manceau C., Jacques M.-A., Boureau T. 2013. High throughput quantitative phenotyping of plant resistance using chlorophyll fluorescence image analysis. *Plant Methods* 9: 17 — 17.
- Rousseau C., Hunault G., Gaillard S., Bourbeillon J., Montiel G., Simier P., Campion C., Jacques M.-A., Belin E., Boureau T. 2015. Phenoplant: a web resource for the exploration of large chlorophyll fluorescence image datasets. *Plant Methods* 11: 24.
- Rybka K. 2009. TILLING i FOX-hunting: nowe metody analizy funkcjonalnej genów *Postępy Biologii Komórki* 36: 539 — 554, DOI: 110.2478/v10052-10011-10001-10056.

- Rybka K., Nita Z. 2014. Nowoczesne fenotypy zbóż do uprawy na obszarach zagrożonych suszą. Biul. IHAR 273: 55 — 72.
- Sadeghi-Tehran P., Sabermanesh K., Virlet N., Hawkesford M. J. 2017. Automated method to determine two critical growth stages of wheat: heading and flowering. *Frontiers in Plant Science* 8.
- Skiryecz A., Vandenbroucke K., Clauw P., Maleux K., De Meyer B., Dhondt S., Pucci A., Gonzalez N., Hoerberichts F., Tognetti V. B., Galbiati M., Tonelli C., Van Breusegem F., Vuylsteke M., Inze D. 2011. Survival and growth of *Arabidopsis* plants given limited water are not equal. *Nature Biotechnology* 29: 212 — 214.
- Tardieu F., Cabrera-Bosquet L., Pridmore T., Bennett M. 2018. Plant phenomics, from sensors to knowledge. *Current Biology* 27: R770 — R783.
- Thiel S., Döhring T., Köfferlein M., Kosak A., Martin P., Seidlitz H. K. 1996. A phytotron for plant stress research: How far can artificial lighting compare to natural sunlight? *Journal of Plant Physiology* 148: 456 — 463.
- Turc O., Bouteillé M., Fuad-Hassan A., Welcker C., Tardieu F. 2016. The growth of vegetative and reproductive structures (leaves and silks) respond similarly to hydraulic cues in maize. *New Phytologist* 212: 377 — 388.
- Virlet N., Sabermanesh K., Sadeghi-Tehran P., Hawkesford M. J. 2017. Field Scanalyzer: An automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring. *Functional Plant Biology* 44: 143 — 153.