

CERTIFIKOVANÁ METODIKA PRO PRAXI

Senzorové měření porostů zemědělských plodin pro variabilní aplikaci hnojiv a pesticidů

Lukas V. - Neudert L.

Mendelova
univerzita
v Brně



AGRIO

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

**Senzorové měření porostů zemědělských
plodin pro variabilní aplikaci hnojiv a
pesticidů**

CERTIFIKOVANÁ METODIKA PRO PRAXI

VOJTĚCH LUKAS, LUBOMÍR NEUDERT

2016

Senzorové měření porostů zemědělských plodin pro variabilní aplikaci hnojiv a pesticidů

Metodika se zaměřuje na technologie a metody hodnocení stavu porostů polních plodin pomocí senzorových měření a jejich uplatnění při lokálně cílené aplikaci hnojiv a přípravků na ochranu rostlin. Popisuje základní principy diagnostiky výživného stavu porostů pozemním a dálkovým spektrálním měření, vč. přehledu technologií dostupných pro zemědělskou praxi. Cílem je seznámit uživatele s nejmodernějšími postupy pro zefektivnění využívání agrochemických látek při pěstování plodin.

Crop sensing for variable rate application of fertilizers and pesticides

This methodology is focused on technologies and methods for assessing of crop stands by using sensor measurement, and its implementation for variable rate application of fertilizers and pesticides. It describes main principles of plant nutrient diagnosis by proximal and remote sensing, including an overview of available technologies for farmers. The aim is to introduce users with the most advanced approaches for an effective usage of agrochemical inputs in crop management..

Metodika byla vytvořena za podpory:

- Technologické agentury ČR č. TA04021389 „Vývoj systému pro variabilní dávkování pesticidů a hnojiv na základě senzorového monitoringu porostních podmínek“
- Ministerstva zemědělství ČR NAZV č. QJ1610289 „Optimalizace využití produkčního potenciálu půdy lokálně cílenou agrotechnikou“

Autorský kolektiv:

Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně

Ing. Lubomír Neudert, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně

Oponenti:

Ing. Jan Hrubý, CSc. - Výzkumný ústav pícninářský, spol. s r. o.

Ing. Josef Svoboda, Ph.D. - Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský

Metodiku schválil Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský pod č. j. 136256/2016

Ministerstvo zemědělství doporučuje tuto metodiku pro využití v praxi.

© Mendelova univerzita v Brně, 2016

ISBN 978-80-7509-460-5

OBSAH

I. Cíl metodiky.....	4
II. Vlastní metodika.....	5
1. Úvod	5
2. Bezkontaktní metody diagnostiky stavu porostů v precizním zemědělství	5
2.1. Online systémy.....	8
2.2. Využití dálkového průzkumu pro hodnocení stavu porostů.....	20
3. Stanovení plánovaného výnosu a normativní dávky	26
4. Využití sensorového měření při variabilní aplikaci hnojiv a přípravků na ochranu rostlin ..	29
4.1. Variabilní aplikace hnojiv	29
4.2. Variabilní aplikace přípravků na ochranu rostlin – fungicidy, herbicidy a regulátory růstu.....	36
III. Srovnání novosti postupů.....	40
IV. Popis uplatnění certifikované metodiky	41
V. Ekonomické aspekty.....	42
VI. Poděkování	47
VII. Seznam použité literatury	48
VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice	50

I. CÍL METODIKY

Cílem metodiky je informovat odbornou veřejnost a zemědělskou praxi o možnostech praktického využívání různých postupů stanovení diferencovaných dávek dusíkatého hnojení a použití pesticidů, jako podkladu pro uplatnění principů lokálně cíleného obhospodařování, tzv. precizního zemědělství. Precizní zemědělství představuje individuální péči o jednotlivé části pozemků na základě přesných znalostí heterogenity půdních vlastností a stavu porostů. V metodice jsou popsány postupy použití systémů, které jsou vybaveny senzory pro diagnostiku stavu porostu na základě jeho spektrálních vlastností (odrazivost ve viditelném a blízké-infračerveném spektru). Spektrální vlastnosti reflektují stav porostu, jak z hlediska strukturních parametrů (pokryvnost, hustota, LAI), tak s vazbou na výživný stav rostlin (obsah chlorofylu). Řídící jednotka vyhodnocuje naměřené údaje a průběžně stanovuje intenzitu hnojení, resp. dávku zvoleného hnojiva nebo pesticidu, jedná se o tzv. online systémy. Základní hypotéza vychází z předpokladu, že diagnostika výživného stavu na základě aktuálního spektrálního měření umožňuje pružněji reagovat na potřebu výživy u rostlin a postihnout prostorové rozdíly v rámci jednotlivých pozemků. Online měření lze doplnit o mapový podklad (tzv. map-overlay), který koriguje intenzitu zásahu podle výnosového potenciálu daného místa. Tzn. potřeba použití intenzity zásahu je korigována dle očekávaného výnosu na dané části pozemku (analyzováno na základě historických dat). Kombinace online měření a korekce na potenciální výnos vede k efektivnějšímu využití vstupů – vyšší intenzita u slabších porostů je provedena pouze za předpokladu očekávaného nadprůměrného výnosu na daném místě. Princip diferencovaných agrotechnických zásahů umožní optimalizovat a zefektivnit spotřebu materiálových vstupů do pěstebních technologií, a tím snížit negativní dopady na životní prostředí, což povede ke zvýšení trvalé udržitelnosti pěstebních systémů polních plodin a zvýšení kvality produkce. Metodika popisuje postupy získávání informací o stavu porostů v podobě diagnostických metod a způsob následné optimalizace dávek vstupů. Kromě informací z odborné literatury zahrnuje předkládaná metodika výsledky a doporučení na základě poznatků získaných v letech 2014-2016.

II. VLASTNÍ METODIKA

1. Úvod

Precizní zemědělství (*precision agriculture*, nebo také *site specific crop management*) je mezinárodně ujednocený název pro směry hospodaření na půdě využívající nové technologie, které začaly být rozvíjeny koncem osmdesátých a začátkem devadesátých let dvacátého století. Hlavním cílem je přizpůsobení pěstebních operací aktuálním (lokálním) podmínkám stanoviště, přičemž zásadou je provádět pěstební zásahy na **správném místě**, se **správnou intenzitou** a ve **správný čas**. Přestože je precizní zemědělství postaveno na využívání nejmodernějších technologií, základní principy ve výživě rostlin zde zůstávají stále platné. Vychází se z bilančního přístupu, tzn. že živiny odebrané pěstovanými plodinami, resp. následně odvezené z pozemku ve formě sklizených produktů, je třeba do půdy navrátit ve formě hnojiv (statkových nebo minerálních). Metody precizního zemědělství však díky pokroku v oblasti lokalizační a aplikační techniky nepřistupují k porostům na pozemcích jako k uniformnímu celku, ale umožňují postihnout jeho heterogenitu. Na základě mapování variability půdy a porostů je možné rozdělit pozemek do tzv. management zón a pomocí techniky pro variabilní aplikaci provádět lokálně cílenou aplikaci hnojiv. Cílem je **efektivní využití hnojiv** s ohledem na výnosový potenciál daného místa na pozemku, **optimalizace kvality produkce a snížení kontaminace životního prostředí** agrochemickými látkami.

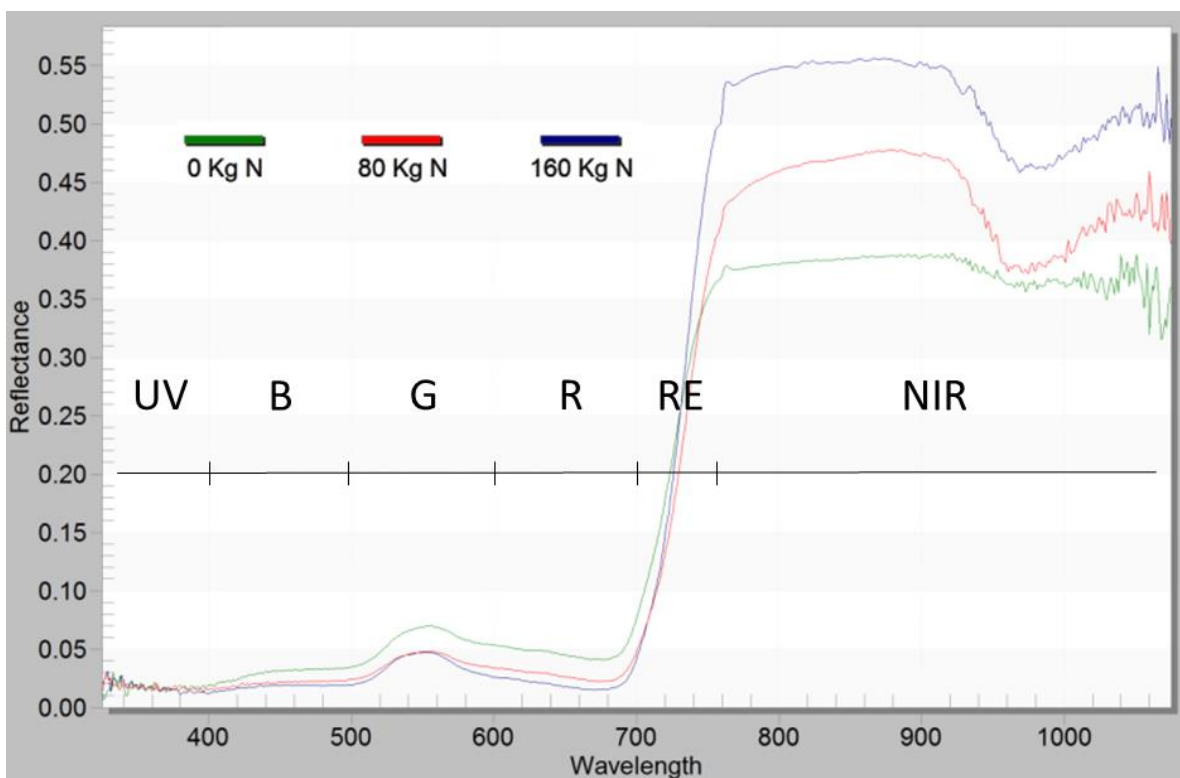
2. Bezkontaktní metody diagnostiky stavu porostů v precizním zemědělství

Současná diagnostika stavu porostů zemědělských plodin využívá moderních metod pracujících na principu měření spektrální odrazivosti. Rostliny vykazují specifickou odrazivost v jednotlivých pásmech elektromagnetického záření. Modrá a červená část záření jsou v převážné většině spotřebovávány při procesu fotosyntézy, část zeleného spektra je odrážena (proto se nám rostliny jeví jako zelené). V blízké infračerveném spektru (NIR) je většina záření odrážena. NIR je pro lidské oko neviditelné, pro jeho záznam je nutné speciální detekční zařízení. Zjednodušeně lze říci, že odrazivost ve viditelném záření podává informaci o stavu fotosyntetického aparátu, zatímco v NIR o množství biomasy. Takto je popsána zdravá vegetace, rostliny trpící stresem (nebo stárnoucí) vykazují změny odrazivosti – přibývá odrazivost v červeném spektru (žloutnoucí listy) a naopak se snižuje odrazivost v NIR. Spektrální měření dokáže poměrně spolehlivě detekovat porostní rozdíly (nedostatečná výživa, vodní stres, napadení rostlin), obvykle ale není schopno určit přesnou příčinu identifikovaného stresu.

Zjednodušeně lze říci, že aplikace dusíku působí na odrazivost porostu dvojnásobným způsobem: jednak zvyšuje obsah chlorofylu v listech a také má vliv na růst rostlin (množství biomasy). Pro úspěšné využití optických metod při řízení výživy N je důležité zachytit oba tyto parametry, např. pomocí tzv. vegetačních indexů, které jsou výsledkem jednoduchých

aritmetických operací s odrazivostí ve dvou a více částech elektromagnetického spektra. Cílem je zvýraznit vegetační složku v obraze na základě znalosti spektrálního chování. Nejčastěji využívají rozdílu odrazivosti v červeném a NIR záření, což umožňuje detekovat fyziologické stresy rostlin a kvantifikovat vybrané parametry porostu.

Odborná literatura uvádí řadu vegetačních indexů, které lze využít pro diagnostiku stanovení výživného stavu rostlin a stresových projevů (Fu et al., 2014; Li et al., 2014). Nejčastěji využívaným vegetačním indexem je Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), který je vypočten z odrazivosti z červené a blíže infračervené části elektromagnetického záření (Rouse et al., 1974) podle rovnice $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$. Pokročilejší systémy detekují záření v úzké red edge oblasti (viz Obr. 1), jako je např. vegetační index Red Edge Inflection Point (REIP) nebo NRERI (Klem, 2014). Red edge indexy jsou více citlivé na změny v obsahu chlorofylu v rostlinách a netrpí jako NDVI sníženou citlivostí při vyšším množství biomasy, tzv. saturačním efektem NDVI.



Obr. 1 Rozdíl odrazivosti porostu pšenice ozimé v BBCH 39 při různé úrovni výživy N (Edrees et al., 2013). Vodorovná osa vyjadřuje oblasti elektromagnetického záření dle vlnové délky (UV – ultrafialové, B – modré, G – zelené, R – červené, RE – red edge, NIR – blíže infračervené)

Dle způsobu vyhodnocení údajů zachycujících stav porostu a provádění aplikace hnojiva lze metody bezkontaktní diagnostiky porostů dělit na online a offline.

Online systémy, také nazývané *on-the-go*, představují postup, kdy měření spektrálních (či jiných) parametrů části porostu, zpracování dat, jejich interpretace a vlastní aplikace jsou prováděny v rámci jedné pracovní operace při přejezdu pozemku. Zdrojem informací jsou aktuální data ze senzorů. Typickým příkladem je zařízení Yara N-Sensor®, které je upevněno

na kabině traktoru nesoucí rozmetadlo hnojiv. Zařízení zjišťuje stav porostu dle jeho spektrální odrazivosti, řídicí počítač vyhodnocuje data a stanovuje dávku hnojiva, které je následně aplikováno. Zjištění stavu porostu na určitém místě a reakce na něj jsou prováděny kontinuálně v jednom okamžiku.

V případě **offline systémů** nejsou jednotlivé procesy prováděny v rámci jedné operace, jsou časově odděleny. Tyto systémy jsou založeny na celoplošném mapování porostů v rámci jednotlivých pozemků. Příkladem může být využití leteckého snímkování pro variabilní aplikaci hnojiv. Na snímcích je přeletem letounu zachycena prostorová variabilita porostu. Tato data jsou po přistání na počítači zpracována a vyhodnocena. Dávka živin je pak v podobě aplikačních map nahrána do palubního počítače traktoru s rozmetadlem, které aplikuje hnojiva. Časové prodlevy mezi jednotlivými operacemi je možné zkrátit automatizací sběru a zpracování dat a moderními technologiemi jejich přenosu.



Obr. 2 Jednotlivé kroky u online systému aplikace postřikovačem a rozmetadlem. Instalace senzorů na ramena postřikovače vede ve většině případů k mírnému zpoždění reakce aplikace postřikové látky na naměřené hodnoty (upravil Neudert)

Oba tyto přístupy mají své výhody i nevýhody. Výhodou online systému je okamžitá odezva na právě měřený porost a provádění zásahů přímo pěstiteli vlastním přístrojem bez nutnosti využívat specializovaných služeb. Nevýhodou je potřeba pořízení několika těchto sensorových zařízení při současné aplikaci více aplikátorů. Zcela opačně to platí v případě offline systémů, kde nevýhodou je časový odstup mezi měřením a aplikací a vliv povětrnostních podmínek (zejména výskyt oblačnosti v případě dálkového průzkumu). Naopak výhodou spočívá ve vyhotovení aplikační mapy pro celý pozemek (či více pozemků) v jeden okamžik, což následně umožňuje nasazení více aplikátorů. Z důvodu vysoké technické, ekonomické a odborné náročnosti mapování jsou offline systémy v současnosti převážně záležitostí firem nabízející služby v precizním zemědělství.

Některé z v současnosti nabízených sensorových systémů nabízí možnost **kombinace online sensorového měření a podkladové mapy potenciálního výnosu**, stanovené off-line metodami; tzv. **online + map overlay** mód aplikace. Principem je přizpůsobení doporučené dávky sensorového systému dle očekávaného výnosu v dané části pozemku a podpořit tak porost s předpokladem dosažení vyššího. Naopak na místech s očekávaným nižším výnosem je dávka snižována. Tímto lze řešit obvyklou tendenci sensorových systémů zvyšovat dávku hnojení u horších porostů. K tomuto zvýšení dávky ale dojde pouze, pokud stanovištní podmínky dávají předpoklad dosažení vyššího výnosu.

Platí, že sensorová měření (online či offline) zahrnují kompletní stav porostu a fotosyntetickou aktivitu rostlin a jsou citlivá na projevy stresu rostlin. Nedokáží ale jednoznačně identifikovat příčinu stresového stavu. Nízké hodnoty vegetačních indexů mohou představovat jak deficienci dusíku v rostlinách, tak stres suchem či poškození rostlin chorobami.

2.1. Online systémy

Yara N-Sensor®

Yara N-Sensor byl vyvinut pro účely precizního zemědělství norskou firmou Hydro Agri v roce 2000, v současnosti je nabízen firmou Yara. Jedná se o sadu multispektrálních detektorů instalovaných na kabinu mechanizace (traktor, samojízdný postřikovač, ...) měřící odrazivost (reflektanci) porostu ve viditelném spektru (400-700 nm), kdy je nejlépe identifikovatelný obsah chlorofylu, a jednak v blízkém infračerveném spektru (700-1000 nm) pro zjištění množství nadzemní biomasy. Vývoji tohoto přístroje předcházela celá řada ověřování a zjišťování nových poznatků v této oblasti. N-sensor od svého počátku až do dnešní doby prodělal výrazné změny ve své konstrukci a posléze i v principu měření. Takzvanou první generací N-Sensoru byla soustava čtyř pasivních sensorů, které pracují stejně jako při satelitním nebo leteckém snímání, kdy při měření je zachycen odraz světla od porostu plodiny. Z toho vyplývá, že práce tohoto senzoru je významně závislá na denním světle s postavením slunce.

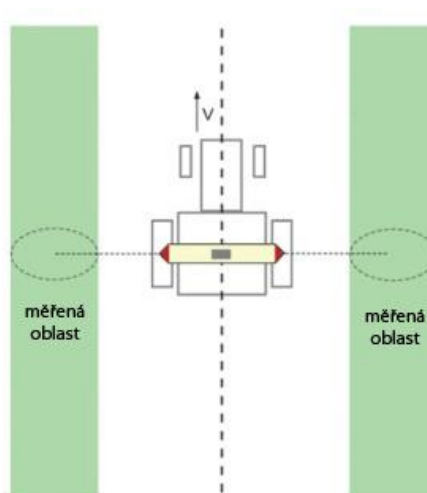
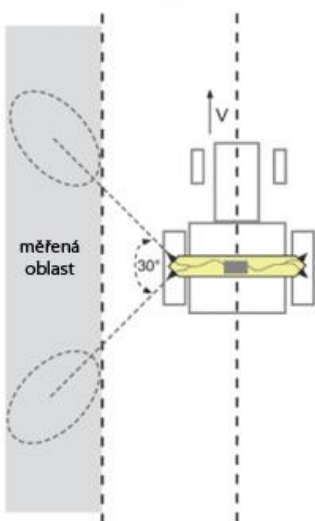


Obr. 3 Detailní pohled na čidla N-Sensoru (vlevo) a N-Sensoru ALS (vpravo)

YARA N-Sensor®



YARA N-Sensor® ALS



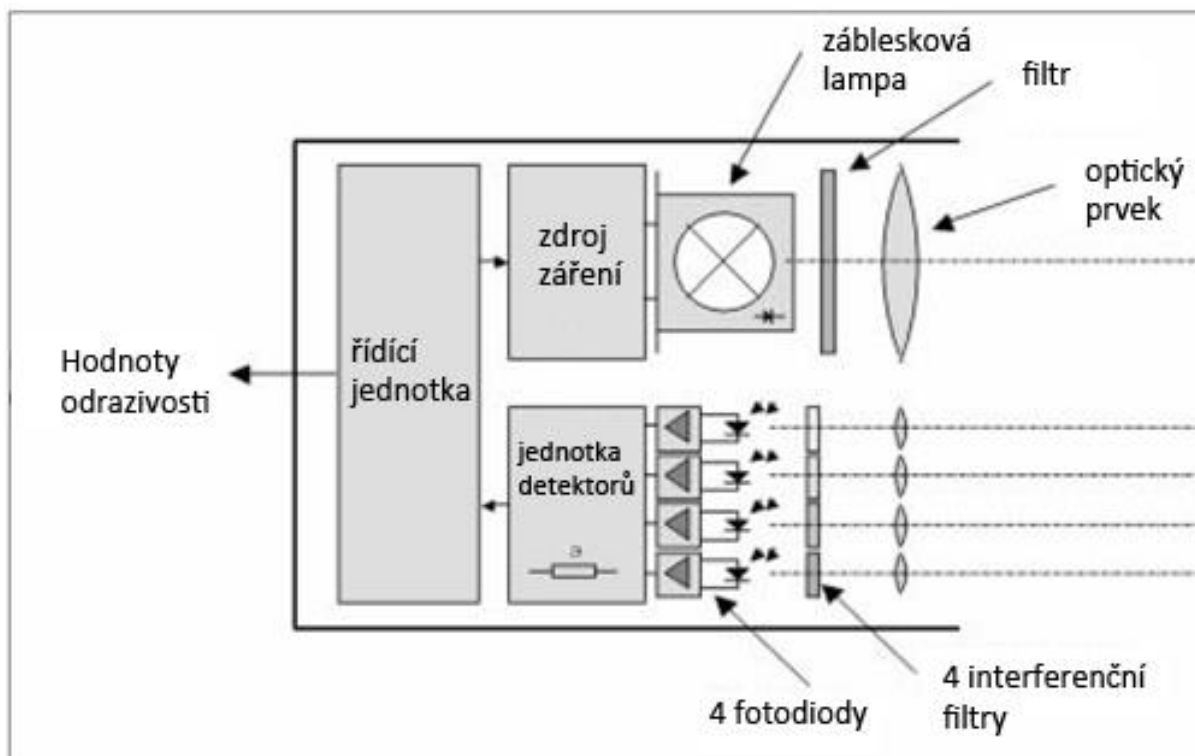
Zdroj světla:	pasivní (denní světlo)	aktivní (xenonové lampy)
Použitelnost v průběhu dne:	8 – 11 hodin	24 hodin
Měřená plocha senzorem:	cca 70 m ²	cca 35 m ²
Měřená plocha při jízdě:	cca 33 % plochy při záběru 24 m	cca 33 % plochy při záběru 24 m

Obr. 4 Porovnání obou generací přístroje Yara N-Sensor® (www.agricon.de)

Kalibrace se provádí chlorofylmetrem Yara N-Tester na malé referenční části pozemku, kde se zjistí aktuální výživný stav rostlin. Na vybrané ploše pozemku provede pracovník kalibrační měření N-Sensorem pojezdem v porostu, přičemž doba kalibrace a plocha je zadána v palubním terminálu. Následně se v rámci kalibrační plochy provede měření N-Testerem. Získaná hodnota se tabulkově přepočítá na množství hnojiva v závislosti na odrůdě a vývojové fázi a zadá se do terminálu N-Sensoru. Tím je kalibrace dokončena. Kalibrační proces je třeba provést na každém novém pozemku; pokud se na jednom pozemku aplikuje déle než 2 hodiny, je vhodné kalibraci zopakovat (poznatek z praxe MJM Litovel, a. s.). Na základě snímaných a vyhodnocených údajů je aplikována optimální dávka dusíku na příslušnou část porostu (pozemku). Podmínkou pro použití Yara N-Sensoru je zapojený porost, což u obilnin znamená použití až pro první produkční přihnojení. Přístroj je využitelný pro přihnojování dusíkatými hnojivy u obilnin, kukuřice, brambor a ozimé řepky. Taktéž jej lze využít pro variabilní aplikaci růstových regulátorů či desikaci.

Pro správnou funkci Yara N-Sensoru je důležité jeho umístění na nosiči (traktor, samochodný stroj). Před instalací systému je nutné provést výpočet, kterým se zjistí, zda plocha porostu snímaná Yara N-Sensorem leží uvnitř pracovního záběru aplikačního stroje (rozmetadla, postřikovače), a v případě použití Yara N-Sensoru s postřikovačem, zda nezasahují ramena postřikovače do snímaného prostoru zařízení. Nesprávným umístěním zařízení vzniká nebezpečí ovlivnění naměřených hodnot.

Druhou generaci známé technologie N-Sensor s vlastním zdrojem světla představuje N-Sensor[®]ALS (Active Light Source = aktivní zdroj světla). Tato inovativní, patentovaná technologie umožňuje variabilní dávkování dusíku podle zbarvení porostu za pojezdu aplikátoru, a to bez ohledu na intenzitu slunečního světla, tzn. 24 hodin denně díky aktivnímu zdroji světla v podobě xenonových lamp. Díky své unikátní technologii může N-Sensor ALS provádět aktivní měření na poměrně velkou vzdálenost a skenuje podstatnou část porostu v pracovním záběru rozmetadla nebo postřikovače oproti generaci první. Část světla odrážená od porostu je analyzována detektorem používajícím čtyři spektrální kanály, které jsou nejvhodnější pro odvození informace o stavu výživy dusíkem a hustotě biomasy.



Obr. 5 Schéma senzorové jednotky Yara N-sensor ALS s aktivním zdrojem záření (Reusch, 2006)

Německá společnost Agricon GmbH nabízí nadstavbu N-senzoru „Precision Farming Box“, která umožňuje senzoru pracovat ve třech režimech – offline aplikace dle podkladové mapy, online aplikace a kombinace obou (map-overlay). Zároveň přidává další funkce pro aplikaci regulátorů růstu, fungicidů, desikantů nebo komunikaci přes rozhraní ISOBUS.

Fritzmeier Isaria / Claas Cropsensor



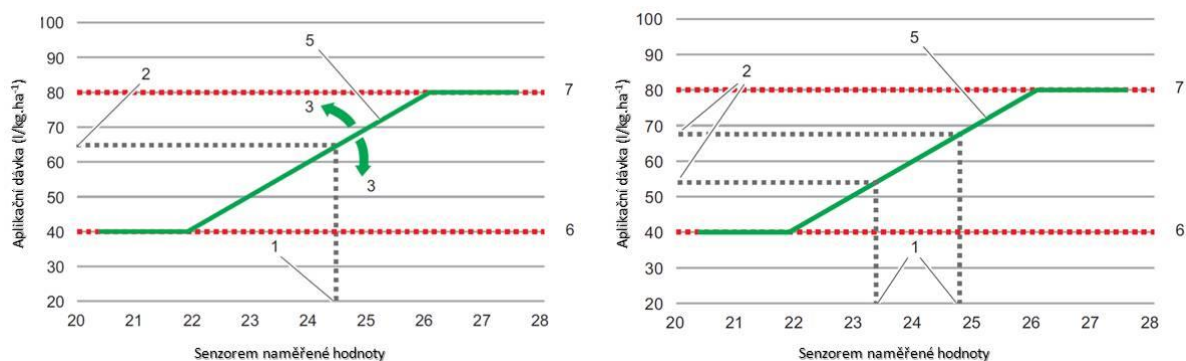
Obr. 6 Souprava s online systémem Fritzmeier Isaria při společném testování MENDELU a AGROTEC, a.s. na pozemku zemědělského podniku SALIX MORAVA, a.s.

V roce 2009 byl představen přístroj **Fritzmeier Isaria**[®] pro sensorové mapování výživného stavu porostů. Výživný stav je detekován na základě spektrometrického měření odrazivosti porostů pšenice, ječmene a řepky ve čtyřech vlnových délkách s využitím aktivního zdroje záření v podobě LED diod. Podobně jako Yara N-Sensor[®] ALS je tak možné používat přístroj za zhoršených světelných podmínek. Naměřená data jsou přenášena bezdrátově do palubního počítače traktoru, odpadá tak instalace kabeláže. Podobně je usnadněno uvedení do provozu na poli – na zařízení lze zvolit mód aplikace hnojiv pro pšenici ozimou bez kalibrace, neboť tu již obsahuje řídicí jednotka. Ovládací software přístroje umožňuje využití mapových podkladů – kombinuje tak vlastnosti online a offline systémů.



Obr. 7 Polohování senzorů Fritzmeier Isaria[®] (<http://umwelt.fritzmeier.de>)

Přístroj měří dva vegetační indexy. Jedná se o index biomasy **IBI**, který poskytuje informaci o množství nadzemní biomasy na základě měření. Vychází z normalizovaného výpočtu odrazivosti v červené a blíže infračervené oblasti elektromagnetického záření. Druhým indexem je **IRMI**, který detekuje odběr N rostlinami dle množství chlorofylu. Jde o index na principu výpočtu red-edge inflekčního bodu (REIP). Význam využití obou indexů při doporučení dávky hnojení se liší dle účelu měření a druhu přihnojení. Např. přihnojení ozimé řepky je provedeno z hodnot podzimního měření porostu IBI indexem, zatímco doporučení dávky při kvalitativním hnojení obilnin vychází z IRMI indexu.



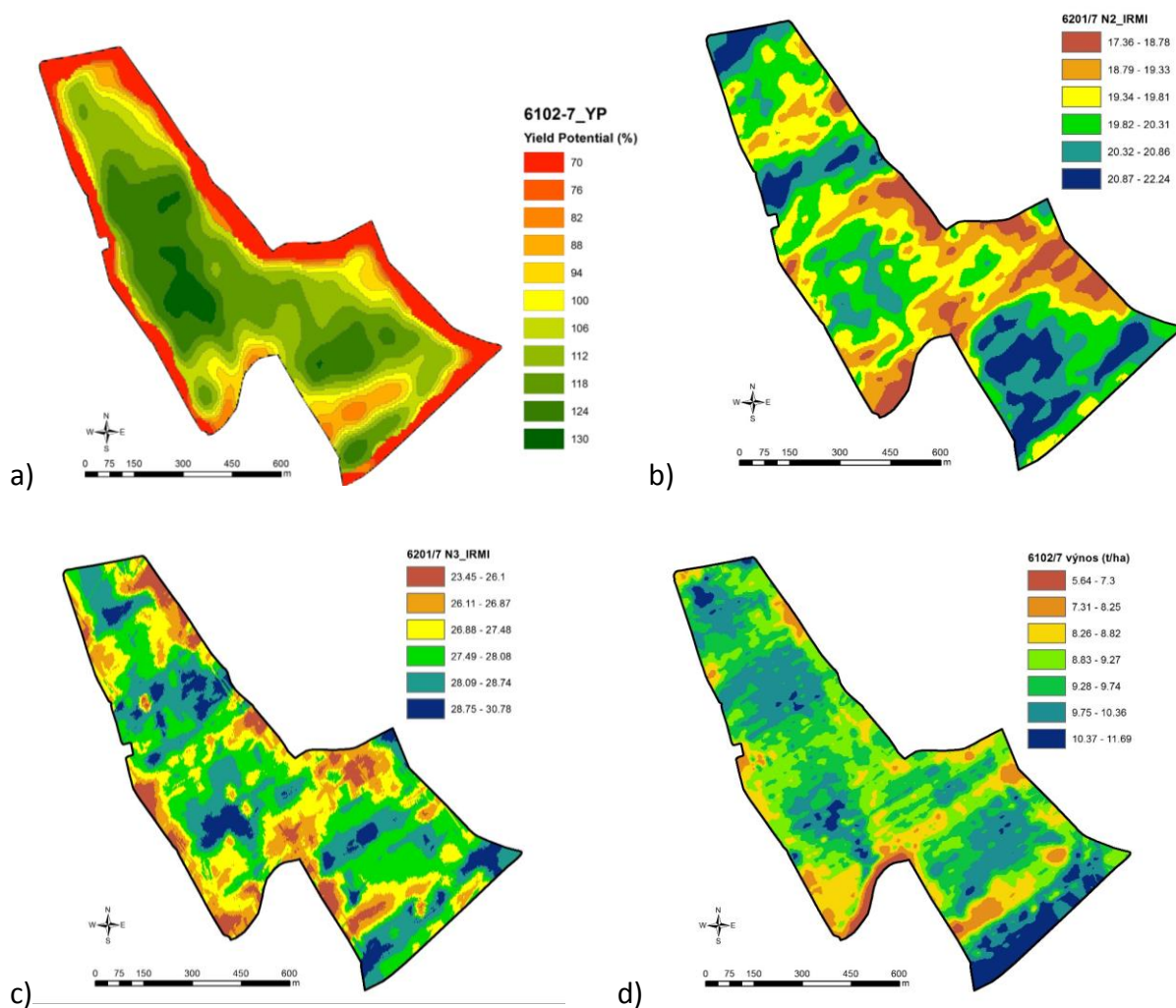
Obr. 8 Graf jednobodového (vlevo) a dvoubodové (vpravo) režimu systému Fritzmeier ISARIA. Nastavení dávky hnojení u jednobodového módu vychází z kalibrace na průměrnou hodnotu porostu a

stanovení sklonu kalibrační křivky (tzv. citlivosti). Dvoubodový mód se kalibruje naměřenou minimální a maximální hodnotou sensorového měření porostu.

Podobně jako jiná zařízení umožňuje Isaria volbu režimu měření a kalibrace:

- **Jednobodová kalibrace** online sensorového měření (obilniny, řepka) – pro vybranou část porostu anebo permanentní kalibrace během pojezdu po pozemku. Kromě kalibrace se nastavuje citlivost, která udává, o kolik kg N se změní dávka při změně hodnoty vegetačního indexu IRMI o jednu jednotku. Definuje tak sklon křivky. Platí, že pro produkční hnojení se dávka snižuje, při kvalitativním se naopak s rostoucí hodnotou IRMI dávka zvyšuje.
- **Jednobodový mód doplněný o podkladovou mapou** potenciálního výnosu pro korekci dávky – stejný princip jako výše uvedený, pouze s uplatněním korekce hnojení dle mapy potenciálního výnosu.
- **Dvoubodový mód** pro kalibraci kontrastních stavů porostu - porost ve špatné a výborné kondici. Určeno pro hnojení ostatních plodin mimo obilnin (cukrovka, brambory)
- **Absolutní mód** pro pšenici ozimou **s podkladovou mapou** bez kalibrace – využívá se křivky odběru N rostlinami dle množství nadzemní biomasy v dané růstové fázi pšenice ozimé. Nevyžaduje kalibrační měření. Pro správné stanovení dávky je nutné v terminálu vyplnit celou řadu údajů – užitkový směr produkce (E, A, B, C), aktuální růstová fáze BBCH, růstová fáze příštího plánovaného hnojení, přibližná hodnota obsahu N_{min} v půdě.
- **Offline mód** aplikace hnojiv dle podkladové mapy – při tomto nastavení není zohledněn aktuální stav porostu sensorovým měřením.
- **Mapový mód** pro záznam měření – vhodné pro podzimní měření

Měření probíhá v intervalu 2000 záznamů za sek; hodnoty z obou sensorových jednotek jsou průměrovány. Reakční doba pro rozmetadla při instalaci na předním závěsu traktoru je přibližně 2 – 3 sek. Při instalaci na ramena postřikovače je zpoždění delší.



Obr. 9 Mapové výsledky testování systému ISARIA pro přihnojení pšenice ozimé na 72 ha pozemku – (a) mapa výnosového potenciálu dodaná výrobcem zařízení (Fritzmeier), záznam vegetačního indexu IRMI v produkčním (b) a kvalitativním (c) hnojení a výnosová mapa ze sklizně (d). Testování proběhlo ve spolupráci se zemědělským podnikem SALIX Morava a.s. a distributorem senzorového systému Isaria pro ČR, firmou AGROTEC a.s.

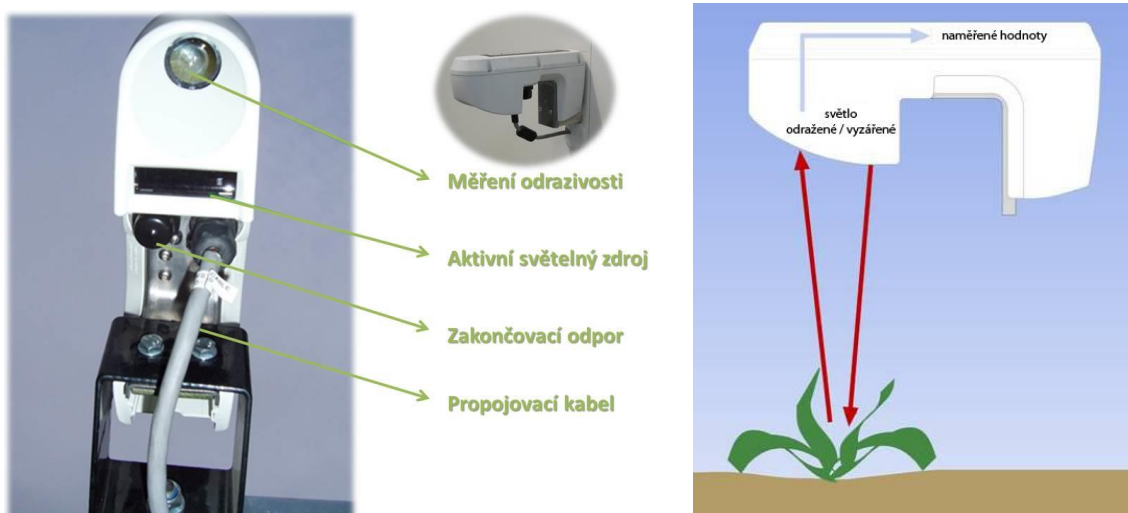
Trimble GreenSeeker

Přístroj GreenSeeker, vyvinutý společností Ntech Industries (USA), která nyní spadá pod Trimble (USA), využívá aktivního záření LED diod pro měření odraženého záření v červeném a NIR spektru od porostu a následný výpočet vegetačního indexu NDVI. Pro rozšíření pokrytí záběru aplikátoru lze instalovat více senzorů. Systém je využíván převážně pro přihnojování a ochranu rostlin obilnin, ozimé řepky a kukuřice.



Obr. 10 Sada přístrojů instalovaná na ramenech postřikovače (foto L. Neudert)

Senzor měří odrazivost červeného a blízkého infračerveného spektra 100x za sekundu, následně počítá NDVI index zprůměrovaný za 1 sec. Lze provést výpočet i jiných vegetačních indexů (SAVI, SR) z hrubých dat, NDVI se ale osvědčil jako nejrobustnější. Greenseeker porost ozařuje umělým světlem v obou spektrech v podobě liniového záření, podobně čte senzor odrazivost v příčné linii při pojezdu – eliminují se tak překryvy míst (oproti odečtu hodnot v kruhové oblasti). Zpoždění mezi čtením senzoru a změnou dávky lze při běžné rychlosti pojezdu odhadnout na 3 – 4 m.



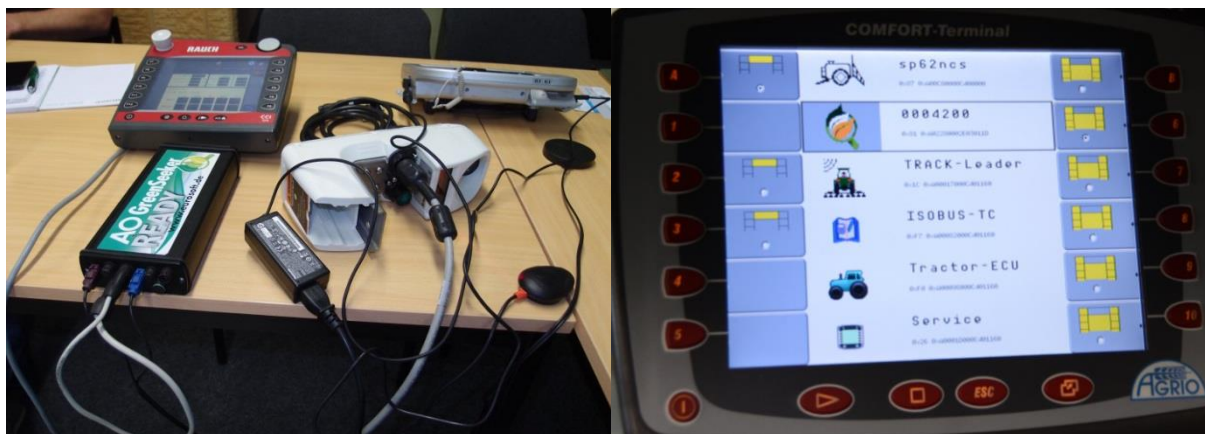
Obr. 11 Popis jednotlivých částí sensorové jednotky Trimble Greenseeker a princip měření přístroje (www.trimble.com)

Při zahájení práce s Greenseeker na pozemku je třeba provést kalibraci přejezdem části porostu. Kalibraci je kdykoli možné zopakovat. Po kalibraci se zadávají hodnoty dávky aplikace (hnojení, regulátory růstu) – dávka pro nulovou hodnotu, naměřenou minimální hodnotu NDVI, naměřenou maximální hodnotu a NDVI=1. Úroveň hnojení (min, max) je tedy uživatelsky nastavitelná.



Obr. 12 Ukázka možných instalací senzorového systému Greenseeker (Land-data Eurosoft)

Kromě standardního zapojení do palubního počítače Trimble přes sériové rozhraní RS232 je možné využít řešení ISOBOX od firmy Land-data. To umožňuje ovládání systému a čtení dávek v palubních terminálech kompatibilních s ISO-BUS ready (např. Müller Elektronik). ISOBOX z CAN-BUS zjistí připojený stroj (postřikovač/rozmetadlo) a přizpůsobuje tomu grafické ovládací rozhraní terminálu. ISOBOX používá svou vlastní jednoduchou GPS (DGPS). Významnou vlastností je možnost nahrání podkladové mapy rozložení potenciálního výnosu ve formátu shapefile (shp). Mapa může obsahovat v atributové tabulce informaci o korekci dávky, či přímo její hodnotu. Tzn. lze volit kombinaci online senzorového měření s mapovým podkladem nebo pouze offline režim.



Obr. 13 Řídicí jednotka AO Greenseeker ISOBOX pro implementaci senzorového systému Trimble Greenseeker do ISOBUS ready palubního terminálu (vlevo). Ovládací menu Greenseeker se následně zobrazuje jako další položka v základním menu palubního počítače (vpravo)



Obr. 14 Obrazovka AO Greenseeker ISOBOX s přehledem stavu senzorových jednotek a aktuální hodnotou NDVI (vlevo). Na obrázku vpravo je nabídka pro volbu dávek hnojiva, kalibraci a spuštění variabilního dávkování.

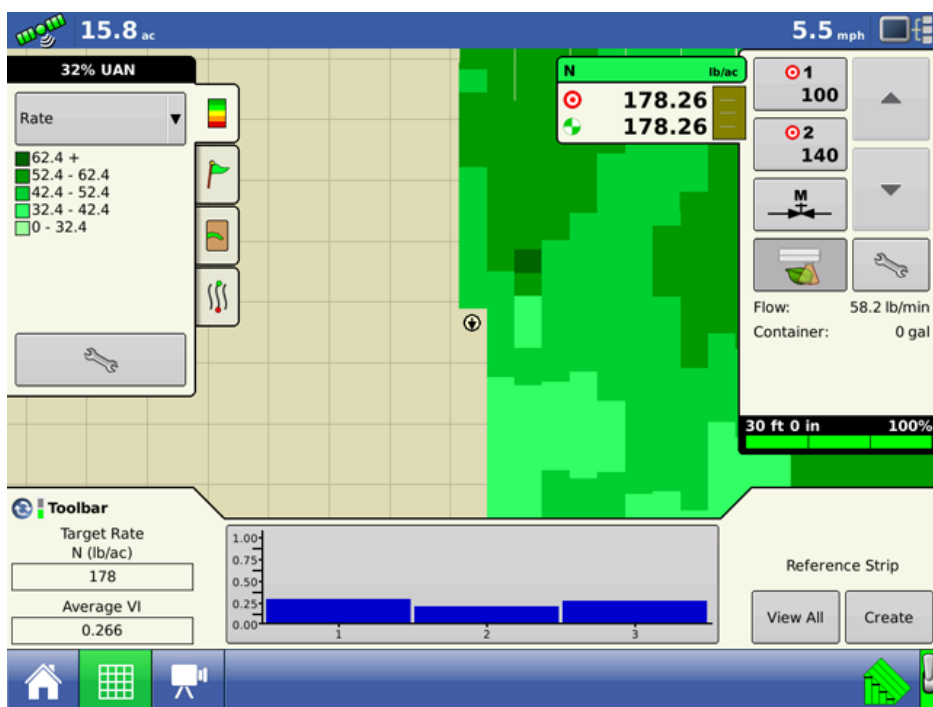
AgLeader OptRx

Aktivní senzor OptRx, vyvinutý společností AgLeader (USA), využívá kromě červeného a blízkého infračerveného pásma také oblast red-edge. Výsledkem je výpočet vegetačních indexů NDVI a NDRE (Normalized Difference Red Edge), přičemž NDRE vykazuje vyšší citlivost na obsah dusíku v rostlinách v pozdějších vývojových fázích rostlin a nedochází u něj k saturačnímu jevu.



Obr. 15 Přístroj OptRx (www.agleader.com)

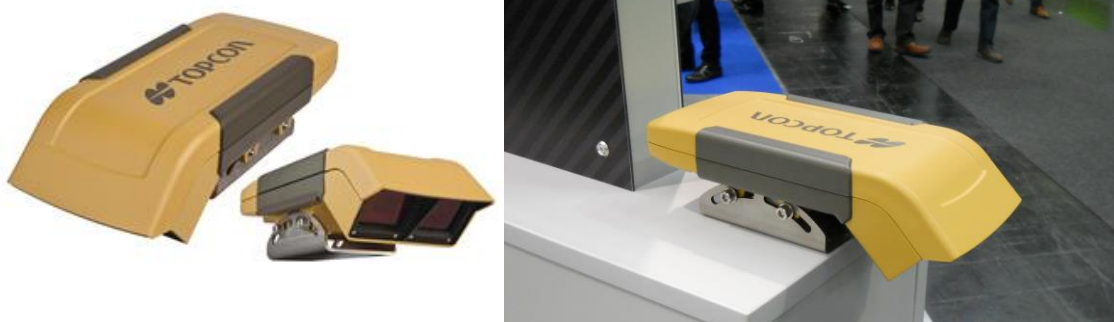
Dávka přihnojení porostů je vyhodnocena na základě vegetačního indexu a jeho referenční hodnoty (virtual reference strip). Ta je stanovena umístěním přístroje nad část porostu s dostatečnou úrovní výživy a odečtením naměřené hodnoty po dobu 5 min. Aktuální naměřené údaje o porostu jsou porovnávány s referenční hodnotou – čím větší rozdíl mezi nimi, tím vyšší je doporučená dávka. Přístroj je používán zejména v USA pro přihnojování ozimé pšenice a kukuřice.



Obr. 16 Obrazovka terminálu monitorujícího činnost OptRx senzoru (www.agleader.com)

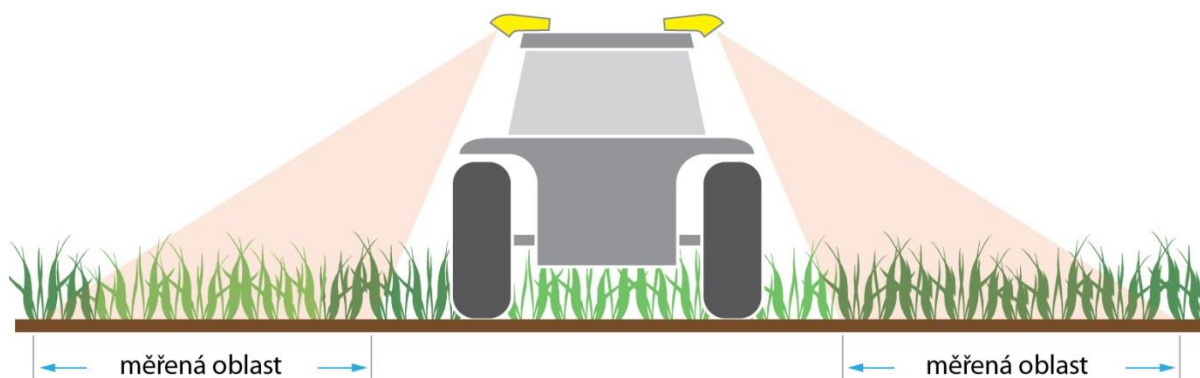
Topcon CropSpec

Zařízení CropSpec od společnosti Topcon se skládá ze dvou měřících jednotek, které jsou instalovány na levou a pravou stranu kabiny traktoru/aplikátoru. Principem zjišťování výživného stavu porostu je měření jeho odrazivosti pomocí aktivního záření v oblasti červeného (730 – 740 nm) a blízkého infračerveného (800 – 810 nm) spektra. Aktivní záření je vytvářeno pomocí pulsujících laserových diod, podobně jako Yara N-sensor[®]ALS je tak možné používat přístroj 24 hod denně.



Obr. 17 Topcon CropSpec přístroj pro online přihnojování porostů (www.topconpa.com)

Výhodou CropSpec je široký záběr při snímání porostů (úhel záběru 45° – 55°) a možnost volby mezi online režimem přihnojování nebo pouze offline mapováním variability porostů (bez současného hnojení). Uživatel má také možnost nastavení intenzity hnojení.



Obr. 18 Schéma záběru přístroje CropSpec instalovaného na kabině traktoru (www.topconpa.com)

Přehled vybraných online senzorových systémů a jejich základní vlastnosti

Online senzorové systémy využívající principu měření odrazivosti záření se liší v následujících bodech:

- zdroj odraženého záření – pasivní využívající odražené sluneční záření (např. starší generace Yara N-Sensor) nebo aktivní s vlastním zdrojem světla (LED diody, xenonové výbojky, apod.)
- počet a rozpětí vlnových délek pásem elektromagnetického záření v oblasti červeného a blízkého infračerveného spektra, které určují používané vegetační indexy
- nasměrováním na porost a zorným polem – kolmo na porost či šikmý úhel
- způsob instalace na mechanizaci – na horní část kabiny, přední závěs traktoru, ramena postřikovače nebo před nesené rozmetadlo
- úroveň propojení s elektronickými palubními systémy – systémy zcela autonomní s vlastním terminálem a přijímačem GNSS (globální navigační družicové systémy), které jsou přímo připojeny k řídicí jednotce aplikátoru či ISOBUS ready řešení propojený s palubním terminál mechanizace a ovládáním aplikátoru.

Pro režim online aplikace není zapotřebí lokalizace stroje pomocí GNSS, stanovení pozice ale umožňuje záznam naměřených hodnot do mapy. Naprosto nezbytnou je lokalizace pro režim využití podkladové mapy (map-overlay), kdy je nezbytné stanovit hodnotu podkladové mapy na pozici aplikátoru.

Mezi rizika diagnostiky stavu porostů na základě detekce odrazivosti záření patří snížení spolehlivosti měření vnějšími vlivy. Jedná se např. o výskyt vody na povrchu listů, neboť voda způsobuje absorpci blízkého infračerveného záření a zvyšuje odraz viditelného záření. Diagnostiku dále znesnadňuje výskyt jiných rostlin v zorném poli senzorů (plevelné rostliny), vliv ostatních stresových faktorů (sucho, poškození porostu, deficece ostatních živin) výskyt stresových, kalibrace čidel a v případě online senzorových systémů případné zašpinění optických částí senzorových jednotek.

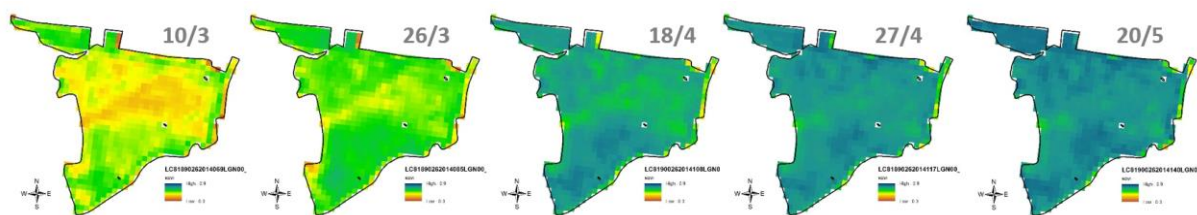
Tab. 1 Přehled online senzorových systémů a jejich základní vlastnosti

	Yara N-Sensor ALS	Fritzmeier Isaria / Claas Crop Sensor	Topcon CropSpec	Trimble GreenSeeker	AgLeader OptRx
Princip měření	Optický	optický	optický	optický	optický
Měřená veličina	odběr N, biomasa	odběr N (IRMI), biomasa (IBI)	odběr N, biomasa	NDVI	NDVI, NDRE
Počet snímaných spektrálních pásem	4 (730, 760, 900, 970 nm)	4	2	2	3
Orientace čidla k porostu	šikmo	kolmo	šikmo	kolmo	kolmo
Montáž	na kabině	přední závěs, ramena postřikovače	na kabině	přední závěs, ramena postřikovače	přední závěs, ramena postřikovače
Zdroj světla	xenonové výbojky	LED	laser	LED	LED
Počet senzorových	2	2	2	volitelně	volitelně
Využitelnost	24h denně	24h denně	24h denně	24h denně	24h denně
Plodiny	obilniny, řepka, kukuřice, brambory, řepa, traviny	obilniny, řepka, traviny	obilniny, řepka, kukuřice, brambory, řepa, traviny	obilniny, řepka, kukuřice, brambory, řepa, traviny,	obilniny, řepka, kukuřice,
Podkladové mapy (map overlay)	ano	ano (shp pro jednotlivé pozemky)	-	ano (shp za všechny pozemky)	-
Stanovení dávky*	volitelná / absolutní	volitelná / absolutní	volitelná	volitelná	volitelná
V praxi	od 1999/2005	od 2009	od 2011	od 2009	
Poznámky	ISOBUS ready (Agricon PF-BOX)	ISOBUS ready		ISOBUS ready (AO ISOBOX)	

*volitelné stanovení dávky – uživatel volí rozpětí dávky živiny (min - max); absolutní – rozpětí dávek je stanoveno přístrojem

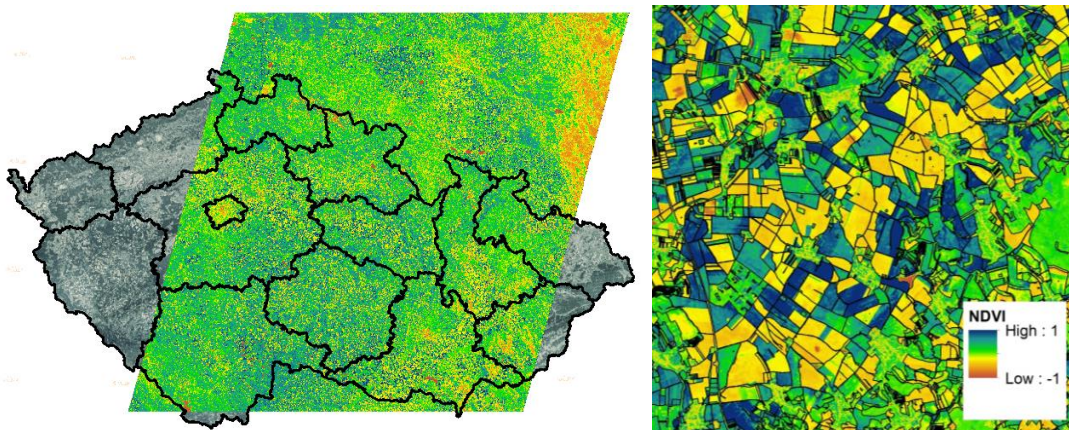
2.2. Využití dálkového průzkumu pro hodnocení stavu porostů

Dálkový průzkum představuje efektivní způsob mapování stavu rostlin a zachycení jejich heterogenity v rámci pozemků. Ačkoli jsou v zemědělství metody dálkového snímání využívány více jak 40 let, v porovnání s ostatními agronomickými oblastmi se ale jedná o relativně nové postupy (Hatfield et al., 2008). Potenciál využití těchto metod při řízení rostlinné produkce byl znám ještě před masovou aplikací geoinformačních technologií do zemědělství. Perspektivy uplatnění monitoringu distančními metodami dálkového průzkumu pro biologickou kontrolu v agrotechnice zemědělských plodin popisuje například ve své monografii „Rukověť agronoma“ na konci 80. let prof. Petr (Petr a kol., 1989). Dle autorů může být jednoduché analogové vyhodnocení leteckého videozáznamu spolu s pozemním měřením agrobiologické kontroly využito pro identifikaci diferencí v zapojení porostu, výživného stavu, zapevlení porostů, zralosti porostů, polehnutí, rozlišení míst s projevy stresových stavů porostů nebo při snímkování půdy k diferencii půdních typů, vlhkostních poměrů a obsahu humusu.



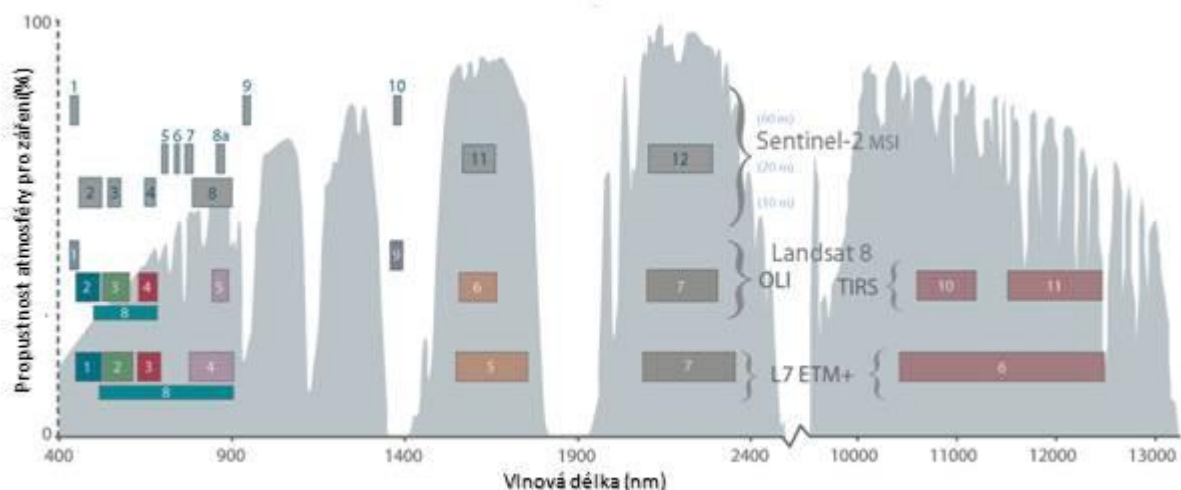
Obr. 19 Dynamika průběhu vývoje porostu pšenice ozimé na pozemku o výměře 70 ha zachycená NDVI snímky z družice Landsat 8 v průběhu vegetačního období 2014. Oranžovou barvou jsou znázorněny nízké hodnoty NDVI, tmavě modrou naopak vysoké.

V současnosti jsou využívány metody digitálního pořizování a zpracování obrazových záznamů z leteckého nebo družicového snímkování. Družicová obrazová data umožňují zachycení rozsáhlého území v krátkém časovém intervalu s vysokou periodicitou, která je vhodná pro zachycení dynamiky přírodních jevů. Díky svým vlastnostem a bezplatnou dostupností je jedním z nejčastěji využívaných zdrojů družicových dat pro precizní zemědělství program NASA a USGS (USA) Landsat. Ten představuje ucelenou řadu družicových misí zaměřených na multispektrální a termální průzkum povrchu naší planety. Průzkum byl zahájen vypuštěním první družice v roce 1972. Vzhledem k této historické řadě jsou data velmi rozšířená v nejrůznějších aplikacích dálkového průzkumu Země. Novější generaci představují senzory Landsat OLI a TIRS, provozované na družici Landsat 8 LDCM. Multispektrální senzor OLI pokrývá 9 pásem v oblasti viditelného, blízké infračerveného (NIR) a krátkovlnného infračerveného (SWIR) záření; termální senzor TIRS pak přidává další 2 pásma v termálním infračerveném spektru. Prostorové rozlišení multispektrálního skeneru je 30m / pixel. Všechny scény pořizené družicemi Landsat jsou standardizované – družice přelétají nad zeměkoulí po 232 drahách, šířka záběru snímacího zařízení je přibližně 183 kilometrů. Obrazová data v podobě jednotlivých scén jsou dostupná po registraci na stránkách USGS (earthexplorer.usgs.gov), vč. automatického upozorňování na nové snímky vybraného území; velikost jedné scény se všemi spektrálními pásmy je zhruba 2 GB. Družicové snímky jsou dodávány po základním geometrickém zpracování (Level 1). Pro digitální analýzu obrazu je vyžadováno předzpracování na straně uživatele, zahrnující radiometrické a atmosférické korekce. I když plán návratu družice Landsat na určité místo na Zemi (angl. Revisit Time) je dobře znám (perioda 16 dní, pro oblasti s překryvem scén 8 dní), je obvyklé, že se v průběhu vegetačního období nepodaří vzhledem k častému výskytu oblačnosti pořídít v daný termín použitelný snímek. To snižuje použitelnost snímků pro plánování pěstebních operací.



Obr. 20 Překryv scény Sentinel 2A nad územím ČR a detail zachycení heterogenity pozemků pomocí NDVI.

V roce 2015 byla v rámci programu Evropské kosmické agentury ESA Copernicus vypuštěna družice Sentinel 2A, která tematicky navazuje na misi Landsat. Pořizuje multispektrální obrazová data ve 13 pásmech s prostorovým rozlišením 10, 20 a 60 metrů v závislosti na vlnové délce o celkové šířce záběru 290 km. Konfigurace spektrálních pásem umožňuje výpočet vegetačních indexů v oblasti red-edge. V roce 2017 bude vypuštěna družice Sentinel 2B, časové rozlišení tandemem družic bude 5 dní (pro oblast rovníku, pro naši zeměpisnou šířku bude 3-4 dny).

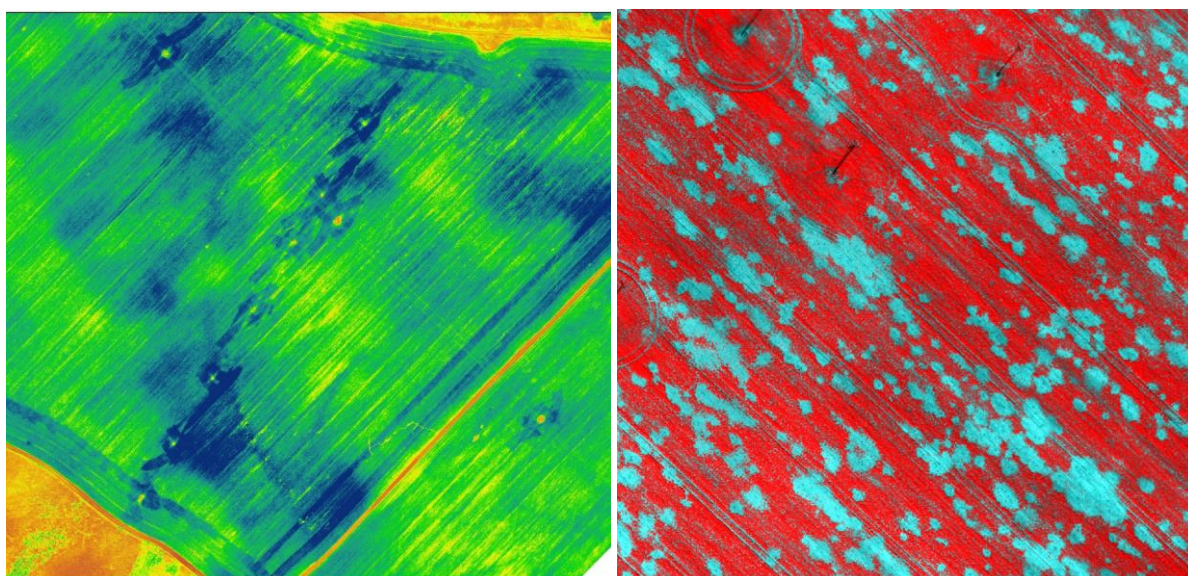


Obr. 21 Schéma porovnávající spektrální pásma družic Landsat 7, Landsat 8 a Sentinel 2. Sentinel 2 svoji spektrální konfigurací navazuje na družice Landsat, současně ale přidává několik úzkých pásem v oblasti NIR záření s vyšší citlivostí na změny vegetačních parametrů.

Zdroj: <http://landsat.gsfc.nasa.gov>

Kromě již zavedeného leteckého a družicového průzkumu se v současnosti stále více prosazují metody dálkového průzkumu za pomoci dálkově pilotovaných systémů (RPAS – Remotely Piloted Aircraft Systems). Je dostupná celá řada studií, které se věnují technickému vývoji těchto systémů a platform (Link et al., 2013) a zpracováním či aplikací tohoto nového typu dat v precizním zemědělství včetně postupů radiometrických korekcí pořízených snímků

(Del Pozo et al., 2014). Obecně v porovnání s leteckým a družicovým průzkumem, RPAS nabízí výrazně nižší provozní a investiční náklady, vyšší prostorové rozlišení pořízených snímků spolu s vysokou flexibilitou (Pechanec et al., 2014). Základním záznamovým zařízením jsou multispektrální kamery, které poskytují jednotlivé spektrální pásma pro výpočet celé řady širokopásmových vegetačních indexů (Candiago et al., 2015). Jinou kategorií jsou úzcepásmové hyperspektrální senzory s mnohem detailnějším zachycením spektrální křivky odrazivosti objektů, čehož lze například využít pro výpočet specifických vegetačních indexů nebo měření fluorescence chlorofylu (Zarco-Tejada et al., 2009). Ale také jednoduché RGB snímkování lze využít pro hodnocení porostů zemědělských plodin, což ve své studii dokazují Bendig et al. (2014) při stanovení nadzemní hmoty rostlin ječmene jarního na základě analýzy digitálního modelu povrchu porostu z bezpilotního průzkumu ve viditelné části elektromagnetického spektra.



Obr. 22 Vysoká detailnost snímků z bezpilotních systémů umožňuje pomocí identifikovat jednotlivé záběry sečího stroje při objetí překážky (vlevo) či poškození porostu ozimé řeky hlodavci (vpravo). Snímky pořídila společnost DATA PROCON s.r.o. pomocí Sensefly eBee se senzorem MULTISPEC4C.

Z výsledků studie stanovení porostních parametrů z bezpilotního a družicového multispektrálního průzkumu provedené ve spolupráci MENDELU se společností DATA PROCON s.r.o. na pozemcích obhospodařovaných zemědělskou společností ROSTĚNICE, a.s. vyplývá zachycení kontrastních oblastí (zón) na 70 ha pozemku s pšenicí ozimou (Lukas et al., 2016). Zatímco s ohledem na prostorové rozlišení je jejich identifikace u bezpilotního průzkumu jednoznačná, v případě družicových snímků je vymezení jednotlivých zón vlivem nižšího prostorového rozlišení nepřesné.



Obr. 23 Bezpilotní prostředek Sensefly eBee (vlevo) a senzor MULTISPEC4C se čtyřmi optickými čočkami pro jednotlivé spektrální pásma (foto uprostřed) a čidlem příchozí radiace (foto vpravo)

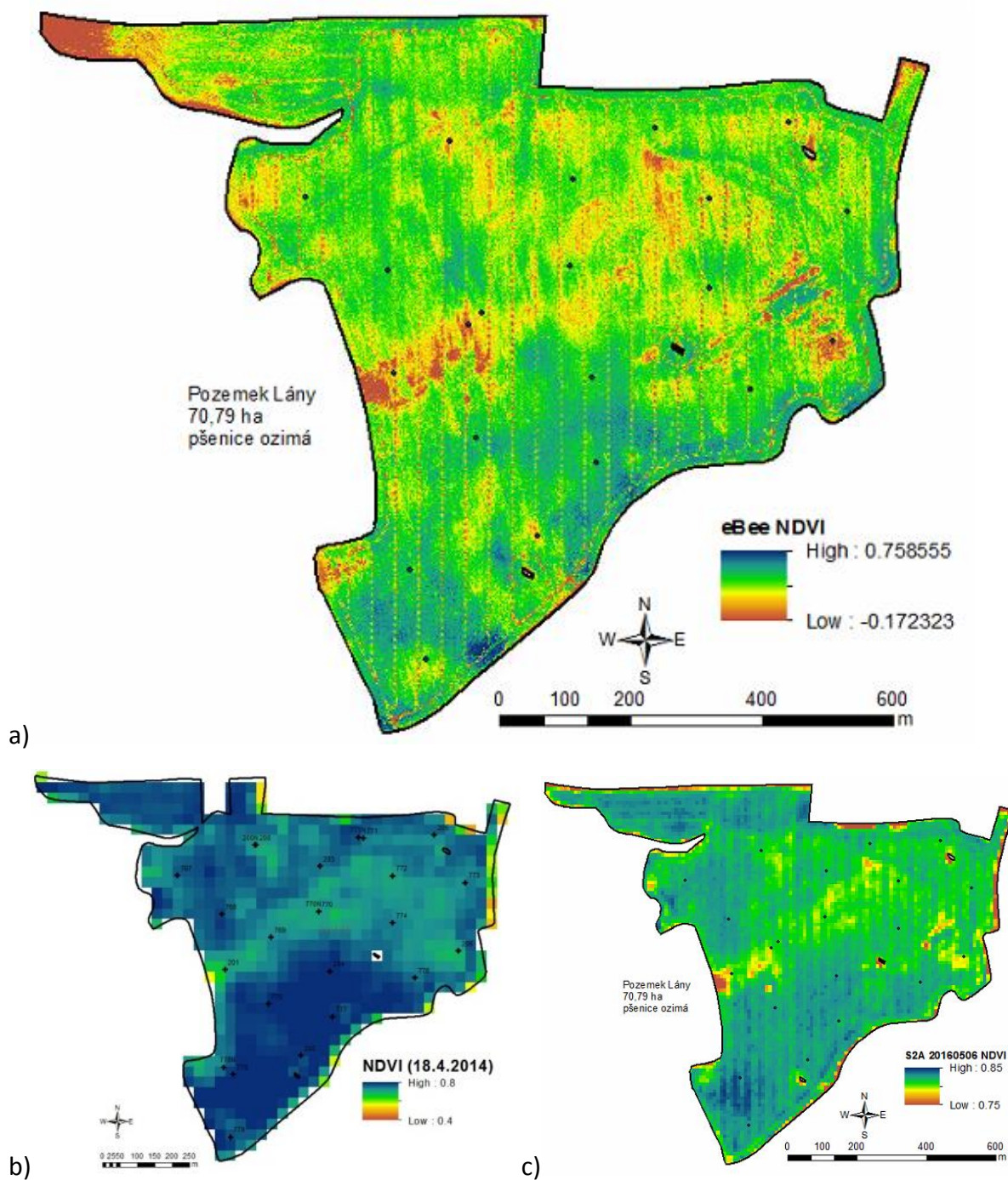
Korelační analýza prokázala dominantní vliv množství nadzemní biomasy, která je významným ukazatelem růstu rostlin a odhadu výnosu pšenice (Fu et al., 2014). V případě bezpilotního průzkumu v roce 2014 byly nejvyšší korelace zaznamenány pro vegetační index GNDVI, u něhož je známa vyšší citlivost ke změnám chlorofylu než u indexu NDVI Gitelson a Merzlyak (1998). V roce 2016 bylo snímkování provedeno pomocí kamery MULTISPEC4C se záznamem také v red-edge oblasti, což se projevilo vyšší citlivostí na změny obsahu N, množství biomasy a odběru N.

Tab. 2 Výsledky korelační analýzy mezi porostními parametry sledovanými na 20 místech pozemku a dálkovým průzkumem v roce 2014 a 2016 (Lukas et al., 2016b)

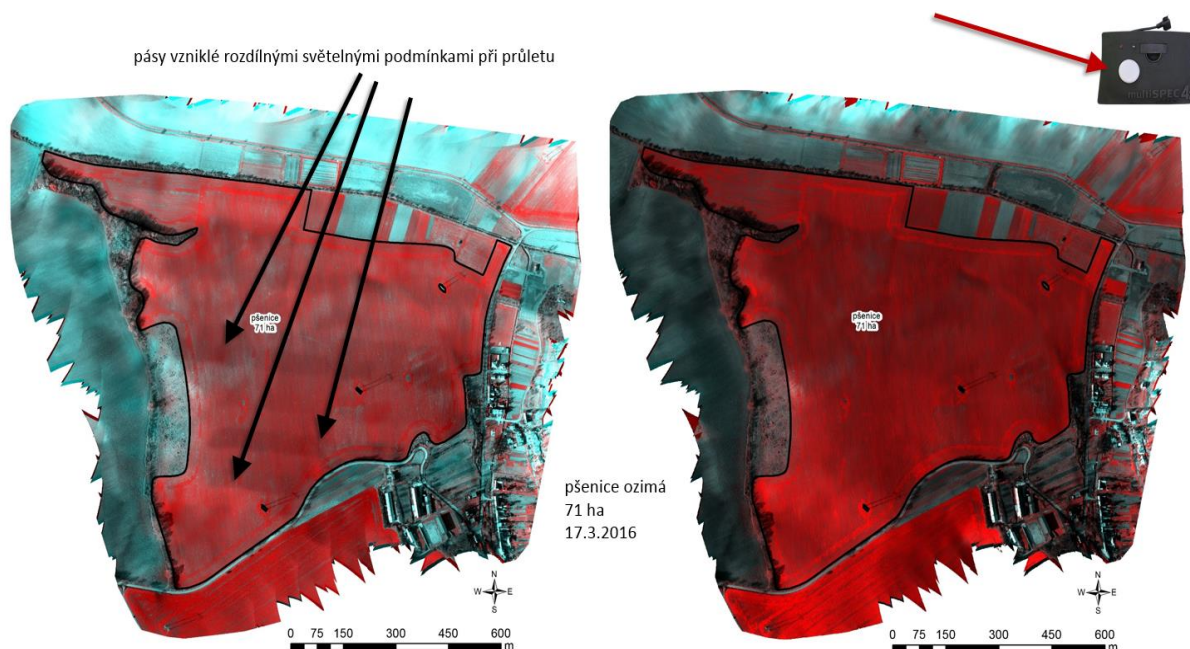
2014 (BBCH 32)	Obsah N [%]	Biom. čerst. [g.m ⁻²]	Biom. suš. [g.m ⁻²]	Odběr N [g.m ⁻²]	2016 (BBCH 34)	Obsah N [%]	Biom. čerst. [g.m ⁻²]	Biom. suš. [g.m ⁻²]	Odběr N [g.m ⁻²]
UAV eBee (22.4.2014)					UAV eBee MULTISPEC4C (6.5.2016)				
NDVI	0.355	0.646	0.688	0.598	NDVI	0.069	0.563	0.453	0.460
GNDVI	0.495	0.754	0.758	0.709	GNDVI	0.173	0.647	0.499	0.558
SRI	0.369	0.654	0.693	0.610	SRI	0.034	0.543	0.442	0.431
					NRERI	0.310	0.796	0.660	0.785
Landsat 8 (18.4. 2014)					Sentinel 2 (6.5.2016)				
NDVI	0.563	0.584	0.564	0.592	NDVI	0.018	0.699	0.613	0.580
GNDVI	0.437	0.478	0.456	0.485					
SRI	0.585	0.596	0.574	0.612					

Další vlastností této kamery je čidlo na příchozí radiaci, které slouží pro zpřesnění atmosférických korekcí pro jednotlivé snímky. Každý pořízený snímek nese informaci o intenzitě světelného záření, kterou lze využít pro normalizaci světelných podmínek pro tvorbu ortofotomozaiky. Význam tohoto měření znázorňuje Obr. 25.

V případě multispektrální snímávací techniky je významnou vlastností zachycení odrazivosti v red-edge pásmu, neboť vegetační indexy v této oblasti lépe postihují zejména výživný stav rostlin v podobě odběru N. Nezbytným krokem při vyhodnocení časových řad snímků je zajištění potřebných radiometrických a atmosférických kalibrací pro porovnání vývoje porostu. Takto dosažené mapové výsledky mohou být dále využity pro plánování lokálně cílených zásahů v oblasti výživy a ochrany rostlin v precizním zemědělství.



Obr. 24 Snímky NDVI 70 ha pozemku: (a) bezpilotní průzkum z roku 2016 (15 cm /pixel), (b) družicový snímek Landsat 8 z roku 2014 s prostorovým rozlišením 30 m / pixel, (c) družicový snímek Sentinel 2A z roku 2016 (10 m / pixel)

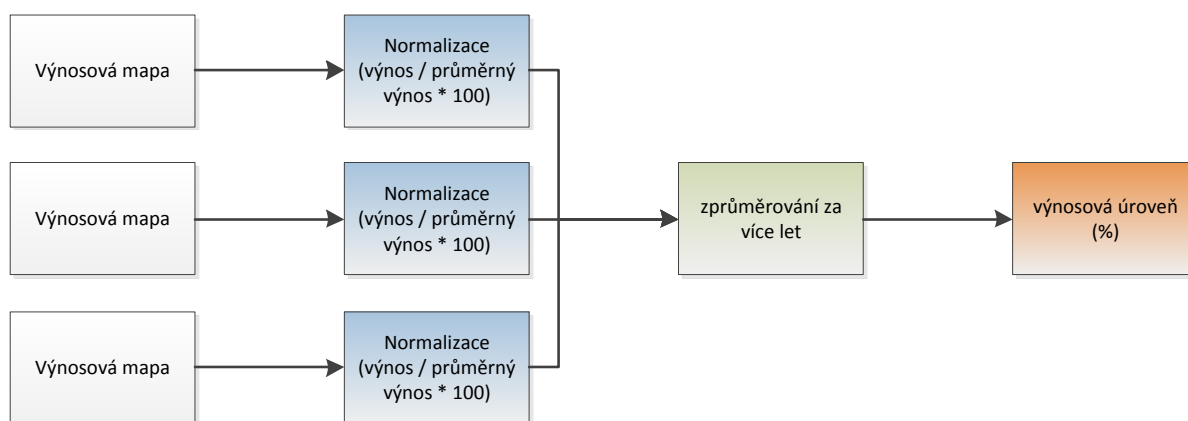


Obr. 25 Význam čidla přichodí radiace na multispektrálním senzoru při sestavování výsledné ortofotomozaiky – vlevo bez normalizace světelných podmínek, vpravo se zohledněním intenzity světelných podmínek a následnou korekcí celé scény.

Volba způsobu monitoringu je odvislá od požadavků na prostorové rozlišení mapování, včasnosti provedení průzkumu a nákladnosti. Použitelnost družicových dat zásadně ovlivňuje výskyt oblačnosti, kterou lze jen obtížně předpovídat. Proto lze družicový monitoring jen omezeně využít pro plánování agrotechnických operací. Naproti tomu letecký a bezpilotní průzkum mají vysokou operativnost, kterou omezuje jen aktuální stav povětrnostních podmínek. Je možné podle něj plánovat pěstební zásahy či mapovat aktuální stav na pozemcích. V obou případech s ohledem na požadavky zpracování a interpretace dat lze předpokládat uplatnění v zemědělství formou služeb namísto provádění průzkumu samotnými zemědělskými podniky.

3. Stanovení plánovaného výnosu a normativní dávky

Plánovaným výnosem je při tradičním výpočtu myšlena průměrná hodnota výnosu plodiny na daném pozemku. U více heterogenních pozemků však může použití jednotného průměrného výnosu za celý pozemek maskovat lokální oblasti s vyšší nebo naopak nižší produktivitou. Vývoj sklízecí techniky v současnosti nabízí možnost celoplošného monitorování výnosu sklizené plodiny. Výsledkem jsou výnosové mapy, ze kterých lze po normalizaci výnosu (přepočtu absolutního výnosu na relativní) stanovit výnosovou úroveň na pozemku. Lukas et al. (2011) popisují postup zpracování výnosových map, kdy kombinací (zprůměrováním) historických map s relativním výnosem lze do určité míry eliminovat ročníkové rozdíly a získat přehled o rozložení výnosového potenciálu na daném území.



Obr. 26 Schéma výpočtu výnosové úrovně z výnosových dat z jednotlivých sklizňových ročníků (počet závisí na dostupnosti historických dat) (Lukas et al., 2011)

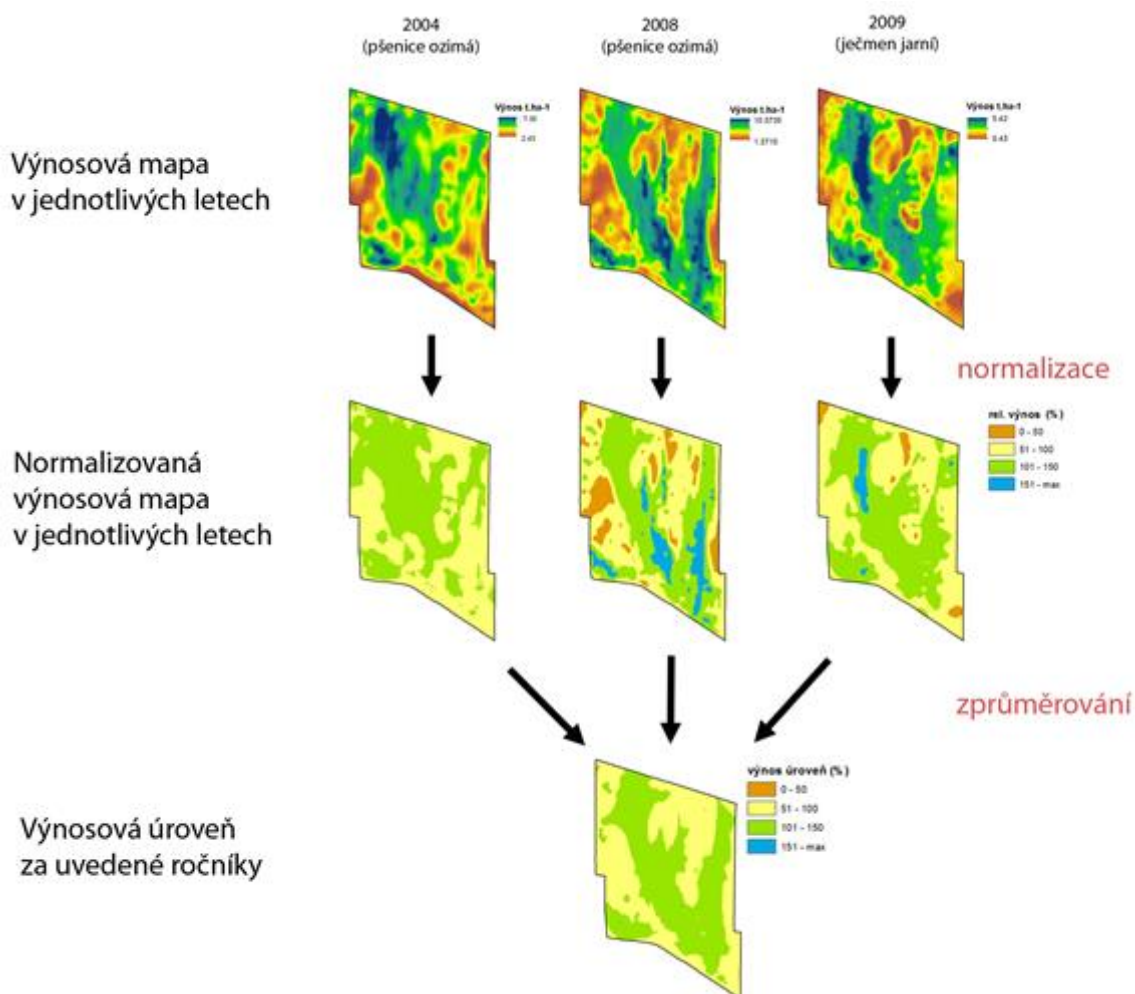
Hodnota výnosové úrovně vyjadřuje procentuální porovnání výnosu na daném místě s průměrným výnosem ve sledovaném roce za celý pozemek. Principem zohlednění výnosové úrovně při výpočtu normativu je plošná diferenciacie výnosového potenciálu daného území namísto použití jednotného průměrného plánovaného výnosu nutného pro výpočet normativu (odběru živin na plánovaný výnos). Stanovení výnosové úrovně se skládá ze dvou kroků – normalizace výnosových map a zprůměrování za více let (pokud jsou data k dispozici).

Normalizování výnosových map

Vstupní bodová data je nutné nejprve upravit (odstranit chybové, nulové a odlehlé hodnoty, přepočítat na konstantní vlhkost zrna) a následně z nich prostorovými interpolacemi vytvořit celoplošné rastrové mapy vyjadřující výnos v absolutních jednotkách ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) v každém pixelu. Normalizovaný výnos se vypočte následovně:

$$\text{normalizovaný výnos} = \left(\frac{\text{výnos}}{\text{průměrný výnos}} \right) \cdot 100 [\%]$$

Výnosem je hodnota každého pixelu (tzn. konkrétní výnos na daném místě), průměrným výnosem je průměr výnosu na daném pozemku. Výsledný normalizovaný výnos vyjadřuje, o kolik procent byl vyšší nebo nižší než průměr celého pozemku v daném roce. Normalizace výnosu umožňuje použít výnosová data rozdílných plodin nebo odrůd s odlišným výnosovým potenciálem, neboť se zohledňuje pouze poměr k průměrnému výnosu, nikoli absolutní hodnoty výnosu.



Obr. 27 Příklad výpočtu výnosové úrovně na 52ha pozemku se zohledněním historických výnosových dat (Lukas et al., 2012)

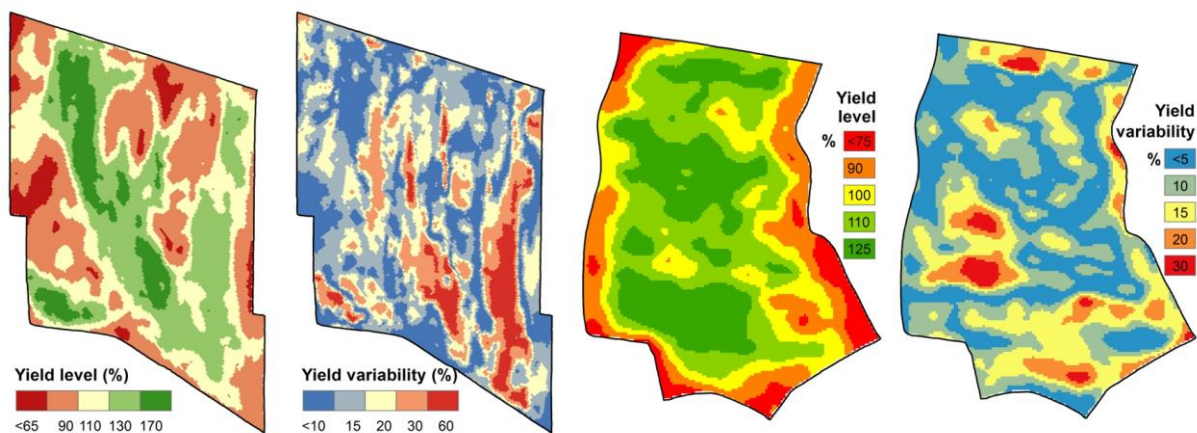
Zprůměrování historických dat

Pokud jsou k dispozici výnosová data za více let, jejich zprůměrováním (po normalizaci výnosu) lze eliminovat vliv ročníku na výnos a vliv rozdílných plodin. Zároveň tento postup umožňuje identifikovat oblasti na pozemku s dlouhodobým podprůměrným nebo nadprůměrným výnosem.

Kromě výpočtu výnosové úrovně lze z časové řady výnosových dat také stanovit stabilitu výnosu na daném místě. Pro výpočet je použit variační koeficient (CV). Vyšší hodnoty variačního koeficientu představují kolísání výnosové úrovně mezi jednotlivými ročníky na daném místě a vypovídá tak o možném riziku dosažení výnosu při změně povětrnostních podmínek v průběhu roku. Dle Blackmore et al. (2003) lze kombinací výnosové úrovně a stability definovat následující kategorie hodnocení výnosu:

- Oblasti s **vysokým a stabilním výnosem** (nadprůměrný výnos, $CV < 30\%$). Představují místa na pozemku s trvale nadprůměrným výnosem, který je možné podpořit vyšší intenzitou pěstování (hnojení, ochrana rostlin, apod.). Zpravidla se jedná o oblasti s vyšší dostupností půdní vláhy.

- Oblasti s **nízkým a stabilním výnosem** (podprůměrný výnos, CV < 30 %). Jedná se o plochy, kde je vhodné snížit intenzitu pěstebních zásahů, dokud nezjistíme a nenapravíme příčinu výnos limitujícího faktoru. Může se jednat o plochy s trvale sníženou úrodností, degradovanou půdu nebo výsušné části pozemků.
- Oblasti s **nestabilním výnosem** (CV > 30 %). Tato místa se z hlediska pěstebních doporučení jeví jako riziková, výnos je zde výrazně ovlivněn ročníkovými vlivy. Jako příklad lze uvést zamokřené části pozemků, které v suchých ročnících poskytují nadprůměrný výnos.



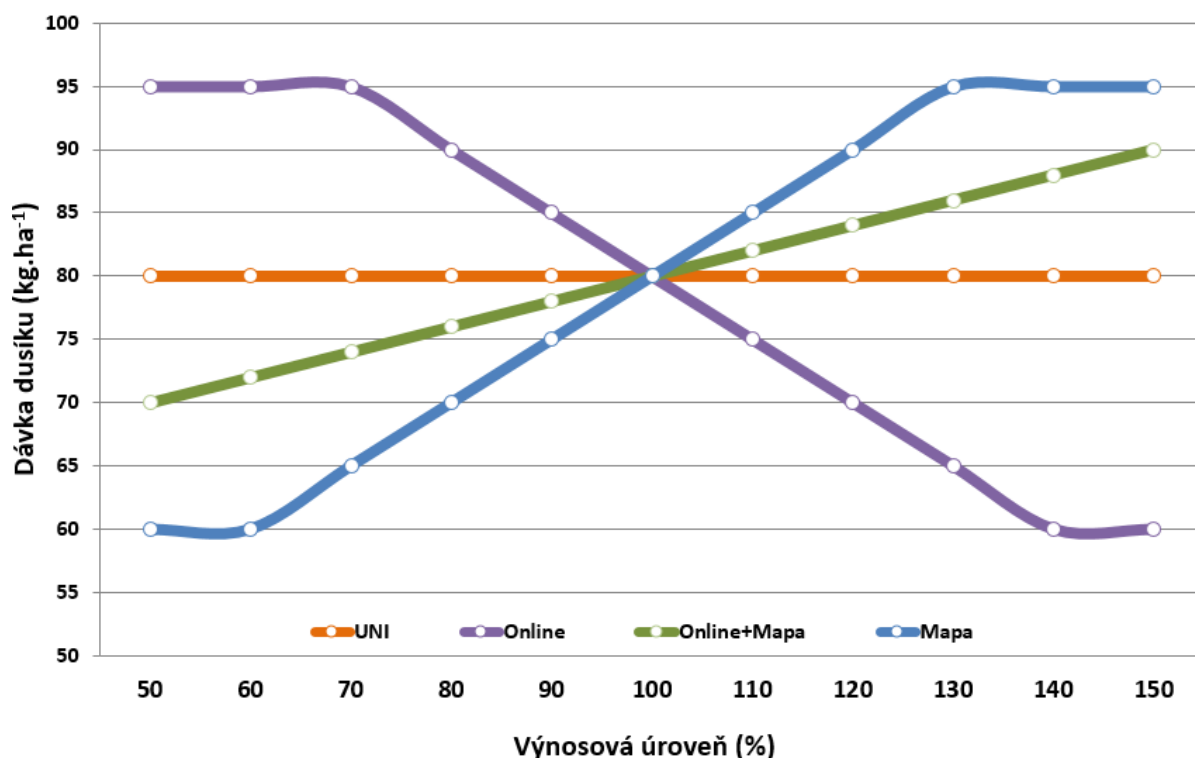
Obr. 28 Příklad map výnosové úrovně (Yield level) a výnosové stability (Yield variability) stanovené pro 52ha (vlevo) a 38 ha (vpravo) pozemek z historických výnosových map (2004-2009)

4. Využití sensorového měření při variabilní aplikaci hnojiv a přípravků na ochranu rostlin

Implementace spektrálního měření do pěstebních technologií zemědělských plodin vychází ze schopnosti sensorových systémů detekovat rozdíly ve stavu porostu, ať z hlediska rozdílného množství nadzemní hmoty rostlin (biomasy), tak stavu fotosyntetického aparátu a obsahu chlorofylu. Toho je využíváno pro diagnostiku výživného stavu rostlin a doporučení aplikace dusíkatých hnojiv, dále pro stanovení hustoty porostu a aplikaci regulátorů růstu či fungicidních látek nebo pro stanovení intenzity zaplevelení na základě pokryvnosti plevelných rostlin na půdě a aplikaci herbicidů. Kromě uvedeného lze spektrální měření použít pro zachycení dynamiky vývoje porostu, identifikaci poškození porostu a predikci výnosové úrovně či kvality výsledné produkce.

4.1. Variabilní aplikace hnojiv

Primárním využitím sensorového měření při pěstování rostlin je řízení dávky při lokálně cílené aplikaci dusíkatých hnojiv. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, vychází ze z faktu, že rozdílná odrazivost porostu vypovídá o rozdílné úrovni výživy dusíkem a potřebě přihnojení.

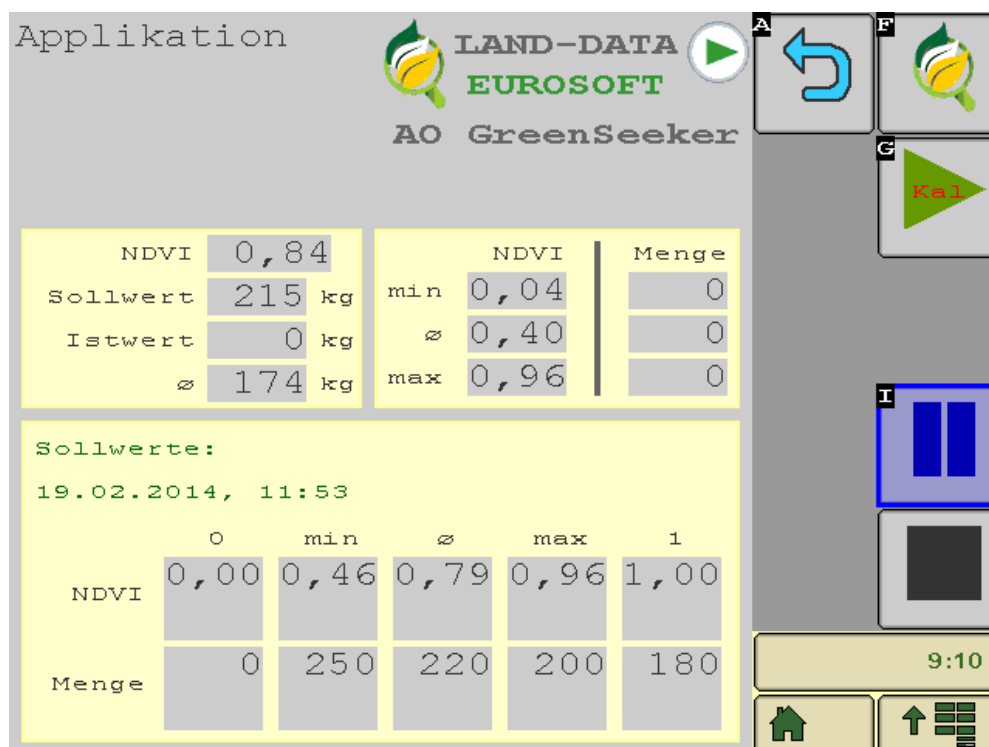


Obr. 29 Graf rozdílných přístupů při stanovení dávky variabilně aplikovaných hnojiv

Uniformní aplikace – stejná dávka bez zohlednění rozdílů porostu. Dávka je stanovena na základě průměrných hodnot diagnostiky výživného stavu rostlin na pozemku. Při stanovení dávky se nebere v úvahu prostorová nevyrovnanost porostu a členění pozemku do zón s rozdílnou úrovní dosahovaného výnosu plodin.

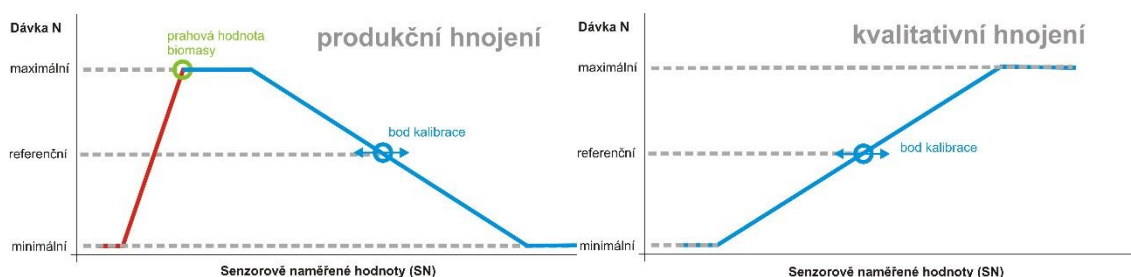
Variabilní aplikace dle sensorového hodnocení aktuálního stavu porostů

Vychází z online nebo offline diagnostiky výživného stavu rostlin na základě vyhodnocení zaznamenaných hodnot vegetačních indexů. Standardním přístupem je snižování dávky se zvyšující se hodnotou vegetačních indexů (NDVI, NRERI, NDRE, REIP, IRMI). Vyšší dávka přihnojení je nastavena pro porost vykazující horší vlastnosti a naopak pro porost v lepší kondici je doporučena nižší dávka hnojení. Cílem je tedy podpořit hnojením slabší porost. V případě online sensorového měření jsou minimální, průměrné a maximální hodnoty sensorového měření získány kalibračním průjezdem po pozemku. Pro nejnižší naměřené hodnoty, reprezentující poškozený porost, lze nastavit nulovou dávku pro zajištění efektivního využití hnojiva na produkci výnosu.



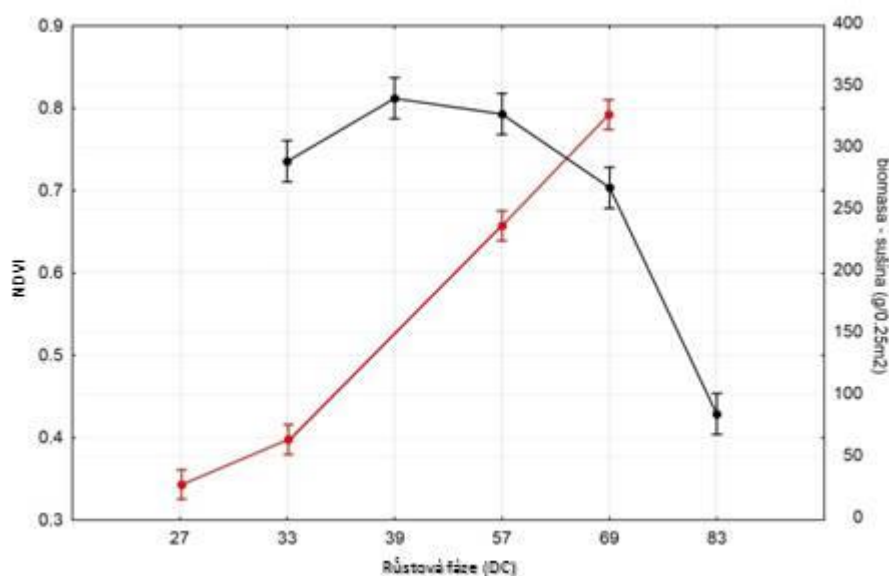
Obr. 30 Obrazovka terminálu ISOBOX přístroje Trimble Greenseeker se stanovením dávky hnojení dle online měření NDVI porostu v pěti bodech – nulové, minimální naměřené, průměrné, maximální naměřené a maximální možné hodnoty NDVI. Naměřené hodnoty NDVI jsou získány kalibračním průjezdem po pozemku.

U obilnin jsou uplatňovány rozdílné přístupy ve výživě rostlin N na základě sensorového měření v různých fázích vývoje porostu. Obecně platí, že v případě produkčního hnojení (DC 30 – 50) je se zvyšujícími se hodnotami sensorového měření dávka N snižována. Jak ukazuje Obr. 31 pro slabší porosty (s nižší naměřenými hodnotami vegetančního indexu) je dávka zvyšována až do jejího maxima, poté s nárůstem naměřených hodnot je porost považován za dostatečně a dávka je snižována. U kvalitativního hnojení je ale situace jiná. Pro příjem N v kapalně formě v dané fázi je zapotřebí dostatečného výskytu zelených částí rostlin, kterými je dusík v kapalných hnojivech přijímán. Čím více je porost tmavší a zelenější, tím vyšší dávka N může být aplikována. Postup je tedy přesně opačný – se zvyšujícími se naměřenými hodnotami se aplikační dávka zvyšuje až do dosažení její maximální hodnoty.



Obr. 31 Princip stanovení dávky N pro produkční (vlevo) a kvalitativní (vpravo) hnojení přístrojem Yara N-Sensor (www.agricon.de)

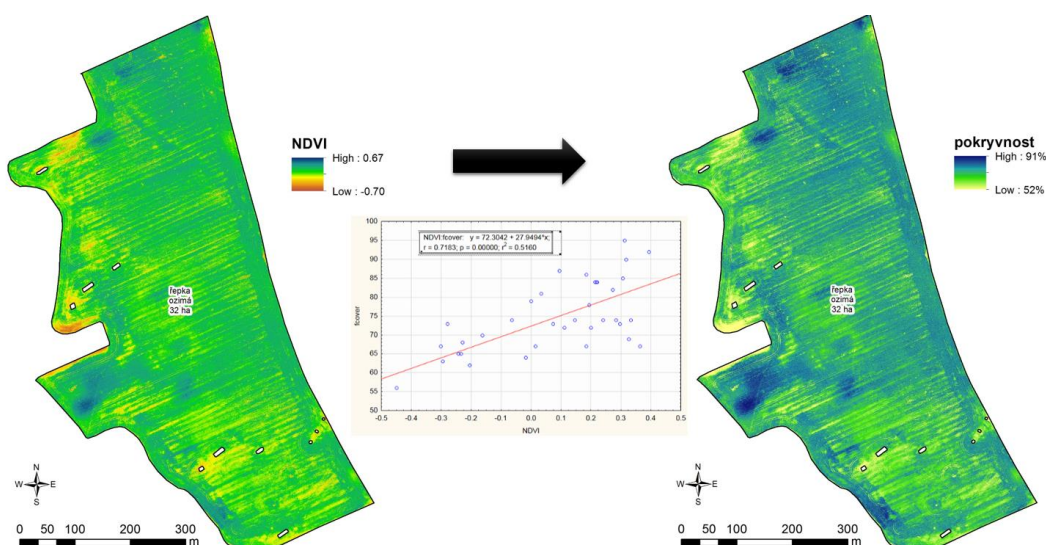
Spolehlivost diagnostiky výživného stavu je daná těsností vztahu mezi vegetačními indexy a obsahu dusíku v rostlinách, či množství nadzemní biomasy; obojí kombinované v odběru dusíku na jednotku plochy. V případě NDVI je dobře popsán tzv. saturační efekt, ke kterému dochází při vysoké indexu listové plochy porostu (LAI). Při dosažení určitého stupně LAI se již NDVI nemění, dochází k nasycení, kdy zvyšující se hustota porostu již není pomocí NDVI indikována (Obr. 32) a snižuje se tak citlivost zachycení rozdílů v porostu. Nárůst biomasy způsobuje zvýšení NIR záření, neboť je porostem transmitováno a jen nepatrně absorbováno. Jedná se tedy o reflektanci z celého objemu porostu. Naproti tomu většina červeného záření je absorbována a to zejména listy horního patra porostu. Odrazivost má tedy povrchový charakter, navíc po zapojení porostu je červeném záření maximálně využíváno, proto s rostoucí biomasou se jeho odrazivost dále nesnižuje. Tento jev lze redukovat použitím úzce pásmových vegetačních indexů vypočtených z red edge oblasti elektromagnetického záření, které vykazují vyšší citlivost na změny vegetace. Jedná se např. o vegetační indexy na způsob Red Edge Inflection Point (IRMI – Isaria), NDRE (např. OptRx) či NRERI (Klem et al., 2011).



Obr. 32 Graf nasyčení NDVI při narůstajícím množství nadzemní hmoty v průběhu vegetace pšenice ozimé (Neudert et al., 2015)

Strategie vyhodnocení spektrálního měření se liší dle plodiny. Implementaci vegetačních indexů pro optimalizaci výživy **ječmene jarního** podrobně popisují (Klem et al., 2014). Vychází ze stanovení indexu výživy dusíkem (Nitrogen Nutrition Index - NNI) vegetačním indexem NRERI či NDVI a stanovení kritické koncentrace dusíku v sušině v závislosti na hmotnosti sušiny nadzemní biomasy z tzv. zředovací křivky. Hodnoty NNI > 1 značí nadbytečnou úroveň dusíkaté výživy, NNI = 1 optimální výživný stav a NNI < 1 nedostatečnou výživu dusíkem. Pro **řepku ozimou** lze využít pro přihnojování během vegetace provedení sensorového měření na podzim, které stanoví dávku hnojení dle vyhodnocení pokryvnosti a hustoty porostu. Vlastní aplikace dusíkatých hnojiv pro regeneraci rostlin je pak provedena v obvyklém časně jarním

termínu, který by z důvodu snížené listové plochy rostlin a špatných povětrnostních podmínek (výskyt sněhu či námrazy) výrazně znesnadňoval optické měření.



Obr. 33 Stanovení pokryvnosti porostu řepky ozimé z NDVI snímku a pozemního hodnocení porostu. Snímek byl pořízen společností DATA PROCON s.r.o. koncem února 2016 bezpilotním letounem Sensefly eBee a kamerou MULTISPEC4C

Postup sensorového měření u ostatních plodin se liší dle použitého sensorového systému. Zpravidla je doporučena **volná kalibrace** průjezdem po reprezentativní části porostu (jednobodová referenční kalibrace) nebo dvoubodová kalibrace zaznamenávající minimální a maximální hodnoty vegetačních indexů pro porost ve špatné a velmi dobré kondici. Následně je uživatelem stanovena průměrná, minimální a maximální dávka hnojení v souladu se strategií posílení slabých rostlin nebo naopak nahnojení potenciálně výnosných částí porostu. Některé systémy doporučují používat na pozemcích referenční pás s maximální dávkou hnojení, kde rostliny nemohou vykazovat deficit výživy dusíkem, tzv. **N-rich strip**. Tento pás slouží následně jako referenční hodnota při interpretaci měření (např. Trimble Greenseeker).

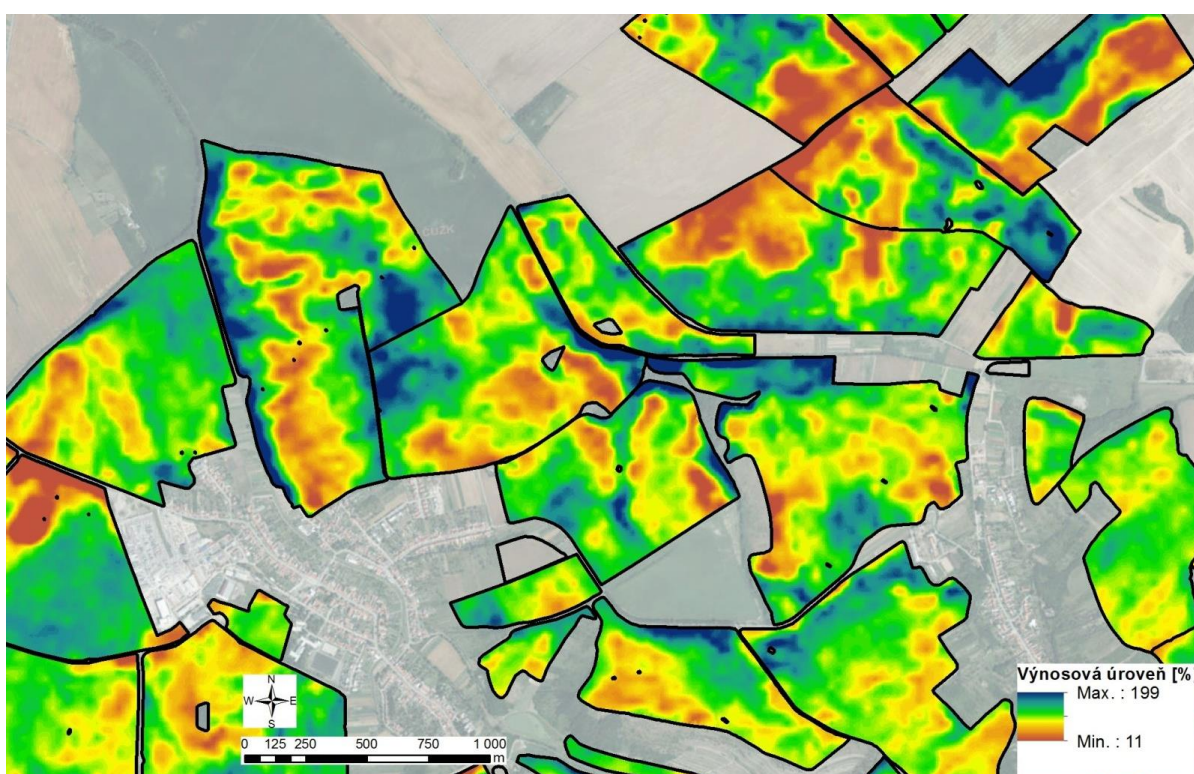


Obr. 34 Referenční pás s maximální dávkou dusíkatých hnojiv (N-rich strip).

Zdroj: <http://www.nue.okstate.edu>

Variabilní aplikace dle podkladové mapy výnosové úrovně

Při tomto způsobu stanovení dávky hnojení se vychází ze znalosti rozložení výnosové úrovně dosahované na pozemcích v uplynulých ročnících. Nabízí se využití víceletých výnosových map získaných záznamem hodnot výnosoměrného čidla při sklizni plodin, které je ale nutné předzpracovat – odstranit chybové a odlehlé hodnoty. Postup zpracování výnosových záznamů uvádí např. Ping a Dobermann (2005), Mirschel et al. (2014), Simbahan et al. (2004) a Lyle et al. (2014). Širůček (2014) ve své práci popisuje implementaci pěti kroků filtrování výnosových dat a porovnává takto zpracované výnosové mapy s multispektrálními snímky z družice Landsat. V případě absence výnosových záznamů lze produkční zóny definovat identifikací nevyrovnanosti porostů z dat DPZ nebo kombinací map výnos určujících půdních vlastností (Fleming et al., 2000).

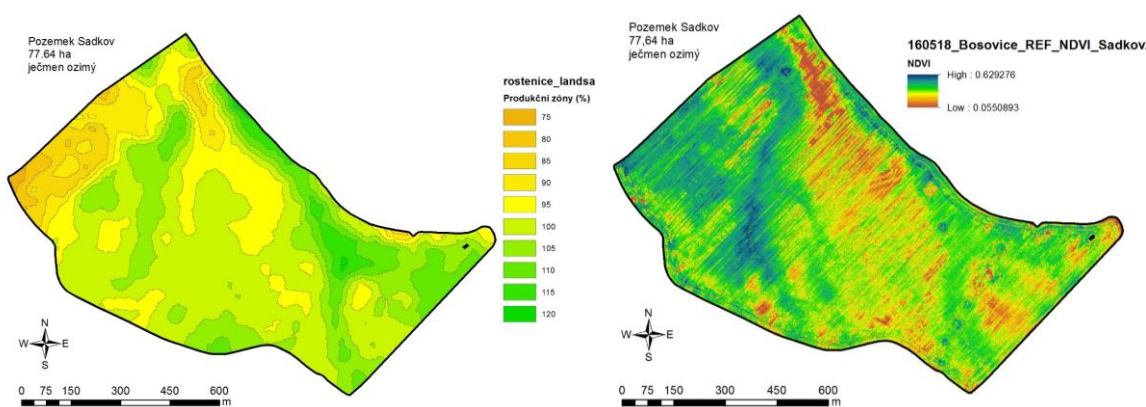


Obr. 35 Příklad výnosové úrovně (potenciálního výnosu) stanovené pomocí časové řady družicových dat

Výchozím předpokladem při aplikaci hnojiv dle podkladové mapy potenciálního výnosu je zvýšení dávky hnojení na místech s vyšším očekávaným výnosem. Výše maximální dávky je stanovena s ohledem na odběr živiny a průběhu povětrnostních podmínek v daném roce. V některých ročnících může dojít k riziku poléhání porostu v zónách s nejvyšší výnosem, jak je znázorněno na obr. 35.

Variabilní aplikace kombinující online sensorové měření s podkladovou mapou potenciálního výnosu (map overlay)

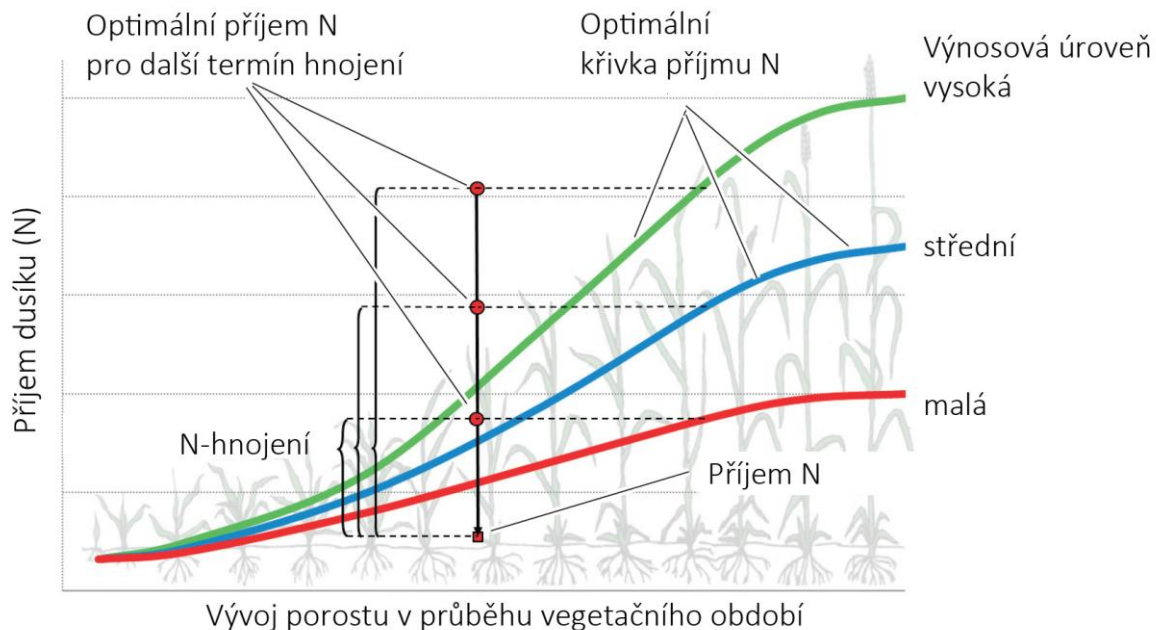
Podstatou je zohlednění rozložení dosažitelné úrovně výnosu (potenciálního výnosu - yield potential) na pozemku při stanovení dávky dusíku ze sensorové diagnostiky porostu. Dávka dusíkatých hnojiv doporučená ze sensorového systému je upravena dle očekávaného výnosu v dané části pozemku. Cílem je hnojením podpořit porost s předpokladem dosažení vyššího výnosu. Naopak na místech s očekávaným nižším výnosem je dávka snižována. Takto lze řešit obvyklou tendenci sensorových systémů zvyšovat dávku hnojení u horších porostů. K tomuto zvýšení dávky ale dojde pouze, pokud stanovištní podmínky dávají předpoklad dosažení vyššího výnosu. Nedochozí tedy ke srovnání porostu, ale k diferenciaci dle očekávané výše a kvality produkce.



Obr. 36 Porovnání mapy produkčních zón s procentuálním rozložením potenciálního výnosu stanoveného z družicových dat LANDSAT za 8 leté období (vlevo) a hodnocením stavu porostu ječmene ozimého pomocí bezpilotního průzkumu dronem Sensefly eBee ve fázi metání (vpravo). Pozemek vykazuje prostorové členění (produkční zóny) identifikovatelné na obou mapách. Nesouhlas mezi přesným vymezením zón ukazuje na rozdíly daného ročníku a potvrzuje nezbytnost sensorového měření v dané vegetační fázi hodnocení porostu

Podkladová mapa potenciálního výnosu je využívána některými sensorovými systémy pro stanovení dávky dusíkatého hnojení bez kalibračního měření na pozemku. Např. Fritzmeier Isaria nabízí tzv. absolutní mód měření, kdy je dávka hnojiva určena na základě křivky optimálního obsahu dusíku pro rozdílnou výnosovou úroveň (Obr. 37). Výnosová úroveň je definovaná podkladovou mapou potenciálního výnosu na pozemku (vyjádřeno procentuálně vůči průměru pozemku) a hodnotou očekávaného výnosu v daném roce.

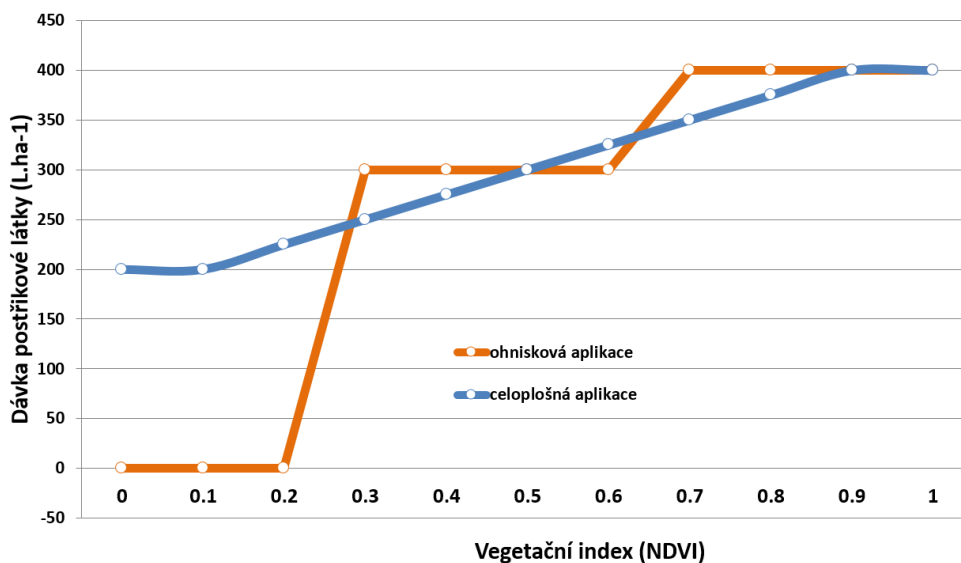
Ve spolupráci se společností AGROTEC a.s., Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG a zemědělským podnikem SALIX Morava a.s. bylo v roce 2015 a 2016 provedeno ověření sensorového systému Fritzmeier ISARIA v polních podmínkách a vyhodnocení vlivu rozdílného způsobu variabilní aplikace dusíkatých hnojiv u pšenice ozimé na výnos a kvalitativní parametry zrna. Výsledky hodnocení jsou uvedeny v kapitole V. Ekonomické aspekty.



Obr. 37 Křivka příjmu dusíku rostlinami pro jednotlivé výnosové úrovně (www.fritzmeier.de)

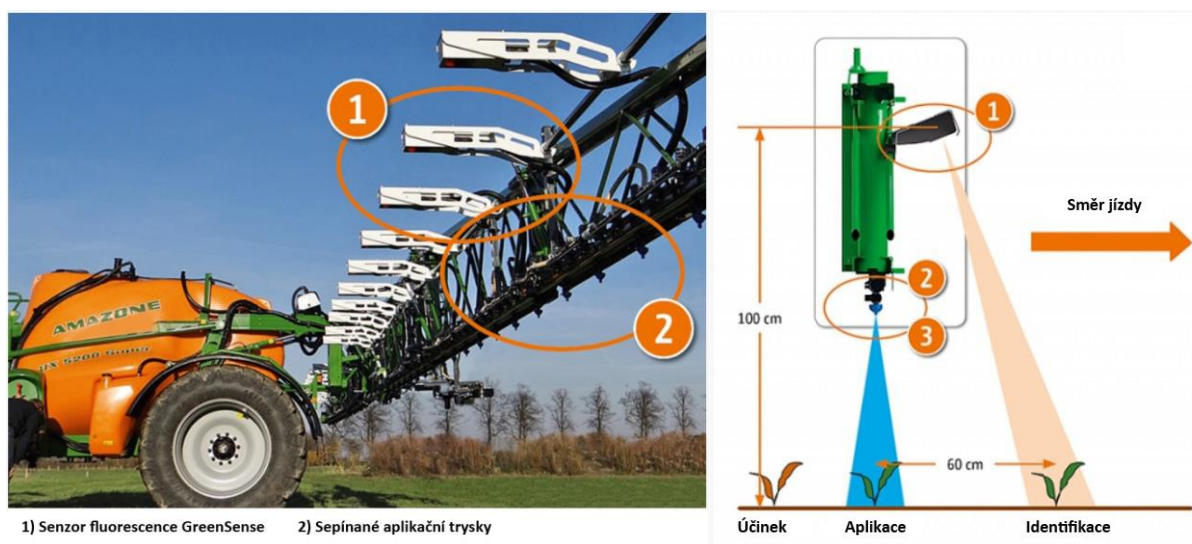
4.2. Variabilní aplikace přípravků na ochranu rostlin – fungicidy, herbicidy a regulátory růstu

Aplikace přípravků na ochranu rostlin může být provedena formou ohniskové aplikace, při které je postřik aplikován pouze tam, kde je detekován škodlivý organismus. Druhou možností je celoplošná aplikace s řízením výše dávky postřikové látky.



Obr. 38 Schématická křivka změny dávky postřikové látky v závislosti na sensorovém měření – pro ohniskovou a celoplošnou aplikaci

V současnosti vychází variabilní aplikace přípravků na ochranu rostlin z nepřímého sledování množství nadzemní biomasy rostlin pomocí spektrálních měření a následného stanovení pokryvnosti, hustoty nebo LAI porostu. Vyšší hodnoty vegetačních indexů indikují výskyt zelených rostlin na daném místě (plevelé, desikace) nebo hustější porost (fungicidy, regulátory růstu), což v obou případech představuje zvýšení postřikové dávky. Zpravidla jsou využívány stejné senzorové systémy jako pro diagnostiku výživného stavu, či jejich modifikace.

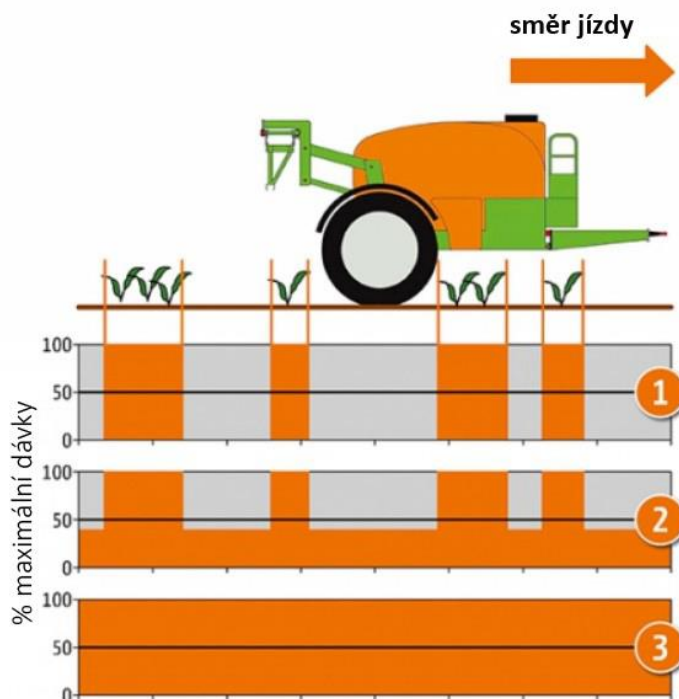


Obr. 39 Řízení postřikové dávky Amazone AmaSpot – čidla GreenSense na ramenu postřikovače a schéma principu měření (www.amazone.de)

V případě aplikace **herbicidních látek** se nejčastěji vychází ze schopnosti senzorových systémů detekovat vegetaci v zorném poli čidla či ze snímků DPZ. Z toho vyplývá, že tyto postupy jsou uplatnitelné zejména pro aplikaci totálních herbicidů. Takto pracuje např. systém AmaSpot na postřikovačích Amazone. Na ramenech jsou instalovány senzory fluorescence vegetace GreenSense, které dávají impuls pro sepnutí trysek až do rychlosti pojezdu 20 km/h (Obr. 39). Vlastní dávkování je odvislé od režimů aplikace – striktně ohniskové (0 nebo 100% dávka) nebo celoplošná nízká dávka (40%) se zvýšením v místech vyššího zaplevelení (na 100%) – viz Obr. 40.

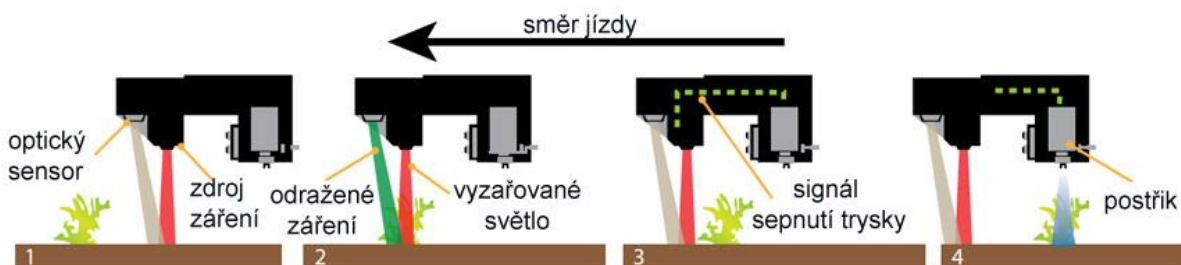
Režimy aplikace

- 1** vypnuto/zapnuto
 - nejvyšší úspora
 - riziko ponechání plevelů
- 2** vypnuto/zapnuto s minimální dávkou
 - vysoká úspora
 - vysoká účinnost
- 3** celoplošná dávka
 - bez úspory postřiku
 - pro případy kdy nelze dávku redukovat



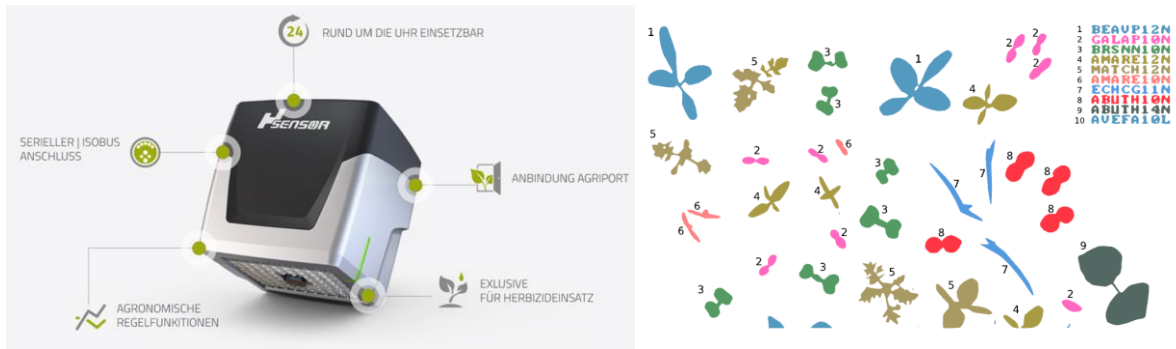
Obr. 40 Režimy řízení aplikace herbicidu systémem Amazone AmaSpot

Obdobným způsobem je řízena aplikace totálních herbicidů systémem Trimble Weedseeker, který je modifikovanou verzí Greenseeker. Navíc je vybaven tryskou s elektromagnetickým ventilem pro aplikaci postřikové látky (Obr. 41).



Obr. 41 Senzor Trimble Weedseeker pro identifikaci zaplevelení a současnou aplikaci totálních herbicidů (www.trimble.com)

Výjimku představuje H-Sensor od německé firmy Agricon GmbH., který detekuje jednotlivé plevelné druhy rostlin na základě objektové analýzy obrazu. Princip určování plevelných rostlin na základě tvaru listů a spektrálních příznaků popisují Weis a Sökefeld (2010). Systém je tak určen i pro aplikaci selektivních herbicidů v raných stádiích růstu plodiny.



Obr. 42 H-sensor pro určování plevelných rostlin (vlevo) a princip detekce plevelů objektovou analýzou obrazu (vpravo) (Weis et al., 2008)

III. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Předkládaná metodika poskytuje informace o možnostech optimalizace hnojení plodin formou variabilní aplikace hnojiv a pesticidů. Pro tento účel je zde uveden souhrn postupů stanovení dávky s ohledem na produktivitu stanoviště a jsou popsány současné metody diagnostiky výživného stavu rostlin a struktury porostu na základě nejnovějších metod sensorového mapování stavu porostů pomocí měření spektrálních charakteristik vegetace. Výsledkem těchto postupů je lokálně cílená aplikace dusíkatých hnojiv a pesticidů, která představuje efektivní využívání těchto látek s ohledem na agroenvironmentální podmínky daného místa, optimalizace kvality produkce a snížení kontaminace životního prostředí.

IV. POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY

Metodika zahrnuje komplexní pohled na uváděnou problematiku a obsahuje nejnovější údaje z výzkumu, které mohou sloužit nejen zemědělské praxi při pěstování plodin, ale také může posloužit jako vhodný materiál pro výuku na středních školách nebo univerzitách se zemědělským zaměřením nebo jako podklad pro zemědělské poradce.

V. EKONOMICKÉ ASPEKTY

Přesné vyčíslení ekonomického přínosu postupů, uvedených v metodice je obtížné, neboť se jedná o kombinaci položek environmentálních, zemědělských i celospolečenských.

Chemické látky používané v rostlinné produkci jsou hlavními zdroji plošného zemědělského znečištění vod. Předpokládané náklady na dosažení cílů ochrany vod jako složky životního prostředí pomocí opatření regulujících znečištění z plošných zdrojů znečištění jsou odhadovány v řádu miliard korun ročně. Předkládaná metodika má výrazný potenciál přispět ke snížení této částky tím, že lze metodou přesně vymezit části území s potenciálním rizikem přehnojení dusíkem, kde lze následně uplatnit odpovídající opatření ke snížení tohoto rizika. Vzhledem k závažnosti a složitosti problematiky vyplavení agrochemikálií nelze předpokládat, že ke zlepšení stavu vod z hlediska zatížení těmito látkami dojde v krátkém časovém úseku, naopak je pravděpodobné, že v závislosti na podmínkách a velikosti povodí se bude nejčastěji jednat o řád roků.

Riziko vysokých ztrát N představují tzv. kritické zdrojové lokality s vysokou infiltrační schopností a hydrologickou konektivitou. Ochranu vod z hlediska zemědělského znečištění dusičnany řeší Směrnice Rady 91/676/EHS o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů (Nitrátová směrnice), která je v ČR uplatněna nař. vl. č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programem. Zvyšování maximálních hodnot dusičnanů v řadě oblastí, zejména povrchových vod, může mít příčinu v nedostatečném zohlednění variability lokalit, tzn. v nedostatečné diferenciaci dávek dusíku podle půdní a výnosové variability. Příčinou může být i celkové zvyšování dávek N v poslední době. Z hlediska množství aplikovaných dávek předložená metodika navrhuje princip korekce senzorového měření dle hodnoty výnosového potenciálu z podkladové mapy – v místech s nižším očekávaným výnosem jsou aplikovány nižší dávky hnojiva a naopak. Paušální dávka představuje situaci, kdy místa s předpokládaným nižším výnosem jsou přehnojována a naopak místa s očekávaným vysokým výnosem nedohnojena.

Ekonomické přínosy metodiky vycházejí z integrace efektivity vstupů do rostlinné výroby a ochrany vod před znečištěním z plošných zemědělských zdrojů pomocí inovativních postupů hospodaření. Cílený management hnojiv a pesticidů zohledňující půdní a výnosovou variabilitu bude mít ekonomický přínos pro koncové uživatele (zemědělce), neboť zvýší jejich tržby prostřednictvím zvýšení výnosů plodin a kvality produktů variabilní aplikací hnojiv (do 3 %) a sníží spotřebu agrochemikálií. Další přínos projektu je v souladu s všeobecným zájmem celé společnosti v oblasti ochrany životního prostředí.

Příklad z praxe

Ekonomické vyhodnocení pozitivních aspektů zavedení předkládaných metodických postupů bylo provedeno ve spolupráci s firmou AGROTEC a.s. a Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG v poloprovozních polním experimentu na 72ha pozemku obhospodařovaného

zemědělskou společností SALIX MORAVA a.s. Předmětem polního experimentu bylo ověření sensorového systému Fritzeier Isaria v polních podmínkách a vyhodnocení vlivu rozdílného způsobu variabilní aplikace dusíkatých hnojiv u pšenice ozimé na výnos a kvalitativní parametry zrna.

V roce 2016 bylo ověřováno pět variant režimů aplikace dusíkatých hnojiv v pevné formě pro produkční (N2, UREA stabil) a kvalitativní (N3, LAD) přihnojení pšenice ozimé:

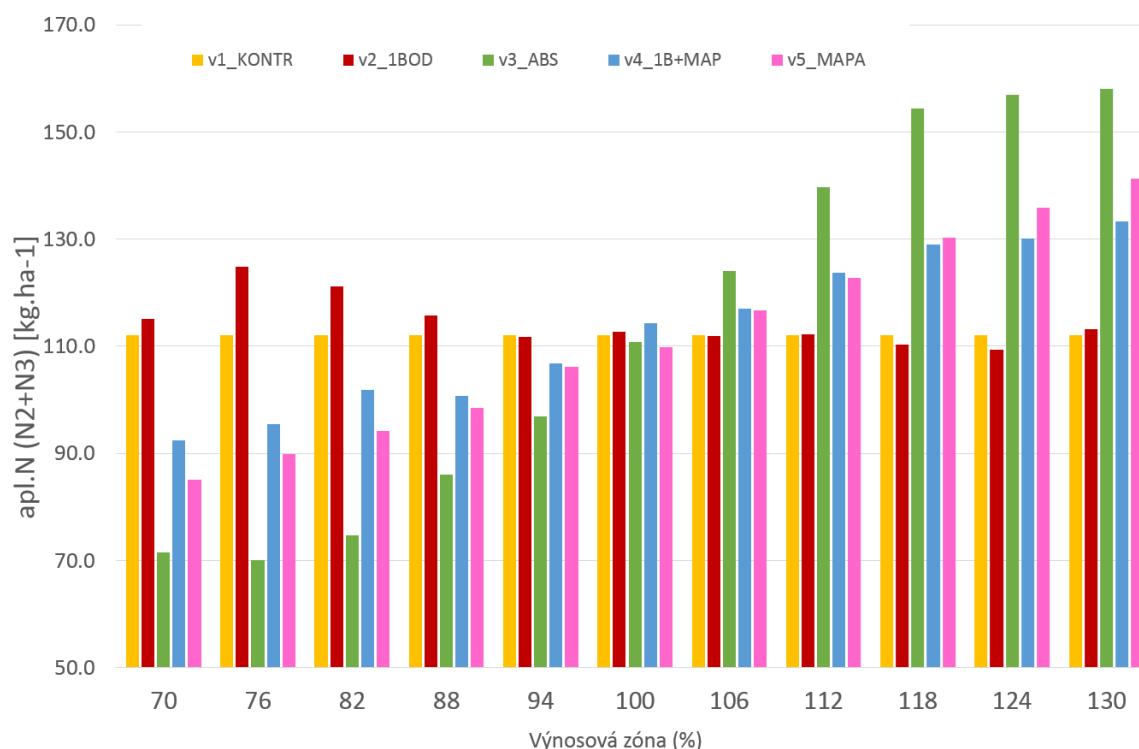
Varianta 1 – **kontrola** (v1_KONTR) - uniformní hnojení dle doporučení agronoma bez zohlednění lokálních rozdílů porostu

Varianta 2 – **1bodový modus bez mapy** (v2_1BOD) – stanovení dávky hnojení na základě online sensorového měření

Varianta 3 – **absolutní modus s mapou** (v3_ABS) - stanovení dávky hnojení na základě online sensorového měření a mapového podkladu s výnosovým potenciálem

Varianta 4 – **1bodový mod s mapou** (v4_1B+MAP) – stanovení dávky na základě kombinace jednobodové kalibrace online sensorového systému s podkladovou mapou

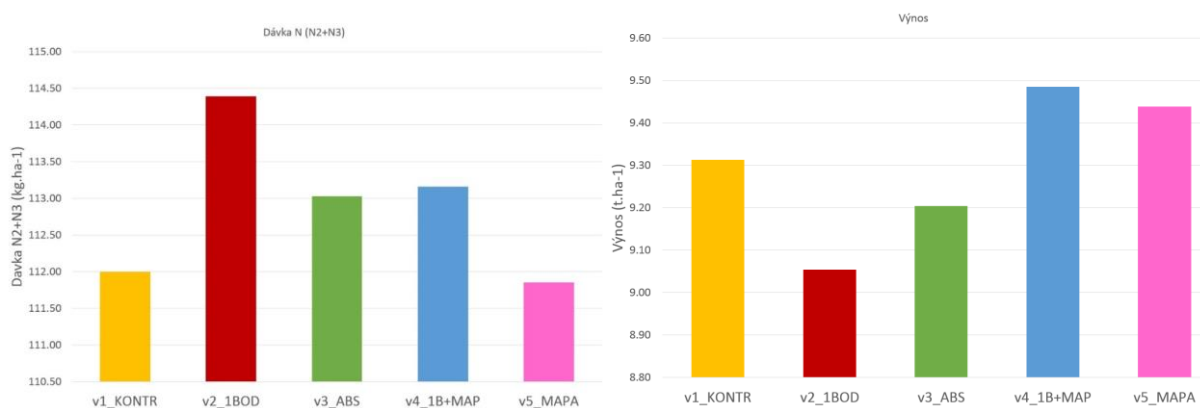
Varianta 5 – **podkladová mapa** (v5_MAPA) – stanovení dávky hnojení na základě doporučení agronoma se zohledněním rozdílu výnosového potenciálu na pozemku



Obr. 43 Graf souhrnu N2 a N3 dávky dusíku pro jednotlivé varianty pokusu a výnosové zóny pozemku

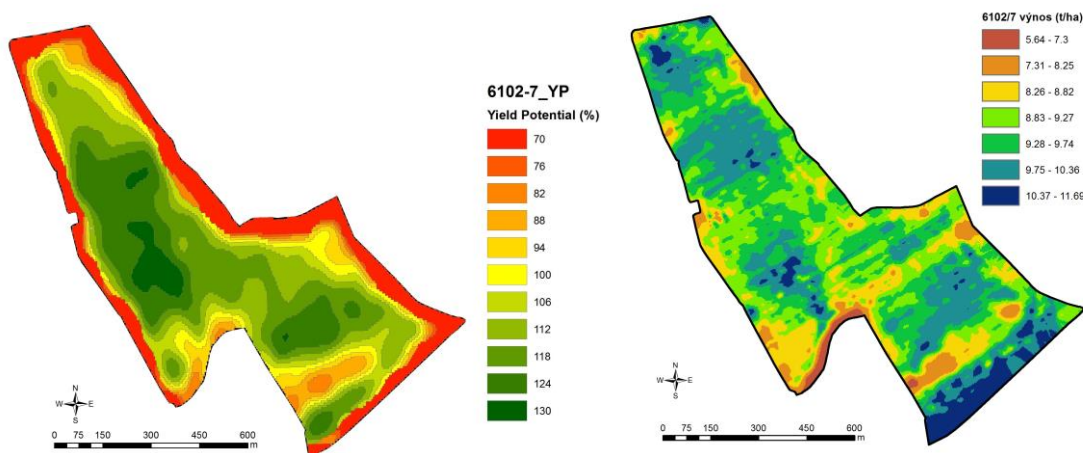
Hodnoty dávek aplikace obou hnojení, znázorněné v grafu na Obr. 43 ukazují na rozdíly mezi módy řízení dávkování hnojiva při aplikaci. Při jednobodovém módu (v2_1BOD) byl součet N2 a N3 dávek na pozemku Čtvrtě u Zdounek přibližně ve stejné výši dávek napříč

výnosovými zónami a odpovídalo tak uniformní aplikaci kontrolní varianty v1_KONTR. Hodnocení jednotlivých aplikací ukázalo, že při N2 byly mírně vyšší dávky v oblastech s nižším očekávaným výnosem, zatímco při kvalitativním hnojení (N3) byly vyšší dávky cíleny do oblasti s vyšším výnosovým potenciálem. Ostatní varianty variabilní aplikace byly ovlivněny hodnotou výnosové zóny, která odpovídá základnímu principu kombinace sensorového měření s mapovým podkladem, které zvyšuje dávku na místech s vyšším potenciálem výnosu a naopak snižuje v méně úrodných částech pozemku. Nejvýraznější rozdíly napříč definovanými výnosovými zónami byly zaznamenány u Absolutního módu s mapovým podkladem (V3_ABS), který dávku při produkčním hnojení na nadprůměrně výnosných částech pozemku výrazně zvýšil (či snížil na výnosově podprůměrných) v porovnání s jednobodovým módem s podkladovou mapou (v4_1B+MAP) a aplikací pouze dle podkladové mapy (v5_MAPA).



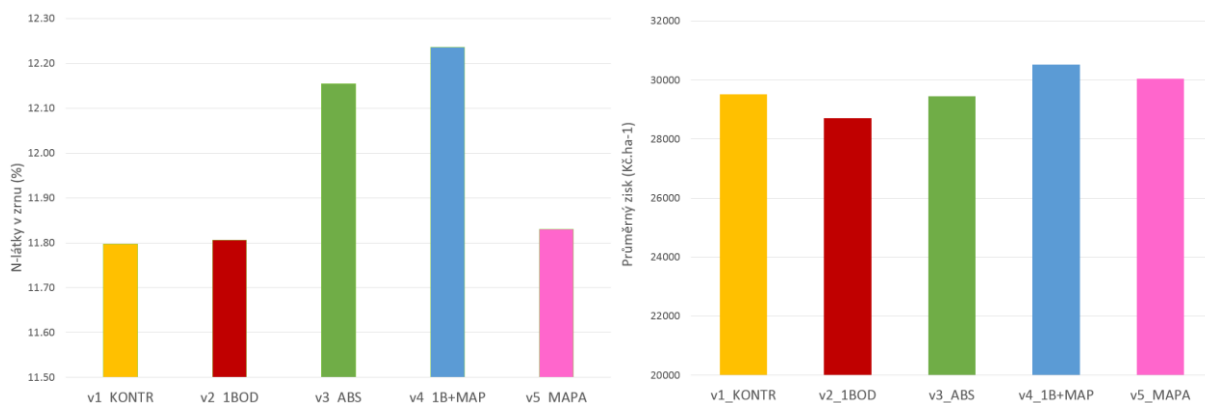
Obr. 44 Sumární graf aplikovaného dusíku v N2 a N3 hnojení pro jednotlivé varianty (vlevo) a dosažený výnos (vpravo)

Z hlediska hodnocení sklizně byl průměrný dosažený výnos vyšší než původní očekávaný. Plánovaný výnos byl stanoven na 8,5 t·ha⁻¹, zatímco průměrný dosažený byl 9,3 t·ha⁻¹. V porovnání s očekávaným rozložením výnosu zrna v jednotlivých úrovních výnosového potenciálu byl dosažený výnos vyrovnaný - na zónách nižšího výnosu byl zaznamenán vyšší výnos, naproti tomu na zónách očekávaného vyššího výnosu byl dosažený výnos nižší.



Obr. 45 Mapa potenciálního výnosu od dodavatele sensorového systému (vlevo) a mapa výnosu zrna zaznamenaného při sklizni plodiny (vpravo)

Prostorové rozložení výnosového potenciálu a výnosové mapy ze sklizně přitom vykazuje obdobné prostorové struktury, s výjimkou souvrátí pozemků, které jsou u výnosového potenciálu označeny jako silně podprůměrné (Obr. 45). Nejvyššího výnosu bylo dosaženo u varianty v4_1BOD; rozpětí průměrných hodnot výnosu pro varianty bylo přibližně 0,5 t·ha⁻¹.



Obr. 46 Souhrnný graf průměrného obsahu N-látek v zrnu (vlevo) a průměrného zisku (vpravo) pro jednotlivé varianty experimentu

Modelové ekonomické porovnání aplikace dusíkatých hnojiv ukázalo významně vyšší tržby a zisk i přes průměrně nižší ocenění zrna dle obsahu N-látek. Nejvyšší průměrný zisk byl dosažen u varianty jednobodové kalibrace s podkladovou mapou (v4_1B+MAP), naopak nejnižší pro jednobodovou kalibraci bez mapy (v2_1BOD). Srovnání s kontrolní variantou ukazuje na nejvyšší rozdíl u varianty v4 413,- Kč na ha a varianty v5_MAPA 225,- Kč na ha. Varianty v2 a v3 vykázaly naopak nižší zisk než kontrola (o -715,- Kč na ha pro v3 a -420,- Kč pro v2).

Závěr

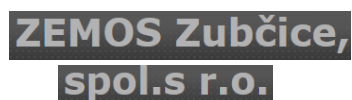
Z hlediska množství aplikovaných dávek byl potvrzen princip korekce sensorového měření dle hodnoty výnosového potenciálu z podkladové mapy – v místech s nižším očekávaným výnosem byly aplikovány nižší dávky hnojiva a naopak. Paušální dávka kontrolní varianty tak představuje situaci, kdy místa s předpokládaným nižším výnosem jsou přehnojována a naopak místa s očekávaným vysokým výnosem nedohnojena. To se ukázalo zejména při porovnání variant se stejným způsobem kalibrace (jednobodový mód) v režimu bez (v2) nebo s (v4) podkladovou mapou výnosového potenciálu. Rozložení dosaženého výnosu zrna v rámci pozemku odpovídalo rozložení zón dle mapy výnosového potenciálu, avšak rozdíl dosaženého výnosu mezi nejnižšími a nejvyššími zónami nebyl tak výrazný, jak hodnoty výnosového potenciálu přepokládaly. Realizovaný průměrný výnos zrna byl vůči plánovanému vyšší o $0,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. To také odráží potřebu hodnocení aktuálního stavu porostů, neboť nelze spoléhat na shodný průběh vývoje a růstu rostlin a jejich výživného stavu mezi jednotlivými ročníky. Porovnání s kontrolní variantou pro tento pozemek pak ukazuje mírné zvýšení zisku u variant variabilní aplikace hnojiv s podkladovou mapou výnosového potenciálu, nejvíce v případě jednobodové kalibrace s mapou (v4_1B+MAP), zatímco aplikace pouze na základě sensorového měření (v2_1BOD) vykazala mírnou ztrátu zisku vůči kontrolní variantě.

Jak ukázal příklad z praxe, míru přímých ekonomických úspor u ostatních výrobních podniků je nutné posuzovat a odhadovat diferencovaně podle míry intenzifikace, kterou již daný podnik v oblasti užití hnojiv a pesticidů dosáhl. Podniky, které v minulosti neinvestovaly do rozvoje produkční schopnosti půdy hnojením ani do péče o základy půdní úrodnosti, mohou dokonce předkládaná doporučení vyhodnotit jako citelně nákladnější, než kolik doposud činila jejich zavedená výrobní praxe. Návrhy optimalizovaných dávek hnojiv a pesticidů mají potenciál vytvořit zisk ve výši cca 300 – 500 Kč/ha. Ekonomické aspekty v širším měřítku budou záležet na rozsahu (výměře pozemků), na jejich variabilitě a celkové úrovni hospodaření podniků, kde metodika nalezne reálné praktické uplatnění.

VI. PODĚKOVÁNÍ

Metodika je součástí řešení výzkumných projektů Technologické agentury ČR č. TA04021389 „Vývoj systému pro variabilní dávkování pesticidů a hnojiv na základě senzorového monitoringu porostních podmínek“ (podíl na vzniku metodiky 70 %) a Ministerstva zemědělství ČR NAZV č. QJ1610289 „Optimalizace využití produkčního potenciálu půdy lokálně cílenou agrotechnikou“ (podíl na vzniku metodiky 30 %).

Metodika zahrnuje dílčí výsledky polních experimentů na pozemcích obhospodařovaných zemědělskými podniky ROSTĚNICE, a.s., SALIX MORAVA a.s. a ZEMOS Zubčice, spol. s r.o. Testování pozemních a dálkových senzorových systémů bylo provedeno ve spolupráci se společnostmi AGRIO MZS s.r.o., AGROTEC a.s., DATA PROCON, s.r.o., Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG, FarmFacts GmbH a sdružením Wirelessinfo.



VII. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., Bareth, G. Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. *Remote Sensing*. 2014, vol. 6, no. 11, pp. 10395-10412. ISSN 2072-4292
- Blackmore, S., Godwin, R. J., Fountas, S. The Analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. *Biosystems Engineering*. 2003, vol. 84, no. 4, pp. 455-466. 4//. ISSN 1537-5110
- Candiago, S., Remondino, F., Giglio, M. D., Dubbini, M., Gattelli, M. Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*. 2015, vol. 7, pp. 4026-4047.
- Del Pozo, S., Rodríguez-González, P., Hernández-López, D., Felipe-García, B. Vicarious Radiometric Calibration of a Multispectral Camera on Board an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing*. 2014, vol. 6, pp. 1918-1937.
- Edrees, M. M. R. H., Lukas, V., Křen, J. Determination of spectral characteristics of winter wheat canopy. In. *MendelNet2013*, 2013, p. 37-42. ISBN 978-80-7375-908-7
- Fleming, K. L., Westfall, D. G., Wiens, D. W., Brodahl, M. C. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. *Precision Agriculture*. 2000, vol. 2, no. 2, pp. 201-215. ISSN 13852256
- Fu, Y., Yang, G., Wang, J., Song, X., Feng, H. Winter wheat biomass estimation based on spectral indices, band depth analysis and partial least squares regression using hyperspectral measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2014, vol. 100, no. 0, pp. 51-59.
- Hatfield, J. L., Gitelson, A. A., Schepers, J. S., Walthall, C. L. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. *Agron J*. 2008, vol. 100, no. Supplement_3, pp. S-117-131.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*. 1998, vol. 22, no. 5, pp. 689-692. // ISSN 02731177 (ISSN)
- Klem, K., Hřivna, L., Ryant, P., Míša, P. *Využití diagnostických metod pro rozhodovací procesy v pěstební technologii jarního ječmene*. Kroměříž: Agrotest fyto, s.r.o., Kroměříž, 2011, 88 s. ISBN 978-80-904597-0-3
- Klem, K., Míša, P., Míša, M., Křen, J. *Využití měření spektrální odrazivosti a odvozených specializovaných vegetačních indexů v pěstební technologii jarního ječmene (Metodika pro zemědělskou praxi)*. Kroměříž; Brno: Agrotest fyto ; Mendelova univerzita v Brně, 2014, 44 s. ISBN 9788087555125
- Li, F., Mistele, B., Hu, Y., Chen, X., Schmidhalter, U. Reflectance estimation of canopy nitrogen content in winter wheat using optimised hyperspectral spectral indices and partial least squares regression. *European Journal of Agronomy*. 2014, vol. 52, pp. 198-209.
- Link, J., Senner, D., Claupein, W. Developing and evaluating an aerial sensor platform (ASP) to collect multispectral data for deriving management decisions in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2013, vol. 94, no. 0, pp. 20-28.

- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J., Širůček, P., Kramář, M., Rodriguez Moreno, F., Zemek, F. Využití dálkového průzkumu pro hodnocení stavu porostů zemědělských plodin. *Úroda*. 2016, vol. 64, no. 12, pp. 67-73. ISSN 0139-6013
- Lukas, V., Ryant, P., Neudert, L., Dryšlová, T., Gnip, P., Smutný, V. *Tvorba aplikačních map pro základní hnojení plodin v precizním zemědělství*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2011, 36 s. ISBN 978-80-7375-561-4
- Lukas, V., Ryant, P., Neudert, L., Dryšlová, T., Gnip, P., Smutný, V. *Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2012, 48 s. ISBN 978-80-7375-686-4
- Lyle, G., Bryan, B. A., Ostendorf, B. Post-processing methods to eliminate erroneous grain yield measurements: review and directions for future development. *Precision Agriculture*. 2014, vol. 15, no. 4, pp. 377-402. 2014/08/01. ISSN 1385-2256
- Mirschel, W., Wieland, R., Wenkel, K.-O., Nendel, C., Guddat, C. YIELDSTAT – A spatial yield model for agricultural crops. *European Journal of Agronomy*. 2014, vol. 52, Part A, no. 0, pp. 33-46. 1//. ISSN 1161-0301
- Neudert, L., Lukas, V., Altmann, J., Dryšlová, T., Gnip, P., Holý, S., Charvát, K., Kocurek, V., Kroulík, M., Křen, J., Křivánek, Z., Loch, T., Pospíšil, J., Ryant, P., Smutný, V., Šmoldas, R., Vondra, M. *Precizní zemědělství. Technologie a metody v rostlinné produkci*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015, 240 s. ISBN 978-80-7509-311-0
- Pechanec, V., Vávra, A., Machar, I. Využití UAV technologie pro získávání dat v precizním zemědělství na příkladu ploch s cukrovou řepou. *Listy cukrov. řepař.* 2014, vol. 130, no. 5-6, pp. 162-165. ISSN 1210-3306
- Petr, J. i., kol. *Rukověť agronoma*. Praha: SZN, 1989. 688 s. ISBN 9788020900623.
- Ping, J. L., Dobermann, A. Processing of yield map data. *Precision Agriculture*. 2005, vol. 6, no. 2, pp. 193-212. ISSN 13852256
- na příkladu ploch s cukrovou řepou. *Listy cukrov. řepař.* 2014, vol. 130, no. 5-6, pp. 162-165.
- Rouse, J. W., H., H. R., A., S. J. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation*. College Station: Texas A and M University, 1974. s.
- Simbahan, G. C., Dobermann, A., Ping, J. L. Screening yield monitor data improves grain yield maps. *Agronomy Journal*. 2004, vol. 96, no. 4, pp. 1091-1102. // ISSN 00021962 (ISSN)
- Širůček, P. *Zpracování a interpretace výnosových map jako podklad pro agronomické rozhodování*. Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, 2014. 99.
- Weis, M., Gutjahr, C., Rueda Ayala, V., Gerhards, R., Ritter, C., Schölderle, F. Precision farming for weed management: techniques. *Gesunde Pflanzen*. 2008, vol. 60, no. 4, pp. 171-181. 2008/12/01. ISSN 0367-4223
- Weis, M., Sökefeld, M. Detection and identification of weeds, Precision Crop Protection - The Challenge and Use of Heterogeneity, pp. 119-134: Springer Netherlands, 2010. ISBN 9789048192779 (ISBN); 9789048192762 (ISBN)
- Zarco-Tejada, P. J., Berni, J. A. J., Suárez, L., Sepulcre-Cantó, G., Morales, F., Miller, J. R. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*. 2009, vol. 113, no. 6, pp. 1262-1275. ISSN 0034-4257

VIII. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

- Lukas, V., Novák, J., Neudert, L., Svobodová, I., Edrees, M., Bláha, O., 2015. Využití bezpilotního snímkování pro hodnocení stavu porostů obilnin v precizním zemědělství. *Úroda* LXIII, 179-183.
- Neudert, L., Lukas, V., Altmann, J., Dryšlová, T., Gnip, P., Holý, S., Charvát, K., Kocurek, V., Kroulík, M., Křen, J., Křivánek, Z., Loch, T., Pospíšil, J., Ryant, P., Smutný, V., Šmoldas, R., Vondra, M., 2015. *Precizní zemědělství. Technologie a metody v rostlinné produkci.* Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Lukas, V., Novák, J., Neudert, L., Svobodova, I., Rodriguez-Moreno, F., Edrees, M., Kren, J., 2016. The combination of UAV survey and Landsat imagery for monitoring of crop vigor in precision agriculture *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLI-B8, 953-957.
- Lukas, V., Neudert, L., Novák, J., Šírůček, P., Kramář, M., Rodriguez-Moreno, F., Zemek, F., 2016. Využití dálkového průzkumu pro hodnocení stavu porostů zemědělských plodin. *Úroda*. 2016. sv. 64, č. 12, s. 67--73. ISSN 0139-6013.

POZNÁMKY:

Název: Senzorové měření porostů zemědělských plodin pro variabilní aplikaci hnojiv a pesticidů

Autoři: Ing. Vojtěch Lukas, Ph.D.
Ing. Lubomír Neudert, Ph.D.

Vydala: Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 BRNO

Sazba, tisk: KARMÁŠEK s.r.o., K. Weise 2619, 370 04 České Budějovice

Vydání: první, 2016

Počet stran: 52

Náklad: 200 ks

Vydáno bez jazykové úpravy.

Metodika je poskytována bezplatně.

Kontakt na autora: vojtech.lukas@mendelu.cz

ISBN 978-80-7509-460-5



© Mendelova univerzita v Brně, 2016

ISBN 978-80-7509-460-5