

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Využití analýz časové řady satelitních snímků pro
optimalizaci hnojení ozimé pšenice dusíkem**

Diplomová práce

Bc. Gabriela Pekárková

Rostlinná produkce

Ing. Jindřich Černý, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci Využití analýz časové řady satelitních snímků pro optimalizaci hnojení ozimé pšenice dusíkem jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 10.4.2023

Bc. Gabriela Pekárková

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala všem, kteří mě v průběhu zpracování diplomové práce podporovali. Zejména pak vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jindřichu Černému, Ph.D. za odborné vedení práce a Ing. Josefovi Chárovi za cenné rady a podporu během zpracování.

Využití analýz časové řady satelitních snímků pro optimalizaci hnojení ozimé pšenice dusíkem

Souhrn

Cílem diplomové práce bylo vyhodnocení časových řad satelitních snímků, na jejichž základě bylo navrženo optimalizované hnojení pšenice ozimé dusíkem. Experimentální část byla provedena na pěti pozemcích společnosti Statek Chyšé s.r.o. V průběhu jarní vegetace byly odebrány vzorky rostlin pšenice ozimé na 30 různých odběrových bodech v různých zónách předem stanoveného výnosového potenciálu, u kterých bylo určeno množství rostlinné biomasy, výnos a obsah dusíku Kjeldahlovou metodou.

V průběhu zpracování byly stanoveny závislosti mezi výnosem, množstvím biomasy, obsahem dusíku a vegetačními indexy. Pro stanovení zón výnosového potenciálu byly použity snímky z družice Sentinel z let 2018–2021 pomocí kterých byl stanoven index NDVI, EVI a REIP na všech bezoblačných snímcích ve vegetačním období pšenice ozimé.

Nejvyšší stupeň korelace mezi výnosem pšenice a zónou výnosového potenciálu byl zaznamenán u potenciálu spočítaném na základě indexu EVI. Vzhledem k tomu, že tento index vykazoval i nejvyšší prostorovou variabilitu, byl využit pro výpočet finálního výnosového potenciálu.

Navrhovaný systém hnojení počítá s využitím dlouhodobého výnosového potenciálu a korekcí na aktuální stav porostu stanovený indexem EVI a REIP. Celková dávka aplikovaného dusíku byla s využitím satelitních snímků snížena průměrně o 6–13 kg N/ha.

Klíčová slova: ozimá pšenice, dusík, hnojení, satelitní snímky, vegetační indexy

Use of time series analysis of satellite images to optimize fertilization of winter wheat with nitrogen

Summary

The diploma thesis aimed to evaluate the time series of satellite images, based on which optimized fertilization of winter wheat with nitrogen was designed. The experimental part was performed on five fields in Statek Chyšé s.r.o. Three samples of winter wheat plants were taken at different growth stages at 30 different sampling points in three zones of predetermined yield potential. The evaluated characteristics included the amount of plant biomass, yield and nitrogen content, determined by the Kjeldahl method.

During processing, the dependencies between yield, amount of biomass, nitrogen content and vegetation indices were determined. Satellite images from the Sentinel from 2018 to 2021 were used to determine the zones of yield potential. Index NDVI, EVI and REIP was calculated on all cloudless images in the growing season of winter wheat.

The highest degree of correlation between wheat yield and the yield potential zone was recorded for the potential calculated based on the EVI index. This index also showed the highest spatial variability; therefore, it was used to calculate the final yield potential.

The proposed fertilization system envisages the use of long-term yield potential and corrections to the current state of the stand determined by the EVI and REIP index. Using satellite images, the total dose of applied nitrogen was reduced by 6-13 kg N / ha.

Keywords: winter wheat, nitrogen, fertilization, satellite images, vegetation indices

Obsah

1 Úvod	9
2 Cíl práce.....	10
2.1 Vědecké hypotézy	10
3 Literární rešerše.....	11
3.1 Pšenice ozimá.....	11
3.1.1 Botanika a biologie	11
3.1.2 Historie a význam	11
3.1.3 Makrofenologická stupnice	12
3.1.4 Pěstební technologie ozimé pšenice	12
3.1.4.1 Zařazení v osevním postupu	12
3.1.4.2 Výběr a zpracování půdy	13
3.1.4.3 Zakládání porostu	13
3.1.4.4 Výživa a hnojení	13
3.1.4.5 Ochrana proti škodlivým činitelům	14
3.1.4.6 Sklizeň a posklizňová úprava	15
3.1.5 Parametry a ukazatele	15
3.1.5.1 Tvorba výnosu pšenice	15
3.1.5.2 Kvalitativní ukazatele	15
3.2 Dusík.....	15
3.2.1 Dusík v půdě.....	16
3.2.2 Dusík v rostlině pšenice ozimé	17
3.2.3 Efektivita využití dusíku.....	18
3.2.3.1 Zvýšení efektivity využití dusíku	18
3.3 Mapování prostorové heterogenity.....	19
3.3.1 Digitální modely terénu	19
3.3.2 Výnosové mapy	19
3.3.2.1 Identifikace produkčních zón z výnosových map.....	20
3.3.3 Dálkový průzkum země.....	20
3.3.3.1 Družicové platformy	21
3.3.3.2 Identifikace produkčních zón z družicových dat	22
3.3.3.3 Vegetační indexy	23
3.3.3.4 Vztah vegetačních indexů a výnosu.....	26
3.3.3.5 Vztah vegetačních indexů a výživového stavu porostu	27
3.3.3.6 Vztah vegetačních indexů a množství biomasy	27

3.3.3.7	Vztah vegetačních indexů a fenologie	28
3.3.3.8	Variabilní aplikace N na základě satelitních snímků	28
3.3.4	Vliv meteorologických jevů ve vztahu k pšenici ozimé	29
4	Metodika	30
4.1.	Charakteristika stanoviště.....	30
4.1.1	Charakteristika půdních bloků	30
4.1.2	Agrotechnika.....	31
4.1.2.1	Odrůda Ponticus	31
4.2	Zpracování mapových podkladů	32
4.2.1	Zpracování vegetačních indexů a výnosového potenciálu	32
4.2.2	Zpracování výnosových dat	33
4.3	Polní část	34
4.3.1	Stanovení odběrových bodů.....	34
4.3.2	Odběr vzorků	35
4.4	Laboratorní část	36
4.4.1	Zpracování vzorků	36
4.4.2	Stanovení obsahu dusíku v rostlinách.....	36
4.4.3	Příprava vzorků a mineralizace.....	36
4.4.4	Proces stanovení obsahu dusíku	37
4.4.5	Odběr dusíku rostlinou pšenice ozimé.....	37
4.4.6	Stanovení množství biomasy	37
4.4.7	Stanovení počtu odnoží.....	38
4.5	Statistické vyhodnocení	38
4.6	Výpočet diferenciované dávky N	38
5	Výsledky	40
5.1	Vztah vegetačních indexů a výnosu	40
5.2	Vztah vegetačních indexů a výživového stavu	42
5.2.1	Vztah indexu a celkového odběru dusíku	43
5.3	Vztah vegetačních indexů a množství biomasy	44
5.4	Vztah vývojové fáze rostliny a vegetačních indexů	45
5.5	Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků	46
5.5.1	Blok 8202/4a.....	47
5.5.1.1	Výnosový potenciál.....	47
5.5.1.2	Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků	47
5.5.2	Blok 8202/4b.....	49
5.5.2.1	Výnosový potenciál.....	49
5.5.2.2	Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků	50
5.5.3	Blok 8202/a.....	51
5.5.3.1	Výnosový potenciál.....	51

5.5.3.2	Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků.....	52
5.5.4	Blok 8202/b	53
5.5.4.1	Výnosový potenciál	53
5.5.4.2	Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků.....	54
5.5.5	Blok 8302.....	55
5.5.5.1	Výnosový potenciál	55
5.5.5.2	Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků.....	56
6	Diskuse	58
6.1	Vztah vegetačních indexů a výnosu.....	58
6.2	Identifikace výživového stavu	59
6.3	Vztah vegetačních indexů a množství biomasy	60
6.4	Vztah vývojové fáze a vegetačních indexů.....	60
6.5	Optimalizace hnojení dusíkem.....	61
7	Závěr	63
8	Literatura.....	64
9	Samostatné přílohy	I

1 Úvod

Obiloviny samy o sobě jsou ve světě nejdůležitějším zdrojem potravy, neboť se odhaduje, že tvoří až 65 % lidské obživy. Pšenice ozimá je v České republice dominantní pěstovanou plodinou, výjimečnost jejího postavení pramením především z jejího zastoupení ve struktuře plodin pěstovaných na orné půdě. Je zastoupena ve všech výrobních oblastech a z hlediska plochy zaujímá asi čtvrtinu orné půdy v České republice.

Produkce, jenž má za cíl dosažení pekařské kvality sebou nese i vyšší realizační cenu. Abychom dosáhli požadované ziskovosti pěstování polní plodiny, je nutné abychom hledali nové postupy pro zvýšení efektivity obhospodařování pozemků. Precizní zemědělství je jedním z nejdůležitějších směrů ve vývoji zemědělství posledních let. Podstatou tohoto systému je, že se k obhospodařovanému pozemku nepřístupuje jako k jednodílnému celku, ale při jeho obdělávání se bere v potaz jeho heterogenita, která může být ovlivňována řadou prostorových charakteristik. Příčinou prostorové variability může být například rozdílná intenzita hospodaření, heterogenní půdní prostředí či bioticky škodlivé vlivy. Krom prostorové variability je možné také sledovat variabilitu časovou, která sleduje průběh a změnu sledovaných znaků v čase. Tento rozvoj zemědělství je umožněn zejména díky rozvoji globálních polohových systémů, geoinformačních systémů a aplikační techniky. Dalším důvodem ke zkvalitnění hospodaření jsou bezpochyby neustále se zvyšující nároky na ochranu životního prostředí.

Role dusíku v rostlinách pšenice je nepostradatelná, neboť je součástí mnoha stavebních látek jako aminokyselin, chlorofylu či nukleonových kyselin. Potřeba dusíku a jeho obsah v rostlině se liší v různých růstových fázích rostliny. Vztah výnosu zrna a potřebou dusíku je u pšenice téměř lineární. Hodnota odběrového normativu okolo 25 kg N/t vyplývá z biologické potřeby rostliny na vytvoření zrna s obsahem dusíkatých látek alespoň 12 %. Vzhledem ke strmě stoupajícím vstupním nákladům je zřejmé, že propočtení optimální dávky dusíkatého hnojení nabývá na významnosti.

2 Cíl práce

Cílem práce byla analýza časových řad satelitních snímků porostů ozimé pšenice v zemědělském podniku Statek Chyšce s.r.o. a následné vyhodnocení závislostí mezi vegetačními indexy, potenciálem výnosu, skutečně dosaženým výnosem, obsahem dusíku v rostlinách a termínem hnojení dusíkem v průběhu vegetace.

2.1 Vědecké hypotézy

H1 – Vyšší hodnota indexu NDVI o 0,1 v době metání odpovídá zvýšení výnosu o 1,5 t/ha.

H2 – Existuje vztah mezi hodnotou indexu REIP a výživovým stavem porostu – vyšší hodnoty indexu odpovídají vyššímu obsahu N v rostlině.

H3 – Množství biomasy kladně koreluje s hodnotami vegetačních indexů (NDVI, EVI).

H4 – Různé hodnoty indexu EVI během vegetace korespondují s vývojovými fázemi rostlin

3 Literární rešerše

3.1 Pšenice ozimá

Pšenice obecná je v našich podmínkách nejrozšířenější plodinou a zaujímá přes čtvrtinu orné půdy České republiky a přes polovinu ploch obilnin. Je pěstována ve dvou formách – ozimá (94 %) a jarní (6 %). Její význam spočívá jak v uplatnění pro výživu lidí, tak i hospodářských zvířat (Šnobl et al. 2007). Osevní plocha ozimé pšenice pro sklizeň v roce 2021 činila necelých 890 tisíc hektarů (CZSO 2021).

3.1.1 Botanika a biologie

Pšenice (*Triticum L.*) se řadí do čeledi lipnicovitých (*Poaceae*). Krom pšenice seté (*Triticulum Aestivum*) spadá do tohoto rodu i několik dalších poměrně významných druhů – z pěstovaných v našich podmínkách je možné zmínit pšenici tvrdou (*Triticulun Durum*) a pšenici špaldu (*Triticulun Spelta*). Dle počtu chromozomů a dělíme pšenici na diploidní ($2n = 14$), tetraploidní ($2n = 28$) a hexaploidní ($2n = 42$) (Diviš et al. 2010).

Kořenový systém pšenice je velmi podobný ostatním obilninám 1. skupiny, skládá se z kořenu primárního, kořenů adventivních a postranních. Stéblo je u současných odrůd poměrně krátké a je rozděleno kolénky, které ho rozdělují na mezičlásky. Listy jsou složeny z listové pochvy a čepele. Listem s nejvýznamnější funkcí je tzv. praporcový list, který plní hlavní fotosyntetickou funkci. Květenstvím je bílý nebo červený klas, který může být jak osinatý, tak osinkatý či bezosinný (Zimolka et al. 2005).

3.1.2

3.1.3 Historie a význam

Obilniny představují základní potravu lidstva. Zejména díky své přizpůsobivosti je pšenice nejpěstovanější plodinou na světě. Osevní plocha přesahuje 216 milionů hektarů s výnosem přes 734 milionů tun (FAO 2018).

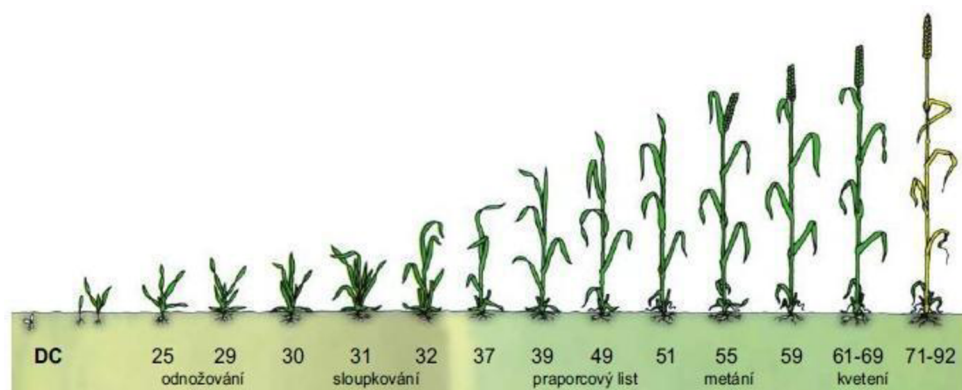
Pšenici můžeme považovat za vůbec nejstarší obilninu. Do světa se rozšířila zejména z přední Asie a severní Afriky. Některé prameny udávají, že její nejstarší nálezy pochází období okolo 15 000 let př. N. l., avšak archeologické nálezy spíše ukazují na období 9 tisíc let př. N. l. Z tohoto období se dochovali informace nejen o pěstování pšenice, ale i o pěstování ječmene, hrachu, čočky a vikve. Nejstarší nálezy, které hovoří o pšenici seté (*Tr. Aestivum*) jsou z oblasti jiho-iránského pohoří Zagros z období okolo 6000 let př. N. l. (Diviš et al. 2010).

Při procesu, kdy se z plané rostliny stávala kulturní, došlo zejména k několikanásobnému zvětšení obilky, nárůstem listové plochy a také k postupnému zkracování stébla. Hlavním beneficentem vývoje pšenice jsou obilky, neboť došlo ke změnám tvorby a ukládání asimilátů právě v jejich prospěch (Petr & Húska 1997).

3.1.4 Makrofenologická stupnice

Vývoj a růst jsou probíhající procesy kvalitativních změn v rostlině, které jsou podmíněny genetickými faktory a vlivy prostředí. Vývojové změny se koncentrují do vzrostného vrcholu, kde zakládají, diferencují a vyvíjejí generativní orgány (Diviš et al. 2010). Životní cyklus pšenice se skládá z období vegetativního (klíčení, vzházení odnožování) a z období generativního (sloupkování, kvetení a zrání) (Zimolka et al. 2005).

Obr. 1: Makrofenologická stupnice obilnin dle BBCH (zdroj: web2.mendelu.cz)



K hodnocení změn slouží mikro fenologická stupnice Kupermanové jež charakterizuje jednotlivé etapy vývoje:

Tab. 1: Vývojové etapy dle Kupermannové

I. Formování listů	VII. Vývin osin
II. Formování odnoží	VIII. Metání
III. Základ klasového větene	IX. Kvetení
IV. Diferenciace klásků	X. Tvorba obilky
V a. Plevy – diferenciace kvítků	XI. Mléčná zralost
V b. Pluchy, plušky	
VI. Diferenciace ostatních částí kvítků	XII. Plná zralost

3.1.5 Pěstební technologie ozimé pšenice

3.1.5.1 Zařazení v osevním postupu

Ozimá pšenice je náročnou plodinou na obsah živin a půdní podmínky. Velmi citlivě výnosem reaguje na předplodinu, neboť ta ovlivňuje půdní prostředí a jeho vlastnosti (Zimolka et al. 2005). Intenzivním hnojením obvykle nelze nevhodnou předplodinu nahradit. Mezi velmi dobré předplodiny se řadí širokolisté plodiny – velmi dobrý je hrách, ozimá řepka, luskovinoobilné směsky, kukuřice na siláž aj. Špatnou předplodinou jsou pro pšenici obilniny

a pozdě sklizené okopaniny. Volba předplodiny neovlivňuje jen výnos, ale také kvalitu zrna, zejména obsah bílkovin a lepku (Křen et al. 2015).

3.1.5.2 Výběr a zpracování půdy

Pšenice je pěstována ve všech výrobních oblastech České republiky. Nejvhodnější jsou půdy střední až těžší, ideálně s neutrální až slabě kyselou půdní reakcí (pH 6,2–7,0). Lehké, vysychavé, kyselé a zamokřené půdy jsou pro pěstování pšenice nevhodné (Šnobl et al. 2007).

Předseťové zpracování má rozhodující vliv na správné založení porostů – ovlivňuje počet rostlin po vzejití i po přezimování, dále rozhoduje i o výskytu chorob a zaplevelení porostu (Zimolka et al. 2005).

Při tradiční přípravě půdy se provádí podmítka ihned po sklizni předplodiny, následná orba či hloubkové kypření se doporučuje přibližně 3 týdny před orbou. Při přímém setí sejeme přímo do podmítnuté půdy (Kuchtík et al. 2005).

3.1.5.3 Zakládání porostu

Termín setí je dán biologickými vlastnostmi odrůd a také výrobní oblastí. Se stoupající nadmořskou výškou je třeba počítat s ranějším termínem výsevu (Kuchtík et al. 2005). V bramborářské oblasti se doporučuje setí mezi 20. a 30. zářím, ve vyšších nadmořských výškách již od 5. září (Šnobl et al. 2007).

Výše výsevku závisí na odrůdě, respektive na její odnožovací schopnosti, na termínu ale také na výrobní oblasti (Kuchtík et al. 2005). Standardně se doporučuje výsevek 3,0–5,0 MKS/ha. U odrůd s nízkou odnožovací schopností 4–5 MKS/ha, u silně odnožujících 3–4,5 MKS/ha (Šnobl et al. 2007).

3.1.5.4 Výživa a hnojení

Příjem živin během vegetace, a i jejich konečný odběr při sklizni, jsou značně ovlivněny půdními a povětrnostními podmínkami, intenzitou růstu, výnosem ale i pěstovanou odrůdou. Na 1 t zrna (a přibližně stejné množství slámy) je z půdy odčerpáno přibližně 24 kg dusíku, 5 kg fosforu, 18 kg draslíku, 4 kg vápníku a 2 kg hořčíku. Nové odrůdy odčerpávají z půdy méně živin zejména proto, že mají nižší podíl slámy (Vaněk et al. 2016).

Převážnou část živin pšenice odčerpává na jaře v období sloupkování, metání až do kvetení (Kuchtík et al. 2005). Odběr fosforu během vegetace příliš nekolísá, pouze v době tvorby zrna dochází k mírně výšené rychlosti odběru této živiny (Zimolka et al. 2005). U ostatních živin je křivka odběru podobná křivce nárůstu biomasy – příjem živin roste v době během sloupkování, zvyšuje se v době metání a vrcholí v době květu. Krom toho u draslíku dochází k výraznému zvýšení odběru v době metání, kdy převyšuje i odběr dusíku (Vaněk et al. 2016).

Organické hnojení se provádí pouze na půdách neúrodných, nebo při vysokém zastoupení obilnin v osevním postupu (Kuchtík et al. 2005).

Hnojení dusíkem ovlivňuje jak výnos, tak i kvalitativní parametry zrna. Potřeba předsetřového hnojení N by měla vycházet z obsahu minerálního dusíku v půdě (Černý et al. 2014). Potřeba dusíku v podzimním a zimním období je u ozimé pšenice velmi malá (10 až 12 % z celkového přijetího N), na většině stanovišť tedy není třeba dusíkem před setím hnojit (Vaněk et al. 2007). Pokud je toto hnojení realizováno, dávka N by neměla přesáhnout 40 kg N/ha.

Jarní dávka dusíkatého hnojení je rozdělena do 3 aplikací – ihned po přezimování aplikujeme regenerační hnojení v dávce 20 až 60 kg N/ha (Vaněk et al. 2016). Regenerační dávka dusíku pomáhá obnovit tvorbu biomasy (Prugar et al. 2008). Formu dusíku volíme dle stavu porostu (Faměra 1993). Na počátku sloupkování následuje produkční hnojení v dávce 20 až 60 kg/ha (Vaněk et al. 2016). Úkolem tohoto přihnojení je zejména podpora počtu plodných odnoží a počtu kvítků, jenž je určující pro počet zrn v klase (Prugar et al. 2008). Kvalitativní hnojení uskutečňujeme před metáním v dávce 20 až 30 kg N/ha. Tímto opatřením spíše ovlivňujeme kvalitu zrna a hmotnost 1000 zrn (HTZ) než výnos (Vaněk et al. 2016).

Hnojení fosforem, draslíkem a hořčíkem vychází z obsahu přístupných živin v půdě. Fosforečná a draselná hnojiva je vhodné aplikovat již před setím a kvalitně je zapravit do půdy. Vzhledem k vyšší pohyblivosti hořčíku v půdě je ideální hnojení tímto prvkem rozdělit alespoň do dvou dávek (Černý et al. 2014).

Potřeba síry u ozimé pšenice je významně spojena s tvorbou biomasy a výnosem. Pro hnojení jsou často využívána dusíkatá hnojiva s obsahem síranu amonného, ze kterého jsou sírany v půdě dobře pohyblivé. Pro hnojení sírou je ideální použití těchto hnojiv při produkčním hnojení. Je doporučována dávka alespoň 30 kg S/ha, tuto dávku lze případně optimalizovat podle analýzy půdy na obsah vodorozpustných forem síry (Černý et al. 2020).

3.1.5.5 Ochrana proti škodlivým činitelům

Od roku 2014 musejí profesionální pěstitelé dodržovat zásady integrované ochrany rostlin. Při ošetřování proti škodlivým činitelům je kladen důraz na růst zdravých plodin a na co nejmenší narušení ekosystému (Kazda 2014).

Konkurenceschopnost pšenice vůči plevelům je v porovnání s ostatními obilninami nízká (Konvalinka & Moudrý 2008). Výskyt plevelů v pšenici ozimé je zejména závislý na základních agroekologických faktorech jako jsou střídání plodin, respektive vliv předplodiny a intenzita zpracování půdy. Zaplevelení může snížit výnos pšenice až o 15–40 % (Winkler et al. 2016). Je nutné upozornit zejména na ochranu proti nejobtížnějším plevelům v pšenici jako jsou chundelka metlice, svízel a heřmánkovitým plevelům (Diviš et al. 2010).

Z virových chorob se nejčastěji objevuje virus zakrslosti pšenice, jenž je původcem zakrslosti pšenice. Přímá ochrana proti virovým chorobám není možná, ale musí být prováděna komplexně. To spočívá zejména v eliminaci zdrojů virů a ochraně pro přenašeči (Kazda 2017).

Po celou dobu vegetace je rostlina pšenice napadána škůdci, avšak nejvýznamnější škody vznikají při sání mšic a křísků na podzim. Tímto napadením omezují odnožovací schopnost rostliny a zhoršují i její přezimování. V teplejších oblastech tyto škůdci přenášejí virus žluté zakrslosti ječmene a zakrslosti pšenice (Zimolka et al. 2005).

3.1.5.6 Sklizeň a posklizňová úprava

Zrání pšenice je nerovnoměrné, nejprve dozrávají klasy na hlavním stéble a teprve poté dozrávají další odnože. Ideální je sklizeň v polovině žluté zralosti. Doba sklizně je však závislá na průběhu počasí. Optimální vlhkost při sklizni zrna je 18 % (Diviš et al. 2010). V případě pozdější sklizně dochází ke snížení obsahu i kvality lepku a čísla poklesu, potravinářskou pšenici je tedy nutné sklízet přednostně (Konvalinka et al. 2008). Pokud v některých letech nelze sklídit porosty s vhodnou vlhkostí, je nutné jej šetrně dosoušet. Sušení musí být velmi šetrné, čím je porost vlhčí, tím nižší teplotu je třeba zvolit. Pekařská a pečivářská pšenice musí být dosoušena zvláště opatrně (Diviš et al. 2010).

3.1.6 Parametry a ukazatele

3.1.6.1 Tvorba výnosu pšenice

Hospodářským výnosem se u pšenice rozumí výnos zrna. Základními výnosovými prvky obilnin jsou počet klasů na jednotku plochy, počet zrna v klasu a hmotnost 1000 zrn v gramech. Výnos obilnin se vytváří po celou dobu vegetace (Křen et al. 2001). Počet klasů závisí především na počtu rostlin na ploše a na schopnosti odnožovat. Počet založených kvítků je základní předpoklad pro počet zrn v klasu. Tento výnosotvorný prvek je ovlivněn geneticky a prostředím. Doba potřebná pro vývin obilek je 35–45 dní. Vysoké teploty, nedostatek živin a vláhy, choroby a další vlivy mohou poškodit asimilační aparát, dochází pak ke zkrácení doby plnění obilek a hmotnost obilek se zvětšuje málo (Diviš et al. 2010).

3.1.6.2 Kvalitativní ukazatele

Každá odrůda je zařazena do jakostní kategorie, což umožňuje spotřebiteli zvolit vhodnou odrůdu pro daný užitkový směr (Zimolka et al. 2005).

Při posuzování kvality zrna pšenice je důležité rozlišovat mezi pšenicí potravinářskou a nepotravinářskou. Pro potravinářské účely by vlhkost neměla přesahovat 14 %, objemová hmotnost 76 kg/hl, příměsi a nečistoty nejvýše 6 % a obsah N látek by měl být nejméně 11,5 % (u potravinářské pšenice maximálně 11,5 %). Pro nepotravinářské účely nejsou kvalitativní kritéria tak náročná (Šnobl et al. 2007).

3.2 Dusík

Dusík z minerálních hnojiv se na tvorbě výnosu podílí zejména při pěstování na neúrodných půdách, kde rostliny čerpají pouze 56–60 % dusíku z půdní zásoby. Na úrodných půdách rostlina využívá 84–88 % dusíku z půdní zásoby a jen 12–16 % z hnojiv (Balík et al. 2012). Nalezení vhodného systému aplikace dusíku není důležité pouze pro výnos zrna, ale je také nutné pozorovat vztah vzhledem k ochraně přírody. Například Brentup et al. 2004 se ve své studii snažili nalézt optimální vztah množství aplikovaného dusíku ve vztahu k environmentální zátěži. Výsledky ukázaly, že agronomicky optimální hospodaření se nemusí

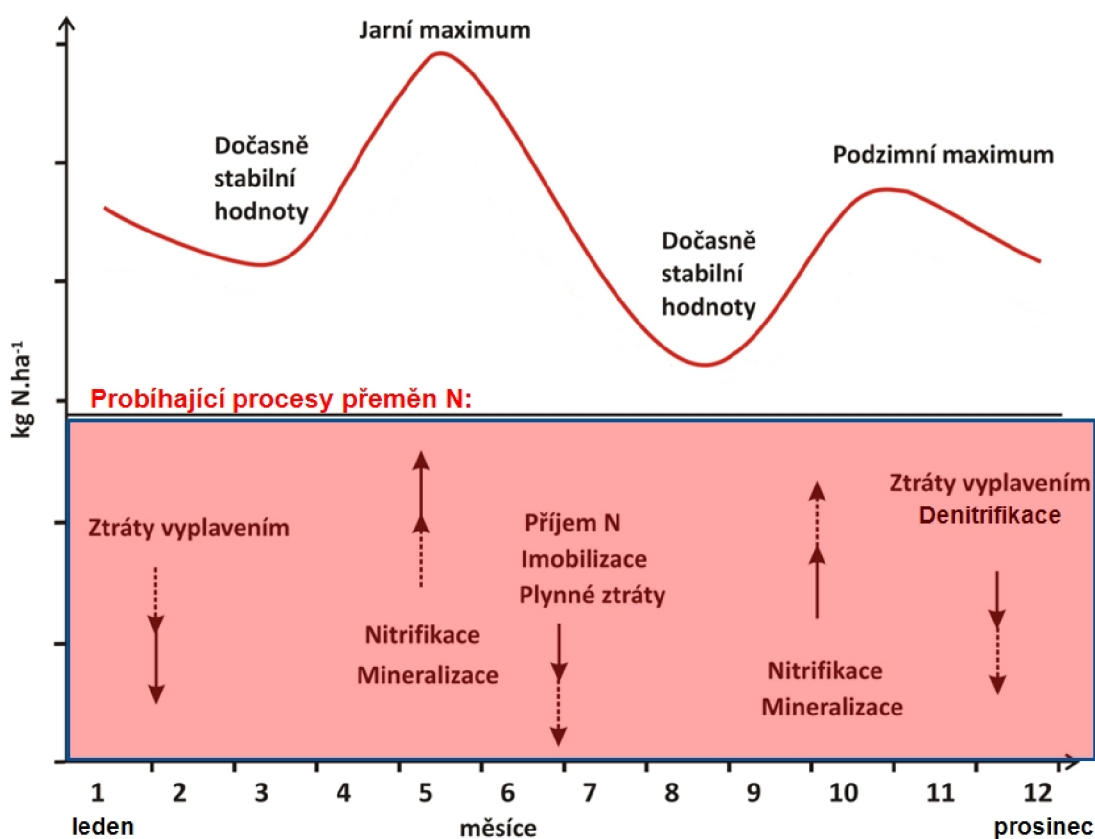
nutně dostat do konfliktu s enviromentálními podmínkami. Přesná předpověď potřebného dusíku pro růst rostliny může napomoci optimalizovat nejen výnos, ale také efektivitu využití dusíku a tím zvýšit zisky farem a snížit riziko znečištění životního prostředí (Zhao et al. 2014)

3.2.1 Dusík v půdě

Převážná část dusíku v půdě je tvořena dusíkem anorganických sloučenin. Jeho celkový obsah v půdě se pohybuje v rozmezí 0,1–0,2 %, což v ornici představuje asi 3000–6000 kg/ha. (Vaněk et al. 2016). Z celkového množství v půdě jsou ale jen 1–2 % ve formě amonné a nitratové, která je dostupná pro rostliny. Obsah minerálního dusíku v půdě se mění v závislosti na mnoha faktorech (hnojení, odběr rostlinami, obsah organické hmoty v půdě, hydrotermické podmínky) (Balík et al. 2012).

Dostupnost dusíku pro rostliny je ovlivňována příjmem, transformací a ztrátami dusíku v rámci systému půda/rostlin. Nejvíce náchylným ke ztrátám je minerální dusík, k těm dochází při volatilizaci amoniaku, vyplavování a denitrifikaci – tj. přeměnou na plynnou formu. Ztráty nejen snižují půdní úrodnost a výnos, ale mají také nepříznivý dopad na životní prostředí. Emise amoniaku do atmosféry přispívají ke kyselým dešťům a přispívají ke zvýšení množství skleníkových plynů (Cameron et al. 2012).

Obr.2: Sezónní změny obsahu minerálního dusíku v půdě a související procesy přeměn (Balík et al. 2012)



Klíčovým procesem, který přispívá k dostupnosti dusíku v půdním roztoku je mineralizace (Ross et al. 2004). Mineralizace je biologický proces, při kterém se organický dusík v půdě přeměňuje na formy dostupné pro rostliny (NH_4^+ a NO_3^-). Tato transformace a následné uvolňování dusíku v pro rostliny přijatelné formě je však do značné míry závislá na složení organické hmoty (Marzi et al. 2020). Organická hmota s vysokým obsahem dusíku a nízkým poměrem C/N uvolňuje více dusíku v porovnání s organickou hmotou s nižším obsahem dusíku a vysokým poměrem C/N, což následně vede k imobilizaci dusíku. (Manojlović et al. 2010). Mineralizaci dusíku z organické hmoty ovlivňují také abiotické faktory, jako je teplota půdy, pH a vlhkost půdy. Organické materiály jako je například pšeničná sláma, která má vysoký poměr C/N (až 80:1), snižuje mineralizaci dusíku v raných fázích rozkladu, to je způsobeno vysokou potřebou dusíku u mikrobiálních populací, které se podílejí na rozkladu pšeničné slámy (Tripathi & Mishra 2011).

Obsah minerálního dusíku kolísá podle půdních a povětrnostních podmínek, biologické činnosti, hnojení a odběru rostlinami. Jak je zobrazeno na obr. 2, během roku můžeme pozorovat dvě maxima – jarní, které se později snižuje v důsledku odběru rostlinami a podzimní – po sklizni rostlin (Vaněk et al. 2012).

3.2.2 Dusík v rostlině pšenice ozimé

Dusík je jednou z nejdůležitějších živin ovlivňujících růst rostlin. Jeho nedostatek má jednoznačně za následek ekonomické ztráty v rostlinné výrobě (Cole et al. 2008).

Pro výnos zrna u pšenice ozimé jsou velmi důležité asimiláty, které se vytvářejí v době plnění obilok. Transport do zrna probíhá zejména z horní části rostliny – klasu a praporcového listu, tyto dva orgány se podílejí na plnění zrna z 90 % (Diviš et al. 2010).

V rostlině je dusík obsažen nejen v organické formě, která je většinou zastoupená, ale i ve formě anorganické. Organické sloučeniny dusíku plní v rostlinách funkci stavební, metabolickou, zásobní i transportní funkci. V rostlinné sušině se množství dusíku pohybuje v rozmezí 1–3 % (Bold & Zrenner 2003). Průměrný obsah dusíku v sušině pšenice ozimé je 2,3 % N v zrna a 0,55 % N ve slámě (Pavlíková et al. 2007).

Jak ve své práci uvádějí King et al. (2003), růst kořenů je základním předpokladem pro příjem dusíku rostlinou, neboť rozvinutější kořeny pomáhají zlepšit příjem hůře dostupného dusíku v hlubších vrstvách půdy. Proto je důležitá nejen hloubka samotného zakořenění, ale hlavně také rychlost, s jakou kořeny mladé rostliny dosáhnou potřebné hloubky (Gastal & Lemaire 2002). Studie, které se věnují vztahu mezi růstem kořenů a dostupností dusíku ukazují tendenci kořenů rozvíjet se v zónách, které jsou bohaté na živiny (Kristensen et al. 2004). Dusík přijímaný rostlinou je nejčastěji ve formě kationtu amonného (NH_4^+), nebo aniontu dusičnanového (NO_3^-), menší část je pak přijímána ve formě organických sloučenin. O množství přijatých iontů rozhodují genetické predispozice rostliny, ale také vnější podmínky, zejména pH. V oblastech s neutrálním až alkalickým pH je příjem jednotlivých iontů vyrovnán, naopak v kyselějších oblastech převažuje příjem nitrátového iontu. Dalším ovlivňujícím faktorem je teplota, aerace půdy a biologická aktivita půdy (Pavlíková et al. 2007).

Přijatý minerální dusík je postupně využíván k tvorbě organických sloučenin. Amonné kationty jsou bezprostředně využívány k syntéze aminokyselin, nitrátový dusík je nejdříve redukován rostlinou na amonný. K této redukci dochází za pomoci enzymů nitrát reduktázy zejména v listech rostliny (Vaněk et al. 2007).

3.2.3 Efektivita využití dusíku

Obiloviny jsou uváděny jako plodina, která se vyznačuje velmi nízkou efektivitou využití dusíku – v celosvětovém měřítku činí pouze 33 %. Garnett et al. (2015) popisují efektivitu využití dusíku (NUE) jako součin účinnosti příjmu N a účinnosti využití N, kde účinnost příjmu N je vyjádřena jako poměr příjmu dusíku k celkovému dostupnému dusíku a účinnost využití jako poměr výnosu zrna k celkovému příjmu dusíku rostlinou. Další autoři, jako například Wallace et al. (2020) ve své studii měří NUE jako účinnost přeměny aplikovaného dusíku na výnos zrna. To je označováno za agronomickou účinnost.

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, dusík je základní živinou pro růst a vývoj pšenice. Jeho dostatečný přísun je bezpodmínečně nutný ke zvýšení indexu listové plochy, obsahu chlorofylu ale také ke zpomalení degradace chlorofylu a prodloužení senescence listů. Tímto přispívá k podpoře akumulace nadzemní biomasy a k samotnému zvýšení výnosů (Liu et al. 2020). Nadměrná aplikace N však již účinně nezvyšuje výnos pšenice, ale naopak vede k nižší efektivitě využití dusíku, čímž se také zvyšují rizika znečištění spodní vody v důsledku vysokých přebytků N a také ke zvýšení emisí skleníkových plynů (Riar & Covert 2013).

3.2.3.1 Zvýšení efektivit využití dusíku

Dostupnost dusíku pro rostlinu a její následná schopnost využití dusíku pro produkci zrna a bílkovin je složitý proces, který je ovlivněn mnoha faktory jako jsou: genotyp, prostředí (voda, klima, půda a jiné) a hospodařením s dusíkem včetně volby vhodného typu dusíkatého hnojení (Hirel et al. 2007).

Základem zlepšení NUE pomocí konvenčního šlechtění je identifikace různých genových fondů. Vzhledem k tomu, že moderní odrůdy pšenice disponují poměrně malou variabilitou, směřují výzkumy věnující se zvýšení efektivit využití dusíku ke studiu příbuzných divokých plodin či krajových odrůd. Nedávné studie u rýže naznačují, že zkoumání a modifikace cis-trans elementů povede k navýšení NUE u obilnin (Islam et al. 2021).

Dalším ze způsobů, jak zvýšit efektivitu využití dusíku je vhodné načasování dusíkatého hnojení, tak aby odpovídalo potřebě plodin. Pozitivní vliv rozdělení dusíkatých hnojiv na efektivitu využití dusíku byl dobře popsán již v několika výzkumech, například Lopez-Bellido et al. (2005) uvádějí, že nejvyšší potřeba dusíku je v době kdy plodiny nejvíce akumulují obsah sušiny a načasování aplikací dusíku zvýšilo jeho efektivitu využití z 27 % na 41 až 55 %. Velmi důležitou proměnnou pro zvyšování efektivit dusíkatých hnojiv je množství dostupné vody v půdě. Její nadbytek vede ke ztrátám dusíku, a naopak nedostatek vody brání v příjmu dusíku rostlinou (Riar & Covert 2013).

Krom působení vody a vhodného načasování dusíkatého hnojení je vhodné vzít v potaz způsob uvolňování dusíku do půdy. Využití hnojiv s řízeným uvolňováním dusíku je v několika studiích považováno za optimální způsob hospodaření dusíkem, díky němuž se sladí uvolňování živin do půdy s příjmem živin plodinou bez dalšího přihnojování. Tímto následně dochází ke zvýšení efektivity využití dusíku (Guo et al. 2017). Některé studie však poukazují na to, že aplikování hnojiv s řízeným uvolňováním dusíku jako základního hnojiva nedokázalo zvýšit výnos pšenice a tím ani jeho efektivitu (McKenzie et al. 2007). Z tohoto důvodu Ma et al. (2023) přistoupili k rozložení dávek těchto hnojiv tak, aby odpovídalo potřebě rostlin, což mělo za následek snížení ztráty dusíku o 30,39 % a mírné navýšení výnosu.

3.3 Mapování prostorové heterogenity

Rozvoj mapování prostorové heterogenity byl zapříčiněn rozvojem technologií jako jsou globální polohové systémy, geoinformační systémy a dálkový průzkum země, které pomohly k pochopení prostorové variability terénu (Verhagen et al. 1995). V posledním desetiletí se studie věnují především prokázání proveditelnosti a funkčnosti technik a metod precizního zemědělství, které byly předtím vyvinuty. Velká část úsilí je věnována strojovému a hlubokému učení, které může poskytovat informace o stavu porostu v téměř reálném čase (Weiss et al. 2020).

3.3.1 Digitální modely terénu

Variabilita výnosu je zapříčiněna mnoha aspekty, ovšem jedním z nejdůležitějších je topografie (Kravchenko & Bullock 2000). Díky rozvoji geoinformačních technologií a jejich nástrojů, je možné jednoduše vytvořit digitální výškový model. Z těchto modelů je možné odvodit topografické parametry, které se následně používají pro analýzu variability výnosu (Wilson & Gallant 2000). Tyto parametry dělíme do dvou kategorií – primární a sekundární (odvozené). Mezi primární atributy řadíme nadmořskou výšku, sklon reliéfu, orientaci, vertikální a horizontální zakřivení, délku toku a sběrná plocha odtoku. Sekundární atributy jsou například směr a akumulace odtoku, index vlhkosti či index transportu sedimentů (Marques da Silva & Silva 2008).

Závislostí mezi topografickými parametry a variabilitou výnosu se zabývá mnoho studií. Například Iqbal et al. (2005) poukazují na vztah nadmořské výšky a výnosu, kdy v nižší pozicích jsou výnosy vyšší. Tímto tématem se také zabývali Kravchenko & Bullock (2000), ti v suchých a srážkově průměrných letech došli ke stejným závěrům jako Iqbal et al. (2005), ale ve vlhčích letech naměřili v nižších polohách i nižší výnosy z důvodu rychlejšího vyplavení dusíku z půdy.

3.3.2 Výnosové mapy

Mapování výnosu zrna má za cíl rozšířit znalosti o prostorové heterogenitě výnosů (Ross et al. 2008). Na poli precizního zemědělství bylo mapování výnosu a tvorba výnosových map první komerčně nabízenou službou (Demmel 2013). Výnos je vyjádřen jako množství

sklizeného zrna na dané ploše (Arslan & Colvin 2002). Pro stanovení hodnoty výnosu je důležitá šířka záběru sklízecí mlátičky, vlhkost zrna, jeho množství a vzdálenost ujetá za jednotku času. Tyto informace jsou kontinuálně zaznamenávány do palubního počítače (Neudert et al. 2015).

V zásadě existují dva typy výnosoměrů – výnosoměr založený na principu měření objemového průtoku a výnosoměr založený na základě hmotnosti průtoku. Nepřesnost měření se pohybuje od 1,5 – 5,5 % relativní směrodatné odchylky (Demmel 2013). Výsledná data z výnosoměrů jsou zatížena množství náhodných či systematických chyb, které negativně ovlivňují kvalitu výsledných map. Pro tvorbu výnosových map je nutné tyto chyby filtrací odstranit (Blackmore & More 1999). Thylen et al. (1997) rozdělují chyby z výnosoměrů do čtyř kategorií:

1. Senzorové chyby
2. Chyby způsobené sklizňovými podmínkami
3. Chyby operátora techniky
4. Chyby ve výnosovém mapování

Brant (2020) uvádí, že pro získání relevantních dat je třeba správné nastavení systémů, důsledná kalibrace a následné vyčištění dat. Dalším problémem může být nasazení více než jednoho stroje na jednom půdním bloku, srovnání těchto dat je pak prakticky nemožné.

3.3.2.1 Identifikace produkčních zón z výnosových map

Produkční zóny je možné identifikovat pouze z více ročníků, ve kterých byla data zaznamenávána, neboť produktivita dané zóny je ovlivněna nejen prostorovou heterogenitou ale také vlivem ročníku (Carvallo et al. 2001). Aby bylo možné provádět analýzu výnosových map, respektive produktivity, je třeba aby výnosová data z každého roku byla standardizována a seskupena do buněk, nebo srovnávání dat z výnosoměru bod po bodu není možné (Spekken et al. 2014). Vymezení produkčních zón si klade za cíl vyhodnotit variabilitu výnosových úrovní za sledované období a následně identifikovat podprůměrné a nadprůměrné výnosové plochy. Významná je také informace o mezi ročníkové variabilitě výnosových úrovní, která umožňuje rozlišit plochy s kolísavou či stabilní výnosovou hladinou (Lukas et al. 2020).

3.3.3 Dálkový průzkum země

Dálkový průzkum země (DPZ) využívá odrazivosti elektromagnetického záření pro získání informací o objektu bez kontaktu s ním. Typ získaných informací záleží na konkrétních vlastnostech snímacího zařízení (Roy et al. 2002). Informace získané dálkovým průzkumem o růstu, rozmanitosti a dynamice vegetace mohou poskytnout mimořádně užitečné poznatky, které můžeme využít při monitorování životního prostředí, biologické rozmanitosti, v zemědělství, lesnictví a v mnoha dalších souvisejících oblastech (Mulla 2013).

Výhody satelitního dálkového průzkumu země zahrnují nízké náklady a zejména možnost získávání konzistentních a porovnatelných datových řad (Foley et al. 1998). Některé platformy jako Landsat 7–8 a Sentinel 2 také umožňují volný přístup k multispektrálním snímkům. Omezující při využití v precizním zemědělství je prostorové rozlišení a také doba oběhu jednotlivých družic (16 dní pro Landsat a 3 dny pro Sentinel). Uvedení platformy Sentinel 2 A + B do provozu vedlo ke zlepšení využitelnosti satelitního snímání v precizním zemědělství (Segarra et al. 2020).

Velký potenciál ve využití dálkového průzkumu země v rostlinné produkci spatřují například Jurišič et al. (2021), pravidelné monitorování polních plodin pomocí DPZ poskytne zemědělcům včasné odhalení nedostatku živin, či správné načasování zásahů na ochranu rostlin. V neposlední řadě zpracování multispektrálních snímků napomáhá přidělování zemědělských dotací, neboť umožňuje kontrolu výrazně vyššího počtu parcel. Kromě zmíněných možností aplikací, Seggara et al. (2020) jako další možnost využití DPZ v agronomii spatřují v monitorování biotických a abiotických stresů pomocí DPZ.

3.3.3.1 Družicové platformy

Senzory, které pořizují snímky DPZ, jsou obvykle instalovány na určitý typ platformy operující ve vzduchu. Naprostá většina dat vzniká s využitím bezpilotních prostředků či družic. Družice pro studium přírodních jevů využívají polární oběžnou dráhu tak, že je jejich pohyb synchronizován s pohybem slunce, což umožňuje snímání dané části povrchu vždy ve stejný čas.

Zdroje družicových dat můžeme rozdělit na komerční a volné. Zásadní nevýhodou komerčních dat je jejich pořizovací cena, proto neustále roste obliba volně dostupných dat, které reprezentují družicové systémy Landsat a Sentinel (Lukas et al. 2020).

Série satelitů Landsat již po více než 40 let poskytují nejdelší časový záznam pozorování povrchu. Landsat 1 byl vypuštěn v roce 1972 a byl následován dalšími družicemi (Landsat 2,3,4,5 a 7), které poskytovali a poskytují globální pokrytí snímky s různými reflektivními a termálními délkami (Loveland a Dwyer 2012). Dne 11. února 2013 byl na oběžnou dráhu vypuštěn satelit Landsat 8, který vznikl za spolupráce NASA (National Aeronautics and Space Administration) a USGS (Department of the Interior U.S. Geological Survey) (Irons & Loveland 2013). Landsat 8 nese dva senzory – operační Land Imager (OLI) a termální infračervený senzor (TIRS), které pořizují více než 500 obrazových scén denně (Woodlock et al. 2008).

Družice Sentinelu 2 byly na oběžnou dráhu vypouštěny na dvě etapy – Sentinel 2A byl vypuštěn 23. června 2015 a Sentinel 2B byl vypuštěn 7. března 2017. Obě družice mají minimální životnost 7,25 roku (plánovaná 12 let). Na palubě mají shodný multispektrální snímač, který operuje ve 13 pásmech. Čtyři pásma s desetimetrovým prostorovým rozlišením (modré, zelené červené a blízké infračervené), šest pásem je s rozlišením 20 m (čtyři úzká pásma v oblasti red edge a dvě široká v oblasti SWIR), a tři pásma s rozlišením 60 m, která slouží k atmosférickým korekcím (Suhet 2015).

Snímky pořízené družicemi nacházejí své využití v mnoha oborech, krom uplatnění na poli životního prostředí a zemědělství, pomáhají v oblasti bezpečnosti, mapování krizových situací či sledování globální klimatické změny (Lukas et al. 2020).

3.3.3.2 Identifikace produkčních zón z družicových dat

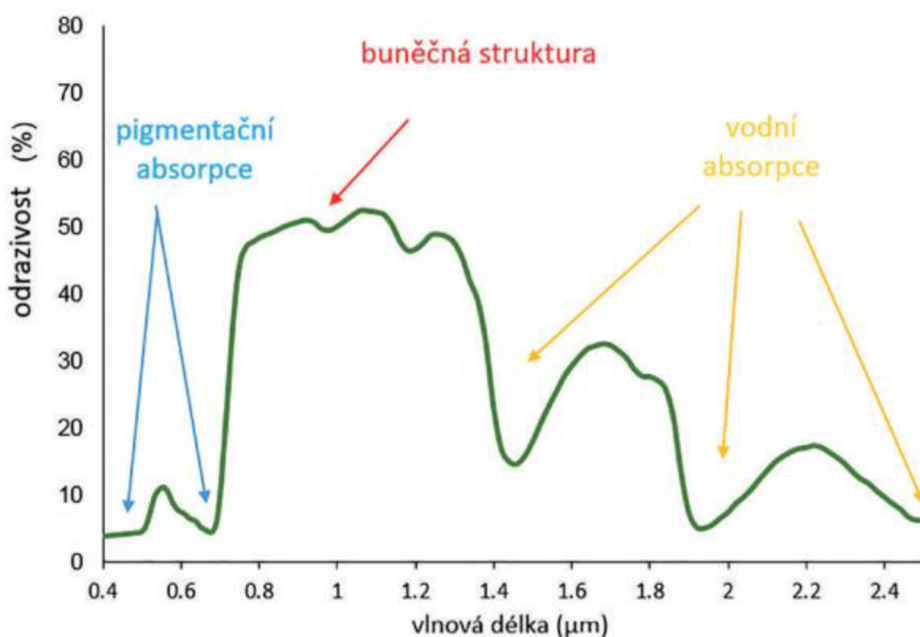
V případě absence dat z výnosoměru je možné využít relativní výnosový potenciál, který představuje alternativu k mapování výnosů při sklizni plodin. Výhoda tohoto mapování spočívá zejména v možnosti stavit produkční zóny i pro plodiny, u nichž měření výnosu není rozšířeno (pícniny, okopaniny aj.). Vymezení relativního potenciálu vychází z analýzy řady satelitních snímků. Tento potenciál je vypočten jako procentuální vyjádření dosažené produktivity na daném místě vůči průměru za celý pozemek (Lukas et. al 2018).

3.3.3.2.1 Spektrální odrazivost rostlin

V závislosti na pozorované vlnové délce interagují rostliny se slunečním zářením různě. Rostlina může buďto dopadající sluneční záření přenášet, odrazet nebo absorbovat. Elektromagnetické záření, které je rostlinou odraženo obsahuje informace a o jejich biofyzikálním a fyziologickém stavu (Avery et al. 1992).

Průběh křivky odrazivosti vegetačního povrchu je zobrazen na obr. 3. Při fotosyntetické aktivitě je využita z větší míry modrá a červená část záření, zelená část spektra je z části odražena. Většina záření v blízkém infračerveném spektru (NIR) je vegetací odražena. Tyto vlastnosti je možné využít pro zjištění stavu vegetace i kvantitativních ukazatelů. Odrazivost ve viditelném spektru vypovídá zejména o stavu fotosyntetického aparátu, naopak blízké infračervené spektrum o množství biomasy (Klem et al. 2014). Na multispektrálním snímku, který zahrnuje všechna výše zmíněná pásma, se bude vegetace jevit jako tmavá až černá v modré a červené části spektra, v zelené části bude šedá a v NIR bude světlá až bílá. Tyto vlastnosti vykazuje zdravá vegetace. Vegetace stresovaná nebo stárnoucí vykazuje změny odrazivosti – zejména v červeném spektru a NIR (Lukas et al. 2012).

Obr. 3: Průběh spektrální křivky typický pro odrazivost vegetačního povrchu (Kroulík 2020)



3.3.3.3 Vegetační indexy

3.3.3.3.1 RVI (Ratio vegetation index) nebo SR (Simple ratio)

Ratio vegetation index patří k nejstarším vegetačním indexům vůbec, byl navržen již v roce 1969 (Jordan in Xue a Su 2017). Je založen na principu, že listy absorbují více červeného než infračerveného záření. Je matematicky vyjádřen jako:

$$RVI = \frac{R}{NIR}$$

kde R je odrazivost v červeném spektru a NIR odrazivost v blízkém infračerveném spektru (Xue & Su 2017). Podle spektrálních charakteristik vegetace husté porosty vykazují nízkou odrazivost v červeném spektru což koreluje i s LAI, obsahem chlorofylu v listech a množství biomasy (Quan et al. 2011). RVI je široce ve využíván pro odhad zelené biomasy a monitorování husté vegetace. Nicméně v momentě, kdy je pokryv vegetací nižší než 50 %, výpočet pomocí RVI již není reprezentativní, neboť je v těchto případech velmi citlivý na atmosférické vlivy (Xue & Su 2017).

3.3.3.3.2 NDVI

Jedním z nejvíce využívaných indexů vypočítaných z multispektrálních snímků je normalizovaný diferenční vegetační index (Karnieli et al. 2010). Normalized difference vegetation index (NDVI) nabývá hodnot od -1 do 1 a jeho hodnota koreluje s množstvím zelené hmoty v ploše pixelu. Vyšší hodnota indexu značí vyšší množství biomasy, hodnoty okolo nuly

odpovídají holé půdě a záporné hodnoty ukazují na zastavěná území a vodní plochu (Lukas et al. 2012).

Tento index je však citlivý na vliv barvy půdy, jejím jasu, na oblačnost a její stín a na stíny listů a pro správné využití vyžaduje korelaci pomocí nástrojů GIS. NDVI je vyjádřen rovnicí:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

3.3.3.3 ARVI

Vzhledem k omezením, která má NDVI díky atmosférickým vlivům, představil Kaufman & Tanré (1992) Atmosféricky odolný vegetační index (ARVI). Tento index je založen na znalosti, že atmosféra výrazně ovlivňuje záření v červeném spektru ve srovnání se zářením v blízkém infračerveném spektru. Je vyjádřen jako:

$$ARVI = \frac{(NIR - RB)}{(NIR + RB)}$$

kde RB je rozdíl bez modrým a červeným spektrem. Kaufman & Tanré (1992) upravili hodnotu záření v červeném spektru jako rozdíl mezi modrým a červeným spektrem, díky čemuž se snižuje vliv atmosférických vlivů. Účinky aerosolů a ozónu v atmosféře ovšem musím být stále odstraňovány pomocí atmosférického 5S modelu. Pokud index ARVI není vypočítán právě pomocí modelu 5S, jeho výsledky nejsou o moc kvalitnější než při použití NDVI.

3.3.3.4 SAVI (Soil adjusted vegetation index)

Možnost rozlišení vegetace od půdy byla původně navržena Richardsonem & Wiegadem (1977). Vzhledem k tomu, že NDVI a další indexy mají jisté nedostatky v popisu spektrálního chování vegetace na půdním pozadí, stanovil Huete (1988) Soil-Adjusted vegetation index (SAVI).

SAVI je definován jako:

$$SAVI = \frac{(1 + L) * (NIR - R)}{NIR + R + L}$$

kde L je faktor kterým se redukuje vliv pozadí vegetace. Rozsah hodnoty L je od 0 do 1 a v praktických aplikacích jsou jeho hodnoty upravovány podle konkrétních podmínek. Pokud je stupeň pokrytí vegetací vysoký, L se blíží k hodnotě nula, což ukazuje, že půdní pozadí nemá žádný vliv na extrakty informací o vegetaci. Tato hodnota se využívá jen v případě velké hustoty vegetace. Bylo zjištěno, že pokud je hodnota L = 0,5 minimalizuje se tak kolísání jasu půdy a eliminuje se tak dodatečnou potřebu kalibrace pro různé druhy půd. Tento index tak zlepšuje citlivost NDVI na půdním pozadí (Kaufman & Tanré 1992).

3.3.3.3.5 EVI

Enhanced Vegetation index (EVI) byl navržen na základě zpětné vazby, která se zabývala vlastnostmi NDVI, jenž je ovlivněn vlivem pozadí a atmosférického odporu (Liu & Huete 1995). EVI je považován za vylepšený NDVI, neboť má zlepšenou citlivost na oblasti s vysokým množstvím biomasy a nedochází zde tolik k efektu přesycení. Díky svým vlastnostem byl přijat skupinou MODIS pro monitorování fotosyntetické aktivity na zemi (Huete & Justice 1999). Matematicky je definován jako

$$EVI = 2,5 \frac{(NIR - R)}{(NIR + 6R - 7,5B) + L}$$

L je zde opět faktor, kterým je redukován vliv pozadí vegetace. Vzhledem k tomu, že se EVI využívá v oblastech hustě pokrytých vegetací, je tato hodnota ve většině případů rovna jedné.

3.3.3.3.6 REIP

Pro hodnocení výživy dusíkem se jako perspektivní jeví Red edge index (REIP – red edge index inflexion point nebo také REP – red edge position), jenž udává vlnovou délku inflexního bodu spektrální křivky. Pozice tohoto bodu se obvykle pohybuje mezi 680–750 nm (Lukas et al. 2012). Pozice tohoto bodu je možné matematicky vyjádřit dvěma způsoby – numericky a lineární interpolací. Guyote (1988) definuje rovnici pro lineární interpolaci ze čtyř spektrálních pásem takto:

$$REIP = 70 + 40 \frac{\frac{(R670 + R780)}{(2 - R700)}}{R740 - R700}$$

Ze studie Heege et al. (2008) vyplývá, že red edge index vypočtený pomocí lineární interpolace dosahuje ve srovnání s ostatními indexy (NDVI, SAVI) nejvyššího koeficientu determinace. Vztah mezi REIP a výživou dusíkem je lineární, jeho změna o 1 nm indikuje rozdíl 15 kg N dodaným hnojením 6 týdnů před měřením.

3.3.3.3.7 Normalized difference nitrogen index (NDNI)

Tento index je určen k odhadu relativního množství dusíku v rostlině. Odrazivost při 1510 nm je do značné míry dána koncentrací dusíku v listech a také celkovým množstvím dusíku. To je srovnáváno s odrazivostí v 1680 nm, která by měla nést podobnou informaci o množství biomasy, ale bez informace o množství dusík (Serrano et al. 2002). Index je definován následující rovnicí:

$$NDNI = \frac{\log\left(\frac{1}{R_{1510}}\right) - \log\left(\frac{1}{R_{1680}}\right)}{\log\left(\frac{1}{R_{1510}}\right) + \log\left(\frac{1}{R_{1680}}\right)}$$

3.3.3.3.8 CCCI (The canopy chlorophyll content index)

Jedná se o dvourozměrný index odvozený z NDVI a NDRE. Hodnoty tohoto indexu korelují s obsahem dusíku v listech rostlin (Barnes et al. 2000)

$$CCCI = \frac{\frac{NIR - Red\ edge}{NIR + Red\ edge}}{\frac{NIR - R}{NIR + R}}$$

3.3.3.3.9 Transformed Vegetation Index (TVI)

TVI je ve své podstatě modifikovaný NDVI, který vznikl přidáním konstanty 0,5 ke všem hodnotám a následném odmocnění výsledku. Konstanta 0,5 je přidána k vyrovnání negativních hodnot NDVI indexu. Z technického neexistuje rozdíl mezi NDVI a TVI při detekci vegetace (Silleos et al. 2006). TVI je dán rovnicí:

$$TVI = \sqrt{\frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}} + 0,5$$

3.3.3.3.10 Optimized soil-adjusted vegetation index (OSAVI)

Index OSAVI využívá odrazivosti v blízkém infračerveném a červeném pásmu při využití koeficientu přizpůsobení půdě. Tato hodnota byla zvolena pro minimalizaci citlivosti indexu NDVI na změny půdního pozadí a tento index je tedy odolný vůči půdní variabilitě (Steven 1998). Index je definován následující rovnicí:

$$OSAVI = (1 + 0,16) \frac{NIR - R}{NIR + R + 0,16}$$

3.3.3.4 Vztah vegetačních indexů a výnosu

Vztah mezi vegetačními indexy a výnosem pšenice ozimé je v posledních letech častým tématem výzkumu v oblasti precizního zemědělství. Studie se zaměřují na různé typy vegetačních indexů v kombinaci s různými metodami sběru data, které zahrnují i satelitní snímky. Studie publikovaná Zhou et al. (2021) se věnuje vztahu vegetačních indexů odvozenými z dat získaných bezpilotními letadly. Výsledky této studie ukázaly, že vegetační indexy OSAVI ($r = 0,72$) a NDVI ($r = 0,64$) významně korelují s výnosem zrna pšenice ozimé. I další studie ukazují, že mezi výnosem zrna a vegetačními indexy je pozorován významný lineární vztah. Kaur et al. (2015) ve své studii poukazují zejména na indexy NDVI a RVI, které vykázaly přesnější predikci výnosu během obou sledovaných let. Podobných výsledků také

dosahoval Singht (2001), který ve své studii srovnával několik vegetačních indexů. Nejpřesnější pro predikci výnosu pšenice ($r = 90$) byl index GVI (Green vegetation index) a obdobného výsledku dosahoval index DVI (Difference vegetation index). Jako úplně nevhodný pro predikci výnosu pšenice se jevil index PVI (Perpendicular vegetation index). Predikci výnosu pšenice pomocí spektrálních indexů se také věnují Zhao et al. (2020), kteří došli k závěru, že většina vegetačních indexů je použitelná a je schopna odhalit až 70 % variability, ovšem nejlepší výsledků dosahoval red edge chlorophyll index (CI) a optimized soil-adjusted vegetation index (OSAVI). Také Chandel et al. (2019) se věnovali hodnocení vztahu vegetačních indexů a výnosu, došli k závěru, že pro predikci výnosu je možné použít hodnoty indexu NDVI v době metání.

Celkově lze tedy říci, že vegetační indexy stanovené na základě multispektrálních snímků jsou účinným nástrojem pro monitorování výnosů pšenice ozime.

3.3.3.5 Vztah vegetačních indexů a výživového stavu porostu

Polní pokusy ukazují, že pro stanovení výživového stavu porostu a pro následné hnojení dusíkem je možné využít hned několik vegetačních indexů. Vysoké koeficienty determinace obsahu dusíku vykazují zejména indexy REIP, NDNI a SR2 (Simple ratio 2).

Jako absolutně nevhodné pro využití pro stanovení obsahu dusíku se jeví využití indexů NDVI a SAVI u kterých dochází k efektu nasycení při vysoké hustotě porostu (Strenner & Maidl 2010). Menmeng & Noboru (2016), došli k závěru, že hodnoty NDVI souvisí s obsahem bílkovin v zrna pšenice v pozdější fázích pěstování.

Výživovým stavem pšenice, respektive obsahu bílkovin se věnuje ve své práci Du (2016). Během výzkumu monitoroval množství obsahu bílkovin a jeho korelaci s vegetačním indexem NDVI a došel k závěru, že obsah bílkovinných látek nejvíce koreluje s hodnotami NDVI v pozdější fázi růstu. Fitzgerald et al. (2010) se pokusili vyhodnotit vztah mezi indexem CCCI a obsahem dusíku. Ačkoliv zkoumaný index vykazoval středně silnou korelaci s obsahem N, nepotvrdilo se, že by bylo možné tento model použít pro predikci obsahu N v rostlině. Wang et al. (2016) využili pro stanovení množství dusíku index NDNI a SAVI, výsledky jeho studie prokázaly, že revidovaný index NDNI je citlivější k obsahu dusíku zejména díky odolnosti vůči odrazivosti půdního pozadí. Další studií, která naznačuje, že hyper spektrální dálkový průzkum Země je vhodný ke stanovení výživy pšenice dusíkem je výzkum práce Jia et al. (2019). Výsledky této studie ukázaly, že normalizovaný rozdílový index dusíku (NDNI) má silnou korelaci s obsahem dusíku v listech, zatímco poměrový index vegetace (RVI) slabě koreluje s modifikovaným indexem absorpčního poměru chlorofylu.

3.3.3.6 Vztah vegetačních indexů a množství biomasy

Jak uvádějí Bolton & Friedl (2013), přesnost předpovědi množství biomasy závisí na mnoha faktorech, jako je například klima regionu, odrůda, fenologická fáze v době, kdy hodnocení probíhá a i na použitém indexu. Index NDVI může ztrácet svoji citlivost zejména v momentě, kdy je již půda kompletně pokryta rostlinným krytem (Povh et al. 2008). Proto je

důležité při hodnocení biomasy zohlednit i dobu, kdy je snímek pořizován a tím se vyvarovat nasycení indexu. Gny et al. (2014) ve své studii uvádějí, že nejlepších výsledků pro detekci biomasy je dosahováno při kombinaci NIR (874 nm) a SWIR (1225 nm) pásem, neboť tato pásma jsou citlivá na absorpční charakteristiky vody v rostlinách, celulózy, ligninu a škrobu. Na základě těchto pásem autoři vyvinuli nový index GnyLi, který ve srovnání se standardními indexy, jakými jsou například NDVI či EVI, lze využívat v delším období vegetační sezóny pšenice ozimé. Vzhledem ke zmíněnému riziku, že vegetační index bude ovlivněn klimatem, či dobou pořízení snímku, sestavili Wang et al. (2016) robustní model 15 vegetačních indexů. Jejich výzkum ukázal, že všechny vegetační indexy jsou v jisté korelaci s biomasou, avšak jednotlivé indexy nejsou pro předpověď biomasy dostatečně citlivé. Tento model byl na rozdíl od jednotlivých indexů stejně citlivý ve všech testovaných růstových fázích.

3.3.3.7 Vztah vegetačních indexů a fenologie

Ke sledování růst a vývoje pšenice na základě vegetačních indexů použili Zhou et al. (2020) multispektrální data z bezpilotních letadel. Během výzkumu došli k závěru, že index NDVI silně koreluje s růstovými fázemi pšenice a lze je využít pro sledování jejich vývoje. Zároveň došli k závěru, že data získaná bezpilotním letadlem jsou více citlivá právě ke změnám v růstu a vývoji pšenice než indexy odvozené z pozemních měření.

Tomuto tématu se také věnovali Mercier et al. (2021), kteří ale použili k odvození vegetačních indexů satelitní snímky z družic Sentinel 1 a 2, neboť kombinací obou družic dosahoval predikční model lepších výsledků ($r = 0,67 - 0,86$). Model se skládal ze stanovení indexu NDVI pro predikci LAI a využití polarimetrických indikátorů ke sledování fenologie. Stejně tak i Magney et al. (2016) využili pro identifikaci fenologických fází pšenice index NDVI. Při denním sledování pohybu indexu NDVI byli schopni pomocí neparametrické regrese odvodit čtyři fenologická období. Tyto informace byly následně použity pro i pro odhad sklizňových metrik. Z výzkumu bylo patrné, že NDVI je obecně nevhodným indexem v době počátku vegetačního období, a naopak dosahuje maximální predikční síly v době metání. Touto problematikou se také zabývali Zhou et al. (2020), kteří pro stanovení fenologické fáze využili indexů NDVI, EVI a VARI. V rámci studie bylo zjištěno, že nejvyšší citlivost pro stanovení fenologické fáze vykazuje index NDVI, následován indexy CI a EVI. Pomocí zdokonaleného modelu v kombinaci s tvarovým modelem byl schopen v rámci studie identifikovat sedm vývojových fází.

3.3.3.8 Variabilní aplikace N na základě satelitních snímků

Interpretace hodnocení porostů pomocí vegetačních indexů se v případě obilnin liší dle vývojové fáze porostu. V případě obilnin je uplatňováno několik postupů pro výpočet dávek N. Obecně platí, že pro produkční hnojení se dávka N snižuje se zvyšující se hodnotou NDVI či REIP. Naopak u kvalitativního hnojení se zvyšující se hodnotou NDVI a REIP je aplikační dávka N vyšší (Lukas et al. 2012). Elbl et al. (2021) uvádějí, že variabilní aplikace (VRA) dusíku na základě satelitních snímků nijak negativně neovlivňují výnos obilí. Během pokusu zaznamenali navýšení výnosu zrna o 3 % v posledním roce testování. První dva roky testování

variabilních aplikací (VRA) neprokázaly žádný vliv na výnos. Různým způsobům, jak přizpůsobit dávku N variabilní aplikaci se věnují Vizzari et al. (2019). Ve své publikaci hodnotí maximální množství aplikované dusíku na hektar. Docházejí k závěru, že zvýšení dávky N způsobem, kdy se původní uniformní dávka N rovná průměrné dávce při variabilní aplikaci, nepřináší žádný zisk v podobě vyššího výnosu zrna. Doporučují tak využít původní uniformní dávku jako maximum při VRA, aby se zabránilo ztrátám a vyplavování.

3.3.4 Vliv meteorologických jevů ve vztahu k pšenici ozimé

Kvalita a výnos pšenice ozimé je ovlivněna nejen pěstitelskými zásahy, ale také klimatickými podmínkami. Pro metabolické děje v rostlinách či pro transformaci energie je rozhodující teplota vzduchu, neboť při příliš nízké, ale i při příliš vysoké teplotě dochází k omezení zmíněných jevů. Změny teplot jsou důležité zejména u procesů, jakými jsou fotosyntéza, transpirace a respirace. (Martin 2005) Nízké teploty mohou působit zimní poškození nebo úhyn rostlin, zatímco vysoké teploty omezují růst a vedou ke snížení výnosů (Daryanto et al. 2016). Jedním ze způsobů, jak hodnotit teplotu je stanovení průměrné teploty buďto stanovením průměru denního maxima a minima, nebo z měření provedených v 7, 14 a 21 hodin. Teplota vzduchu ve vztahu k růstu obilnin se nejčastěji hodnotí jako suma teplot, která se rovná součtu průměrných teplot za biologickým minimem rostlin (Brázdil 1995). Při dosažení biologického minima (u většiny rostlin 5 °C) začíná růst rostlinné biomasy, překročení teploty biologického maxima je pak pro růst rostlin nežádoucí. (Kalvová 1995).

Dalším limitujícím faktorem pro růst a vývoj rostlin jsou srážky. Různé odrůdy mají rozdílné nároky na množství srážek (Martin 2005). Nedostatečné množství srážek ovlivňuje veškeré výnosové charakteristiky rostlin, zejména pak celkovou biomasu a výnos zrna. Zcela zásadní je pro rostliny pšenice ozimé dostatek srážek v období klíčení a následně ke konci vegetace, kdy jsou srážky nezbytné pro růst a výnos zrna (Lobell et al. 2011). Nedostatek vláhy se může projevit krácením stébel či postupným odumíráním a vadnutím listů. Špatné vláhové podmínky mají také za následek zrychlené stárnutí rostliny, což vede ke snížení doby zrání semen, postižená semena vykazují nižší HTZ a vznikají tak škody na výnosu (Prášil 2018). Riar & Coaverty (2013) hovoří o velmi důležité roli akumulované vody v půdním profilu v zimním období, neboť v raných fázích vegetace se obvykle ozimým plodinám dostává více srážek než v pozdějším vegetačním období. Důležitou roli vláhových poměrů daného ročníku také ve své práci zdůrazňují Hooper et al. (2015), ti dále uvádějí, že schopnost rostliny vázat dusík je značně ovlivněna právě aktuálním stavem množství vody v půdě.

Sluneční záření je nezbytnou podmínkou fotosyntézy, avšak jeho další úlohou je i ohřívání vzduchu a půdy. Pro vývoj rostlin je nejdůležitější žlutočervená a modrofialová složka světla, jež je označována jako fyziologická (Uhlíř 1961).

4 Metodika

4.1. Charakteristika stanoviště

Pokus probíhal na pěti půdních blocích společnosti Statek Chyšě s.r.o., tato společnost byla založena v roce 1991 a jejími hlavními činnostmi jsou zemědělská výroba, služby v zemědělství a obchod se zemědělskými činnostmi. Rostlinná výroba je zde zaměřena zejména na pěstování pšenice ozimé, ječmene jarního, žita ozimého a řepky ozimé.

Statek Chyšě s.r.o. obhospodařuje celkem 4585 ha orné půdy a 2199 ha trvalých travních porostů. Pozemky společnosti leží převážně v bramborářské výrobní oblasti s nadmořskou výškou 440 až 630 m n. m a průměrná roční teplota se pohybuje v rozmezí 6–8 °C. Osevní postup je volný s vysokým zastoupením obilnin.

Pokusné pozemky byly vybrány na základě pěstované plodiny a předplodin, které byly pěstovány v letech 2018–2021, zohledněny byly také půdní vlastnosti.

4.1.1 Charakteristika půdních bloků

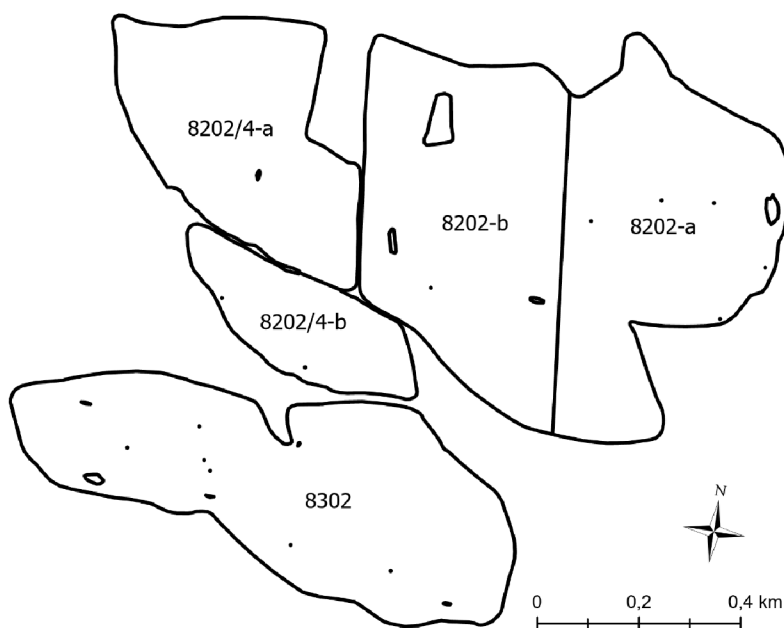
Půdní bloky, na kterých by prováděn pokus (zobrazené na obr. 4), se nacházejí v katastrálním území Brložec u Štědré v nadmořské výšce od 565 do 632 m n. m. Bodová výnosnost pozemků se pohybuje dle BPEJ mezi 13 a 44 body a řadí se tedy mezi produkčně málo významné plochy. Skupiny půdních typů je na všech pozemcích kambizem.

Na vybraných půdních blocích, kde probíhal pokus, se pH pohybuje v rozmezí slabě kyselého až neutrálního. Obsah fosforu dle aktuálních výsledků AZZP (tab. 2) spadá na většinu půdních bloků do kategorie vyhovující (pouze blok 8302 má hodnocení nízký), obsah hořčíku byl hodnocen jako dobrý, z hlediska obsahu draslíku pozemky spadají také do kategorie dobrý.

Tab. 2: Popis pokusných pozemků

Půdní blok	8202-4b	8202-4a	8302	8202a	8202b
Výměra (ha)	7,6	17,1	28,6	23,5	23,9
Nadmořská výška	583	605	572	573	578
BPEJ	5.30.01	8.34.24	8.50.01	5.30.04	5.32.14
Půdní typ	kambizem	kambizem	kambizem	kambizem	kambizem
pH (ppm)	6,7	6	6,5	6,7	6,5
Ca (ppm)	1910	1610	2310	1840	1960
Mg (ppm)	216	171	209	233	173
P (ppm)	68	95	31	49	66
K (ppm)	209	257	277	338	340

Obr. 4: Schéma pokusných pozemků



4.1.2 Agrotechnika

Společnost Statek Chyšé uplatňuje minimalizační postupy při zpracování půdy. Po sklizni předplodiny, kterou na všech pokusných půdních blocích byla řepka ozimá, byla provedena mělká podmítka radličkovým podmítačem Horsch Terrano 12 FM. Před setím bylo provedeno kypření radličkovým kypřičem Horsch Tiger 8 MT do hloubky 25 cm. Setí odrůdy Ponticus bylo uskutečněno 23.9.2020 s výsevkem 175 kg/ha pomocí secího stroje Horsch Sprinter 9 SW s přihnojením 130 kg/ha NPK pod patu.

V průběhu vegetace proběhlo regenerační hnojení 59 kg N ve formě ledku amonného s dolomitem (LAD), produkční hnojení 54 kg N/ha v hnojivu DAM a kvalitativní hnojení 67 kg N/ha v hnojivu LAD. Veškeré hnojení bylo provedeno uniformní dávnou N stejnou na všech pozemcích. Sklizeň proběhla 14.8.2021.

4.1.2.1 Odrůda Ponticus

Ponticus je poloraná až polo pozdní odrůda pšenice ozimé s vynikající potravinářskou kvalitou. Má stabilní číslo poklesu a současně i velmi vysokou úroveň dusíkatých látek. Ponticus je velmi kladně hodnocen v odolnosti k poléhání. Doporučeným termínem výsevu je září až konec října. Cílová hustota porostů je u této odrůdy 700–750 klasů/m². Výnosy v České republice se stabilně pohybují mezi 6,9 t/ha až 9,5 t/ha.

Tab. 3: Podrobný popis výživy a hnojení

Datum	Množství	Název hnojiva
23.09.2020	130 kg	<i>NPK 10-26-26</i>
18.03.2021	220 kg	<i>LOVOFERT LAD 27</i>
14.04.2021	180 kg	<i>LOVODAM 30</i>
24.04.2021	2 l	YaraVita Gramitrel
24.04.2021	0,15 l	YaraVita Mantrac Pro
20.05.2021	250 kg	<i>LOVOFERT LAD 27</i>
13.06.2021	0,2 l	YaraVita Bortrac 150
13.06.2021	0,1 l	YaraVita Coptrac 500
13.06.2021	0,3 l	YaraVita Zintrac 700
13.06.2021	1,5 l	YaraVita Thiotrac 300

Tab. 4: Podrobný popis chemické ochrany v průběhu vegetace

Datum	Množství	Název ochrany	Účinná látka
14.09.2020	1,5 l	Glister Ultra	<i>Glyphosate</i>
11.10.2020	0,1 g	Lambo 50 EC	<i>Lambda-Cahalotrin</i>
11.10.2020	1,8 l	Chlortoluron 500 SC	<i>Chlortoluron</i>
24.04.2021	1 l	Agri CCC - 750 SL	<i>Chlormekvát chlorid</i>
24.04.2021	0,9 l	Prochloras 450 EC	<i>Prochloraz</i>
20.05.2021	50 g	Response	<i>Pyroxsulam</i>
20.05.2021	50 g	Orcane	<i>Florasulam, Pyroxsulam</i>
13.06.2021	0,1 g	Lambo 50 EC	<i>Lambda-Cahalotrin</i>
13.06.2021	0,8 l	Boogie Xpro	<i>Bixafen, spiroxamine, prothioconazole</i>
13.06.2021	75 ml	Superfin	<i>Polyether siloxanes, heptamethyltrisiloxan</i>

4.2 Zpracování mapových podkladů

Pro výpočet výnosového potenciálu byly použita řada satelitních snímků z družice Sentinel 2 z let 2018 až 2020. Pro analýzu byl využit produkt s úrovní zpracování dat L2A, který poskytuje snímky s atmosférickou korekcí. Tyto snímky jsou zpracovány procesorem Sen2Cor a PlanetDEM. Výnosový potenciál byl stanoven na základě dvou vegetačních indexů – NDVI a EVI ze stejného časového rozmezí. Satelitní snímky a výnosové mapy byly zpracovávány v prostředí programu ESRI ArcGIS Pro.

4.2.1 Zpracování vegetačních indexů a výnosového potenciálu

Pro výpočet výnosového potenciálu byl ke každému zkoumanému roku použit poslední bezoblačný snímek v druhé polovině vegetačního roku dané plodiny. U každého snímku byl vypočítán vegetační index NDVI a EVI dle rovnic uvedených níže. Pro výpočty bylo využito

následujících pásem – B02, modré pásmo s vlnovou délkou 490 nm, B04 – červené pásmo v délce 665 nm a B08 – blízké infračervené ve vlnové délce 842 nm

$$EVI = 2,5 * \frac{B08 - B04}{(B08 + 6 * B04 - 7,5 * B02) + 1}$$

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$$

Následně bylo využito nástroje k výpočtu popisné statistiky – Zonal statistics pro stanovení průměrné hodnoty indexu pro daný půdní blok. Tato hodnota byla využita pro stanovení relativní hodnoty indexu dle vzorce uvedeného níže. Kde platí, že $NDVI_{px}$ je hodnota spektrálního indexu v daném bodě, $NDVI_{pot}$ je NDVI potenciál v % a NDV_{PB} je průměrná hodnota vegetačního indexu za půdní blok.

$$NDVI_{pot} = \frac{NDVI_{px}}{avg\ NDVI_{PB}} \times 100$$

Stejný postup byl dodržen pro výpočet potenciálu indexu EVI. Následně byla rastrová vrstva převedená do vektorové formy pomocí nástroje Raster to Points, z níž byla pomocí prostorových interpolací odvozena rastrová vrstva, která byla použita pro zprůměrování hodnot za 3 sledované roky pomocí Cell statistics.

Pro stanovení výživového stavu rostlin byl pro každý půdní blok vypočítán index REIP na snímcích nejbližší odběrovému termínu vzorků. REIP byl vypočítán dle rovnice:

$$REIP = 700 + 40 * \frac{\left(\frac{B04 + B07}{2}\right) - B05}{B06 - B05}$$

4.2.2 Zpracování výnosových dat

Data z výnosoměru byla předzpracována v aplikaci Microsoft Excel. Chybná data byla odstraněna na základě stanovení intervalu spolehlivosti v rozmezí $\pm 3\sigma$. Tyto hodnoty se nazývají meze spolehlivosti, na které navazují nepřijatelné odchylky. Data, která spadají do nepřijatelné odchylky se nazývají oblasti zamítnutí a byla odstraněna. Následně byly v programu ArcGIS Pro odstraněny body, které se nacházely v blízkosti 1 m od dalšího bodu (Sudduth & Drummond 2007).

Takto upravená data byla použita ke zpracování výnosové mapy pomocí interpolační metody Kriging. Na základě této mapy byl následně zpracován relativní výnosový potenciál každého bloku dle rovnice:

$$\text{Výnosový potenciál} = \frac{Výnos_{px}}{\text{avg } Výnos_{PB}} \times 100$$

Kde platí, že výnos $Výnos_{px}$ = hodnota výnosu daného pixelu a $\text{avg } Výnos_{PB}$ = průměrný výnos daného půdního bloku. Data z výnosoměru z roku 2020 byla použita pro zpřesnění mapy výnosového potenciálu.

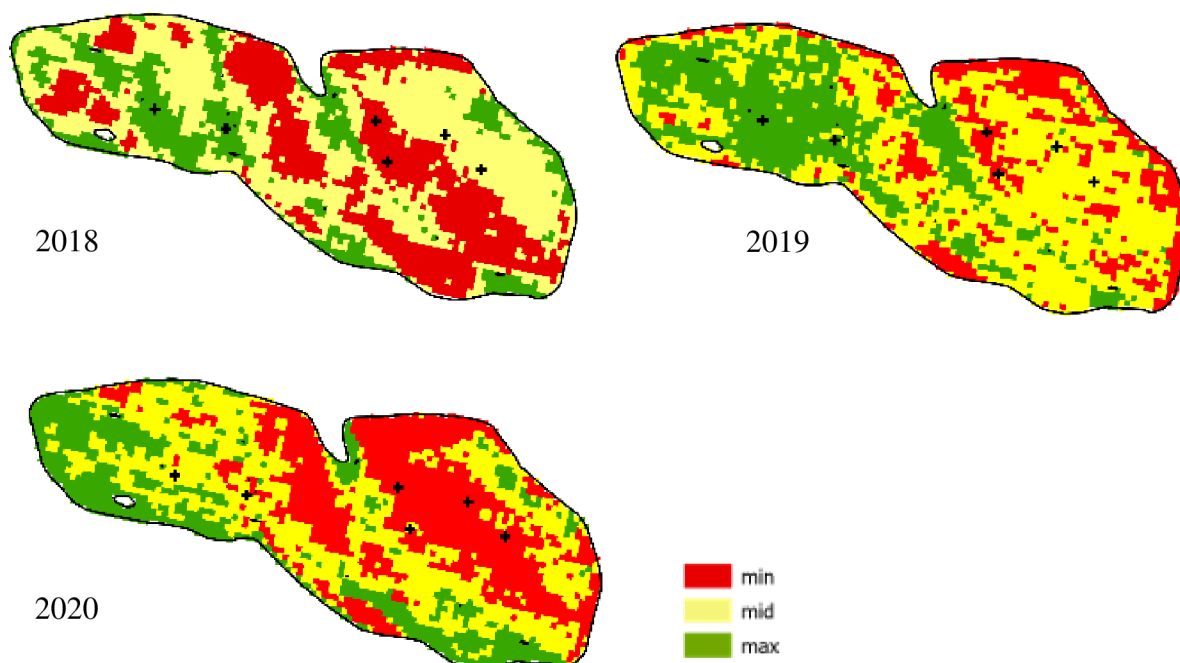
4.3 Polní část

V polní části byly stanoveny odběrové body na základě výnosového potenciálu a následně provedeny 3 odběry v různých růstových fázích pšenice ozimé.

4.3.1 Stanovení odběrových bodů

Odběrové body byly stanoveny na základě výnosového potenciálu, který byl vypočten z časové řady satelitních snímků v letech 2018–2020 pomocí indexu EVI z druhé poloviny vegetačních období. Index EVI byl pro výpočet výnosového potenciálu zvolen z důvodu jeho vlastnosti nejlépe vystihnout prostorovou heterogenitu pozemku. Průběh výnosového potenciálu je ve sledovaném časovém období znázorněn na obrázku 5.

Obr. 5: Vývoj zón výnosového potenciálu na pozemku 8302 v letech 2018 - 2020

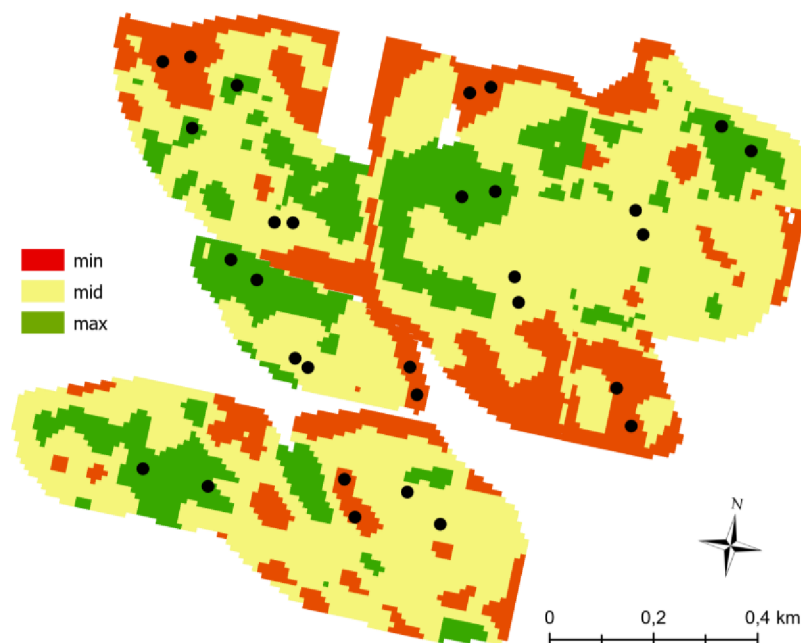


Tab. 5: Snímky z družice Sentinel použité pro výpočet výnosového potenciálu

Ročník	Datum Snímku	Snímek
2018	7.5. 2018	T33UUR_20180507T102019
2019	3.6.2019	T33UUR_20190603T101031
2020	8.5.2020	T32UQA_20200508T101031

Dlouhodobý výnosový potenciál byl následně rozdělen do tří produkčních zón – zóna s nejnižším produkčním potenciálem (min), zóna se středním potenciálem (mid) a zóna s nejvyšším potenciálem (max) a odběrové body byly rozmístěny tak, aby vždy dva body spadaly do každé zóny zkoumaného půdního bloku, tak jak je zobrazeno na obrázku 6. Hodnoty výnosových potenciálů se na vybraných pozemcích pohybovaly v rozmezí 72–117 %.

Obr. 6: Základní zóny výnosového potenciálu a odběrové body



4.3.2 Odběr vzorků

Odběr vzorku proběhl na předem stanovených bodech vždy z plochy 0,25 m² ve třech různých růstových fázích rostliny. Odběrová místa byla zaznamenána a v terénu lokalizována pomocí aplikace ESRI Fields maps. Při prvotním zaměření odběrových míst byl zohledněn pohyb secího stroje tak, aby nedocházelo k překryvu řádků. Detailní harmonogram odběrů a růstovou fází je zaznamenán v tabulce níže.

Tab. 5: Rozpis prováděných odběrů rostlin

Datum odběru	BBCH	Typ vzorku
10.6.2021	51	Celé rostliny
12.7.2021	75	Celé rostliny
10.8.2021	89	Klasy

4.4 Laboratorní část

4.4.1 Zpracování vzorků

Pro přesnější stanovení výnosu v daném odběrovém bodě byly klasy odebrané při třetím odběru nejprve spočítány a následně vymláčeny na ruční mlátičce. Takto připravené vzorky byly následně vyčištěny pomocí laboratorní vzduchové čističky. Vyčištěné zrno bylo poté zváženo na laboratorních vahách a následně rozemleto na mlýnku IKA MF 10.

Vzorky celých rostlin byly nejprve spočítány a zváženy na laboratorní váze, poté byl vybrán reprezentativní vzorek 25 odnoží, který byl rozemlet na střížném mlýnu Retsch SM 100 na sítu s průměrem 20 mm. Pro stanovení obsahu sušiny byly tyto vzorky následně zváženy a dosušeny v sušičce. Po vysušení byl opět odebrán reprezentativní vzorek, který byl rozemlet na výsledných 1 mm. Takto zpracované vzorky byly připraveny na analýzu obsahu dusíku.

4.4.2 Stanovení obsahu dusíku v rostlinách

Stanovení obsahu dusíku v rostlině pšenice ozimé proběhlo pomocí Kjeldahlovy metody, tato metoda byla představena v roce 1883 Johanem Kjeldahlem. Princip této metody spočívá v mineralizaci organických látek pomocí koncentrované kyseliny sírové. Po alkalizaci mineralizátu je destilací uvolněn amoniak, který je jímán v předloze v roztoku kyseliny borité. Poté je jeho obsah stanoven titrací (Munoz-Huerta 2013).

4.4.3 Příprava vzorků a mineralizace

Pro stanovení obsahu dusíku byly použity reprezentativní části vzorků odebraných na předem určených odběrových bodech. Tyto vzorky byly nejdříve rozmělněny tak, jak je popsáno v kapitole 4.4.1 a pro potřeby analýzy bylo odváženo 0,5 g rostlinného materiálu v případě vzorku 1 a 2 (celé rostliny) a 0,4 g vzorku 3 (zrno). Po odvážení vzorků byl do kyvet byl přidán katalyzátor pro mineralizaci (směs $K_2SO_4 + Se + CuSO_4 \cdot 5 H_2O$), který slouží ke zvýšení bodu varu směsi na potřebných 380 °C až 420 °C. Pro ověření metody je do panelu se vzorky přidáván slepý vzorek (prázdna kyveta) a jeden vzorek se známým obsahem dusíku (referenční standard).

Kyvety se vzorkem byly umístěny do stojanu mineralizačního bloku a následně bylo přidáno 10 ml 96% roztoku kyseliny sírové pomocí automatického dávkovače. Stojan se vzorky byl zasunut do výtahu mineralizačního bloku a následně zakryt víkem pro odsávání par.

Mineralizace vzorků probíhá po dobu 2 hodin. Nejprve je hnízdo se vzorky v prvních třiceti minutách zahřáto na 360 °C, následně je na dalších třicet minut zahřáto na požadovaných 400 °C. Poté probíhá postupné snižování teploty až do úplného vychladnutí.

4.4.4 Proces stanovení obsahu dusíku

Ke stanovení obsahu dusíku byl použit přístroj Gerhardt Vapodest 50s. Analýza vzorků je řízena automaticky pomocí programu Vapodest Manager. V průběhu analýzy je do květy ke vzorku přidávána NaOH, což vede k přeměně amonných iontů v síranu amonném na amoniak. Tento roztok je zahříván, aby se uvolnil plynný čpavek, který následně prochází zpětným chladičem, kde kondenzuje. Poté je zachycen v jímacím roztoku kyseliny borité. Dalším krokem je titrace pomocí HCl, kdy je na základě spotřebované HCl v porovnání s navážkou vzorku stanoven obsah dusíku. Použitý software automaticky výsledky zpracuje a uloží.

4.4.5 Odběr dusíku rostlinou pšenice ozimé

Odběr dusíku nadzemní biomasou byl pro vzorky odebrané během jarní vegetace vypočten na základě zjištěného výnosu biomasy v daném bodě a obsahu dusíku v odebraném vzorku.

$$\text{Odběr N (kg/ha)} = \text{obsah dusíku (\%)} * \text{zjištěný výnos biomasy (t/ha)}$$

Pro zjištění celkového odběru dusíku nadzemní biomasou byl nejdříve stanoven odběr dusíku zrnem stanovený na základě zjištěného výnosu a obsahu dusíku v zrně. K němu byl přičten dusík odebraný slámou. Množství slámy a jí odebraného dusíku bylo stanoveno dle vyhlášky č.377/2013.

$$\text{Celkový odběr N (kg/ha)} = (\text{obsah dusíku (\%)} * \text{výnos (t/ha)}) * 10 + (\text{výnos zrna (t/ha)} * 0.9) * \text{průměrný odběr N slámou (kg/t)}$$

Bilance dusíku byla stanovena jako rozdíl dávky N dodaného v minerálních hnojivech a odběru N v zrně.

$$\text{Bilance N (kg)} = \text{N v min. hnojivech (kg/ha)} - \text{odběr N v zrně (kg/ha)}$$

4.4.6 Stanovení množství biomasy

Množství biomasy bylo dopočítáno na základě váhy odebraných vzorků. Vzorky byly zváženy, po odebrání a rozemletí reprezentativního vzorku byla tato část opět zvážena a vysušena. Během sušení byla sledována hmotnost vzorků, aby bylo zajištěno stoprocentní vysušení. Vlhkost v době vážení se pohybovala mezi 8–11 %.

$$\text{Vlhkost při vážení (\%)} = 1 - \frac{m \text{ suchého vzorku}}{m \text{ při vážení}} * 100$$

$$\text{Množství sušiny (g)} = m \text{ při vážení (g)} - m \text{ při vážení (g)} * \text{vlhkost (\%)}$$

4.4.7 Stanovení počtu odnoží

Počet odnoží na metr čtvereční byl vypočten z odebraných vzorků v rámci prvního a druhého odběru. Veškeré odnože v rámci každého odběrového místa byly spočítány a vynásobeny čtyřmi pro stanovení celkového množství na m².

4.5 Statistické vyhodnocení

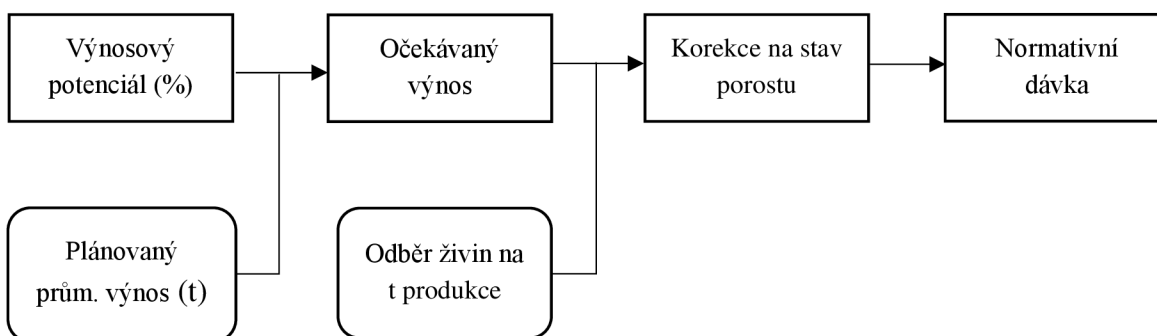
Hodnoty vegetačních indexů a výnosových potenciálů v odběrových bodech byly získány v aplikaci ArcGIS Pro pomocí prostorové analýzy Extract Multi Values to Points, pomocí které byly výsledné hodnoty uloženy do souboru s odběrovými body.

Pro hodnocení vztahu jednotlivých indexů ke sledovaným znakům byla využita korelační regresní analýza v aplikaci Microsoft Excel. Pro hodnocení časových závislostí byl použit program Statistica.

4.6 Výpočet diferenciované dávky N

Výpočet diferenciované dávky N pro danou výnosovou hladinu byl proveden na základě vypočtené výnosové úrovně s ohledem na očekávaný výnos plodiny. Výnosová hladina byla korigována na aktuální stav pro podporu porostu v místech, kde je aktuální stav porostu horší než výnosový potenciál.

Obr. 7: Schéma stanovení normativní dávky dusíku (Lukas et al. 2020, vlastní úprava)



Výnosová hladina byla korigována na aktuální stav porostu. Pro tuto korekci byla relativní hodnota daného indexu na snímku pořízeného přibližně v době přihnojení odečtena z hodnot dlouhodobého výnosového potenciálu. Pro stanovení regeneračních a produkčních dávek hnojiva byl pak touto hodnotou potenciál korigován tak, aby se podpořily slabší porosty na plochách s větším výnosovým potenciálem.

Podkladová mapa pro regenerační hnojení byla optimalizována pomocí aktuálních hodnot EVI. Pro stanovení produkčního hnojení byl využit index REIP, který vykázal nejvyšší korelace s výživovým stavem porostu. V tabulce č.6 jsou uvedeny satelitní snímky použité pro korekci výnosového potenciálu aktuálním stavem porostu.

Vzhledem k nedostupnosti satelitních snímků z důvodu oblačnosti byly podkladové mapy pro kvalitativní hnojení zpracovány na základě dlouhodobých výnosových potenciálů. Pro zabránění polehání porostu v nejvyšších výnosových zónách byla maximální dávka N rovna maximální dávce při využití rovnoměrného hnojení.

Tab.6: Korekce dlouhodobého výnosového potenciálu na stav porostu

Typ hnojení	Korekce satelitním snímkem
Regenerační	Sentinel 2.3.2021
Produkční	Sentinel 23.4.2021
Kvalitativní	Snímek nedostupný – využití dl. výnosového potenciálu

5 Výsledky

Celkový výnosový potenciál pro vytvoření diferenciovaných dávek N hnojení byl vypočítán ze snímků v letech 2018–2021. Index EVI prokázal vyšší schopnost rozlišení prostorové heterogenity porostu zejména v oblastech v okolí hodnot výnosového potenciálu 90–100 %, z tohoto důvodu byla tato charakteristika následně využita pro přípravu podkladů pro hnojení N. Detailní rozdělení hodnot je uvedeno v tabulce níže.

Tab.7: Zastoupení výnosového potenciálu na základě indexu EVI vyjádřené v procentech

DPB	Index	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
8202/4a	EVI			0,44	7,58	18,29	20,65	26,8	24,44	1,81	
	NDVI				1,54	13,51	30,86	44,81	9,82		
8202/4b	EVI			1,13	4,5	4,38	36,38	40,88	12,75		
	NDVI				1,5	6,5	39,25	49,88	2,88		
8202/a	EVI	0,12	0,32	0,81	2,63	7,69	26	58,78	3,6		
	NDVI		0,2	0,2	0,77	5,46	31,84	61,53			
8202/b	EVI	0,36	1,07	1,95	6,48	15,06	22,77	27,94	16,3	7,51	0,56
	NDVI	0,2	0,83	1,23	2,86	14,86	24,01	37,68	17,77	0,56	
8302	EVI		0,23	0,87	1,43	9,14	37,19	37,46	13,44	0,23	
	NDVI			0,27	1,63	4,5	43,7	41,66	8,24		

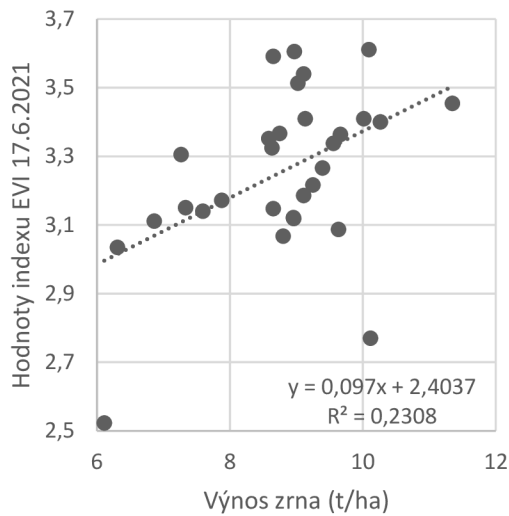
Z tabulky č. 7 je patrné, že nejvyšší prostorovou heterogenitu je možné pozorovat na pozemku 8202/b, kde středové hodnoty reprezentovaly přibližně 65 % výměry. Naopak jako téměř prostorově homogenní pozemek lze označit pozemek 8202/4b, kde hodnoty dlouhodobého výnosového potenciálu v rozmezí 95 – 105 % jsou reprezentovány na více než 78 % plochy.

5.1 Vztah vegetačních indexů a výnosu

Na grafu 1 a 2 je zachycen vztah vegetačních indexů EVI a NDVI v době metání (BBCH 51), které byly přepočítány na hodnotu v odběrové bodě a výnosu v odběrových bodech stanoveným při odběru vzorku klasů 10.8.2021. Oba indexy vykázaly kladnou korelaci s výnosem, index EVI vykázal mírný stupeň korelace, index NDVI střední stupeň korelace. Nejvyššího stupně korelace dosáhly oba indexy zejména v místech nižšího výnosu, tento jev lze vysvětlit procesem nasycení, kdy vegetační indexy neposkytují přesně výsledky v místech s hustým porostem.

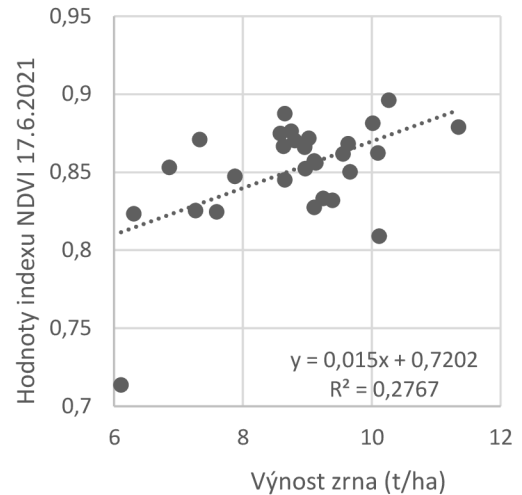
Graf 1: Vztah indexu EVI BBCH 51 a výnosu

$r = 0,48$



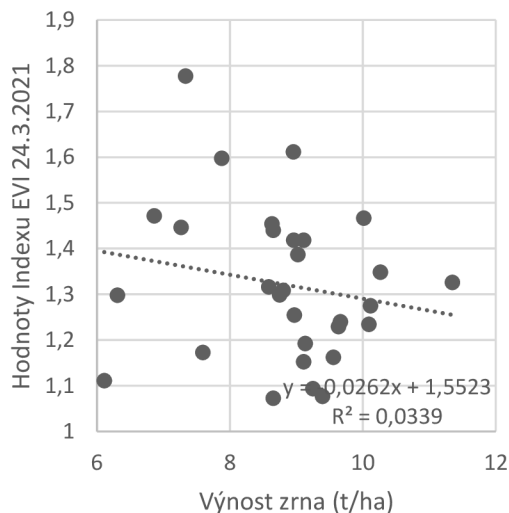
Graf 2: Vztah indexu NDVI BBCH 51 a výnosu

$r = 0,52$



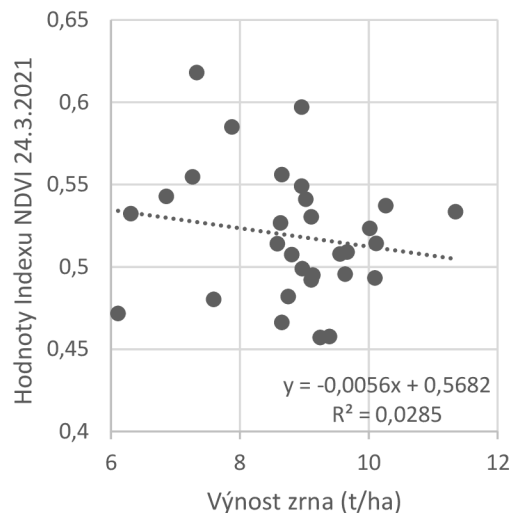
Graf 3: Vztah indexu EVI BBCH 29 a výnosu

$r = 0,-18$



Graf 4: Vztah indexu NDVI BBCH 29 a výnosu

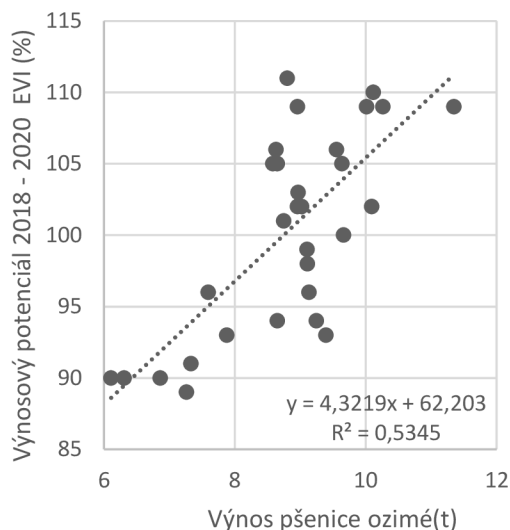
$r = -0,17$



Na grafu č. 3 a 4 je zobrazen vztah indexů EVI a NDVI v rané vývojové fázi rostliny přibližně v období kdy rostlina dosáhla BBCH 29 (24.3.2021) a výnosu zrna stanovených při odběru vzorku klasů. Oba indexy vykazují velmi slabou nepřímou závislost a je tedy patrné, že využití vegetačních indexů v ranných vývojových fázích pro predikci výnosu zrna je zcela nevhodné.

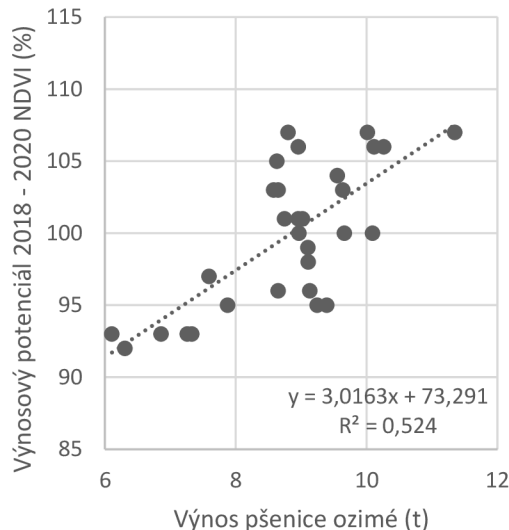
Graf 5: Vztah výnosového potenciálu EVI a výnosu

r = 0,73



Graf 6: Vztah výnosového potenciálu NDVI a výnosu

r = 0,72



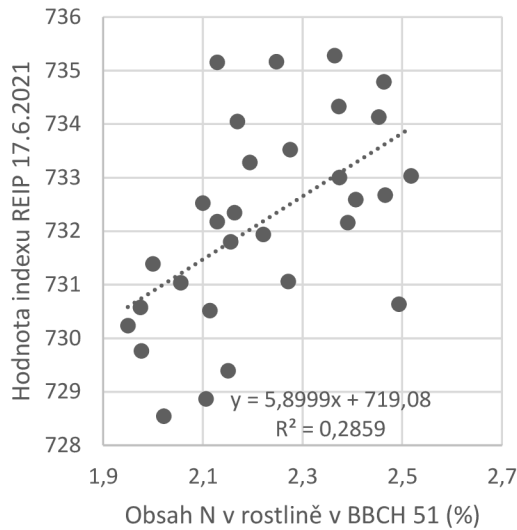
Jak je patrné z grafu 5 a 6, oba dlouhodobé výnosové potenciály stanovené z indexů v letech 2018-2020 vykázaly kladnou korelaci s výnosem zrna v roce 2021. Stupeň korelace je v obou případech vysoký, dlouhodobý výnosový potenciál založený na indexu EVI vykázal mírně vyšší korelaci, avšak vzhledem k množství odběrových bodů je tento rozdíl zanedbatelný. Stejně tak jako při porovnání hodnot indexu v BBCH 51 a výnosu, i výnosový potenciál vykazuje nejlepší výsledky

Z výsledků vyobrazených na grafu 2 lze odvodit, že při navýšení indexu NDVI o 0,1 v době metání se průměrný zvýšil výnos zrna o 2,8 t/h.

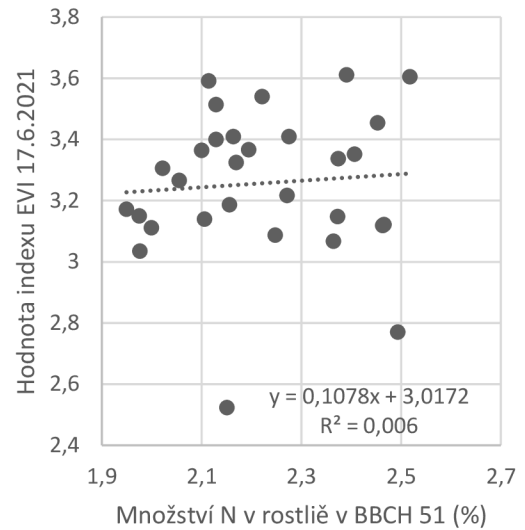
5.2 Vztah vegetačních indexů a výživového stavu

Na grafech 7–9 je zobrazen vztah mezi jednotlivými indexy množství dusíku v rostlině pšenice ozimé. Pro korelace byly použity satelitní snímky z 17.6.2021 a obsahy dusíku získané z 1. odběru celých rostlin prováděném 10.6.2021. Index EVI vykázal prakticky nulovou závislost a je možné tvrdit, že je lineárně nezávislý. Index NDVI vykazuje nízký stupeň korelace. Nejvyšší stupeň korelace mezi obsahem dusíku a vegetačním indexem byl zjištěn u indexu REIP (r = 0,53, střední korelační závislost). Posun inflexního bodu u indexu REIP o 2 mm odpovídal navýšení obsahu dusíku o 0,1 %.

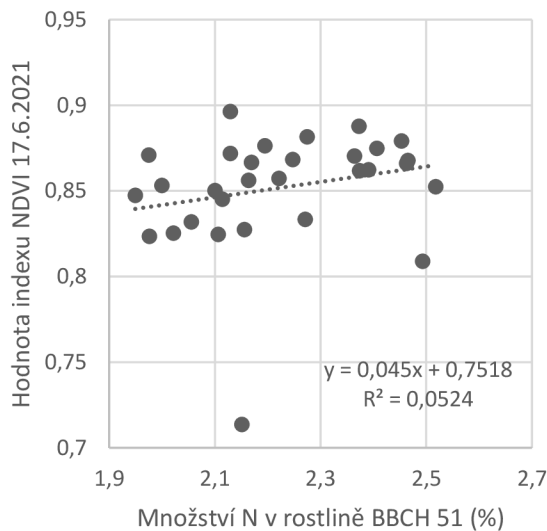
Graf 7: Vztah indexu REIP BBCH 51
obsahem dusíku v rostlině $r = 0,53$



Graf 8: Vztah indexu EVI BBCH 51 a obsahem
dusíku v rostlině $r = 0,07$



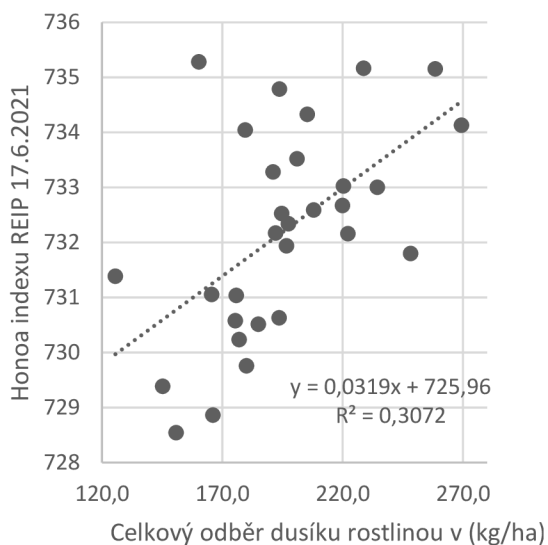
Graf 7: Vztah indexu NDVI BBCH 51 a obsahem
dusíku v rostlině $r = 0,23$



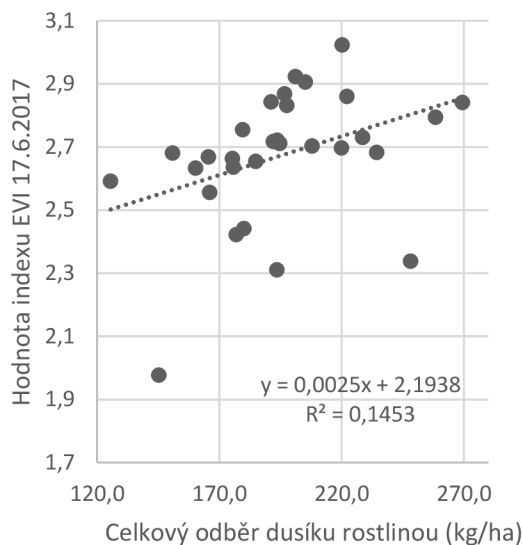
5.2.1 Vztah indexu a celkového odběru dusíku

Hodnocení vztahu vegetačních indexů a celkového odběru dusíku rostlinou bylo provedeno na základě snímků z 17.6.2021. Tento snímek byl zvolen na základě analýzy časové řady snímků ze zkoumaného území vykazovaly analýzy nejvyšší stupeň korelace s odběrem dusíku (hodnota r narůstala od 0,44 v období BBCH 29 a nejvyšší hodnot korelačního koeficientu dosáhla v BBCH 51 $r = 0,67$). V tomto období byla také provedena analýza ostatních indexů. Stejně tak jako v případě hodnocení obsahu dusíku, i celkový odběr dusíku vykázal nejvyšší korelaci i indexem REIP.

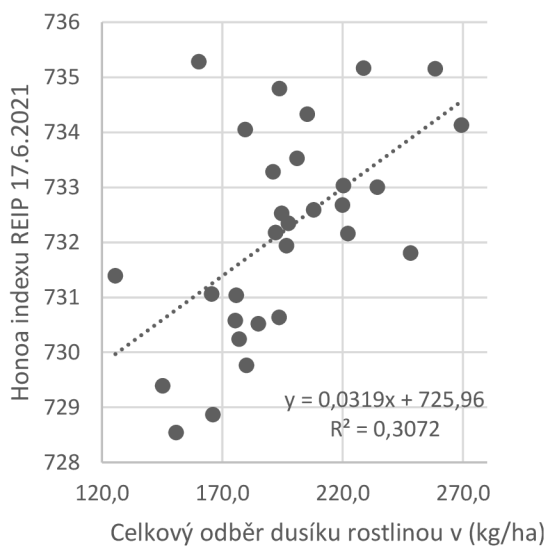
Graf 10: Vztah indexu REIP BBCH 51 a odběru N rostlinou $r = 0,55$



Graf 11: Vztah indexu EVI odběru N BBCH 51 rostlinou $r = 0,38$



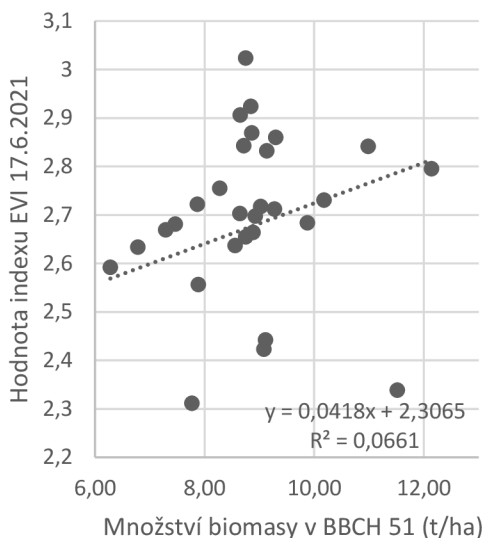
Graf 12: Vztah indexu NDVI BBCH 51 a odběru N rostlinou, $r = 0,45$



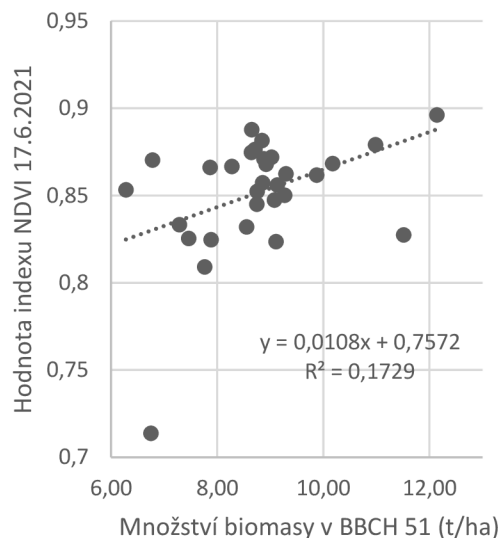
5.3 Vztah vegetačních indexů a množství biomasy

Pozitivní korelace mezi množstvím biomasy a vegetačním indexem byla zjištěna jak u indexu EVI, tak u indexu NDVI. Oba indexy vykazaly silnější korelaci s množstvím biomasy vyjádřenou počtem odnoží na 1m^2 (EVI $r = 0,43$ a NDVI $r = 0,53$) než s množstvím biomasy vyjádřeným v tunách na hektar, kde se vyskytl velmi nízký a nízký stupeň korelační závislosti (EVI $r = 0,25$ a NDVI $r = 0,41$). Nejsilnější korelace byly zaznamenány v místech s nízkým výnosovým potenciálem a zároveň s nízkým aktuálním množstvím biomasy. Tento trend je možné pozorovat díky procesu, kdy dojde k nasycení indexu v místech s hustým porostem.

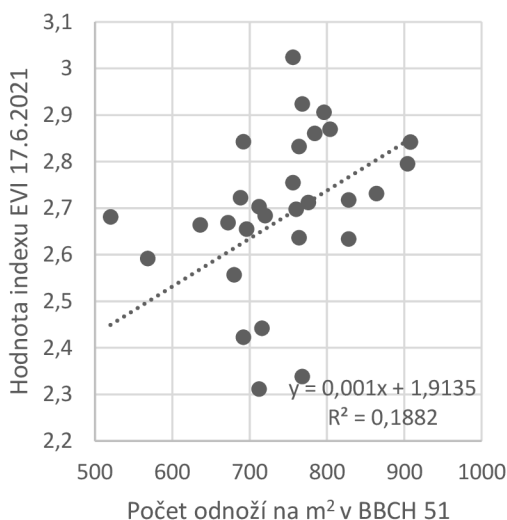
Graf 13: Vztah indexu EVI BBCH 51 a množstvím biomasy $r = 0,25$



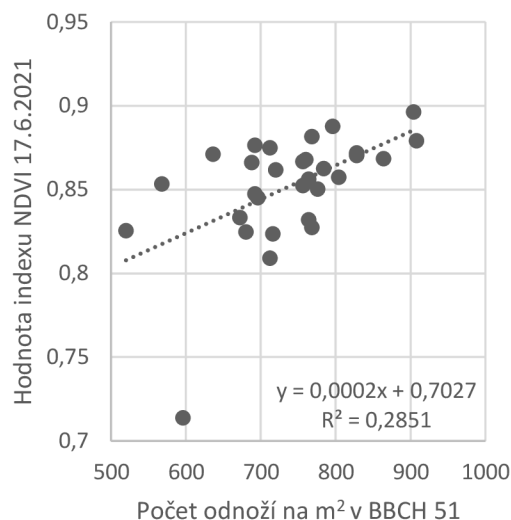
Graf 14: Vztah indexu NDVI BBCH 51 a množstvím biomasy $r = 0,41$



Graf 15: Vztah indexu EVI BBCH 51 a počtem odnoží na 1m² $r = 0,43$



Graf 16: Vztah indexu NDVI BBCH 51 a počtem odnoží na 1m² $r = 0,53$

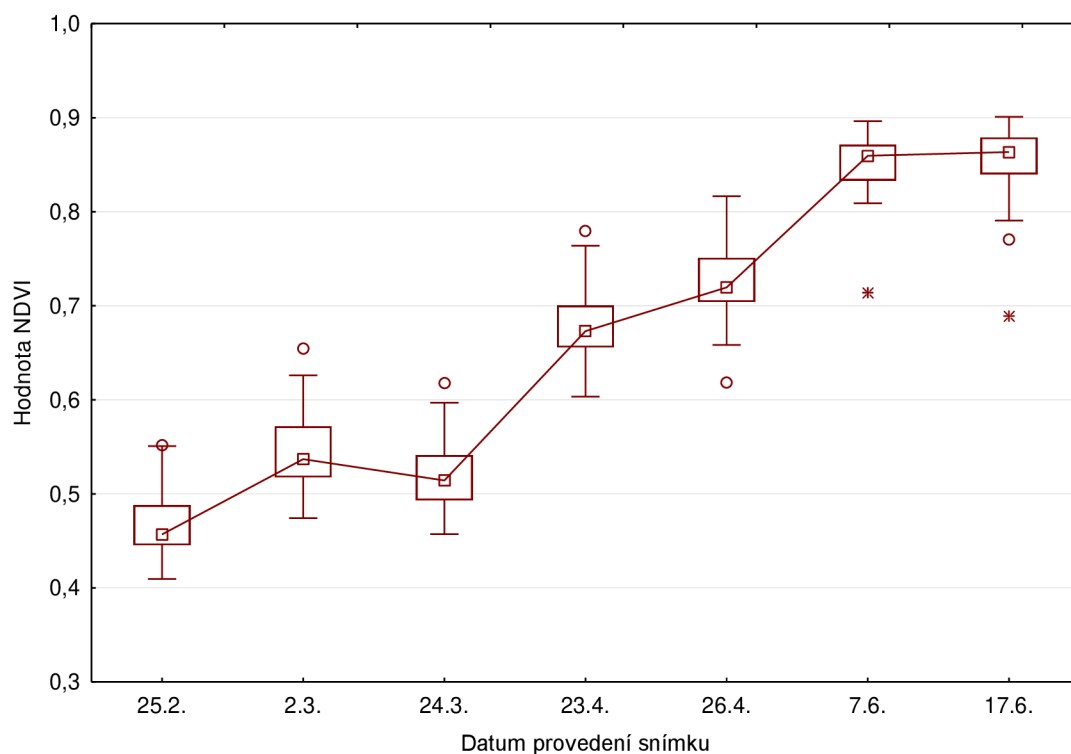


5.4 Vztah vývojové fáze rostliny a vegetačních indexů

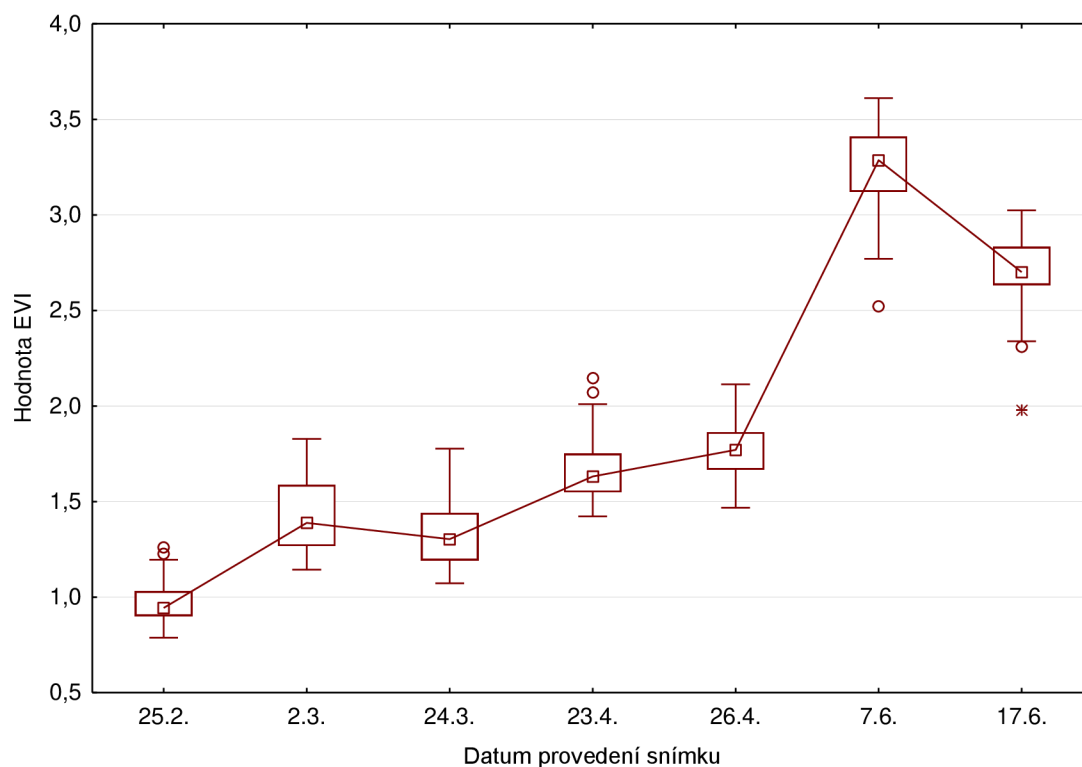
Na grafu 17 a 18 je zaznamenán průběh vývoje indexů EVI a NDVI ve vegetačním období pšenice ozimé v roce 2021. Graf zachycuje období v závěru odnožování, cca do 24.3., během níž dochází k pozvolnému nárůstu obou indexů, jež je zejména ovlivněno množstvím chlorofylu a nedostatečnou fotosyntetickou aktivitou

V době ukončení odnožování je možné u obou indexů pozorovat inflexní bod, kdy dochází k rychlejšímu nárůstu hodnot obou indexů. V této době již dochází k intenzivní fotosyntéze, která ovlivňuje prudký nárůst vegetačních indexů. Oba indexy shodně rostou až do počátku kvetení. V této fázi již dochází k poklesu hodnot, která je způsobena snížením odrazivosti v době metání a kvetení, kdy dochází ke změně struktury a barvy porostu.

Graf 17: Graf vývoje indexu NDVI v období 25.2. – 17.6.2021



Graf 18: Graf vývoje indexu EVI v 25.2. – 17.6.2021



5.5 Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků

Jak bylo uvedeno v kapitole 5.1 dlouhodobý výnosový potenciál založený na indexu EVI dosáhl nevyššího korelačního koeficientu ($r = 0,73$) ve vztahu k výnosu zrna, z tohoto důvodu

byl tento index vybrán pro vytvoření dlouhodobého výnosového potenciálu a následnému odvození dusíkatého přihnojení. Regenerační a produkční přihnojení bylo zpracováno s přihlédnutím k aktuálnímu stavu porostu. Vzhledem k nedostupnosti satelitních snímků bylo kvalitativní hnojení zpracováno na základě dlouhodobého výnosového potenciálu.

5.5.1 Blok 8202/4a

Bilance dusíku na půdním bloku 8202/4a odpovídala navrženým produkčním zónám ve všech odběrových místech. V bodech s nejvyšším výnosem byla zaznamenána negativní bilance, naopak v bodech v nejhorší produkční zóně byl zaznamenán výrazný přebytek.

Tab.8: Bilance N a výnos srna v odběrových bodech PB 8202/4a

Odběrový bod	Zóna výnosového potenciálu	Výnos (t/ha)	Bilance dusíku (kg/ha)
1	Max	8,95	-8,7
5	Max	10,11	-31,5
3	Mid	8,95	16,1
6	Mid	8,58	27,7
2	Min	6,3	75,5
4	Min	6,85	67,2

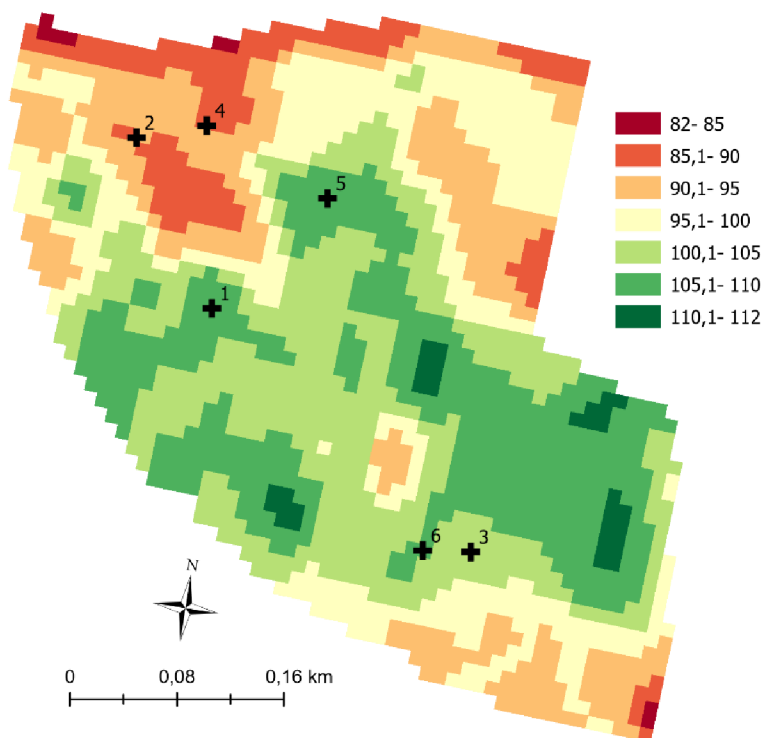
5.5.1.1 Výnosový potenciál

Výnosový potenciál (obr. 8) se na půdním bloku 8202/4a pohyboval v rozpětí 82–112 %. Do zóny s potenciálem pod 90 % spadalo 9,1 % výměry. Zóny s vyšším výnosovým potenciálem byly soustředěny do střední oblasti pozemku.

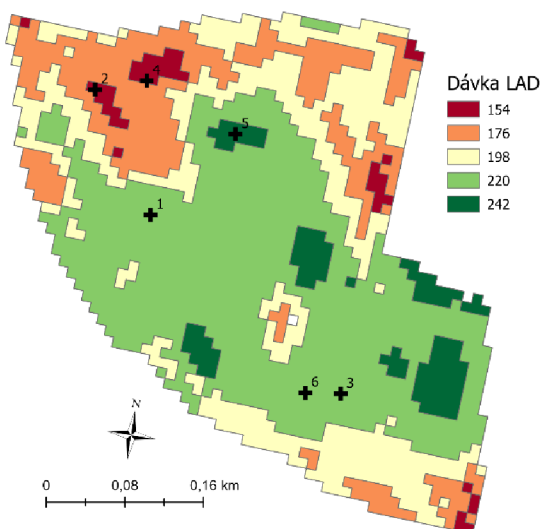
5.5.1.2 Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků

Ve sledovaném roce bylo na pozemku aplikováno celkem 194 kg N/ha. V rámci regeneračního hnojení bylo aplikováno 59,4 kg N/ha (220 kg LAD/ha), optimalizovaná dávka detailně zobrazená na obrázku č. 9 činí průměrně 55,6 kg N/ha (205,84 kg LAD/ha). Při produkčním hnojení bylo aplikováno 54 kg N/ha (180 kg DAM/ha), navržená dávka (obr. 10) odpovídá 50 kg N/ha (167 kg DAM/ha). Při kvalitativní hnojení bylo aplikováno 67,5 kg N/ha (250 kg LAD), navrhovaný systém hnojení (obr. 11) počítá s průměrnou aplikací 61 kg N/ha 225 kg (LAD/ha).

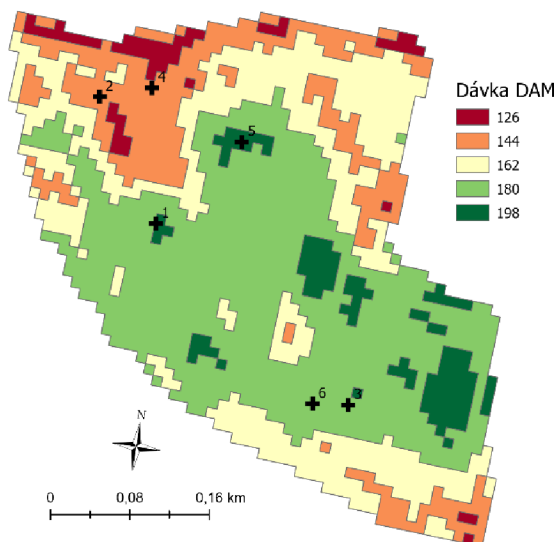
Obr. 8: Výnosový potenciál 2018–2021 (EVI), PB 8202/4a



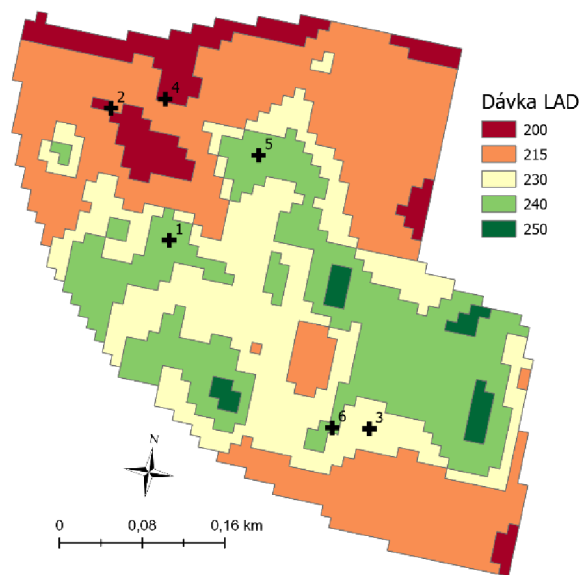
Obr. 9: Návrh regeneračního přihnojení
PB 8202/4a



Obr.10: Návrh produkčního přihnojení
PB 8202/4a



Obr. 11: Návrh kvalitativního přihnojení
PB 8202/4a



5.5.2 Blok 8202/4b

Bilance dusíku (tab. 9) na půdním bloku 8202/4b odpovídala navrženým produkčním zónám v 5 ze 6 odběrových míst. Pouze v bodě 10 výnos a tedy i bilance dusíku odpovídala spíše střední hladině.

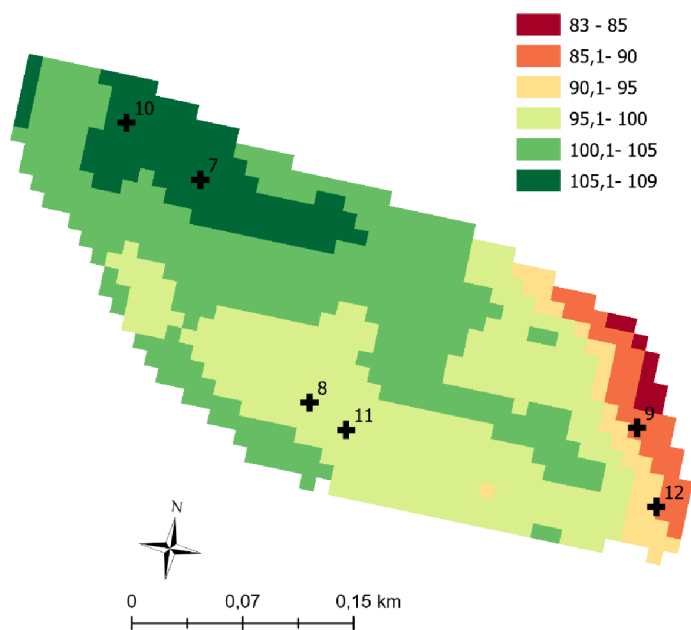
Tab. 9.: Bilance N a výnos srna v odběrových bodech PB 8202/4b

Odběrový bod	Zóna výnosového potenciálu	Výnos (t/ha)	Bilance dusíku (kg/ha)
7	Max	11,3	-32
10	Max	9,55	4,6
8	Mid	9,1	13
11	Mid	9,1	13,8
9	Min	7,2	69
12	Min	6,1	82

5.5.2.1 Výnosový potenciál

Maximální výnosový potenciál (obr. 12) byl na pozemku 8202/4b dosažen v severozápadní části, kde se pohyboval v hodnotě 100–109 procent. Zóna s nejnižším výnosovým potenciálem se nachází pouze v jihovýchodní části pozemku. Z hlediska rozložení pak 5,6 % výměry pozemku leží v zóně výnosového potenciálu pod 85 %, v zóně s nadprůměrným potenciálem od 105 % se nachází 12,75 % výměry pozemku.

Obr. 12: Výnosový potenciál 2018-2021 (EVI), PB 8202/4b

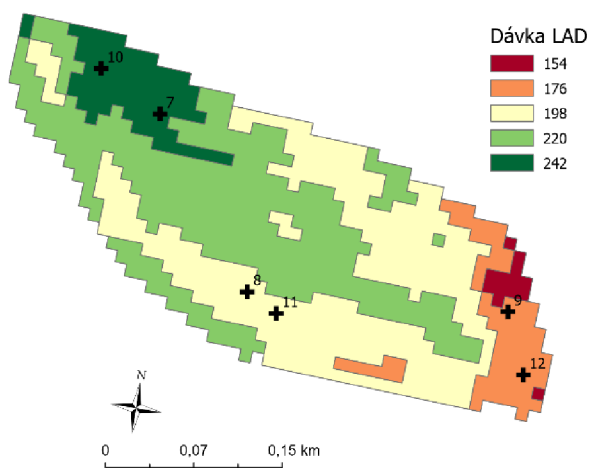


5.5.2.2 Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků

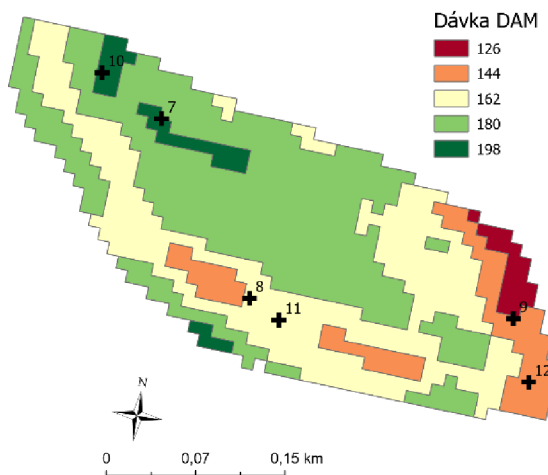
V rámci regeneračního hnojení bylo aplikováno 59,4 kg N/ha (220 kg LAD/ha), optimalizovaná dávka (obr. 12) činí průměrně 56,2 (208,25 kg LAD/ha). Při produkčním bylo aplikováno 54 kg N/ha (180 kg DAM/ha), dávka navržená na základě satelitních snímků (obr. 13) odpovídá 50 kg N/ha (169 kg DAM/ha). Při kvalitativním hnojení bylo aplikováno 67,5 kg N/ha (250 kg LAD), systém variabilní aplikace zobrazený na obr. 14 počítá s průměrnou aplikací 62,6 kg N/ha 232 kg (LAD/ha).

Při optimalizaci hnojení na základě satelitního snímku by se celková spotřeba N snížila průměrně o 13 kg N/ha (ze 194 kg/ha na 181 kg/ha).

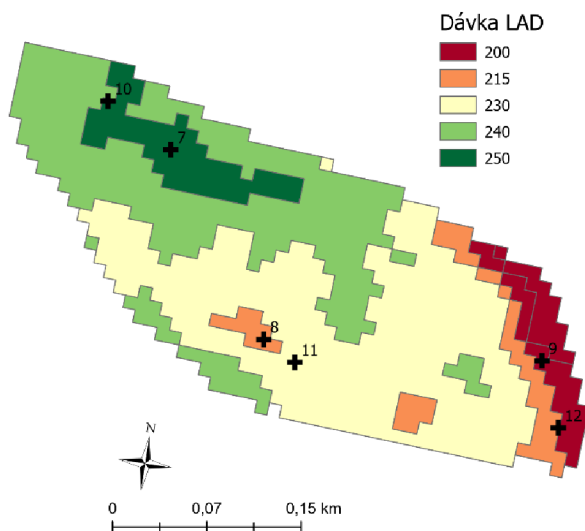
Obr. 13: Návrh regeneračního přihnojení
PB 8202/4b



Obr. 14: Návrh produkčního přihnojení
PB 8202/4b



Obr. 15: Návrh kvalitativního přihnojení
PB 8202/4b



5.5.3 Blok 8202/a

Jak je uvedeno v tabulce č. 10, z hlediska výnosu a bilance dusíku spadal na pozemku 8202/b do zóny s maximálním výnosovým potenciálem pouze bod 19. Ostatní body spadaly svými charakteristikami spíše do střední zóny. To je způsobeno vyrovnaností pozemku, kdy se 58 % výměry pohybuje mezi 100 a 105 % výnosového potenciálu.

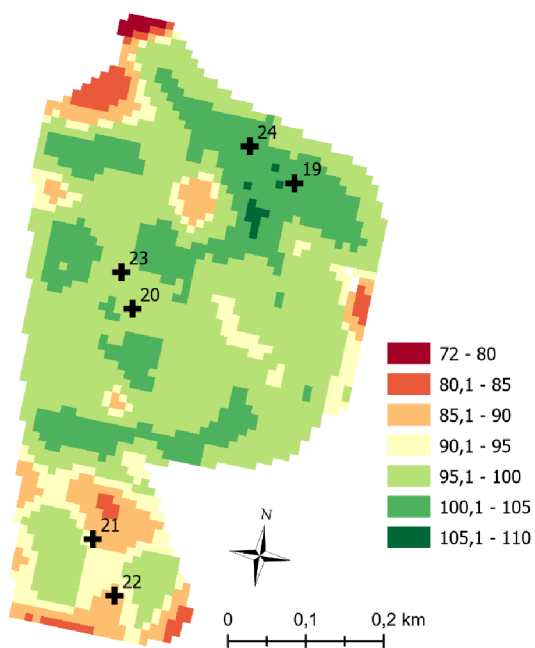
Tab. 10.: Bilance N a výnos srna v odběrových bodech PB 8202/a

Odběrový bod	Zóna výnosového potenciálu	Výnos (t/ha)	Bilance dusíku (kg/ha)
19	Max	9,6	-12
24	Max	8,6	14
20	Mid	9	10,3
23	Mid	9,1	11,9
21	Min	7,5	11
22	Min	78,6	10,9

5.5.3.1 Výnosový potenciál

Dlouhodobý výnosový potenciál na pozemku 8202/a zobrazený na obr. č. 16 se dá řadit mezi vyrovnané, jak již bylo zmíněno, většina výměry spadá do průměrné zóny výnosového potenciálu a pouze 1 % výměry spadá do zcela odlehlých zón.

Obr. 16: Výnosový potenciál 2018–2021 (EVI), PB 8202/a

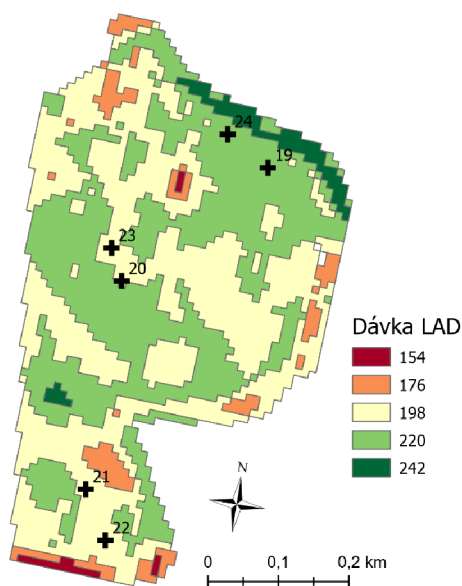


5.5.3.2 Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků

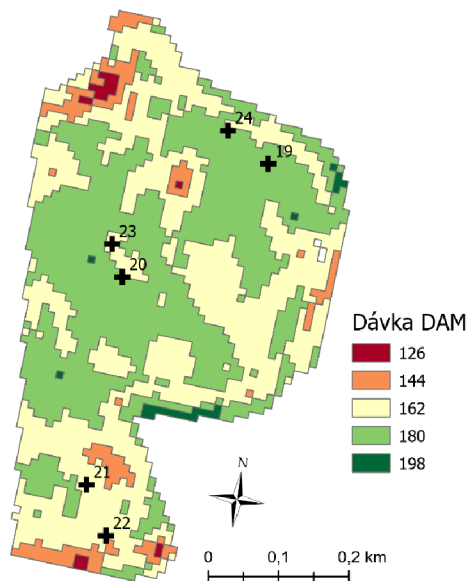
Na obr. 16 je vyobrazen návrh regeneračního hnojení, který počítá s průměrnou dávkou 57,5kg N/ha (213 kg LAD/ha). Při produkčním hnojení bylo původně aplikováno 54 kg N/ha (180 kg DAM/ha), navržená dávka (obr. 17) odpovídá 53,5 kg N/ha (175 kg DAM/ha). Při kvalitativním hnojení bylo aplikováno 67,5 kg N/ha (250 kg LAD), navrhovaný systém hnojení počítá s průměrnou aplikací 63,1 kg N/ha (235 kg LAD/ha).

Rozdíl mezi uniformní dávkou a diferenciovanou činí 7,5 kg N/ha.

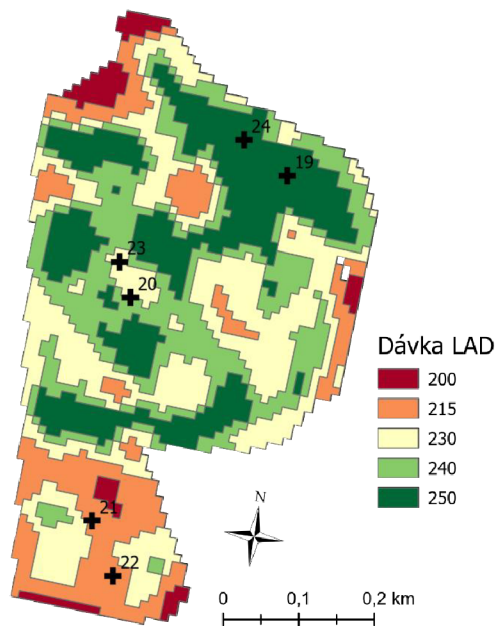
Obr. 17: Návrh regeneračního přihnojení
PB 8202/a



Obr.18: Návrh produkčního přihnojení
PB 8202/a



Obr. 19: Návrh kvalitativního přihnojení
PB 8202/a



5.5.4 Blok 8202/b

Bilance dusíku (tab. 11) na půdním bloku 8202/b odpovídala navrženým zónám ve 4 ze 6 odběrových míst. Odběrový bod č. 13 spadal svou charakteristikou spíše do střední produkční zóny a odběrový bod 18 se pohyboval na hranici střední a maximální produkční zóny.

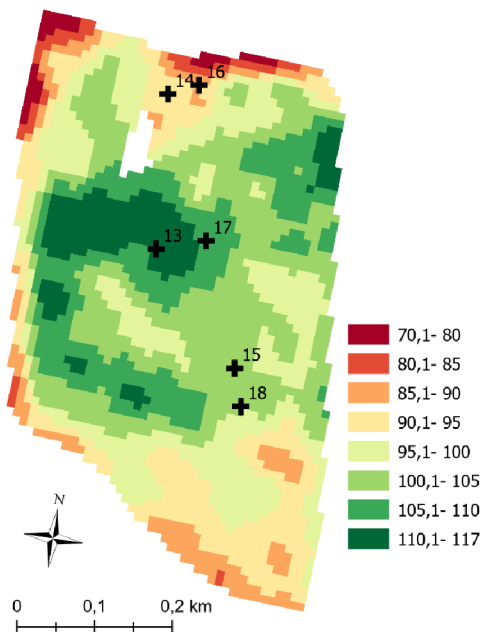
Tab. 11.: Bilance N a výnos srna v odběrových bodech PB 8202/b

Odběrový bod	Zóna výnosového potenciálu	Výnos (t/ha)	Bilance dusíku (kg/ha)
13	Max	8,8	0,9
17	Max	10,2	-10,4
15	Mid	8,7	25,09
18	Mid	9,6	5,7
14	Min	7,8	45,1
16	Min	7,3	49,7

5.5.4.1 Výnosový potenciál

Půdní blok 8202/b je z hlediska rozložení výnosového potenciálu (obr. 20) vykazuje mezi zkoumanými pozemky jednu z nejvyšších prostorových variabilit. Téměř 10 % dosahuje výnosového potenciálu pouze 85 % a 8 % pozemku má vyšší výnosový potenciál než 110 %.

Obr. 20: Výnosový potenciál 2018-2021 (EVI), PB 8202/b

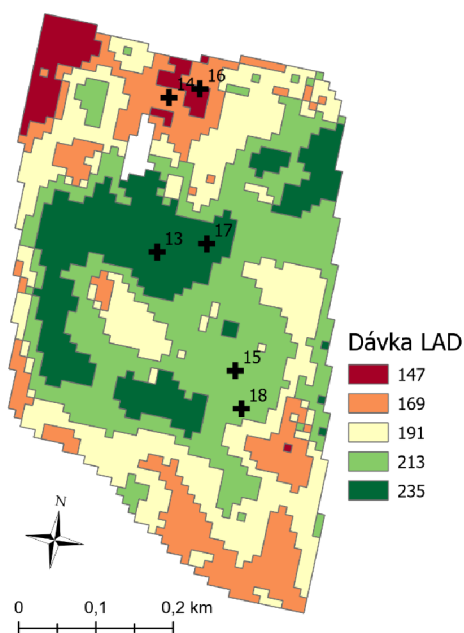


5.5.4.2 Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků

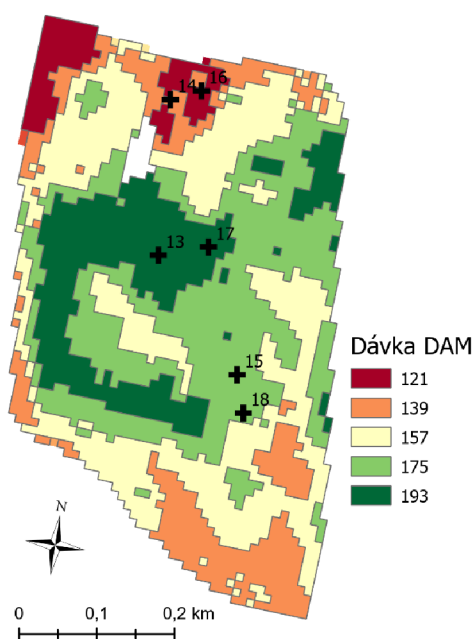
Na půdním bloku 8202/b bylo regeneračního hnojení bylo aplikováno 59,4 kg N/ha (220 kg LAD/ha), optimalizovaná dávka obr. 21) činí průměrně 56,7kg N/ha (210 kg LAD/ha). Při produkčním hnojení byla průměrná aplikovaná dávka snížena 54 kg N/ha na 51 kg N/ha (170 kg DAM/ha). Při kvalitativní hnojení bylo aplikováno 67,5 kg N/ha (250 kg LAD), variabilní aplikace na obr. č. 23 je navržena s průměrnou dávkou 62,7 kg N/ha (232 kg LAD/ha).

Celková spotřeba N na půdním bloku byla snížena o 12 kg N/ha.

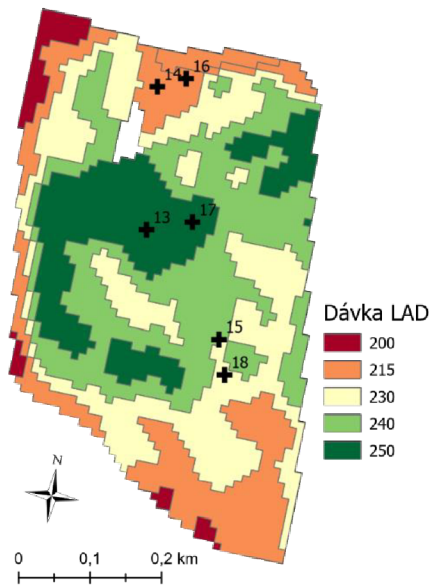
Obr. 21: Návrh regeneračního přihnojení
PB 8202/b



Obr. 22: Návrh produkčního přihnojení
PB 8202/b



Obr. 23: Návrh kvalitativního přiřazení
PB 8202/b



5.5.5 Blok 8302

Tabulka č. 12 ukazuje, že hlediska bilance N a výnosu spadaly 3 zkoumané body do předpokládaných výnosových zón. Jak je patrné z tabulky níže, bod č. 29 a bod č. 30 vykazoval charakteristiky střední výnosové hladiny. Žádný z bodů nevykazoval deficit N.

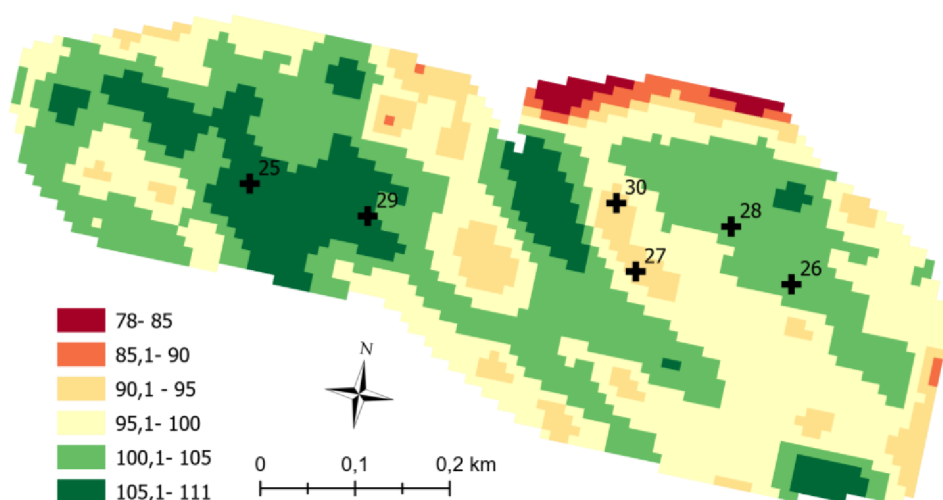
Tab. 12.: Bilance N a výnos srna v odběrových bodech PB 8302

Odběrový bod	Zóna výnosového potenciálu	Výnos (t/ha)	Bilance dusíku (kg/ha)
25	Max	10	6
29	Max	8,6	22,5
26	Mid	8 9	29,3
28	Mid	10,1	13
27	Min	9,2	32
30	Min	9,3	17,9

5.5.5.1 Výnosový potenciál

Půdní blok se složením výnosového potenciálu (obr. 24) řadí k vyrovnanějším pozemkům. 74 % výměry leží v rámci zón výnosového potenciálu 95–105 %. V odlehlých hodnotách se nachází pouze 2 procenta celkové výměry.

Obr. 24: Výnosový potenciál 2018-2021 (EVI), PB 8302

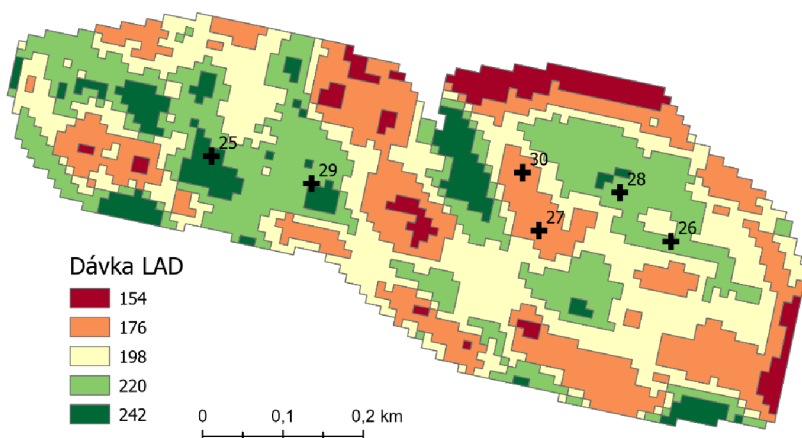


5.5.5.2 Návrh hnojení dusíkem na základě satelitních snímků

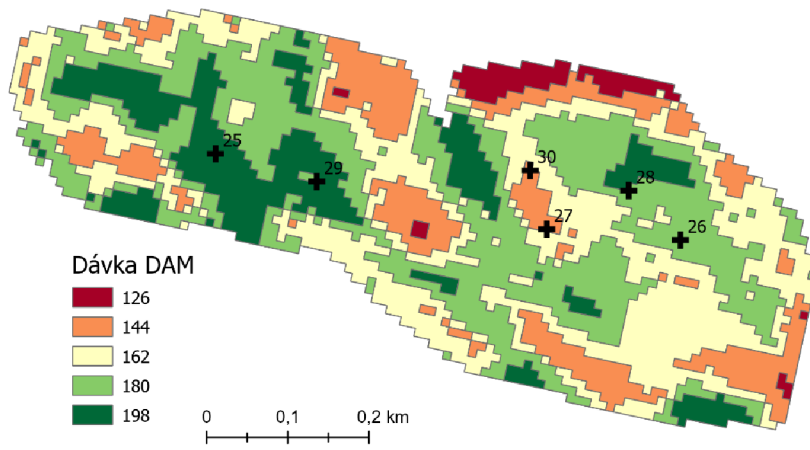
V rámci regeneračního hnojení bylo aplikováno 59,4 kg N/ha (220 kg LAD/ha), optimalizovaná dávka (obr.24) činí průměrně 56 kg N/ha (208 kg LAD/ha). Při produkčním hnojení bylo aplikováno 54 kg N/ha (180 kg DAM/ha), navržená dávka (obr. 26) odpovídá 51,5 kg N/ha (171,6 kg DAM/ha). Při kvalitativní hnojení bylo aplikováno 67,5 kg N/ha (250 kg LAD), navrhovaný systém hnojení (obr. 27) počítá s průměrnou aplikací 62,9 kg N/ha (233 kg LAD/ha).

Rozdíl mezi uniformní dávkou a diferenciovanou činí 11 kg N/ha.

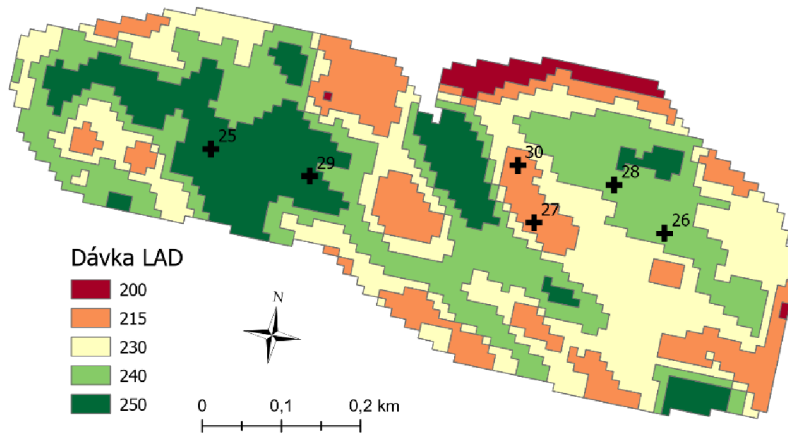
Obr. 25: Návrh regeneračního přihnojení, PB 8302



Obr. 26: Návrh produkčního přihnojení, PB 8302



Obr. 27: Návrh kvalitativního přihnojení, PB 8302



6 Diskuse

Sledování zemědělské produkce a plánování a predikce výnosů plodin je velmi užitečné zejména v dnešní době, kdy zemědělství potýká s vysokými vstupními náklady jako jsou ceny hnojiv a zároveň se vyrovnává se silícími tlaky na zlepšení environmentálních dopadů zemědělské produkce na krajinu.

6.1 Vztah vegetačních indexů a výnosu

V první části diplomové práce byl řešen vztah vegetačních indexů EVI a NDVI s výnosem zrna, respektive s výnosovým potenciálem daného pozemku. Panek & Goydowski (2020) uvádějí, že nejsilnější vztah mezi vegetačním indexem a výnosem zrna je pozorován přibližně 3 měsíce před sklizní. Dle této studie je navýšení indexu NDVI v tomto období o 0,1 přibližně začátkem dubna by zvýšilo predikovaný výnos zrna o 1,1 – 2,6 t/ha s průměrem okolo 2 t/ha. V rámci diplomové práce byl nejsilnější vztah mezi hodnotami NDVI a EVI zaznamenán v době metání, což potvrzují výsledky studie Smith et al. (1995), kteří zaznamenali, že největší vztah mezi hodnotami NDVI a predikcí výnosu je při využití dat z doby přibližně 3 měsíce před sklizní. Predikovaný výnos se dle této studie s nárůstem NDVI o 0,1 zvýšil o 0,23 – 0,43 t/h. Z analýzy výnosu v odběrových bodech zpracovávané v rámci diplomové práce měl posun indexu NDVI 0,1 za následek zvýšení výnosu v daném odběrovém bodě na počátku metání o přibližně 2,8 t/ha, což je v souladu s výsledky studie Panek & Goydowski (2020). Nízké zvýšení výnosu ve studii Smith et al. (1995) může být dán celkovým nízkým výnosem, neboť výzkum a vývoj v poslední letech měl za následek zvýšení průměrného výnosu v ČR z 4,2 t/ha v roce 1995 na 6,3 t/ha v roce 2021 (Ondřej et. al 2021). Výzkum vztahu výnosu a vegetačních indexů v této diplomové práci však může být zatížen chybou, která plyne z omezeného počtu odběrových míst. Jako vhodnější prostředek pro hodnocení vztahu výnosu a vegetačních indexů se jeví porovnání údajů ze sklízecí mlátičky. Tato analýza nebyla provedena z důvodu technické chyby na výnosoměru, který nezaznamenal všechna potřebná data.

Z hlediska rozdělení pozemků, nejvyšší korelaci mezi vegetačním indexem a výnosem byl zaznamenán na pozemku 8202/4b, kde se korelační koeficient výnosu a indexu NDVI rovnal 0,78 a naopak nejnižší korelační koeficient se objevil na pozemku 8202/4a, kde se hodnota r rovnala 0,15. Pozemek 8202/4b se vyznačoval nejvyšším rozptylem hodnot výnosu zrna, kde se hodnoty pohybovaly mezi 6 t/ha a 11,4 t/ha. Naopak hodnoty na pozemku 8202/4a byly podstatně kompaktnější a pohybovaly se od 6,8 t/ha a 10,1 t/ha. Dle mého názoru tento nedostatečný rozptyl hodnot mohl snížit vztah mezi výnosem a vegetačním indexem, neboť hodnoty indexů také nenabývaly dostatečného rozptylu. V rámci pokusu byly odběrové body rozděleny na základě výnosového potenciálu do tří zón, nejvyšší korelace bylo dosaženo na částech pozemků s nejnižším výnosovým potenciálem.

Chandel et al. (2019) popisují chování indexu NDVI ve vztahu k výnosu v různých vývojových fázích rostliny, a došli k závěru, že index je možné použít k predikci výnosu pšenice v době metání ($r = 0,88$) a naopak index je zcela nevhodný v době odnožování a sloupkování. Toto tvrzení je v souladu s výsledky diplomové práce, neboť nebyl nalezen

žádný vztah mezi vegetačním indexem v době počátku sloupkování a konečným výnosem. Nízká korelace v tomto období je vysvětlena nižším vegetačním pokryvem, kdy zejména hodnoty odrazivosti v pásmu NIR jsou ovlivněny půdou na pozadí snímku. Tyto výsledky jsou srovnatelné i s výsledky zmiňovaných autorů Panek & Goydowski (2020) či Smith et al. (1995), kteří shodně potvrzují, že vhodnost vegetačních indexů pro stanovení celkového výnosu narůstá v průběhu vegetačního období. Ačkoliv během výzkumu zpracovávaném v této diplomové práci nedošlo k získání takto přesvědčivých výsledků jako ve zmíněných studii, trend, který výsledky naznačují směřuje ke stejnému závěru. Nejvyšší korelace mezi výnosem a vegetačním indexem se objevila právě na počátku metání, a naopak vztah v době konce odnožování byl minimální a tím pádem nevhodný pro predikci výnosu.

6.2 Identifikace výživového stavu

Další bodem, který byl v rámci diplomové práce řešen, byl vztah vegetačních indexů a obsahu dusíku v nadzemní biomase. Indexy NDVI a EVI vykázaly minimální korelaci s obsahem dusíku, což podporuje tvrzení Hawkesford (2014), který ve své práci dokázal, že existuje vztah mezi množstvím dusíku v zrnu a jeho výnosem. Se stoupajícím výnosem lineárně klesá obsah dusíku. Tento vztah částečně vysvětluje velmi slabé korelace s indexy, které kladně korelují s výnosem zrna a množstvím biomasy. Podobný trend bylo možné pozorovat ve výzkumu v této práci, kde v bodech s nízkými výnosy (6–7 t/ha) se obsah dusíku v rostlině v BBCH 75 pohyboval v průměru okolo hodnoty 1,4 %, v bodech s vysokým výnosem se průměrný obsah dusíku v rostlině pohyboval okolo 1,28 %, což odpovídá teorii, že porost s vyšším výnosem zásoby dusíku rychleji vyčerpá. Naopak v ranější fázi rostliny obsah dusíku byl rovnoměrněji rozložený a nevykazoval ve vztahu k výnosu takovou odchylku. Obsah dusíku v porovnání s výnosem v té době neukazoval žádnou korelaci. Stejně tak indexy korelující s celkovým výnosem zrna vykázaly velmi nízkou či žádnou korelaci s výživovým stavem rostliny (NDVI $r = 0,32$ a EVI = 0,07).

Mistele & Schmidhalter (2008) popisují silný korelační vztah mezi indexem REIP a výživovým stavem rostlin, respektive mezi REIP a indexem výživy dusíkem. Zároveň však dodávají že ačkoliv index REIP je vhodný ke stanovení obsahu dusíku v rostlině, samotná tato informace k hodnocení porostu nestačí, neboť v suchých částech pozemku, kde jsou rostliny zatíženy stresem z nedostatku vody, může být příjem dusíku i množství biomasy nízké, ale procentuální obsah dusíku vysoký. Na stejný fakt poukazují také Riar & Covert (2013), jenž ve své studii vyzdvihují právě důležitost dostupnosti vody v půdě a její vztah s obsahem dusíku v rostlinách. Proto to je žádoucí do výsledného modelu také zahrnout informace o reliéfu a vodním odtoku. V místech s nízkým výnosovým potenciálem se index REIP pohyboval mezi 728 a 731 mm, vyšších hodnot pak vykazoval v místech s vysokým výnosovým potenciálem – mezi 734 a 735 mm.

Na pozemcích zkoumaných v rámci diplomové práce zvýšení koncentrace dusíku o 0,1 procentního bodu odpovídalo přibližnému nárůstu indexu REIP o 2 body. V rámci provedeného výzkumu hodnoty indexu REIP slabě korelovaly i s výnosem. Důvodem tohoto výsledku mohou být rovnoměrně rozložené srážky v sezoně 2020/2021, jejichž rozložení je

zobrazeno na grafu vývoje srážek v letech 2018 – 2021 v příloze číslo 1. Vzhledem k tomu, že nedocházelo k výraznějším výkyvům srážek, nedocházelo ke zvýšení koncentrace dusíku ve slabých porostech, které by jinak mohly trpět vodním stresem.

Výpočet celkového odebraného dusíku rostlinou v dané vývojové fázi vycházel z obsahu dusíku v rostlině a množství biomasy v t/ha v daném bodě. Tato hodnota stejně tak jako obsah dusíku kladně korelovala s indexem REIP, ale již vykazovala silnější korelaci s indexy NDVI a EVI, neboť jak již bylo zmíněno, ve výpočtu bylo zohledněno aktuální množství biomasy. Mistele & Schmidhalter (2008) zároveň připomínají, že pokud by bylo možné ze spektrálních měření zjistit právě aktuální biomasu porostu, byly by vegetační indexy lépe využitelné pro výpočet množství N, které má být aplikováno na plodinu. Spektrální měření však popisují vztah výživy dusíkem s vegetačním indexem silnější než vztah vegetačních indexů a biomasy (Mistele et al. 2004, Houles et al. 2007). S vyšší koncentrací dusíku se se index REIP posouvá směrem k delším vlnovým délkám, což je způsobeno zejména snížením odrazivosti v červené oblasti spektra při vyšších koncentracích chlorofylu. S ohledem na výsledky diplomové práce, které jsou v souznění se zmíněnými studiemi lze tvrdit, že index REIP je možné použít pro účely hnojení, které by bylo přizpůsobené aktuálním potřebám rostlin.

6.3 Vztah vegetačních indexů a množství biomasy

Dle Wang et al. (2019) vykazují vegetační indexy ve vztahu k biomase pšenice nejvyšší korelace v období metání, kde se hodnoty r pohybují od 0,48 do 0,93, kde NDVI dosahovalo výsledků $r = 0,84$. Poté dle autorů korelace v následných obdobích významně klesají. V rámci zpracování diplomové práce byla studována korelace mezi množstvím biomasy vyjádřeným v t/ha a také pomocí v počtu odnoží na m^2 . Právě s počtem odnoží vykázal nejvyšší korelaci index NDVI – $r = 0,55$ oproti tomu ve vztahu s množstvím biomasy na hektar vykázal index o něco slabší korelace $r = 0,41$. Ve studii Wang et al. (2019) byly pro sběr multispektrálních dat využity data získané z bezpilotních letounů, které slibují přesnější výsledky než satelitní snímky. Právě přesnější data ze zmíněné studie společně s hustším odběrovým polem ovlivňují výslednou korelaci. V diplomové práci korelace NDVI v době metání a biomasy dosahovala lepších výsledků na místech s nižším výnosovým potenciálem, a i nižší biomasou. Toto potvrzuje i tvrzení Jin et al. (2016), kteří uvádějí, že v hustších porostech dochází k nasycení indexu a index již není schopen podávat optimální informace o stavu porostu. Vzhledem k nedostupnosti satelitních snímků v pozdějším období z důvodu zvýšené oblačnosti nebylo možné ověřit tvrzení, že v pozdějších růstových fázích korelace s biomasou klesá.

6.4 Vztah vývojové fáze a vegetačních indexů

Hodnocení vztahu fenologického vývoje rostliny a vegetačních indexů byly využity satelitní snímky z období od 24.3.2021 do 17.6.2021, tedy závěru odnožování do počátku metání. Inflexní bod, tedy doba, kdy vegetační index začne strmě stoupat byl pozorován v době ukončení odnožování a počátku sloupkování, k podobnému výsledku došli také Troy et al. (2016), kteří ve své studii dokázali odvodit 4 fenologické fáze rostlin na základě snímků NDVI

při použití lineární regrese. Ti ovšem pro pozorování fenologie pšenice ozimé použili ve své studii denní hodnoty indexu NDVI díky čemuž byli schopni odvodit délku fenologické fáze ve dnech. V rámci diplomové práce nebyly stanoveny jednotlivé fenologické fáze rostlin v různých částech pozemku, a tedy nebylo možné sledovat rozptyl hodnot indexu. Pro sledování fenologických fází se satelitní snímky jeví jako nevhodné, neboť jsou ovlivněny množstvím oblačnosti a případná nedostupnost snímku může vést k chybějící informaci o inflexních bodech křivky indexu, a tedy k nezaznamenání změny vývojové fáze. Vhodnost využití UAV oproti satelitním snímkům popisují také Zhou et al. (2020), kteří nejlepšími výsledky dosáhli při využití bezpilotního letounu s pasivním hyper spektrálním senzorem. Hlavním důvodem pro nalezení kladných korelací vegetačních indexů s fenologickými fázemi je kladná korelace s LAI (Mercier et al. 2020), kteří však dodávají, že vegetační index založený pouze na snímcích z jedné družice není vhodný. Pro zvýšení přesnosti lze tedy doporučit využití snímků s možností častějšího sběru dat nebo kombinaci více dostupných zdrojů dat – například kombinaci dat ze Sentinel 1 a 2. Zmiňovaní autoři se svých studiích využili vždy kombinaci různých zdrojů dat, nebo přesnější data, než jsou satelitní snímky, což zvýšilo přesnost jejich výsledků. Výsledky prezentované v rámci diplomové práce odpovídají základním parametrům vývoje vztahu BBCH a vegetačních indexů, ale pro stanovení jednotlivých fází jsou nevhodné, neboť ve sledovaném období bylo možné použít pouze 7 bezoblačných snímků.

6.5 Optimalizace hnojení dusíkem

Navrhované variabilní hnojení vycházelo z dlouhodobého výnosového potenciálu a aktuálního stavu porostu tak, aby zejména zvýšilo efektivitu hnojení dusíkem. Existuje mnoho způsobů, jak hodnotit zmíněnou efektivitu dusíkatého hnojení. Jak zmiňují Černý et al. (2020), nejjednodušším způsobem hodnocení je výpočet bilancí, které se zakládají na výpočtu vstupů v podobě dusíku v hnojivech a výstupu ve sklizeném produktu. Pro provozní podmínky může být vhodnou interpretací bilance dusíku tzv. dílčí faktor produktivity aplikovaného dusíku. Ten je vypočítán jako poměr výnosu zrna a množství aplikovaného dusíku. Vzhledem k tomu, že při vyšší dávce dusíku na plochách s vyšším výnosovým potenciálem nedochází k očekávanému zvýšení výnosů (Duffková 2021), dochází při využití variabilních aplikací i ke zlepšení produktivity aplikovaného dusíku, neboť průměrná dávka na hektar se snižuje a hnojení N lze považovat za účinnější. K podobným výsledkům došli také Elbl et al. (2021), kteří zaznamenali zvýšení výnosu zrna při použití variabilních aplikací N pouze v jednom sledovaném roce. Je tak možné tvrdit, že hlavním benefitem navrhované variabilní aplikace je zvýšení efektivity hnojení a lepší vyrovnanost porostu. Elbl et al. (2018) uvádějí, že při variabilním dávkování je možné dosáhnout až 6 % vyšší efektivity minerálních hnojiv.

Neefektivitu uniformních dávek potvrzují i výsledky bilance dusíku v odběrových bodech. Všechny odběry, které byly provedeny v zónách s minimálním výnosovým potenciálem vykazovaly kladnou bilanci dusíku. Výsledky této bilance poukázaly na fakt, že na místech s nižším výnosovým potenciálem dochází k velmi neefektivnímu využití dusíkatých hnojiv, a to až o 47 kg N/ha. Pro základní výpočet optimalizovaných dávek byl použit dlouhodobý výnosový potenciál, neboť jak uvádějí Lucas et al. (2020), vliv produkční schopnosti

stanovištních podmínek je pro tvorbu výnosu více rozhodující než samotná úroveň výživy dusíkem. Jedním z největších rizik optimalizace na základě satelitních snímků je jejich nedostupnost při zvýšené oblačnosti, tento hendikep může být částečně odstraněn právě využitím pouze dlouhodobého potenciálu. Vegetační období pšenice ozimé v roce 2021 bylo zejména v jeho druhé polovině zatíženo velkou oblačností, což vedlo k omezené dostupnosti satelitních snímků, z tohoto důvodu bylo kvalitativní hnojení navrženo pouze na základě dlouhodobého výnosového potenciálu bez korekce na aktuální stav. S tímto rizikem je nutné vždy počítat. Satelitní snímky nenahrazují agronomickou kontrolu a je vždy nutné přihlídnout k aktuálnímu reálnému stavu porostu. Cílem variabilních aplikací je zejména zvýšení efektivity využití dusíku. Jak uvádějí například Chien et al. (2016), průběrná využitelnost dusíku je u orných půd velmi nízká a dosahuje maximálních hodnot 50 %.

Vzhledem k tomu, že pšenice ozimá je v České republice jednou z dominantních plodin, pěstuje přibližně na 800 tisících hektarech, je zlepšení ekonomiky pěstování jednou z priorit. Navrhovaná řešení v rámci diplomové práce nemají za cíl pouze zlepšení ekonomické stránky pěstování pšenice ozimé, ale také zlepšení po stránce ekologické. Vyšší efektivita využití dusíku zlepšit také kvalitu spodních vod, která je častým tématem diskusí o současném směru směřování zemědělské výroby. Jedním z důvodů, proč variabilní aplikace nejsou již masově rozšířené, mohou být prvotní investice do vybavení a také vzdělanostní úroveň personálu, která mnohdy odrazuje majitele zemědělských podniků od implementace podobných řešení.

Variabilní aplikace hnojiv nejsou jedinou možností využití map dlouhodobého výnosového potenciálu, vzhledem k tomu, že vegetační indexy kladně korelují s množstvím biomasy a počtem odnoží na m^2 , nachází výnosový potenciál využití při variabilním setí či aplikaci přípravků na ochranu rostlin.

Navržené mapy variabilního hnojení nebyly v praxi ověřeny. Krom dalšího výzkumu vztahů mezi faktory, který byly v rámci DP sledovány se jako perspektivní jeví výzkum reziduálního dusíku v půdě ve vztahu k diferenciovaným dávkám hnojení. Pro ověření tvrzení o efektivitě dusíkatého hnojení by bylo vhodné následně založení pokusu, kde by byly využity částečně uniformní dávky hnojiva a částečně variabilní aplikace.

7 Závěr

V rámci diplomové práce byl řešen vztah vegetačních indexů s výnosem zrna pšenice ozimé, s obsahem dusíku v nadzemní biomase a vztah mezi indexy a vývojovými fázemi rostlin. V rámci první hypotézy (H1) byl sledován výnos ve vztahu k indexu NDVI v době metání. Základní hypotézou bylo, že s nárůstem indexu NDVI o 0,1 v době metání dojde k nárůstu výnosu o 1,5 t/ha. Vztah indexu NDVI a výnosu zrna byl v rámci diplomové práce potvrzen, ale nárůst výnosu se v porovnání s hypotézou lišil o 1,3 t/ha (posun o 2,8 t/ha). K tomuto rozdílu mohl přispět jednak vyšší celkový výnos, než ze kterého hypotéza vycházela, ale také možná výsledková chyba, která vycházela z nižšího počtu odběrových bodů

V rámci druhé hypotézy (H2) byla sledována hodnota indexu REIP a její korelace s výživovým stavem porostu. Index REIP vykázal kladnou korelaci s výživovým stavem a ze sledovaných indexů byla síla korelace nejvyšší ($r = 0,53$), přibližný nárůst indexu o 2 mm odpovídal navýšení obsahu dusíku o 0,1 procentního bodu.

Otázka kladné korelace s množstvím biomasy u sledovaných indexů EVI a NDVI byla řešena v rámci vědecké hypotézy číslo tři (H3). S množstvím biomasy v BBCH51 vyjádřené v t/ha více koreloval index NDVI ($r = 0,52$), avšak při porovnání počtu odnoží na m^2 oba indexy dosahovaly velmi podobných výsledků.

Hypotéza o vztahu vegetačních indexů a vývojové fáze rostlin (H4) se potvrdila pouze pro ranější fáze rostlin. Změny ve vegetačním indexem v závěru vegetačního období nebylo možné objektivně zhodnotit, neboť se nepodařilo získat bezoblačné satelitní snímky ze sledovaného území. Z analýzy dostupných dat je ale možné usoudit, že vegetační indexy vztah s vývojovou fází mají, neboť na křivce vývoje obou indexů byl patrný prudký nárůst hodnot indexů v době, kdy se zintenzivnil růst rostlin a fotosyntéza.

Na základě získaných informací o chování indexů a jejich vztahu k výnosu a stavu vegetace byl navržen systém optimalizovaných dávek dusíku pšenice ozimé, který vychází ze dlouhodobého výnosového potenciálu stanoveném na základě indexu EVI. Index EVI byl vybrán pro jeho schopnost více rozlišit variabilitu v rámci půdních bloků. Dlouhodobý výnosový potenciál byl využit pro základní stanovení diferenciované dávky N a následně byl pro regenerační a produkční hnojení upraven na základě aktuálního stavu porostu.

8 Literatura

- Argento, F., Anken, T., Abt, F., Vogelsanger, E., Walter, A., Liebisch, F. 2021. Site-specific nitrogen management in winter wheat supported by low-altitude remote sensing and soil data. [Online]22 (2). 364-386. doi: 10.1007/s11119-020-09733-3.
- Avery, T. E. 1992. Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation 5th Edition. 5 ed. Washington, DC. Macmillan Coll Div. ISBN: 9780023050350.
- Balík, J., Černý, J., Kulhánek, M. 2012. Bilance dusíku v zemědělství: certifikovaná metodika. Praha. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN: 978-80-213-2329-2.
- Barnes E.M, Clarke T.R., Richards S.E. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. 2013. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. 5 (1). 15.
- Brant, V., Kroulík, M., Krček, V., Krása, J., Kapička, J., Hamouz, P., Lukáš, J., Záborský, P., Škeříková, M., Škeřík, J., Job, Z., Lang, J., Petrus, D. 2020. Implementace principů precizního zemědělství do rostlinné výroby. České Budějovice. Kurent. ISBN: 978-80-87111-81-9.
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Barraclough, P., Kuhlmann, H. 2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. [Online]20 (3). 265-279. doi: 10.1016/S1161-0301(03)00039-X.
- Cameron, K. C., Di, H. J., Moir, J. L. 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. [Online]162 (2). 145-173. doi: 10.1111/aab.12014.
- Carvalho, V. C. F., Kessler, M., Fradinho, J. C., Oehmen, A., Reis, M. A. M. 2021. Achieving nitrogen and phosphorus removal at low C/N ratios without aeration through a novel phototrophic process. [Online]793 . doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148501.
- Černý, J., Schejbalová, Š., Kovařík, J., Kulhánek, M. 2014. Předsetřové a podzimní hnojení pšenice ozimé. [Online]. Retrieved April 12, 2022, from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/predsetove-a-podzimni-hnojeni-psenice-ozime>
- ČESKO. Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech). Vyhláška 377/2013 Sb., o skladování o způsobu používání hnojiv. In: *Zákony pro lidi*, from <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2013-377>
- Demmel, M. 2013. Site-Specific Recording of Yields. [Online] In: *Precision in Crop Farming*. pp. 313-329. Dordrecht. Springer Netherlands. ISBN: 978-94-007-6759-1.
- Diviš, J. 2010. Pěstování rostlin: (učební texty pro obor provozní podnikatel a pozemkové úpravy a převody nemovitosti). 2., dopl. vyd. České Budějovice. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta. ISBN: 978-80-7394-216-8.
- Du, M., Noguchi, N. 2016. Multi-temporal Monitoring of Wheat Growth through Correlation Analysis of Satellite Images, Unmanned Aerial Vehicle Images with Ground Variable. 49 (16). 5-9. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.002.
- Elbl, J., Mezera, J., Kintl, A., Širůček, P., Lukas, V. 2021. Comparisons of Uniform and Variable Rate Nitrogen Fertilizer Applications in Real Conditions - Evaluation of Potential Impact on the Yield of Wheat Available for Use in Animal Feed. [Online]69 (1). 33-43. doi: 10.11118/actaun.2021.003.

- Erdle, K., Mistele, B., Schmidhalter, U. 2011. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. [Online]124 (1). 74-84. doi: 10.1016/j.fcr.2011.06.007.
- Faměra, O. 1993. *Základy pěstování ozimé pšenice*. Praha. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství ČR. ISBN: 80-7105-045-8.
- Fitzgerald, G., Rodriguez, D., O'Leary, G. 2010. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI). 116 (3). doi: 10.1016/j.fcr.2010.01.010.
- Foley, M. E., Fennimore, S. A. 1998. Genetic basis for seed dormancy. [Online]8 (2). 173-182. doi: 10.1017/S0960258500004086.
- Franch, B., Vermote, E. F., Becker-Reshef, I., Claverie, M., Huang, J., Zhang, J., Justice, C., Sobrino, J. A. 2015. Improving the timeliness of winter wheat production forecast in the United States of America, Ukraine and China using MODIS data and NCAR Growing Degree Day information. [Online]161 . 131-148. doi: 10.1016/j.rse.2015.02.014.
- Garnett, T., Plett, D., Heuer, S., Okamoto, M. 2015. Genetic approaches to enhancing nitrogen-use efficiency (NUE) in cereals: challenges and future directions. [Online]42 (10). doi: 10.1071/FP15025.
- Gastal, F., Lemaire, G. 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. [Online]53 (370). 789-799. doi: 10.1093/jexbot/53.370.789.
- Gnyp, M. L., Bareth, G., Li, F., Lenz-Wiedemann, V. I. S., Koppe, W., Miao, Y., Hennig, S. D., Jia, L., Laudien, R., Chen, X., Zhang, F. 2014. Development and implementation of a multiscale biomass model using hyperspectral vegetation indices for winter wheat in the North China Plain. [Online]33 . 232-242. doi: 10.1016/j.jag.2014.05.006.
- Guo, J., Wang, Y., Blaylock, A. D., Chen, X. 2017. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding (>15 Mg ha⁻¹) maize. [Online]204 . 23-30. doi: 10.1016/j.fcr.2016.12.021.
- Hawkesford, M. J. 2014. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production. [Online]59 (3). 276-283. doi: 10.1016/j.jcs.2013.12.001.
- Hirel, B., Le Gouis, J., Ney, B., Gallais, A. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. 58 (9). 2369-2387. doi: 10.1093/jxb/erm097.
- Hooper, P., Zhou, Y., Coventry, D. R., McDonald, G. K. 2015. Use of Nitrogen Fertilizer in a Targeted Way to Improve Grain Yield, Quality, and Nitrogen Use Efficiency. [Online]107 (3). 903-915. doi: 10.2134/agronj14.0363.
- Houlès, V., Guérif, M., Mary, B. 2007. Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations. [Online]27 (1). 1-11. doi: 10.1016/j.eja.2006.10.001.
- Huete, A., Justice, C. 1999. Modis vegetation index (mod 13) algorithm theoretical basis document. [Online]1999 (1). 120. Retrieved from https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf
- Hui Qing Liu, Huete, A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. [Online]33 (2). 457-465. doi: 10.1109/36.377946.
- Chandel, N. S., Tiwari, P. S., Singh, K. P., Jat, D., Gaikwad, B. B., Tripathi, H., Golhani, K. 2019. Yield Prediction in Wheat (*Triticum aestivum* L.) using Spectral Reflectance Indices. [Online]116 (2). 272-278. doi: 10.18520/cs/v116/i2/272-278.

- Chien, S. H., Teixeira, L. A., Cantarella, H., Rehm, G. W., Grant, C. A., Gearhart, M. M. (2016). Agronomic effectiveness of granular nitrogen/phosphorus fertilizers containing elemental sulfur with and without ammonium sulfate: A review. *Agronomy Journal*, 108(3), 1203-1213.
- Iqbal, J., Thomasson, J. A., Jenkins, J. N., Owens, P. R., Whisler, F. D. 2005. Spatial Variability Analysis of Soil Physical Properties of Alluvial Soils. [Online]69 (4). 1338-1350. doi: 10.2136/sssaj2004.0154.
- Islam, S., Zhang, J., Zhao, Y., She, M., Ma, W. 2021. Genetic regulation of the traits contributing to wheat nitrogen use efficiency. [Online]303 . doi: 10.1016/j.plantsci.2020.110759.
- Jia, X., Zhou, Y., Liu, Q., Zhao, C. 2019. Study on the relationship between wheat nitrogen nutrition and vegetation indices based on hyperspectral data. [Online]2019 (1). 1-9. doi: 10.1155/2019/7652358.
- Jirsa, O., Polišínská, I., Irena, S. 2021. Kvalita pšenice ze sklizně 2021 v ČR. XXIX (4). 107 - 111.
- Jordan, C. F. 1969. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. [Online]50 (4). 663-666. doi: 10.2307/1936256.
- Jurišić, M., Radočaj, D., Šiljeg, A., Antonić, O., Živić, T. 2021. Current status and perspective of remote sensing application in crop management. [Online]22 (1). 156-166. doi: 10.5513/JCEA01/22.1.3042.
- Kalvová, J. 1995. Scénáře změny klimatu pro Českou republiku: územní studie změny klimatu pro Českou republiku, Element 2. Praha. Český hydrometeorologický ústav. ISBN: 8085813246.
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R. T., Anderson, M., Imhoff, M. L., Gutman, G. G., Panov, N., Goldberg, A. 2010. Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations. [Online]23 (3). 618-633. doi: 10.1175/2009JCLI2900.1.
- Kaufman, Y. J., Tanre, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. [Online]30 (2). 261-270. doi: 10.1109/36.134076.
- Kaur, C., Kushwaha, H. R., Mustafiz, A., Pareek, A., Sopory, S. K., Singla-Pareek, S. L. 2015. Analysis of global gene expression profile of rice in response to methylglyoxal indicates its possible role as a stress signal molecule. [Online]6 . doi: 10.3389/fpls.2015.00682.
- Kazda, J. 2014. Škúdcí polních plodin. Praha. Profi Press. ISBN: 9788086726618.
- KING, J. Modelling Cereal Root Systems for Water and Nitrogen Capture: Towards an Economic Optimum. [Online]91 (3). 383-390. doi: 10.1093/aob/mcg033.
- Klem, K., Babušik, J., Spáčilová, V. Základy utváření výnosových prvků u intenzivních technologií pěstování sladovnického ječmene. 2006 (1). 69-72.
- Kravchenko, A. N., Bullock, D. G., Boast, C. W. 2000. Joint Multifractal Analysis of Crop Yield and Terrain Slope. [Online]92 (6). 1279-1290. doi: 10.2134/agronj2000.9261279x.
- Kristensen, H. L., Thorup-Kristensen, K. 2004. Uptake of ¹⁵N labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2–2.5 meters depth. [Online]265 (1-2). 93-100. doi: 10.1007/s11104-005-0696-y.
- Křen J. 2001. Pěstování ozimé pšenice v České republice. Úroda. Zemědělský výzkumný ústav Kroměříž, Brno. Available from <https://www.uroda.cz/pestovani-ozime-psenice-v-ceske-republice/>
- Křen, J., Neudert, L., Procházková, B., Smutný, V., Hůla, J. 2015. Obecná produkce rostlinná. Brno. Mendelova univerzita v Brně. ISBN: 978-80-7509-325-7.
- Kuchčík, F. 2005. Pěstování rostlin: speciální část.. 1st ed. Třebíč. Petr Večeřa. ISBN: 80-901789-7-9.

- L. Thylén, P. Jürschik and D. P. L. Murphy, "Improving the Quality of Yield Data," In: J. V. Stafford, Ed., Precision Agriculture '97: Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture, BIOS Scientific Publishers Ltd, Oxford, UK, 1997, pp. 743-750.
- Liu, M., Wu, X., Li, C., Li, M., Xiong, T., Tang, Y. 2020. Dry matter and nitrogen accumulation, partitioning, and translocation in synthetic-derived wheat cultivars under nitrogen deficiency at the post-jointing stage. 248 . doi: 10.1016/j.fcr.2020.107720.
- Lucas, V., Neudert, L., Duffková, R., Haberer, J., Brom, J., Horniaček, I. 2020. Variabilní přihnojení dusíkem pomocí nástrojů GIS a vyhodnocení efektivity využití živin v rozdílných vláhových podmínkách. 1st ed. Brno. Mendelova univerzita v Brně. ISBN: 11.
- Ma, Q., Qian, Y., Yu, Q., Cao, Y., Tao, R., Zhu, M., Ding, J., Li, C., Guo, W., Zhu, X. 2023. Controlled-release nitrogen fertilizer application mitigated N losses and modified microbial community while improving wheat yield and N use efficiency. [Online]. 349 . doi: 10.1016/j.agee.2023.108445.
- Magney, T. S., Eitel, J. U. H., Huggins, D. R., Vierling, L. A. 2016. Proximal NDVI derived phenology improves in-season predictions of wheat quantity and quality. [Online]217 . 46-60. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.11.009.
- Mann, M. L., Warner, J. M. 2017. Ethiopian wheat yield and yield gap estimation: A spatially explicit small area integrated data approach. 201 . 60-74. doi: 10.1016/j.fcr.2016.10.014.
- Manojlović, M., Cabilovski, R., and Bavec, M. (2010). Organic materials: sources of nitrogen in organic production of lettuce. *Turk. J. Agric. For.* 34, 163–172. doi: 10.3906/tar-0905-11
- Marques da Silva, J. R., Silva, L. L. 2006. Relationship between Distance to Flow Accumulation Lines and Spatial Variability of Irrigated Maize Grain Yield and Moisture Content at Harvest. [Online]94 (4). 525-533. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.04.011.
- Martin, J., Waldreen, R. 2005. Principles of field crop production.. 4 ed. Prentice Hall. Pearson. ISBN: 9780130259677.
- Marzi, M., Shahbazi, K., Kharazi, N., and Rezaei, M. (2020). The influence of organic amendment source on carbon and nitrogen mineralization in different soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20, 177–191. doi: 10.1007/s42729-019-00116-w
- McKenzie, R. H., Bremer, E., Middleton, A. B., Pfiffner, P. G., Dowbenko, R. E. 2007. Controlled-release urea for winter wheat in southern Alberta. [Online]87 (1). 85-91. doi: 10.4141/S06-055.
- Mercier, A., Betbeder, J., Baudry, J., Le Roux, V., Spicher, F., Lacoux, J., Roger, D., Hubert-Moy, L. 2020. Evaluation of Sentinel-1 & 2 time series for predicting wheat and rapeseed phenological stages. [Online]163 . 231-256. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.03.009.
- Mercier, A., Betbeder, J., Baudry, J., Le Roux, V., Spicher, F., Lacoux, J., Roger, D., Hubert-Moy, L. 2020. 163 . 231-256. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.03.009.
- Mistele, B., Schmidhalter, U. 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. [Online]29 (4). 184-190. doi: 10.1016/j.eja.2008.05.007.
- Mistele, B., Schmidhalter, U., Gutser, R. Validation of field-scaled spectral measurements of the nitrogen status in winter wheat. [Online]Proceedings Of The 7Th International Conference On Precision Agriculture And Other Precision Resources Management. (15). 1187-1195. Retrieved from <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1304805/1304805.pdf>
- Moore, M., Blackmore, S. 1999. Remedial Correction of Yield Map Data. [Online]1 (1). 53-66. doi: 10.1023/A:1009969601387.

- Mulla, D. J. 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. [Online]114 (4). 358-371. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.
- Muñoz-Huerta, R., Guevara-Gonzalez, R., Contreras-Medina, L., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J., Ocampo-Velazquez, R. 2013. A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances. [Online]13 (8). 10823-10843. doi: 10.3390/s130810823.
- Neudert, L., Lukas, V. 2015. *Precizní zemědělství: technologie a metody v rostlinné produkci*. Brno. Mendelova univerzita v Brně. ISBN: 978-80-7509-311-0.
- Osevní plochy ozimých plodin pro sklizeň v roce 2021. 2021. Osevní plochy ozimých plodin pro sklizeň v roce 2021. [Online]. Retrieved April 12, 2022, from <https://www.czso.cz/csu/czso/osevni-plochy-ozimych-plodin-pro-sklizen-v-roce-2021>
- Panek, E., Gozdowski, D. 2020. Analysis of relationship between cereal yield and NDVI for selected regions of Central Europe based on MODIS satellite data. [Online]. doi: 10.1016/j.rsase.2019.100286.
- Parry, M. A. J., Reynolds, M., Salvucci, M. E., Raines, C., Andralojc, P. J., Zhu, X. -G., Price, G. D., Condon, A. G., Furbank, R. T. 2010. Raising yield potential of wheat. II. Increasing photosynthetic capacity and efficiency. [Online]62 (2). 453-467. doi: 10.1093/jxb/erq304.
- Pathak, V., Tripathi, B. D., Mishra, V. K. 2011. Evaluation of Anticipated Performance Index of some tree species for green belt development to mitigate traffic generated noise. [Online]10 (1). 61-66. doi: 10.1016/j.ufug.2010.06.008.
- Pavlíková, D., Pavlík, M., Staszková, L., Tlustoš, P., Száková, J., Balík, J. 2008. The effect of potentially toxic elements and sewage sludge on the activity of regulatory enzyme glutamate kinase. [Online]53 (5). 201-206. doi: 10.17221/2204-PSE.
- Petr, J., Húska, J. 1997. *Speciální produkce rostlinná*. Praha. Česká zemědělská univerzita. ISBN: 802130152x.
- Prášil, I. T. 2018. Sucho a reakce pšenice. [Online]. Retrieved April 12, 2022, from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/sucho-a-reakce-psenice>
- Prugar, J. 2008. *Kvalita rostlinných produktů na prahu 3. tisíciletí*. 1st ed. Praha. Výzkumný ústav pivovarský a sladařský ve spolupráci s komisí jakosti rostlinných produktů ČAZV. ISBN: 978-80-86576-28-2.
- Pulkrábek, J., Capouchová, I., Hamouz, K. 2003. *Speciální fyto technika*. Praha. Česká zemědělská univerzita, Katedra rostlinné výroby. ISBN: 80-213-1020-0.
- Quan, C., Liu, Y. -S., Utescher, T. 2011. Paleogene evolution of precipitation in northeastern china supporting the middle eocene intensification of the east asian monsoon. [Online]26 (11). 743-753. doi: 10.2110/palo.2011.p11-019r.
- Renosh, P. R., Doxaran, D., Keukelaere, L. D., Gossn, J. I. 2020. Evaluation of Atmospheric Correction Algorithms for Sentinel-2-MSI and Sentinel-3-OLCI in Highly Turbid Estuarine Waters. [Online]12 (8). doi: 10.3390/rs12081285.
- Riar, A., Coventry, D. 2013. Nitrogen Use as a Component of Sustainable Crop Systems. [Online]Agricultural Sustainability. 63-76. doi: 10.1016/B978-0-12-404560-6.00004-6.
- Ross, D. S., Lawrence, G. B., and Fredriksen, G. (2004). Mineralization and nitrification patterns at eight northeastern USA forested research sites. *Forest Ecol. Manag.* 188, 317–335. doi: 10.1016/j.foreco.2003.08.004

- Segarra, J., Buchaillet, M. L., Araus, J. L., Kefauver, S. C. 2020. Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. 10 (5). doi: 10.3390/agronomy10050641.
- Silleos, N. G., Alexandridis, T. K., Gitas, I. Z., Perakis, K. 2006. Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. [Online]21 (4). 21-28. doi: 10.1080/10106040608542399.
- Smith, R. C. G., Adams, J., Stephens, D. J., Hick, P. T. 1995. Forecasting wheat yield in a Mediterranean-type environment from the NOAA satellite. [Online]46 (1). doi: 10.1071/AR9950113.
- Spekken M, Anselmi A. 2013 A simple method for filtering spatial data. 2013. Conference: 9th European Conference on Precision Agriculture.
- Steven, M. D. 1998. The Sensitivity of the OSAVI Vegetation Index to Observational Parameters. [Online]63 (1). 49-60. doi: 10.1016/S0034-4257(97)00114-4.
- Šnobl, J., Pulkrábek, J. 2005. *Základy rostlinné produkce*. Vyd. 2., přeprac. V Praze. Česká zemědělská univerzita. ISBN: 978-80-213-1340-8.
- Uhlíř, P. 1961. *Meteorologie a klimatologie v zemědělství*. 1st ed. Praha. Československá akademie zemědělských věd.
- Územní srážky v roce 2018, 2019, 2020, 2021. 2021. Územní srážky v roce 2018, 2019, 2020, 2021. [Online]. Retrieved April 10, 2023, from <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky#>
- Vaněk, V. 2007. *Výživa polních a zahradních plodin*. 1st ed. Praha. Profi Press. ISBN: 978-80-86726-25-0.
- Vizzari, M., Santaga, F., Benincasa, P. 2019. Sentinel 2-Based Nitrogen VRT Fertilization in Wheat: Comparison between Traditional and Simple Precision Practices. [Online]9 (6). doi: 10.3390/agronomy9060278.
- Wallace, A. J., Armstrong, R. D., Grace, P. R., Scheer, C., Partington, D. L. 2020. Nitrogen use efficiency of 15N urea applied to wheat based on fertiliser timing and use of inhibitors. 116 (1). 41-56. doi: 10.1007/s10705-019-10028-x.
- Wang, L., 'ai, Zhou, X., Zhu, X., Dong, Z., Guo, W. 2016. Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data. [Online]4 (3). 212-219. doi: 10.1016/j.cj.2016.01.008.
- Wang, L., Wei, Y. 2016. Revised normalized difference nitrogen index (NDNI) for estimating canopy nitrogen concentration in wetlands. [Online]127 (19). 7676-7688. doi: 10.1016/j.ijleo.2016.05.115.
- Weiss, M., Jacob, F., Duveiller, G. 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. 236 . doi: 10.1016/j.rse.2019.111402.
- Xue, J., Su, B. 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. [Online]2017 . 1-17. doi: 10.1155/2017/1353691.
- Zhao, B., Yao, X., Tian, Y. C., Liu, X. J., Ata-Ul-Karim, S. T., Ni, J., Cao, W. X., Zhu, Y. 2014. New Critical Nitrogen Curve Based on Leaf Area Index for Winter Wheat. 106 (2). 379-389. doi: 10.2134/agronj2013.0213.
- Zhao, Y., Po, L. -M., Yan, Q., Liu, W., Lin, T. 2020. Hierarchical Regression Network for Spectral Reconstruction from RGB Images. [Online] In: 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision

and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). pp. 1695-1704. IEEE. ISBN: 978-1-7281-9360-1.

Zhou, M., Ma, X., Wang, K., Cheng, T., Tian, Y., Wang, J., Zhu, Y., Hu, Y., Niu, Q., Gui, L., Yue, C., Yao, X. 2020. Detection of phenology using an improved shape model on time-series vegetation index in wheat. 173 . doi: 10.1016/j.compag.2020.105398.

Zhou, Y., Lao, C., Yang, Y., Zhang, Z., Chen, H., Chen, Y., Chen, J., Ning, J., Yang, N. 2021. Diagnosis of winter-wheat water stress based on UAV-borne multispectral image texture and vegetation indices. 256 . doi: 10.1016/j.agwat.2021.10707

9 Samostatné přílohy

Příloha I: Porovnání měsíčních úhrnů srážek v Karlovarském kraji v letech 2018 – 2021 (CHMU 2021)

