

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Markéta ŠUDOVÁ

**PROTOKOL PRO SBĚR BIOFYZIKÁLNÍCH PARAMETRŮ
VEGETACE V TERÉNU**

**FIELD PROTOCOL FOR IN-SITU BIOPHYSICAL PARAMETERS
COLLECTION**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lukáš Brodský, Ph.D.

Praha 2019

Vysoká škola: Univerzita Karlova

Fakulta: Přírodovědecká

Katedra: Aplikované geoinformatiky a kartografie

Akademický rok: 2018/2019

Zadání diplomové práce

pro Markétu Šudovou

obor Kartografie a geoinformatika

Název tématu:

Protokol pro sběr biofyzikálních parametrů vegetace v terénu

Zásady pro vypracování

Diplomová práce se zabývá problematikou sběru biofyzikálních parametrů vegetace v terénu. Hlavním cílem diplomové práce bude navrhnout konkrétní postup protokolu pro sběr biofyzikálních dat v terénu, včetně vymezení pravidel sběru, na základě dosavadní dostupné literatury a vlastní experimentální práce. Práce vychází ze zjištění F. Bareta (prezentovaném r. 2014 v ESA), že v současné době nejsou vytvořena jednotná pravidla pro pozemní sběr biofyzikálních parametrů. Cílem je získat opakovatelná a reprezentativní měření vhodná pro následnou kalibraci nebo validaci k získání kvantitativních parametrů z dat DPZ. Praktická část práce bude zaměřena na jeden vybraný biofyzikální parametr vegetace a experimentální změřením tohoto parametru určeným přístrojem (LAI-2200C, AccuPAR LP-80).

Díličmi cíli práce budou:

- navržení konkrétního protokolu pro sběr LAI dat v terénu. Tento protokol bude zahrnovat všechny fáze sběru dat. Návrh bude vycházet z rozboru stávajících metodik měření LAI dat v terénu
- nalezení vhodné parametrizace dílčích kroků protokolu na základě experimentální práce v terénu (návrh vhodného počtu dílčích měření, návrh rozložení dílčích měření v rámci jedné ESU, porovnání různých přístrojů pro sběr LAI dat)
- zhodnocení výsledků parametrizace s literaturou a běžnou praxí

Rozsah grafických prací: cca 10 stran

Rozsah průvodní zprávy: cca 50 stran

Seznam odborné literatury:

BARET, F. a kol. (2014): *Validation of Sentinel-2 Biophysical Prototype Products using ESA Field Campaigns* [online]. ESA VALSE project.

BARET, F. a kol. (2005): *VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products*. Remote Sensing of Environment, roč. 76, č. 3, s. 36-39.

CAMACHO, F. a kol. (2014): *A network of sites for ground biophysical measurements in support of Copernicus Global Land Product Validation*. In Proceedings of the IV RAQRS conference, Torrent, s. 22-26

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lukáš Brodský, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 19. prosince. 2016

Termín odevzdání diplomové práce: červenec 2019

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....
Vedoucí diplomové práce

.....
Garant studijního oboru

V Praze dne 16. 1. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 31. 7. 2019

Markéta Šudová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Lukášovi Brodskému, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále děkuji své rodině a přátelům za pomoc při terénním měření a podporu v průběhu celého studia.

Protokol pro sběr biofyzikálních parametrů vegetace v terénu

Abstrakt

Hlavním cílem diplomové práce je navržení jednotného protokolu pro sběr biofyzikálních parametrů vegetace v terénu na základě dosavadní dostupné literatury a vlastního experimentálního měření. Zavedení jednotných pravidel zahrnující všechny fáze sběru dat včetně doporučené přípravy před měřením, volby vzorkovacího schématu a zpracování naměřených údajů je důležité pro naměření kvalitních terénních dat vhodných pro následnou validaci produktů DPZ. Na základě dostupné literatury jsou zhodnoceny současné metodiky měření LAI dat v terénu a vymezeny základní parametry protokolu. Pro navržení vhodné parametrizace protokolu bylo provedeno vlastní experimentální měření v terénu. Stanovení vhodného počtu dílčích měření v rámci ESU je určeno pomocí vztahu mezi počtem dílčích měření a hodnotou MSE. Pro stanovení vhodného vzorkovacího schématu jsou otestována schémata uvedená v literatuře a vlastní navržená vzorkovací schémata. Na základě dosažených hodnot MSE bylo vyhodnoceno nejvhodnější vzorkovací schéma, které bylo prakticky ověřeno v terénu. Na základě terénního měření přístroji LAI-2200C a AccuPAR LP-80 je porovnána vhodnost přístrojů a naměřené hodnoty LAI.

Výsledkem práce je obecný protokol pro sběr dat v terénu a konkrétní protokol pro sběr LAI dat pro obiloviny v terénu, který uživateli zajistí naměření reprezentativních, přenositelných a opakovatelných terénních dat.

Klíčová slova: LAI, biofyzikální parametry, protokol, terénní měření, vzorkování

Field protocol for in-situ biophysical parameters collection

Abstract

The main aim of diploma thesis is to design a unified protocol intended for collecting of in-situ biophysical parameters of vegetation based on an up-to-now published literature as well as on my own experimental measuring. The key for measuring of high-quality field data, that are suitable for a subsequent validation of remote sensing products, is an implementation of unified rules as well as all the phases of data collecting, a recommended preparation before the very measuring, the choice of a sampling scheme and a processing of measured data. Based on an accessible literature the current methods of LAI data measuring were evaluated and the basic protocol parameters were defined. For designing of a proper parameterization of this protocol an experimental field measurement was carried out. A determination of a suitable number of partial measurements within ESU is given by a relationship between the number of partial measurements and MSE value. The sampling schemes stated in a literature as well as my own designed sampling schemes are subsequently tested in order to determine a suitable sampling scheme. Based on achieved MSE values the most suitable sampling scheme that was later verified in field measuring was evaluated. Based on a field measuring with a use of LAI-2200C and AccuPAR LP-80 measuring devices a suitability of these instruments was compared.

The result of this thesis is a general protocol for field data collecting and a concrete protocol for field LAI data collecting for grains that should ensure the users measuring of the representative, transferable and repeatable field data.

Keywords: LAI, biophysical parameters, protocol, field measurement, sampling

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	9
SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	10
1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE	12
2. VYUŽITÍ IN-SITU DAT.....	14
2.1. Proces validace.....	14
2.2. Reprezentativnost dat.....	16
3. ROZBOR METODIK MĚŘENÍ LAI DAT V TERÉNU.....	18
4. PARAMETRY PROTOKOLU.....	20
4.1. Biofyzikální parametry.....	20
4.1.1. Přístroje pro sběr biofyzikálních parametrů.....	22
4.2. Základní vzorkovací jednotka (ESU).....	25
4.3. Prostorové vzorkování	26
4.3.1. Vzorkovací schémata	26
4.4. Metody měření LAI	29
4.4.1. Přímé metody	29
4.4.2. Polopřímé metody	31
4.4.3. Nepřímé metody.....	31
5. Metodika	34
5.1. Popis dat.....	35
5.2. Postup zpracování dat	40
6. Výsledky práce	41
6.1. Experiment pro určení počtu dílčích měření.....	42
6.2. Experiment pro určení vzorkovacího schématu.....	46
6.3. Porovnání přístrojů LAI-2200C a AccuPAR LP-80.....	59
6.4. Ověření opakovatelnosti měření	60
6.5. Návrh protokolu pro měření LAI dat v terénu	63
7. Závěr	67
POUŽITÁ LITERATURA	69
SEZNAM PŘÍLOH.....	78

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ANOVA	Analýza rozptylu (Analysis of Variance)
CFR	Poměr fluorescence (Chlorophyll Fluorescence Ratio)
ESA	Evropská kosmická agentura (European Space Agency)
ESU	Základní vzorkovací jednotka (Elementary Sampling Unit)
fAPAR	Podíl absorbovaného fotosynteticky aktivního záření (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation)
LAI	Index listové plochy (Leaf Area Index)
LMA	Množství sušiny na jednotku plochy listu (Leaf Mass per Area)
MAD	Střední absolutní odchylka (Mean Absolute Deviation)
MSE	Střední kvadratická chyba (Mean Squared Error)
PAR	Fotosynteticky aktivní záření (Photosynthetically Active Radiation)
R ²	Koeficient determinace
SE	Kvadratická chyba (Square Error)
SLA	Specifická listová plocha (Specific Leaf Area)
VALERI	Validation of Land European Remote Sensing Instruments

SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vztah mezi přesností, precizností a pravdivostí měření	16
Obr. 2: AccuPAR LP-80	22
Obr. 3: LAI-2200C	23
Obr. 4: CCM-300	24
Obr. 5: Vzorkovací schéma <i>square</i>	27
Obr. 6: Vzorkovací schéma <i>cross</i>	27
Obr. 7: Vzorkovací schéma <i>transect</i>	27
Obr. 8: Vzorkovací schéma dle Camacho a kol. (2014)	28
Obr. 9: Vzorkovací schéma dle Weiss a Baret (2011)	28
Obr. 10: Vzorkovací schéma <i>grid</i>	29
Obr. 11: Hemisférická fotografie korunové vrstvy	32
Obr. 12: Terénní měření 4. 5. 2018	35
Obr. 13: Histogram četností – ESU 1	36
Obr. 14: Histogram četností – ESU 2	36
Obr. 15: Histogram četností – ESU 3	37
Obr. 16: Terénní měření 16. 6. 2018	37
Obr. 17: Terénní měření 28. 3. 2019	38
Obr. 18: Terénní měření 25. 4. 2019	38
Obr. 19: Střední kvadratická chyba podle počtu vzorků	42
Obr. 20: MSE podle počtu vzorků pro ESU 1	44
Obr. 21: Počáteční počet a rozložení vzorkovacích bodů	46
Obr. 22: Konečný počet a rozložení vzorkovacích bodů	46
Obr. 23: MSE podle počtu vzorků pro schéma corners - ESU 1	47
Obr. 24: MSE podle počtu vzorků pro schéma corners - ESU 2	47
Obr. 25: MSE podle počtu vzorků pro schéma corners - ESU 3	48
Obr. 26: Počáteční počet a rozložení vzorkovacích bodů	49
Obr. 27: Konečný počet a rozložení vzorkovacích bodů	49
Obr. 28: MSE podle počtu vzorků pro schéma cross - ESU 1	49
Obr. 29: MSE podle počtu vzorků pro schéma cross - ESU 2	50

Obr. 30: MSE podle počtu vzorků pro schéma cross - ESU 3	50
Obr. 31: Počáteční počet a rozložení vzorkovacích bodů	51
Obr. 32: Konečný počet a rozložení vzorkovacích bodů	51
Obr. 33: MSE podle počtu vzorků pro schéma diagonal - ESU 1	52
Obr. 34: MSE podle počtu vzorků pro schéma diagonal - ESU 2	53
Obr. 35: MSE podle počtu vzorků pro schéma diagonal - ESU 3	53
Obr. 36: Počáteční počet a rozložení vzorkovacích bodů	54
Obr. 37: Konečný počet a rozložení vzorkovacích bodů	54
Obr. 38: MSE podle počtu vzorků pro schéma dle Weiss a Baret (2011) - ESU 1 ...	55
Obr. 39: MSE podle počtu vzorků pro schéma dle Weiss a Baret (2011) - ESU 2 ...	56
Obr. 40: MSE podle počtu vzorků pro schéma dle Weiss a Baret (2011) - ESU 3 ...	56
Obr. 41: Srovnávací statistika pro všechny hodnoty LAI	60
Obr. 42: Grafické znázornění statistických charakteristik	61
Obr. 43: Vývojový diagram pro přípravu před měřením	64
Obr. 44: Vývojový diagram pro měření v terénu	65
Obr. 45: Vývojový diagram pro zpracování naměřených dat (post-processing)	66
Tab. 1: Parametry přístroje AccuPAR LP-80	23
Tab. 2: Parametry přístroje LAI-2200C	24
Tab. 3: Parametry přístroje CCM-300	25
Tab. 4: Souhrn terénních měření	39
Tab. 5: Statistická analýza publikovaných metodik (N = 65 článků)	41
Tab. 6: Hodnoty maximálních přípustných chyb pro jednotky ESU	43
Tab. 7: Počet dílčích měření N pro ESU v závislosti maximální přípustné chybě měření	45
Tab. 8: Počet dílčích měření pro daná schémata v závislosti maximální přípustné chybě	58
Tab. 9: Statistické ukazatele pro všechny naměřené hodnoty	61
Tab. 10: Statistické ukazatele po odstranění odlehlých hodnot	61
Tab. 11: Výsledky ANOVA testu	62
Tab. 12: Výsledky dvouvýběrového F-testu	63

1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Hlavní potenciál dálkového průzkumu Země představuje mapování, modelování a monitorování povrchu Země a jeho změn v čase. Zejména mapování vegetace, tj. rozšíření a uspořádání krajinného pokryvu, hodnocení změn povrchu v různých časových horizontech či zhodnocení zdravotního stavu vegetace. Díky možnosti kvalitativního a kvantitativního hodnocení vegetace pomocí metod DPZ lze získat více reálné údaje o povrchu Země. Družice, jako zdroj informací a dat, nachází využitelnost v široké škále oborů. Zpracování družicových dat umožňuje získat komplexní poznatky v oblasti geologie, pedologie, krajinná ekologie, zemědělství či lesnictví, v oblasti životního prostředí atd. Pro získání kvalitních výsledků z obrazových dat DPZ je zásadní získání správných dat naměřených v terénu. Naměřené parametry vegetace jsou pak využity jako referenční data při vytvoření kvalitativní či kvantitativní legendy obrazových dat, tj. definování tříd, do kterých se budou pixely obrazových dat rozřazovat. Při tvorbě kvantitativní legendy pro analýzu obrazových dat DPZ určujeme vybrané vegetační kategorie např. obsah chlorofylu, hustotu vegetace či množství fotosynteticky aktivního záření. Mezi hlavní biochemické a biofyzikální indikátory využívané při hodnocení zdravotního stavu vegetace či určování procesů v rostlinách patří odrazivost, množství chlorofylu, index listové plochy a fAPAR. Procesem tvorby kvalitní sítě pozemních měření pro validaci satelitních produktů se v současné době zabývá program Copernicus, s cílem monitorování vybraných biofyzikálních parametrů vegetace, zejména LAI a fAPAR (Geo/Copernicus v České republice, 2016a, Červená a kol., 2016).

Diplomová práce se zabývá problematikou sběru biofyzikálních parametrů vegetace v terénu. Hlavní motivací práce byla prezentace Frédérica Baretta (Baret a kol., 2014), zveřejněna roku 2014 v ESA u příležitosti vydání procesoru pro Sentinel-2. Baret a kol. (2014) uvedl zjištění, že doposud nejsou vytvořena jednotná pravidla pro pozemní sběr biofyzikálních parametrů vegetace v terénu. Konkrétně uvádí potřebu vytvoření jednotného postupu při výběru používaných přístrojů, vytvoření protokolu pro všechny fáze sběru dat, vzorkování a zpracování naměřených údajů.

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout podrobný postup protokolu pro sběr biofyzikálních parametrů vegetace v terénu, konkrétně na příkladu LAI pro obiloviny, na základě dosavadní dostupné literatury a vlastního experimentálního měření. Návrh protokolu bude zahrnovat všechny fáze sběru dat, včetně doporučené přípravy před měřením, volby vzorkovacího schématu a zpracování naměřených údajů. Cílem je získat reprezentativní a opakovatelná měření vhodná pro následnou kalibraci nebo validaci dat DPZ.

V rámci diplomové práce budou řešeny následující dílčí cíle:

1. rozbor stávajících metodik měření LAI dat v terénu
 - 1.1. návrh konkrétního protokolu pro sběr LAI dat v terénu
2. návrh vhodné parametrizace dílčích částí protokolu a jejich experimentální ověření
 - 2.1. vhodný počet dílčích měření v rámci ESU
 - 2.2. rozložení dílčích měření v rámci ESU
 - 2.3. porovnání různých přístrojů pro sběr LAI dat
3. praktické ověření navrženého protokolu
4. zhodnocení výsledků parametrizace s literaturou a běžnou praxí

2. VYUŽITÍ IN-SITU DAT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou sběru biofyzikálních dat v terénu. Následující kapitola vymezuje důvody, proč jsou pozemní data pořizována.

2.1. Proces validace

Biofyzikální a biochemické parametry vegetace získané pomocí in-situ měření mají klíčový význam při procesu kalibrace a validace produktů DPZ.

Justice a kol. (2000) definoval validaci jako: „proces posuzování přesnosti datových produktů pomocí nezávislých prostředků“.

Obecně můžeme proces validace produktů nízkého a středního rozlišení rozdělit na tři základní fáze:

1. sběr pozemních reprezentativních prostorově rozložených biofyzikálních dat získaných pomocí experimentálního měření v terénu,
2. vygenerování mapy vysokého rozlišení pro vybraný biofyzikální parametr pomocí přenosové funkce odvozené z pozemního měření,
3. porovnání agregované mapy vysokého rozlišení s produkty nízkého a středního rozlišení (Yang a kol., 2006).

Camacho a kol. (2014) definoval důležitost výběru vhodného místa pro validaci, které by mělo splňovat několik kritérií. Pro jednodušší interpretaci validace by se vybrané místo mělo nacházet v relativně plochém terénu. Rozsah místa by měl mít kolem několika km², aby byl snadný pozemní sběr dat. Plocha vegetace by měla být dostatečně velká, aby bylo zamezeno měření na hranicích plochy. Zároveň by měla plocha zahrnovat rozsah několika vegetačních typů v různých vývojových stádiích v závislosti na dalším využití měření.

Projekt VALERI

Projekt VALERI (Validation of Land European Remote sensing Instruments) se věnuje validaci produktů odvozených ze satelitních senzorů středního rozlišení. Cílem projektu VALERI je poskytnout mapy vysokého prostorového rozlišení pro různé biofyzikální proměnné (LAI, fAPAR, fCover) odvozených z dat středního rozlišení (např. POLDER, MERIS, MODIS, AVHRR), s využitím různých algoritmů a následné vzájemné porovnání odvozených biofyzikálních parametrů z různých senzorů. K tomuto účelu byla v rámci projektu VALERI vytvořena síť měřicích míst rozmístěných na zemském povrchu určených k měření biofyzikálních parametrů v různých prostorových a časových měřítkách. Měřicí místa byla volena tak, aby reprezentovala rozsáhlou variabilitu biomů. Databáze VALERI poskytuje uživateli pozemní měření biofyzikálních parametrů, satelitní snímky a mapy vysokého prostorového rozlišení, které představují hlavní výstup projektu VALERI (Fernandes a kol., 2006). Pro pozemní kampaně připravované v rámci projektu VALERI byly navrhovány postupy vhodného prostorového vzorkování, pomocí kterých lze charakterizovat jednotku ESU. Součástí navrhované metodologie byly doporučené postupy pro kalibraci LAI-2000 či hemisférických fotografií (VALERI, 2002).

Služba Copernicus

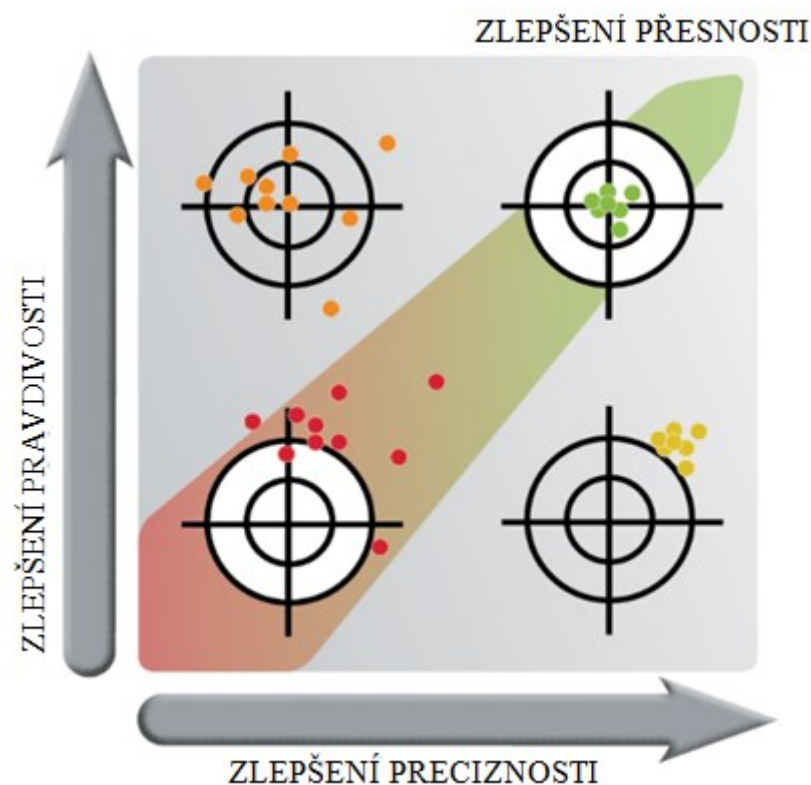
Evropská služba Copernicus pro monitorování území se zabývá procesem tvorby kvalitní sítě pozemních měřicích stanic pro validaci satelitních produktů. In-situ data jsou nezbytnou součástí pro všechny komponenty služby Copernicus (globální složka, panevropská složka, lokální složka), aby mohlo být zajištěno účinné a efektivní využití dat satelitních produktů. In-situ data jsou získána pomocí sítě pozemních stanic zahrnující pozemní měřicí zařízení na Zemi, ve vzduchu a ve vodním prostředí (Geo/Copernicus v České republice, 2016b).

2.2. Reprezentativnost dat

Pro efektivní využití LAI dat určených pomocí dálkového průzkumu Země v různých aplikacích je nezbytné nejdříve posoudit jejich vhodnost a správnost. Nepřesnosti v produktech LAI lze určit pomocí přímé validace na základě porovnání s in-situ daty. Hlavní nevýhodou představuje fakt, že při pozemním měření LAI je měření prováděno v řádu desítek metrů na jednom místě, zatímco družicový produkt LAI určuje hodnotu LAI v celém pixel. Z toho vyplývá, že pozemní měření může odrážet charakteristiku částečné oblasti uvnitř pixelu. Při využití pozemního měření pro validaci družicových dat je reprezentativnost vymezena jako: „míra, s jakým pozemní měření v určitém bodě reprezentuje charakteristiku daného pixelu“ (Xu a kol, 2014).

Nappo a kol. (1982) vymezuje reprezentativnost jako: „míru, s jakou soubor měření v daném čase a prostoru reflektuje skutečné podmínky ve stejné či rozdílné oblasti v daném čase a prostoru“.

Pro zhodnocení správnosti naměřených hodnot je třeba vymezit přesnost, preciznost a pravdivost měření. Vzájemnou vazbu zobrazuje Obr. 1.



Obr. 1: Vztah mezi přesností, precizností a pravdivostí měření

Zdroj: ARTEL (2019), upraveno

Přesnost měření

Farková (2013) definuje přesnost měření (*angl.* accuracy measurement) jako: „těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny”.

Preciznost měření

Farková (2013) definuje preciznost měření (*angl.* precision measurement) jako: „těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny na stejném objektu nebo na podobných objektech za specifických podmínek, která je zpravidla vyjádřena číselnými mírami nepřeciznosti (směrodatnou odchylkou, rozptylem, variačním koeficientem nebo kvadratickou chybou/střední kvadratickou chybou)”.

Pravdivost měření

Farková (2013) definuje pravdivost měření (*angl.* trueness measurement) jako: „těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakování naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotou veličiny”. Pravdivost měření je nepřímo úměrná systematické chybě, kterou lze odhadnout vychýlením měření.

3. ROZBOR METODIK MĚŘENÍ LAI DAT V TERÉNU

V následující kapitole budou rozebrány a zhodnoceny dosavadní metodiky sběru LAI dat v terénu na základě dostupné literatury.

Při měření hodnot LAI v terénu byly dle rozboru článků použity pouze nepřímé metody měření a k tomu byl nejčastěji využit přístroj LAI-2200 či novější verze LAI-2200C. Při pořizování dat v terénu hrají důležitou roli aktuální sluneční podmínky, zejména při dalším zpracování a využití dat. Nejčastěji byla data pořízena v čase po východu slunce či před západem slunce. Tato skutečnost má souvislost s použitým přístrojem měření. Pro přístroj LAI-2200, jsou výrobcem doporučené podmínky při měření tj. východ slunce, západ slunce či zataženo, aby nebylo měření ovlivněno přímým slunečním zářením dopadajícím na měřicí senzor. Při přímém osvětlení vzorku dochází k podhodnocení naměřených hodnot LAI v rozmezí 11 - 56 % (LI-COR, 2009). Z Přílohy 1 je patrné, že ve více jak polovině článků informace o rozptylových podmínkách během měření uvedena není.

Dalším důležitým parametrem navrhovaného protokolu je určení vhodného počtu měření a rozložení jednotlivých měření v rámci ESU. Z Přílohy 1 je patrná velká variabilita v počtu měření v rámci jedné jednotky ESU. Uvedené hodnoty se pohybují od 4 měření (měření v rozích ESU) po 81 měření (mřížka 9 x 9 měření). Nejčastěji byla hodnota LAI pro jednu jednotku ESU určena jako průměr 24 měření. V závislosti na počtu měření můžeme v literatuře najít také informaci o použitém vzorkovacím schématu. U tohoto parametru protokolu autoři nejčastěji vychází z již navržených VALERI vzorkovacích schémat - schéma *cross*, schéma *square*, schéma *grid* a schéma dle Camacho a kol. (2014). V článcích se také objevuje informace, že pro vzorkování bylo použito náhodné schéma, případně autor informaci vůbec neuvádí. Z takového způsobu vzorkování ovšem není patrné, zda byla zachycena variabilita v rámci ESU a lze tedy takto získaná data považovat za reprezentativní.

Vysoká míra variability je patrná i při vymezení velikosti ESU. Setkáme se s hodnotami od 1 x 1 m do 50 x 50 m. Nejčastěji je však velikost ESU volena shodně s velikostí pixelu produktu DPZ tj. 20 x 20 m, pro který budou terénní data použita jako data validační. Za hlavní nedostatek většiny článků lze považovat fakt, že autor neuvádí

informace o jakémkoliv následném statistickém zpracování dat, na základě kterého by bylo možné určit kvalitu naměřených dat a jejich vhodnost pro další využití.

Závěrem bylo hodnoceno, zda autoři berou v potaz možnost vzniku chyb v rámci pozemního měření, které jsou následně přeneseny do dalších analýz a mohou tak ovlivnit dosažené výsledky práce. Z Přílohy 1 vyplývá, že ve většině příkladů nedávají autoři dosažené výsledky do souvislosti s kvalitou naměřených pozemních dat. Lu a kol. (2005) uvádí, že odchylky mezi naměřenými hodnotami LAI a vegetačními indexy může způsobit několik faktorů, kterými jsou např. chyby vzniklé v důsledku oblačnosti či nevhodných povětrnostních podmínek během měření, chyby při práci s přístroji vzniklé v důsledku pořizování dat v terénu více lidmi či chyby způsobené časovým rozdílem mezi dobou pořízení terénní dat a dobou pořízení dat DPZ. Také Richter a kol. (2010) na základě své práce doporučuje vytvoření jednotného postupu při vytváření in-situ dat pro LAI. Tento postup by měl zahrnovat volbu vhodného měřicího přístroje, vhodného schéma pro odběr vzorků v terénu a vhodné statistické zpracování dat. Na základě tohoto jednotného postupu by bylo zajištěno vytvoření spolehlivé referenční databáze vhodné pro využití při validaci dat Sentinel-2.

Na základě rozboru metodik měření LAI dat je tedy patrné, že doposud nebyl navržen jednotný protokol popisující komplexní postup sběru biofyzikálních dat v terénu.

Na základě výše popsaných faktů můžeme vymezit následující základní parametry protokolu, které jsou důležité pro získání kvalitních terénních dat:

1. počet dílčích měření v rámci ESU
2. rozložení dílčích měření v rámci ESU
3. volba vhodného přístroje pro sběr LAI dat

4. PARAMETRY PROTOKOLU

Pro vytvoření jednotného protokolu pro sběr biofyzikálních parametrů vegetace v terénu je třeba vymezit jednotlivé parametry protokolu, které budou při vytváření výsledného protokolu využívány.

4.1. Biofyzikální parametry

Index listové plochy (LAI)

LAI (Leaf Area Index) neboli index listové plochy je biofyzikální veličina, která byla poprvé definována Watsonem (1947) jako celková jednostranná plocha fotosyntetizující tkáně na jednotku půdní plochy.

Obecně lze index listové plochy vymezit jako „listovou plochu vyskytující se nad jednotkou povrchu půdy“. Zjednodušeně můžeme LAI vymezit jako plochu listové vegetace normalizovanou plochou povrchu půdy. Jednotkou LAI je m^2/m^2 nebo ha/ha, z toho vyplývá, že se jedná o víceméně bezrozměrnou veličinu (Pokorný, 2015).

Výše popsaná definice je aplikovatelná na ploché listy listnatých stromů či travní porost, neboť obě strany mají stejnou plochu. V případě, že listová plocha není plochá, ale pokrčená, svráštělá či ohnutá, nelze jednostrannou plochu jasně vymezit. Obdobný problém nastává také u jehličnatých stromů, neboť jehlice jsou válcové či poloválcové. Z tohoto důvodu někteří autoři navrhují použití projekční plochy listů pro zohlednění nepravidelného tvaru listů a jehlic. Důležitou roli hraje volba úhlu projekce, neboť zvolení vertikální projekce nemusí zaručit nejvyšší hodnoty LAI (Jonckheere a kol., 2004). Myneni a kol. (1997) definoval LAI jako maximální projekční plochu listu na jednotku plochy povrchu. Lang a kol. (1991) či Chen a Black (1992) definují LAI jako polovinu celkové plochy listové na jednotku plochy povrchu. Tato definice je pro jehličnaté stromy vhodnější, než použití projekční plochy.

V literatuře se nejčastěji setkáme s vymezením parametru listové plochy jako:

1. projekční plocha listové (projected LAI, LAIp),
2. polovina celkové plochy listové/jehlic (hemi-surface LAI, LAI),
3. celková plocha listové/jehlic (total LAI, LAIt).

Nejčastěji je používána definice ad 2 pro listnaté stromy, kde tedy platí, že $LAI = LAIp$; resp. $2 \times LAIp = 2 \times LAI = LAIt$. Pro jehličnaté stromy je definice ad 2. vymezena zvláště, neboť i když platí $2 \times LAI = LAIt$, na rozdíl od listnatých stromů neplatí, že $LAI = LAIp$ (Pokorný, 2015). Toto rozdílné vymezení definice parametru LAI může mít za následek významný rozdíl mezi vypočtenými hodnotami LAI (Jonckheere a kol., 2004).

Beadle (1993) uvádí hodnoty LAI pro listnaté lesy mezi 6 - 8 a hodnoty 2 - 4 pro jednoleté rostliny. Schulze (1982) uvedl, že hodnoty LAI se pro většinu biomů (kromě tundry a pouště) pohybují v rozmezí 3 - 19. V literatuře však najdeme uvedené i vyšší hodnoty. Vysoké hodnoty LAI byly zaznamenány v boreálních jehličnatých lesích, kde byla naměřena hodnota $LAI = 21,6$. Vysoká hodnota LAI byla zaznamenána i pro travnaté porosty, kde byla naměřena hodnota $LAI = 15,4$. Maximální naměřená hodnota LAI byla zaznamenána v stálezelených jehličnatých lesích, kde byla naměřena hodnota $LAI = 47$ (Asner a kol., 2003).

fAPAR

fAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) neboli podíl absorbovaného fotosynteticky aktivního záření je důležitý biofyzikální parametr používaný pro hodnocení stavu a vývoje vegetace. Parametr fAPAR je přímo spojen s produkcí rostliny, neboť fotosynteticky aktivní záření (PAR) je využíváno v procesu fotosyntézy a pro odhad ukládání CO_2 v rostlině. fAPAR nabývá hodnot od 0 (nejnižší fAPAR) po 1 (nejvyšší fAPAR), ačkoli maximální hodnotu nelze v praxi nikdy naměřit, neboť část dopadajícího záření je vždy odražena od povrchu vegetace či půdního povrchu (Fensholt a kol., 2004; NOAA, 2019).

Chlorofyl

Fotosyntéza je považována za jeden z nejvýznamnějších biochemických procesů. Při procesu fotosyntézy hrají důležitou roli listová barviva, zejména pak chlorofyly obsažené v listech vegetace. Můžeme rozlišit chlorofyl a (C_a) a chlorofyl b (C_b). Jako další se do skupiny listových barviv řadí karotenoidy a anthokyaniny. Tyto biochemické parametry se v listech vegetace nachází v různých poměrech v závislosti na zdravotním stavu vegetace, vlivu abiotického stresu či stáří vegetace. Celkový obsah chlorofylu se udává v $\mu g \cdot cm^{-2}$. Pro výpočet obsahu chlorofylu lze využít modely radiativního transferu (Ferret a kol., 2008).

4.1.1. Přístroje pro sběr biofyzikálních parametrů

V následující kapitole budou stručně popsány jednotlivé přístroje, vhodné pro sběr biofyzikálních parametrů vegetace v terénu.

AccuPAR LP-80

Pro sběr pozemních dat se často využívá přístroj AccuPAR LP-80 (viz Obr. 2) od firmy Decagon Devices, Inc.



Obr. 2: AccuPAR LP-80

Zdroj: Rosell a Sanz (2012)

Pro tento přístroj je charakteristická dlouhá tyč, ve které jsou po celé její délce umístěny senzory. Při vlastním měření se tyč se senzory umísťuje pod měřený vzorek. Pomocí senzorů citlivých na světlo jsou naměřeny hodnoty dopadajícího záření na vegetaci, záření procházející vegetací, záření odražené od vegetace a záření odražené od půdního povrchu. Parametry přístroje jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Parametry přístroje AccuPAR LP-80

Počet senzorů	80
Rozlišení	1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Délka sondy	84 cm
Celková délka	99 cm
Rozsah PAR	0 - >2 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Minimální prostorové rozlišení	1 cm

Zdroj: METER Environment (2018)

LAI-2200C

Hlavním přístrojem používaným pro sběr pozemních dat je přístroj LAI-2200C (viz Obr. 3) od firmy LI-COR Biosciences.



Obr. 3: LAI-2200C

Zdroj: LI-COR (2019)

K měření přístroj využívá čočku fisheye (rybí oko), díky které je zajištěn 180° rozsah měření. Pomocí opakovaného měření nad a pod vegetací je zachyceno množství záření

v pěti zenitových úhlech, z kterého je následně pomocí modelů radiativního transferu záření ve vegetaci vypočítán index listové plochy. Hlavní výhodou přístroje je možnost měření za libovolných slunečních podmínek (LI-COR, 2014). Parametry přístroje jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2: Parametry přístroje LAI-2200C

Rozsah vlnových délek	320 - 490 nm
Rozsah měření	180 °
Měřené zenitové úhly	kruh 1: 0.0 - 12.3° kruh 2: 16.7 - 28.6° kruh 3: 32.4 - 43.4° kruh 4: 47.3 - 58.1° kruh 5: 62.3 - 74.1°
Teplotní rozsah	-20 - 50 °C

Zdroj: LI-COR (2014)

CCM-300

Přístroj CCM-300 od firmy Opti-Sciences, Inc. je přístroj pro měření obsahu chlorofylu v rostlinách (viz Obr. 4).



Obr. 4: CCM-300

Zdroj: OPTI-SCIENCES, Inc. (2011)

Přístroj využívá poměru fluorescence CFR v červené části spektra při vlnových délkách 700 nm a 735 nm. K měření se využívá měřicí klips, který je umístěn na konci optického kabelu. Mezi senzory klipsu je vložen měřený vzorek tak, aby byla zakryta celá plocha senzoru. Hlavní výhodou přístroje je jeho použitelnost pro velmi malé či obtížně měřitelné vzorky - př. řasy, lišejník, mech, jehličí, tráva (OPTI-SCIENCES, Inc., 2011). Parametry přístroje jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3: Parametry přístroje CCM-300

Rozlišení	CFR 0,01 nebo 1 mg/m ²
Měřená plocha	kruh o průměru 3 mm, vnější průměr 4 mm
Doba snímání	5 sekund
Šum	<+/- 2%
Teplotní rozsah	0 - 50 °C

Zdroj: OPTI-SCIENCES, Inc. (2011)

4.2. Základní vzorkovací jednotka (ESU)

Fernandes a kol. (2014) definoval základní vzorkovací jednotku (ESU) jako souvislou prostorovou oblast, nad kterou bude odhadována hodnota LAI pomocí in-situ měření. ESU závisí na prostorovém měřítku odhadů LAI použitých pro referenční mapy LAI. Velikost ESU v referenční oblasti je volena v závislosti na stavu povrchu, světelných podmínkách, zorném poli přístroje a prostorovém vzorkování. Zároveň by měla být velikost ESU volena tak, aby mohlo být provedeno opakované měření s minimálními rozdíly v důsledku změn osvětlení či geolokace (Fernandes a kol. ,2014).

Camacho a kol. (2014) vymezuje jednotku ESU pomocí několika základních kritérií. Jednotka ESU představuje plochu o přibližné velikosti 20 x 20 m, shodnou s velikostí pixelu dat DPZ s vysokým rozlišením. ESU by měla být umístěna tak, aby v místě měření zachycovala variabilitu celé zájmové oblasti. Zároveň by ESU měla být umístěna přibližně 50 m od hranice zájmové oblasti a okolní oblast (tj. oblast ve vzdálenosti 1 pixelu) by měla být pokryta stejným typem vegetace.

4.3. Prostorové vzorkování

Při navrhování schématu odběru vzorků v terénu je třeba brát v úvahu řadu faktorů, které jsou závislé na heterogenitě krajiny, rozměru ESU, rozložení jednotlivých ESU v krajině či rozložení jednotlivých měření v rámci ESU (Liang, 2004). Nejčastěji používaná vzorkovací schémata jsou náhodné, systematické a stratifikované vzorkování.

1. Metoda náhodného vzorkování je založena na volbě libovolných jednotek ESU a libovolném rozložení jednotlivých měření v rámci ESU. Hlavní výhodou této metody je jednoduchost a snadná proveditelnost v terénu. Nevýhodou ovšem představuje fakt, že výsledný rozptyl naměřených vzorků dosahuje vysokých hodnot (Martínez a kol., 2009).
2. Metoda systematického vzorkování je založena na stanovení vzorkovacích míst v pravidelných intervalech. Vzorkovací síť složená ze vzorkovacích bodů může být variabilní. Problém může nastat v případě výskytu více typů pokryvu v zájmové oblasti. V takovém případě nelze každý typ pokryvu stejnou mírou zařadit do vzorkovací sítě (Martínez a kol., 2009).
3. Metoda stratifikovaného náhodného vzorkování představuje nejučinnější přístup, neboť lze dosáhnout obdobného rozptylu naměřených hodnot, ale s nižšími náklady oproti metodě náhodného vzorkování. Metoda je založena na rozdělení celkové měřené oblasti na dílčí podjednotky, tj. do pravidelných bloků či do tzv. přírodních oblastí na základě určitých faktorů, např.: půdní typ či typ krajinného pokryvu (Martínez a kol., 2009).

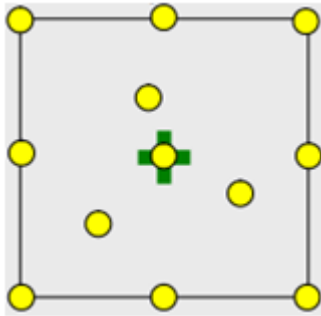
4.3.1. Vzorkovací schémata

V následující kapitole budou na základě literatury popsány vzorkovací schémata a zhodnoceny jejich výhody a nevýhody.

Vzorkovací schémata dle VALERI

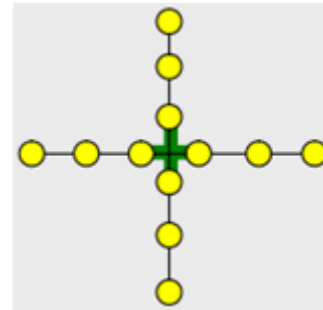
Vzorkovací schéma *square* (viz Obr. 5) a schéma *cross* (viz Obr. 6) představuje design, kdy je ESU reprezentována 12 měřeními body uspořádanými do vzoru čtverce či kříže. Zelený křížek představuje místo zaznamenání GPS souřadnic. Schéma *cross* bylo původně navrženo pro získání geostatistických informací pro krátké vzdálenosti.

Pomocí simulací bylo prokázáno, že vzorkovací schéma *square* a vzorkovací schéma *cross* poskytuje obdobné výsledky měření (Baret a kol., 2005). Nevýhodou schématu *cross* je nižší možnost zachycení variability vegetace v rámci ESU oproti schématu *square*.



Obr. 5: Vzorkovací schéma *square*

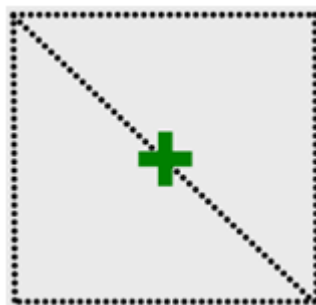
Zdroj: Baret a kol. (2005)



Obr. 6: Vzorkovací schéma *cross*

Zdroj: Baret a kol. (2005)

Schéma *transect* (viz Obr. 7), které je v praxi málo používané, je využíváno jako alternativa k schématům *cross* a *square* v případě, že je řídká vegetace v rámci ESU rozložena heterogenně. Umístění měření je reprezentováno přerušovanou linií, na které jsou jednotlivá měření provedena v pravidelném intervalu. Zelený křížek představuje místo zaznamenání GPS souřadnic (Baret a kol., 2005).

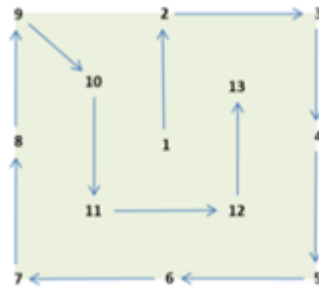


Obr. 7: Vzorkovací schéma *transect*

Zdroj: Baret a kol. (2005)

V novější publikaci (Camacho a kol., 2014) bylo v rámci kampaně VALERI vytvořeno nové vzorkovací schéma pro vzorkování biofyzikálních proměnných v rámci ESU (viz Obr. 8). Schéma dle Camacho a kol. (2014) je reprezentováno 13 vzorkovacími body. Hlavní výhodou tohoto schématu je rovnoměrné rozložení

jednotlivých vzorkovacích bodů v rámci ESU, díky čemuž lze věrněji zachytit variabilitu vegetace. V bodě č. 1 byly určeny souřadnice GPS.

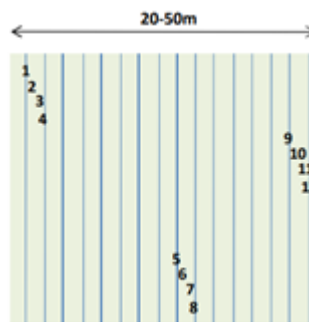


Obr. 8: Vzorkovací schéma dle Camacho a kol. (2014)

Zdroj: Camacho a kol. (2014)

Vzorkovací schéma dle Weiss a Baret (2011)

Weiss a Baret (2011) vytvořili alternativní vzorkovací schéma (viz Obr. 9). Jedná se o specifické vzorkovací schéma, které je reprezentováno 12 vzorkovacími body. Schéma bylo primárně vytvořeno pro řádkovou vegetaci, z toho důvodu jsou jednotlivé vzorkovací body umístěny v místech malých přechodů mezi řádky. Hlavní nevýhodou představuje zachycení variability v rámci ESU z důvodu lokálního rozmístění vzorkovacích bodů, které tak zachycují stav LAI pouze na malé ploše.



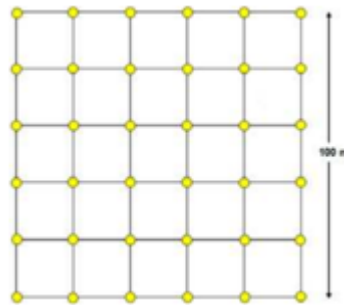
Obr. 9: Vzorkovací schéma dle Weiss a Baret (2011)

Zdroj: Weiss a Baret (2011)

Vzorkovací schéma *grid*

Vzorkovací schéma *grid* (viz Obr. 10) je založeno na pravidelném systému vzorkování, pomocí kterého je charakterizována jednotka ESU. V rámci ESU je vymezeno 36 vzorkovacích bodů na ploše 100 x 100 m, rozdělených do buněk 20 x 20 m (Woodgate a kol., 2012). Obdobné vzorkovací schéma uvádí Majasalmi a kol. (2012), který jednotku ESU vymezuje jako plochu 36 x 36 m, která obsahuje 81 vzorkovacích bodů,

tj. mřížka 9 x 9 bodů. Vzhledem k větší rozloze ESU je dané vzorkovací schéma vhodné k využití především pro lesní plochy.



Obr. 10: Vzorkovací schéma *grid*

Zdroj: Woodgate a kol. (2012)

4.4. Metody měření LAI

Hodnoty LAI lze určit pomocí několika experimentálních metod, které lze rozdělit do následujících skupin (Pokorný, 2015):

- přímé metody
- polopřímé metody
- nepřímé metody

Obdobné rozdělení metod měření LAI v literatuře uvádí např. Jonckheere a kol. (2004) či Zheng a Moskal (2009), kteří rozdělují metody měření na přímé a nepřímé. Přímé metody jsou pak dále rozlišovány na destruktivní a nedeštruktivní, metody nepřímé na kontaktní a bezkontaktní. Rozdíly mezi jednotlivými metodami tvoří zejména časová náročnost a proveditelnost měření.

4.4.1. Přímé metody

Přímé metody se řadí mezi nejpřesnější metody určení hodnot LAI. Nevýhodou těchto metod je jejich pracnost, časová náročnost a nemohou být využity ve velkém měřítku (Jonckheere a kol., 2004). Princip těchto metod je založen na destrukci rostliny či větve, kdy dojde k odstranění jednotlivých listů z celé rostliny, větve či celého stromu. Vzhledem k náročnosti tohoto procesu se často používá reprezentativní vzorek, jehož parametry jsou použity pro zbytek rostliny, větve či stromu. Další nevýhodou této

metody je znemožnění opakování měření na stejném vzorku a zmapování vývoje LAI v čase kvůli destrukci vzorku během měření. Při použití přímé metody lze současně určit tvar, úhel nasazení, rozměry nebo pozici jednotlivého orgánu, ovšem kvantitativní popis těchto parametrů nadzemní biomasy je velmi složitý vzhledem k velké časové proměnlivosti (Pokorný, 2015). Důležitost těchto metod představuje jejich využití pro kalibraci metod nepřímých (Jonckheere a kol., 2004).

Metoda opadoměrů

Mezi přímé metody se řadí metoda opadoměrů, která může být použita pro listnatý porost. Tato metoda není destruktivní, pracuje na principu sběru napadaného listí v podzimních měsících do speciálních nádob tzv. opadoměrů. Opadoměry jsou otevřené nádoby s předem stanovenou velikostí a s bočnicemi, které zamezují ovlivnění měřeného opadu listí větrem. Zpravidla jsou umístovány pod korunou stromu nad půdním povrchem (Jonckheere a kol., 2004). Mezi nevýhody této metody patří její použití pro stálezelené lesy, u kterých opad listí nesouvisí s celkovým LAI, ale záleží na průměrné životnosti listů a klimatických podmínkách (Chen a kol., 1997). Nevýhodou je i fakt, že oproti ostatním přímým metodám, metoda opadoměrů neposkytuje informace o vertikálním rozmístění listů v koruně stromu (Jonckheere a kol., 2004).

Techniky determinace listové plochy

Jonckheere a kol. (2004) definoval techniky determinace listové plochy jako metodu, která se používá po sběru opadaného listoví, kdy je třeba určit jeho plocha. Tu určujeme pomocí planimetrických a gravimetrických technik. Planimetrická technika pracuje na principu korelace mezi plochou jednoho listu a plochou překrytou tímto listem v horizontální rovině. V praxi je tedy list připevněn k vodorovné podložce, pomocí planimetru je určen jeho obrys a z něho je následně vypočtena plocha. Gravimetrická technika pracuje na principu korelace hmotnosti suchých listů a plochy čerstvých listů. Při gravimetrické technice je nejprve odebrán vzorek, pro který je pomocí planimetrické techniky určena jeho plocha. Poté je tento čerstvý, zelený list vysušen, dokud není dosaženo konstantní hmotnosti a následně je vzorek zvážen. Hodnotu LMA získáme tak, že hmotnost suchého vzorku vydělíme plochou čerstvého listu (Jonckheere a kol., 2004). Hodnota SLA je obrácenou hodnotou LMA (Enrique a kol., 2016). Ostatní vzorky listů (zachycené do opadoměrů) pak také usušíme a zvážíme a díky známé hodnotě LMA určíme hodnotu celkové plochy listů (Jonckheere a kol., 2004).

4.4.2. Polopřímé metody

Do polopřímých metod řadíme metodu alometrických vztahů, Langovu metodu a metodu kvadrantů inklinálních bodů.

Pomocí metody alometrických vztahů lze ze základních dendrometrických parametrů porostu stromů (př. výčetní tloušťka kmene, výška stromu) určit listovou plochu stromu a následně vypočítat celkové LAI (Pokorný, 2015).

Určování hodnoty LAI pomocí Langovi metody či metodou kvadrantů inklinálních bodů jsou již v dnešní době málo využívané metody. Langova metoda je založena na principu měření úhlů pomocí tří ramen a tím určení polohy libovolného bodu v koruně (Norman a Campbell, 1989). Metoda kvadrantů inklinálních bodů je založena na principu průchodu sondy korunou (pod určitým inklinálním a azimutálním úhlem) a určení počtu dotýkajících se listů této sondy (Jonckheere a kol., 2004).

Hlavní rozdíl mezi metodami přímými a polopřímými představuje menší náročnost metody, ale i zde je zapotřebí kontakt s listovým či korunou stromu (Pokorný, 2015).

4.4.3. Nepřímé metody

Nepřímé metody měření LAI vychází z optických vlastností listů a jejich prostorového uspořádání v koruně, kde jeden parametr může být použit k odhadu parametru druhého. Určení LAI pomocí nepřímé metody je obecně rychlejší než přímá či polopřímá metoda měření. Do nepřímých metod řadíme metodu měření intenzity radiace resp. stanovení transmitance, metodu mezernatosti, spektrální metody a laserové metody (Pokorný, 2015).

Metoda měření intenzity radiace

Metoda měření intenzity radiace využívá faktu, že po průchodu korunou stromu je záření zeslabováno exponenciálně dle Lambert-Beerova extinkčního zákona modifikovaného Monsim (1953):

$$I = I_0 * \exp(-k * LAI) \quad \text{nebo} \quad I = I_0 * \exp(-G * \mu * d),$$

kde I je intenzita záření v určité výšce korunové vrstvy nebo pod korunovou vrstvou, I_0 je intenzita záření dopadající na porost, \exp je základ přirozeného logaritmu, k je

extinkční koeficient, *LAI* (kumulativní) je celková listová plocha půdního povrchu, *d* je délka dráhy paprsku procházejícího korunovou vrstvou, μ je průměrná hustota listoví podél této hrany a *G* je průměrná projekce jednotky listoví (Nilson, 1971).

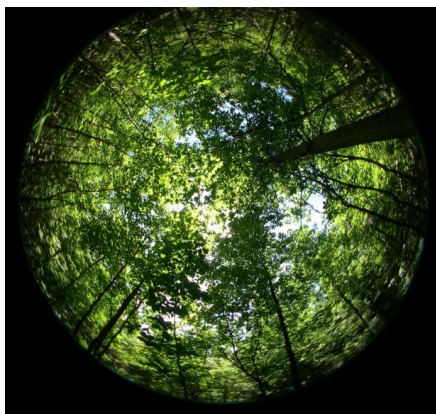
Pro měření intenzity radiace procházející korunovou vrstvou se využívá přístrojů měřících ve vlnových délkách 380 - 780 nm, kam se řadí AccuPAR LP-80, LaiPen LP 100 či SunScan (Pokorný, 2015).

Metoda mezernatosti

Metoda mezernatosti (též frakce děr) funguje na principu určení poměru zakryté a nezakryté části podkladu listovím. Při pohledu zdola představuje podklad obloha, při pohledu shora představuje podklad půdní povrch. S pravděpodobností zachycení radiace procházející porostem je metoda frakce děr spjata s metodou transmise přímého slunečního záření. Pro měření pomocí metody frakce děr se využívají přístroje TRAC a LAI-2200 (Pokorný, 2015).

Hemisférická fotografie

První hemisférický objektiv byl sestaven již roku 1924 Robinem Hillem s cílem vytvořit celkový obraz oblohy pro meteorologické studium tvorby oblačnosti (Jonckheere a kol., 2003). Hemisférická fotografie (viz Obr. 11) je technika pro studium korunové vrstvy porostu, díky použití hemisférické čočky objektivu (tzv. fisheye - rybí oko). Šířka záběru pořizovaných fotografií je téměř 180°. Hemisférické fotografie lze pořizovat při pohledu ze zdola od půdního povrchu či ze shora, z pohledu dolů skrz vegetaci. Ve výsledné fotografii se určuje poměr nezakryté části vymezením podkladu (půdní povrch, obloha) uvnitř kruhů, jejichž střed je totožný se středem fotografie. Poloměru každého kruhu odpovídá určitý zenitální úhel (Pokorný, 2015).



Obr. 11: Hemisférická fotografie korunové vrstvy
Zdroj: USGS (2018)

Hlavní výhodou hemisférických fotografií je fakt, že poskytují trvalý záznam a proto jsou cenným zdrojem informací o poloze, velikosti, hustotě a rozmístění mezer v koruně. Zároveň lze zaznamenat druhové, prostorové a věkové rozdíly korunové vrstvy (Jonckheere a kol., 2004).

5. Metodika

Cílem této kapitoly je popsat metodiku praktické části diplomové práce, pomocí které budou splněny dílčí cíle.

V úvodu práce byl nejprve proveden rozbor metodik stanovujících postupy měření LAI dat v terénu. Na základě tohoto rozboru byly stanoveny dílčí parametry protokolu pro sběr dat, na základě kterých byla potvrzena důležitost vytvoření jednotného protokolu pro sběr LAI dat v terénu. Na základě vlastních navržených terénních experimentů bude stanovena vhodná parametrizace protokolu, který bude zahrnovat porovnání různých měřicích přístrojů, určení vhodného počtu dílčích měření, určení vhodného vzorkovacího schématu.

V rámci experimentu pro stanovení vhodného počtu dílčích měření a vzorkovacího schémata byl pro ESU měřen vysoký počet bodů tak, aby bylo umožněno ověřit vhodnost různých schémat a závislost kvalitativních ukazatelů na měnícím se počtu dílčích měření. Pro tento účel bylo měřeno 100 bodů, což je více než čtyřnásobek nejčastěji uváděného počtu měření uvnitř ESU. Pro stanovení vhodného počtu dílčích měření v rámci ESU bude navržen experiment, v rámci kterého bude stanovena hodnota střední kvadratické chyby v závislosti na počtu měření. Pro stanovení vhodného vzorkovacího schématu budou použita vzorkovací schémata uvedená v literatuře a vlastní navržená vzorkovací schémata. Pro zhodnocení jejich použitelnosti budou daná vzorkovací schémata aplikována na soubor 100 měření na jednotku ESU. Vzorkovací schéma bude upraveno tak, aby kromě přesných bodů, kterými je dané schéma vymezeno, byly do analýzy zahrnuty i nejbližší okolní body. Pro porovnání různých přístrojů pro sběr LAI dat v terénu bude provedeno terénní měření, pomocí kterého budou porovnány a vyhodnoceny naměřené hodnoty LAI získané pomocí LAI-2200C a AccuPAR LP-80.

Hlavním cílem je vytvoření protokolu pro sběr dat v terénu tak, aby pomocí dílčích experimentů bylo zajištěno získání reprezentativních a opakovatelných měření vhodných pro následnou kalibraci či validaci dat DPZ.

5.1. Popis dat

Pozemní měření indexu listové plochy probíhalo pomocí přístrojů LAI-2200C a AccuPAR LP-80. Dvě terénní měření byla provedena během vegetační sezóny v termínech 4. 5. 2018 a 16. 6. 2018.

Terénní měření 4. 5. 2018 bylo provedeno v lokalitě Jinonice. Měření pomocí přístrojů LAI-2200C a AccuPAR LP-80 byla provedena za jasných podmínek, měřenou plodinou byla jarní pšenice a oves. V rámci měření bylo prakticky provedeno seznámení s jednotlivými přístroji, určení systému ukládání dat přístrojem či praktická příprava přístrojů před měřením v terénu. Celkem bylo změřeno 5 dílčích jednotek ESU (20 x 20 m). Pro každou ESU bylo provedeno jedno měření nad vegetací a následně 13 měření pod vegetací. Z toho důvodu byla získána pouze jedna celková hodnota LAI na jednotku ESU. Průměrná naměřená hodnota LAI pro LAI-2200C byla 1,5 (min = 0,9; max = 1,8), průměrná naměřená hodnota LAI pro AccuPAR LP-80 byla 0,9 (min = 0,6; max = 1,05). Stav vegetace v době měření zobrazuje Obr. 12.

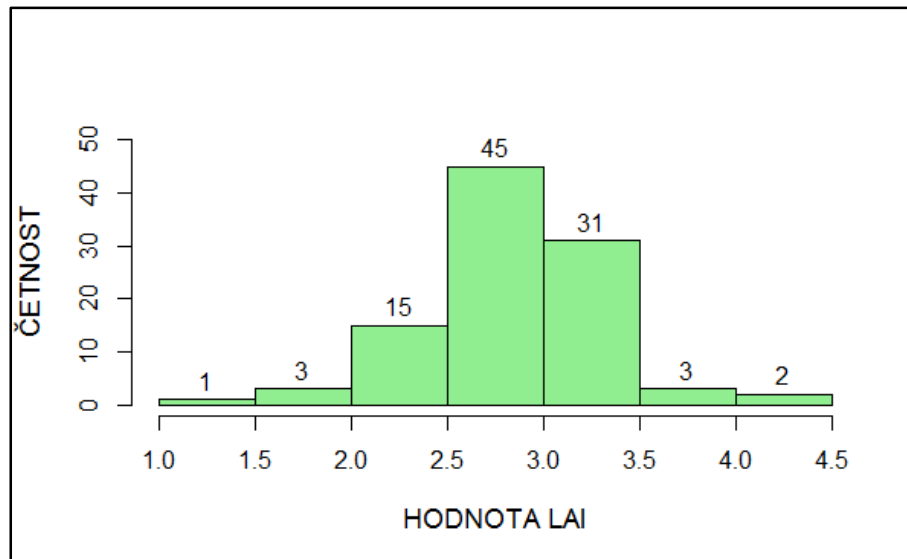


Obr. 12: Terénní měření 4. 5. 2018

Zdroj: vlastní fotografie

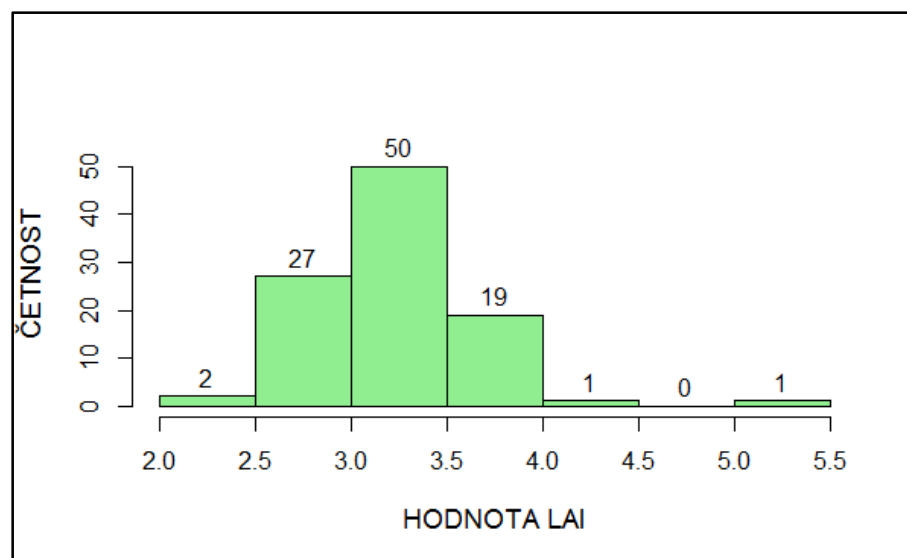
Terénní měření 16. 6. 2018 bylo provedeno na stejném místě v lokalitě Jinonice. Měření pomocí přístroje LAI-2200C byla provedena za jasných podmínek, měřenou plodinou byla jarní pšenice a oves. V rámci měření byl naměřen větší soubor dat, který bude následně využit ke statistickému zpracování v rámci dílčích cílů diplomové práce. Celkem byly změřeny 3 dílčí jednotky ESU (20 x 20 m). Pro každou jednotku ESU byla provedena měření v pravidelné mřížce po dvou metrech, tj. 100 naměřených hodnot LAI na jednu jednotku ESU. Každá naměřená hodnota LAI byla získána na základě

3 měření nad vegetací a 3 měření pod vegetací. Průměrná naměřená hodnota LAI byla 2,8 (min = 1,3; max = 4,4). Četnost naměřených hodnot LAI pro každou ESU zobrazuje Obr. 13 – 15. Stav vegetace v době měření zobrazuje Obr. 16.



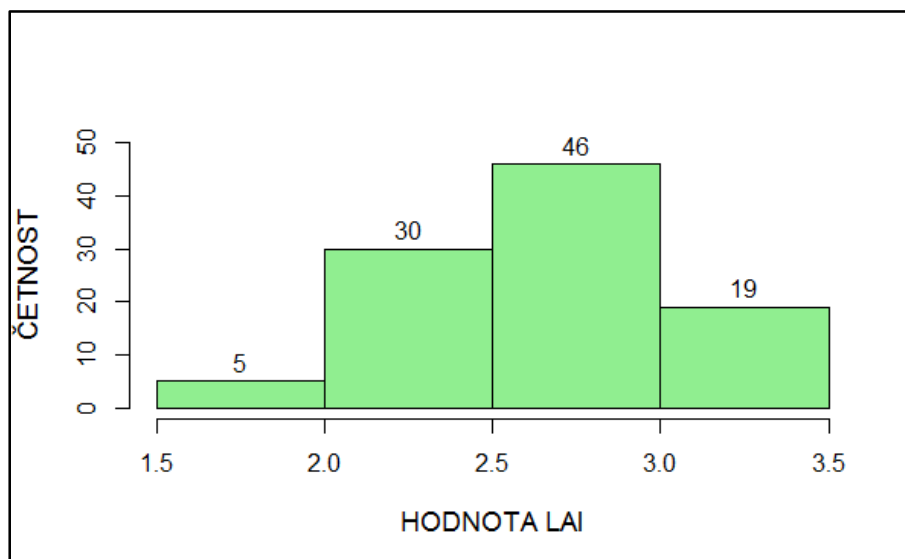
Obr. 13: Histogram četností - ESU 1

Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 14: Histogram četností - ESU 2

Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 15: Histogram četností - ESU 3

Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 16: Terénní měření 16. 6. 2018

Zdroj: vlastní fotografie

V roce 2019 byla provedena další 3 terénní měření během vegetační sezóny v termínech 28. 3. 2019, 25. 4. 2019 a 27. 6. 2019. Měření byla provedena v lokalitě Třeboradice. Měření pomocí přístrojů LAI-2200C a AccuPAR LP-80 byla provedena za jasných podmínek, měřenou plodinou byla jarní pšenice. Hlavním cílem měření bylo získat data ze stejného místa pro oba přístroje tak, aby mohlo dojít ke vzájemnému porovnání výsledků. Pro měření provedené 28. 3. 2019 byla průměrná naměřená hodnota LAI přístrojem LAI-2200C 1,45 (min = 0,2; max = 2,59), průměrná naměřená hodnota LAI přístrojem AccuPAR LP-80 1,01 (min = 0,33; max = 1,49). Pro měření provedené 25. 4. 2019 byla průměrná naměřená hodnota LAI přístrojem LAI-2200C

3,26 (min = 1,69; max = 5,23), průměrná naměřená hodnota LAI přístrojem AccuPAR LP-80 2,67 (min = 0,44; max = 4,88). Stav vegetace v době měření zobrazuje Obr. 17 a Obr. 18.



Obr. 17: Terénní měření 28. 3. 2019

Zdroj: vlastní fotografie



Obr. 18: Terénní měření 25. 4. 2019

Zdroj: vlastní fotografie

Hlavním cílem terénního měření provedeného 27. 6. 2019 bylo ověření navrhované parametrizace protokolu pro sběr LAI dat v terénu a zhodnocení opakovatelnosti naměřených dat. Měření bylo provedeno pro vzorkovací schéma *diagonal*, v rámci každé ESU bylo naměřeno 24 dílčích měření. Průměrná naměřená hodnota LAI přístrojem LAI-2200C byla 2,80 (min = 2,03; max = 3,87). Souhrn všech provedených terénních měření zobrazuje Tab. 4.

Tab. 4: Souhrn terénních měření

Lokalita, datum měření	Účel měření	LAI-2200C			AccuPAR LP-80		
		Počet ESU	Opaková ní	Počet měření	Počet ESU	Opaková ní	Počet měření
Jinonice 4. 5. 2018	Seznámení s přístroji	5 ESU x 13 měření	1 x NAD 13 x POD	65	5 ESU x 13 měření	1 x NAD, 1 x POD	65
Jinonice 16. 6. 2018	Soubor pro ověření počtu dílkých měření a schémata	3 ESU x 100 měření	3 x NAD 3 x POD	300	xxx	xxx	xxx
Třeboradice 28. 3. 2019	Porovnání LAI-2200C, AccuPAR LP-80	3 ESU x 13 měření, 2 ESU x 12 měření	3 x NAD 3 x POD	63	3 ESU x 13 měření, 2 ESU x 12 měření	3 x NAD, 3 x POD	63
Třeboradice 25. 4. 2019	Porovnání LAI-2200C, AccuPAR LP-80	5 ESU x 13 měření, 3 ESU x 12 měření	3 x NAD, 3 x POD	101	5 ESU x 13 měření, 3 ESU x 12 měření	3 x NAD, 3 x POD	101
Třeboradice 27. 6. 2019	Ověření navržených parametrů protokolu	3 ESU x 24 měření	3 x NAD, 3 x POD	72	xxx	xxx	xxx
Celkový počet měření				601			229

(xxx měření nebylo provedeno)

Zdroj: vlastní tvorba

5.2. Postup zpracování dat

Pro zpracování dílčích experimentů diplomové práce byly určovány následující statistické charakteristiky. Pro určení dílčího počtu měření byla vypočtena hodnota střední kvadratické chyby podle vzorce:

$$MSE = \frac{1}{N} * \sum_{i=2}^{100} (Y_i - Y_{ESU})^2$$

kde N představuje počet opakování, Y_i představuje průměr náhodného výběru hodnot LAI a Y_{ESU} představuje průměrnou hodnotu LAI za celou ESU.

Pro určení variability a hustoty dílčích bodů vyjadřující hodnotu kvadratické chyby byl použit následující vzorec:

$$SE = \sum_{i=2}^{100} (Y_i - Y_{ESU})^2$$

kde Y_i představuje průměr náhodného výběru hodnot LAI a Y_{ESU} představuje průměrnou hodnotu LAI za celou ESU.

6. Výsledky práce

Před návrhem vlastního konkrétního protokolu pro sběr dat v terénu byla provedena analýza publikovaných metodik měření LAI s cílem analyzovat současnou praxi a ověřit variabilitu postupů. Detailní rozbor uvádí kapitola 3, pro souhrnný přehled byla vytvořena Tab. 5.

Tab. 5: Statistická analýza publikovaných metodik (N = 65 článků)

	Nejčastější hodnota /průměr	Min	Max	Četnost hodnoty “neuveđeno”	Četnost nejčastější hodnoty	Výskyt nejčastější hodnoty (%)
Přístroj	LAI - 2200	xxx	xxx	0	50	77
Sluneční podmínky	západ/východ slunce	xxx	xxx	34	19	29
Počet opakování	1x NAD, 1x POD	xxx	xxx	30	9	14
Počet měř. v ESU	24	4	81	12	19	29
Schéma	náhodné	xxx	xxx	32	10	15
Velikost měř. území	20 x 20 m	1 x 1 m	50 x 50 m	13	32	49
RMSE	Ø 0,65	0,2	1,4	53	xxx	xxx
Směrod. odchylka	Ø 1,6	0,2	4,5	54	xxx	xxx
Koeficient det.	Ø 0,94	0,9	0,97	62	xxx	xxx

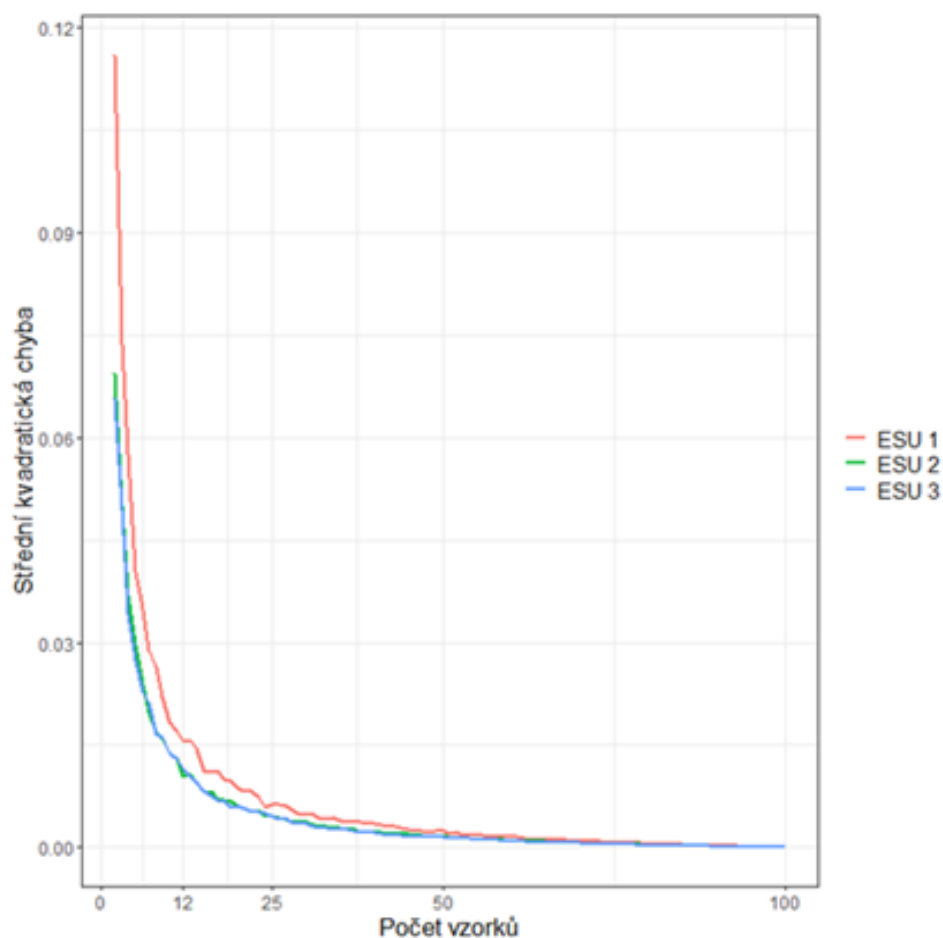
(xxx nelze určit danou hodnotu)

Zdroj: vlastní tvorba

Z výsledné Tab. 5. byly pro další experimentální zpracování použity parametry volba přístroje, počet měření v ESU a vzorkovací schéma. Parametr volba měřicího přístroje byl jediný parametr, který byl uveden v každém článku. Využití přístroje LAI-2200 uvádí 77 % článků. Pro parametr počet měření v ESU byl nejčastěji uváděn počet 24, celkem v 29 % článků. Pro parametr vzorkovací schéma bylo nejčastěji uváděno schéma náhodné, celkem v 15 % článků, zároveň ale téměř polovina článků metodu vzorkování neuvádí.

6.1. Experiment pro určení počtu dílčích měření

Pro určení vhodného počtu dílčích měření v rámci jednotky ESU byl vytvořen experiment zobrazující závislost počtu měření na střední kvadratické chybě (MSE). Pro určení hodnot MSE byla provedena simulace náhodného výběru vzorků s opakováním (N) ze souboru 100 měření na jednotku ESU. Výsledek zobrazuje Obr. 19, kde $N = 800$.



Obr. 19: Střední kvadratická chyba podle počtu vzorků

Zdroj: vlastní tvorba

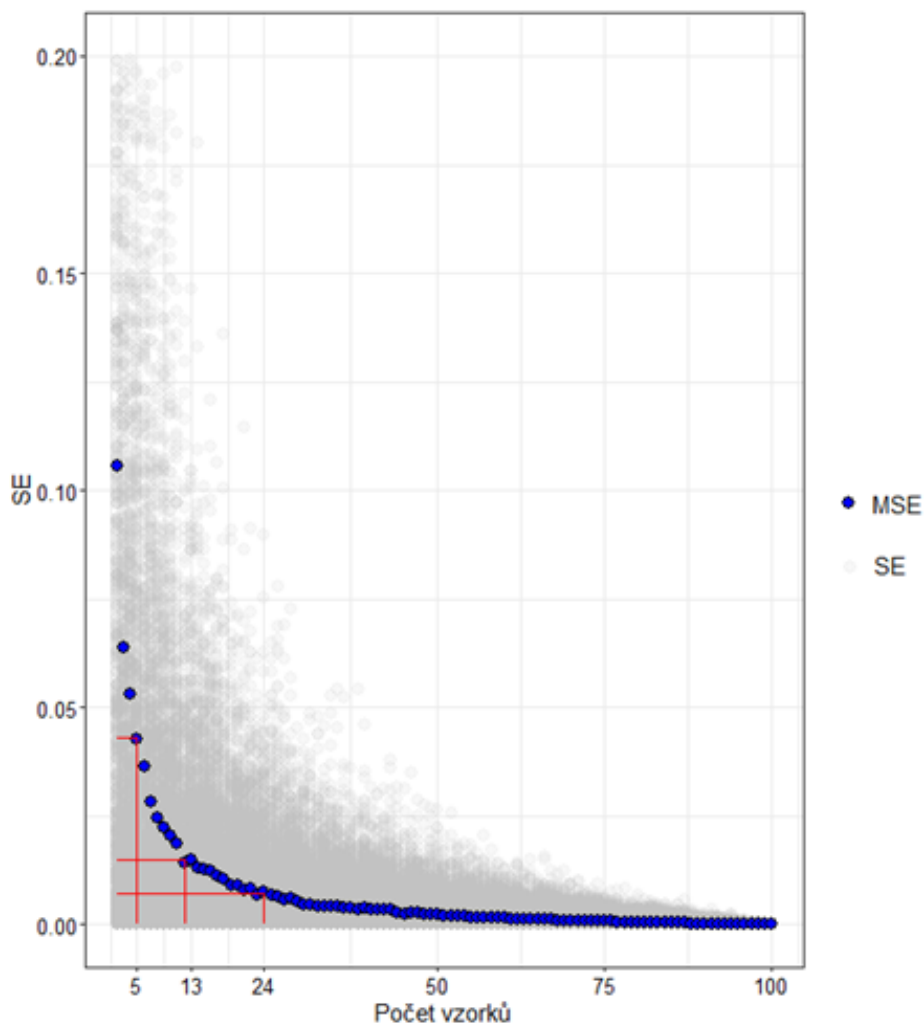
Porovnání různého počtu opakování (N) zobrazuje Příloha 2. Z výsledku je patrné, že se zvyšujícím se počtem opakování dochází k zpřesnění a ustálení průběhu křivky MSE. Při porovnání grafů pro $N = 500$ a $N = 800$ je patrné, že již nedochází k výrazným rozdílům v průběhu křivek, pouze dochází k zhlazení výraznějších rozdílů MSE. Z toho důvodu bylo pro další zpracování voleno $N = 800$.

Následně bylo vytvořeno grafické znázornění MSE podle počtu vzorků zvlášť pro jednotlivé jednotky ESU. Dále jsou zobrazeny body SE pro vybranou jednotku ESU. Pro určení vhodného počtu dílčích měření v rámci jednotky ESU je třeba vycházet z maximální přípustné hodnoty chyby měření. Podle ESA Sentinel-2 Team (2010) je při zpracování výsledné mapy LAI ze satelitní dat Sentinel - 2B maximální chyba hodnot stanovena na 10 %. Hodnotu 10 % tak budeme brát jako maximální přípustnou mez. Vzhledem k tomu, že během zpracovávání výsledné mapy LAI je velká část chyb způsobena modelem výpočtu LAI ze spektrálních měření Sentinel-2, je nutné požadovat přesnost in-situ referenčních dat vyšší. Předpokládáme kumulaci chyb z terénního měření, chyb radiometrických a atmosférických korekcí S2 a také chyb modelu výpočtu LAI. Nejvyšší naměřené hodnoty pro jednotlivé jednotky ESU zobrazuje Tab. 6. Zároveň jsou zde uvedeny hranice hodnot maximálních přípustných chyb pro jednotlivé jednotky ESU. Na základě rešerše literatury bylo zjištěno, že nejčastěji použitý počet dílčích měření bylo 24, 12 a 5. Tyto počty měření budou zhodnoceny a určena jejich vhodnost použití.

Tab. 6: Hodnoty maximálních přípustných chyb pro jednotky ESU

	Max hodnota LAI	Maximální přípustná chyba				
		5 %	4 %	3 %	2 %	1 %
ESU 1	4,457	0,050	0,032	0,018	0,008	0,002
ESU 2	5,146	0,066	0,042	0,024	0,011	0,003
ESU 3	3,448	0,030	0,019	0,011	0,005	0,001

Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 20: MSE podle počtu vzorků pro ESU 1

Zdroj: vlastní tvorba

Z Obr. 20 a Přílohy 3 – 4 je patrné, že při použití 5 dílčích vzorkovacích bodů lze dosáhnout nízkých hodnot MSE. Nejnižší hodnoty MSE bylo dosaženo pro ESU 3, kde $MSE = 0,028$. Pro ESU 1 bylo dosaženo $MSE = 0,043$ a pro ESU 2 bylo dosaženo $MSE = 0,03$. Při volbě 5 dílčích měřicích bodů je velký rozptyl hodnot SE, kvůli kterému může být 5 měření nedostatečných. Při porovnání se stanovenou maximální chybou hodnot na 5 % je patrné, že při použití 5 dílčích měření v rámci ESU je tato podmínka splněna. Z toho lze vyvodit, že pokud je uživatelem stanovena tolerovaná 5% chyba měření, pak by bylo 5 dílčích měření dostatečné. Při požadavku na snížení chyby měření, tj. chyba měření stanovena na 1 % je ovšem použití 5 dílčích měřicích bodů nedostatečné. 5 měřicích bodů bude také nedostatečných při požadavku na zachycení variability v rámci ESU.

Vzhledem ke klesajícímu trendu křivky hodnot MSE, dochází při volbě 12 dílčích měření k nižším hodnotám MSE oproti 5 měřením. Nejnižší hodnoty MSE bylo dosaženo pro ESU 3, kde $MSE = 0,011$. Pro ESU 1 bylo dosaženo $MSE = 0,015$ a pro ESU 2 bylo dosaženo $MSE = 0,012$. Zároveň pro 12 dílčích měření dochází ke snížení variability hodnot SE.

Pro 24 dílčích měření bylo dosaženo nejnižší hodnoty MSE, neboť s rostoucím počtem měření dochází k snižování hodnoty MSE. Nejnižší hodnoty MSE bylo dosaženo pro ESU 3, kde $MSE = 0,004$. Pro ESU 1 bylo dosaženo $MSE = 0,007$ a pro ESU 2 bylo dosaženo $MSE = 0,005$. Jak je patrné z Obr. 20 a Přílohy 3 – 4, se zvyšujícím se počtem měření dochází ke snižování MSE, zároveň se však zvyšují nároky na časovou náročnost a proveditelnost měření v terénu. Dostačující počet dílčích měření v závislosti na maximální přípustné chybě měření zobrazuje Tab. 7.

Tab. 7: Počet dílčích měření N pro ESU v závislosti maximální přípustné chybě měření

Maximální přípustná chyba	ESU 1	ESU 2	ESU 3
5%	5	3	5
4%	7	4	7
3%	12	7	12
2%	24	12	24
1%	52	37	56

Zdroj: vlastní tvorba

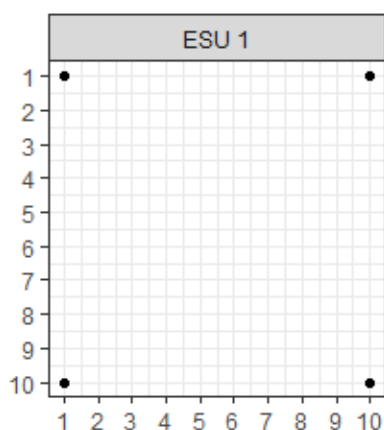
Z porovnání je patrné, že použití 24 dílčích měření poskytne nízkou hodnotu MSE a nižší rozptyl hodnot SE a zároveň je dosaženo 2% chyby měření. Pro ESU 2 je pro dosažení 2% chyby měření dostačující pouze 12 měření. Z Tab. 7 lze vyvodit, že 24 dílčích měření na jednotku ESU poskytne kvalitní výsledky a zároveň naměření 24 vzorkovacích bodů nepředstavuje pro uživatele výraznou časovou náročnost při sběru dat.

6.2. Experiment pro určení vzorkovacího schématu

Pro určení vhodného vzorkovacího schématu byla aplikována vybraná schémata pro každou ESU na soubor dat popsanych v kapitole 5.1. Otestována byla vlastní navržená schémata *corners* a *diagonal* a z literatury převzatá a následně upravená schémata *cross* a schéma dle Weiss a Baret (2011).

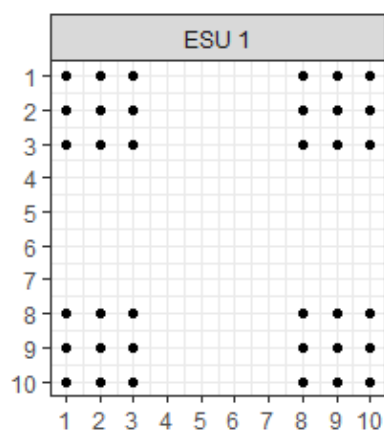
Schéma *corners*

Pro schéma *corners* byly voleny vzorkovací body tak, aby pokrývaly rohové oblasti jednotky ESU. Byly voleny minimálně 4 vzorkovací body rovnoměrně do každého rohu ESU (viz Obr. 21). Následně byly přidávány jednotlivé vzorkovací body, dokud nebyla pokryta rohová oblast 3 x 3, tj. celkem 36 bodů (viz Obr. 22).



Obr. 21: Počáteční počet a rozložení vzorkovacích bodů

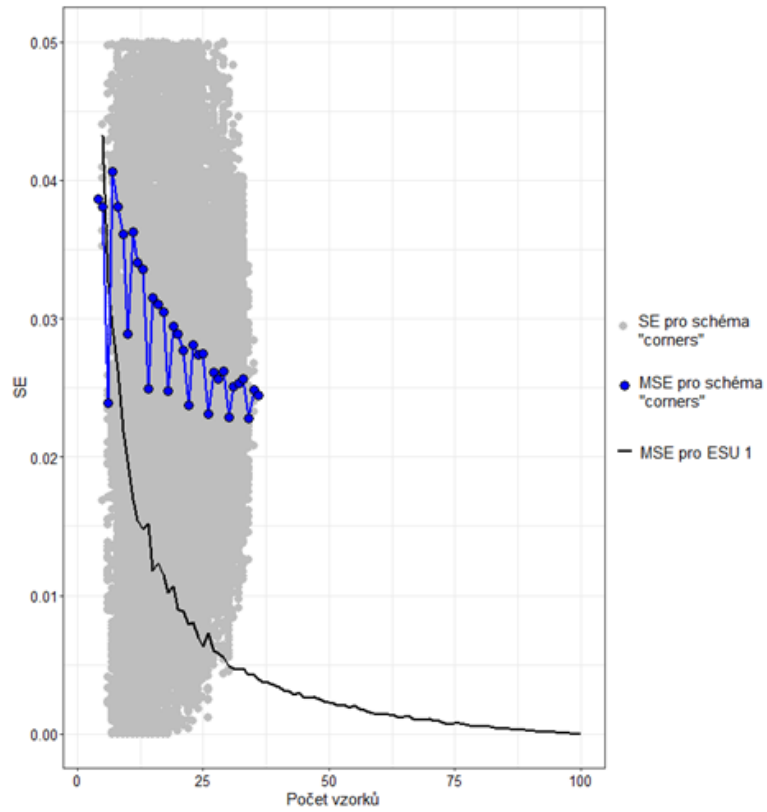
Zdroj: vlastní tvorba



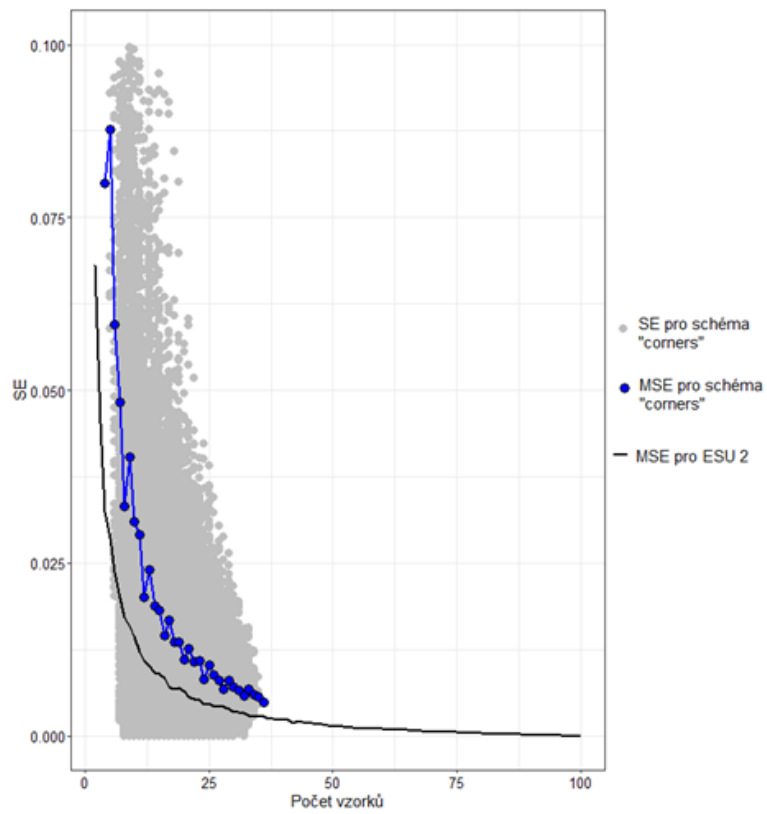
Obr. 22: Konečný počet a rozložení vzorkovacích bodů

Zdroj: vlastní tvorba

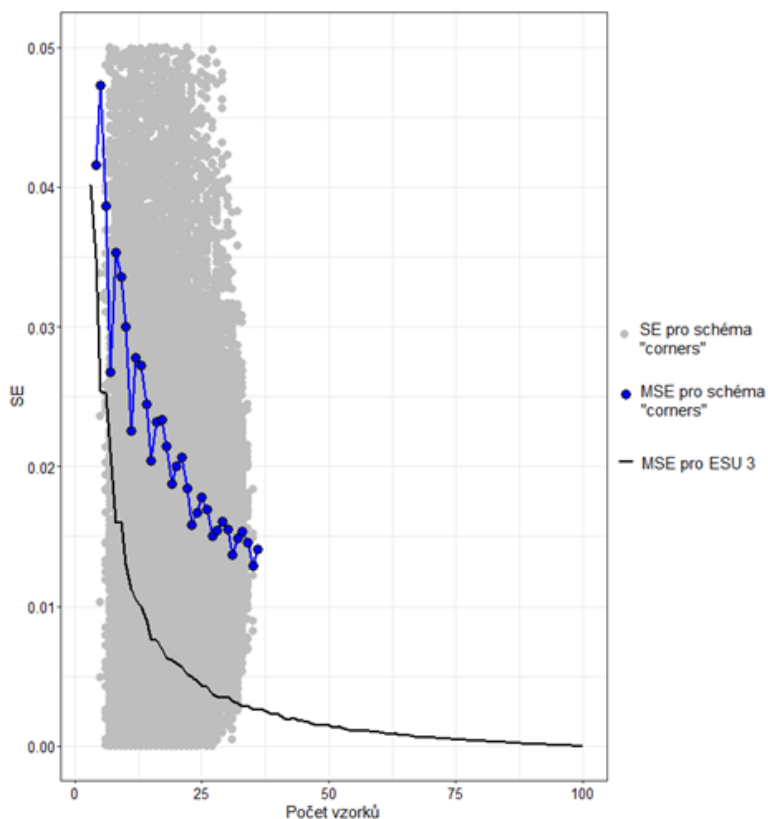
Následně byl výše popsán princip aplikován zvlášť na každou ze tří jednotek ESU (viz Obr. 23 – 25). Grafické znázornění porovnává MSE pro celou jednotku ESU a MSE pro zvolené vzorkovací schéma. Dále jsou zobrazeny body SE pro vybrané vzorkovací schéma.



Obr. 23: MSE podle počtu vzorků pro schéma *corners* - ESU 1
Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 24: MSE podle počtu vzorků pro schéma *corners* - ESU 2
Zdroj: vlastní tvorba

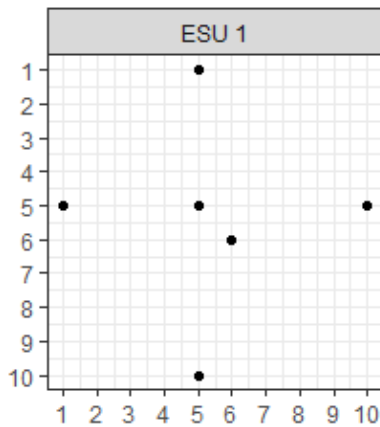


Obr. 25: MSE podle počtu vzorků pro schéma *corners* - ESU 3
Zdroj: vlastní tvorba

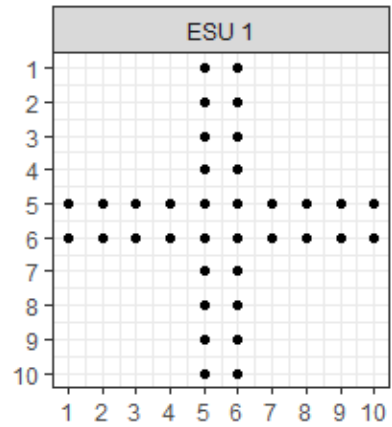
Z výsledných grafů je patrné, že s rostoucím počtem vzorkovacích bodů dochází ke snížení hodnot MSE pro vzorkovací schéma. Zároveň je patrné, že hodnota MSE pro schéma *corners* nabývá vyšších hodnot než hodnota MSE pro celou jednotku ESU. Z toho lze vyvodit, že schéma *corners* nepředstavuje vhodné vzorkovací schéma, zejména kvůli nerovnoměrnému rozložení dílčích vzorkovacích bodů.

Schéma *cross*

Pro schéma *cross* byly voleny vzorkovací body tak, aby pokrývaly oblast jednotky ESU ve tvaru kříže. Bylo voleno minimálně 6 vzorkovacích bodů, kde 4 byly rozmístěny rovnoměrně do krajů kříže a 2 do středu jednotky ESU (viz Obr. 26). Následně byly přidávány jednotlivé vzorkovací body, dokud nebylo pokryto celé schéma *cross*, tj. celkem 36 vzorkovacích bodů (viz Obr. 27).

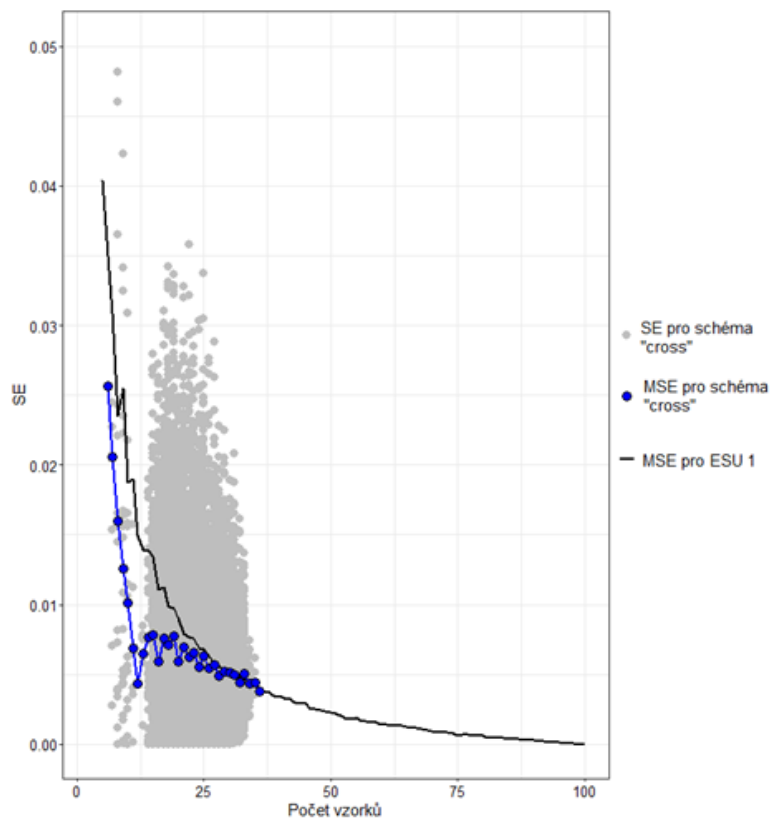


Obr. 26: Počáteční počet a rozložení
vzorkovacích bodů
Zdroj: vlastní tvorba



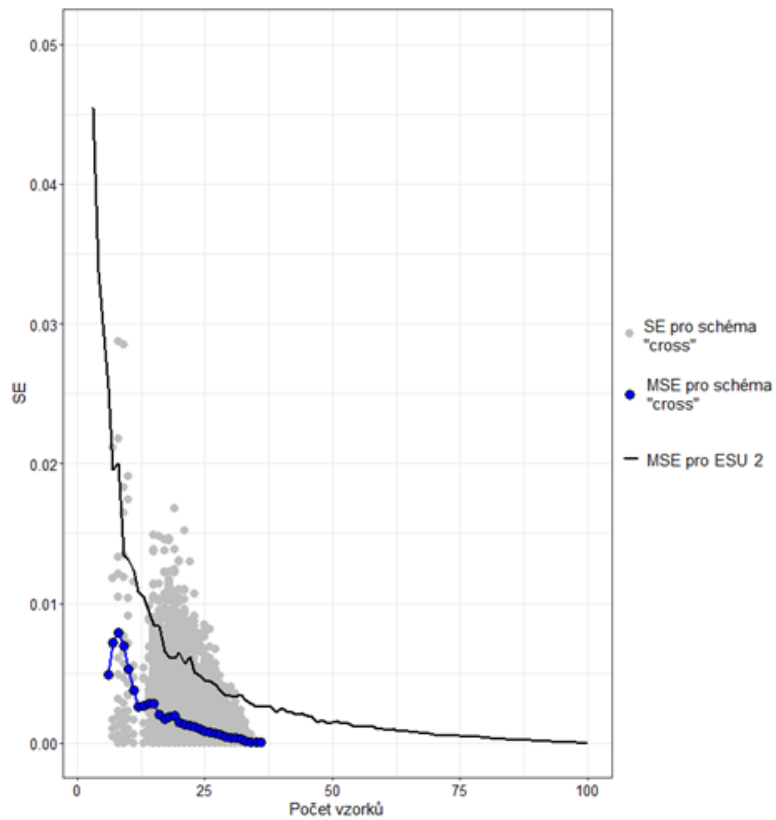
Obr. 27: Konečný počet a rozložení
vzorkovacích bodů
Zdroj: vlastní tvorba

Rozmístění vzorkovacích bodů podle schématu *cross* bylo následně aplikováno zvlášť na každou ze tří jednotek ESU (viz Obr. 28 – 30). Grafické znázornění porovnává MSE pro celou jednotku ESU a MSE pro volené vzorkovací schéma. Dále jsou zobrazeny body SE pro vybrané vzorkovací schéma.

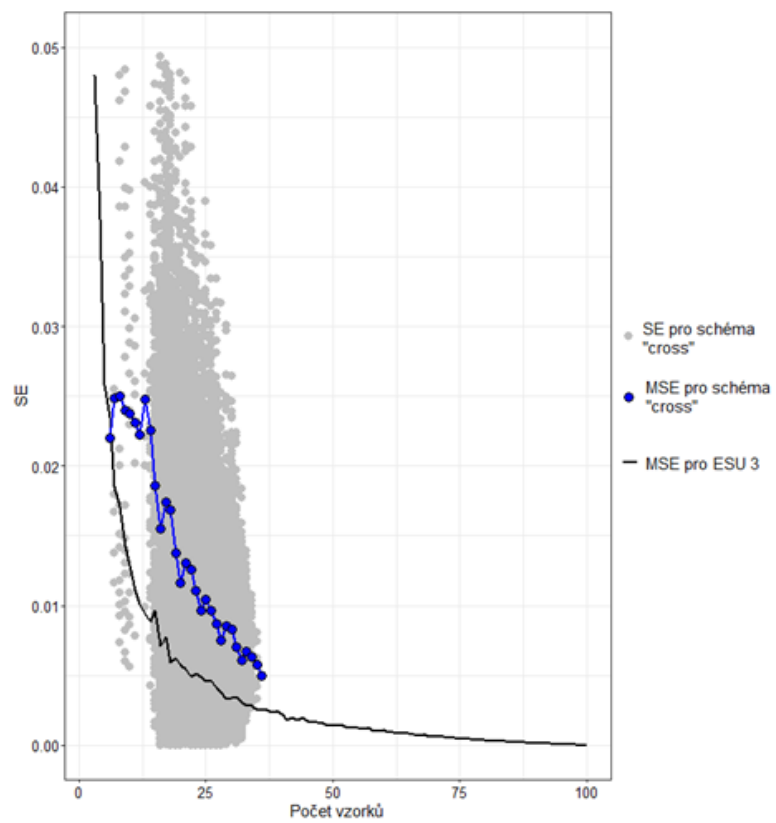


Obr. 28: MSE podle počtu vzorků pro schéma *cross* - ESU 1

Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 29: MSE podle počtu vzorků pro schéma *cross* - ESU 2
Zdroj: vlastní tvorba

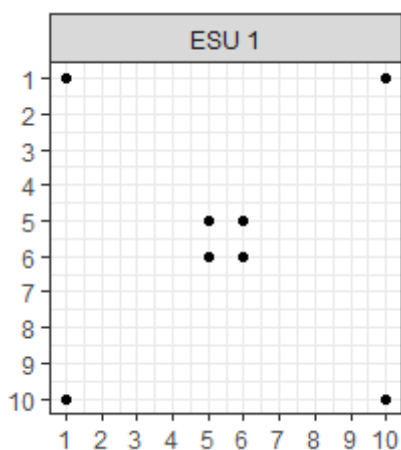


Obr. 30: MSE podle počtu vzorků pro schéma *cross* - ESU 3
Zdroj: vlastní tvorba

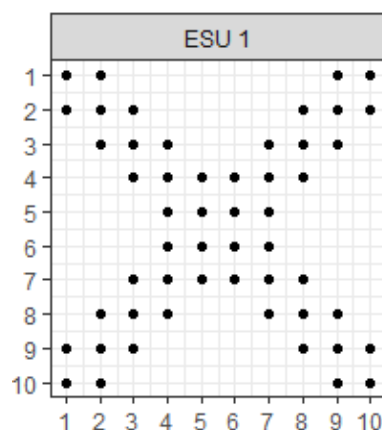
Při porovnání jednotlivých grafů je patrné, že hodnota MSE pro schéma *cross* dosahuje pro ESU 1 a ESU 2 nižších hodnot MSE než je hodnota MSE pro celou ESU. Nejnižších hodnot MSE dosáhla ESU 2. Pro ESU 3 se vhodnost schématu *cross* nepotvrdila, neboť hodnoty MSE pro schéma *cross* dosáhly vyšších hodnot než je hodnota MSE pro ESU 3. Z toho lze vyvodit, že schéma *cross* představuje vhodnější vzorkovací schéma oproti schématu *corners*, zejména díky rovnoměrnému rozložení dílčích vzorkovacích bodů. Při porovnání Přílohy 5, 7 a 9 je patrné, že vyšší hodnoty MSE u ESU 3 jsou způsobeny maximálními hodnotami, které jsou zahrnuty do schématu *cross*, zatímco pro ESU 1 a ESU 2 je dosaženo nižších průměrných hodnot LAI. Zároveň dle Přílohy 10 je patrné, že pro ESU 3 je dosaženo vyšších hodnot směrodatné odchylky, tedy že je pro ESU 3 dosaženo větších rozdílů mezi průměrnými hodnoty LAI.

Schéma *diagonal*

Pro schéma *diagonal* byly voleny vzorkovací body tak, aby pokrývaly oblast jednotky ESU ve tvaru diagonály. Bylo voleno minimálně 8 vzorkovacích bodů, kde 4 byly rozmístěny rovnoměrně do krajů diagonály a 4 do středu jednotky ESU (viz Obr. 31). Následně byly přidávány jednotlivé vzorkovací body, dokud nebylo pokryto celé schéma diagonály, tj. celkem 52 vzorkovacích bodů (viz Obr. 32).

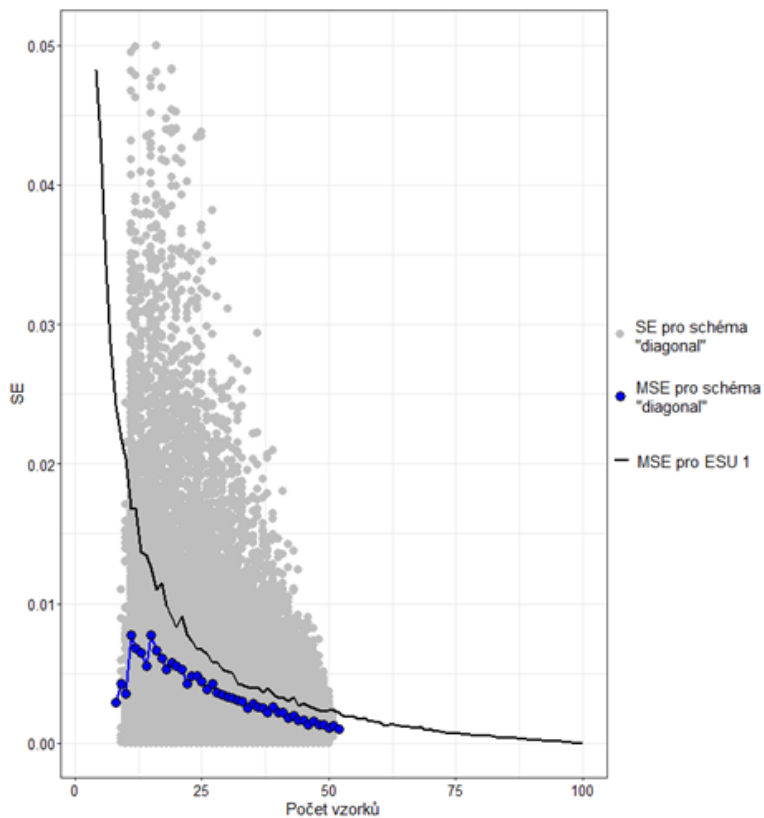


Obr. 31: Počáteční počet a rozložení vzorkovacích bodů
Zdroj: vlastní tvorba



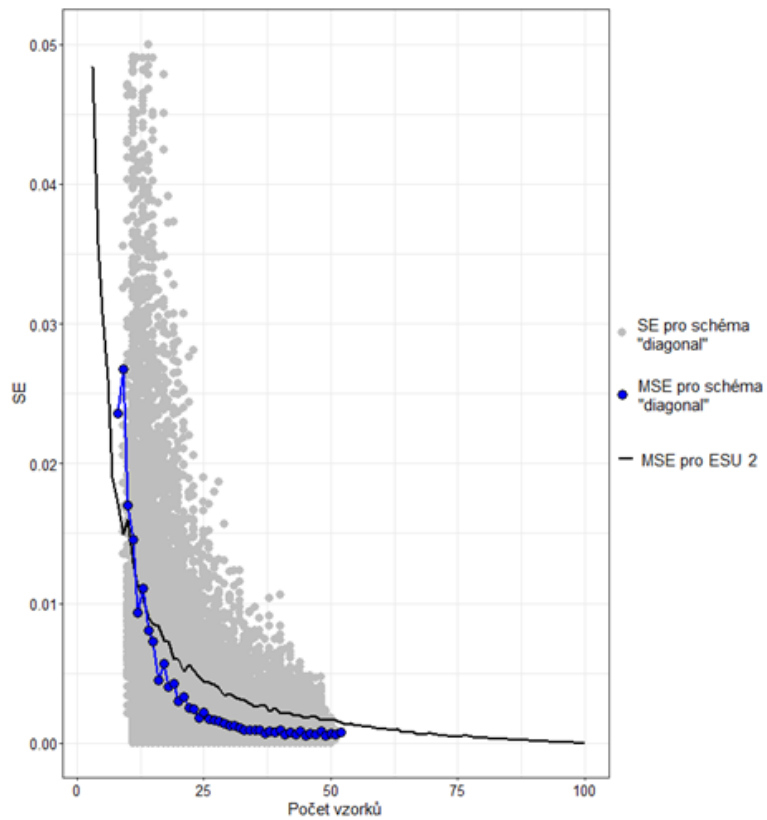
Obr. 32: Konečný počet a rozložení vzorkovacích bodů
Zdroj: vlastní tvorba

Rozmístění vzorkovacích bodů podle schématu *diagonal* bylo následně aplikováno zvlášť na každou ze tří jednotek ESU (viz Obr. 33 – 35). Grafické znázornění porovnává MSE pro celou jednotku ESU a MSE pro volené vzorkovací schéma. Dále jsou zobrazeny body SE pro vybrané vzorkovací schéma.

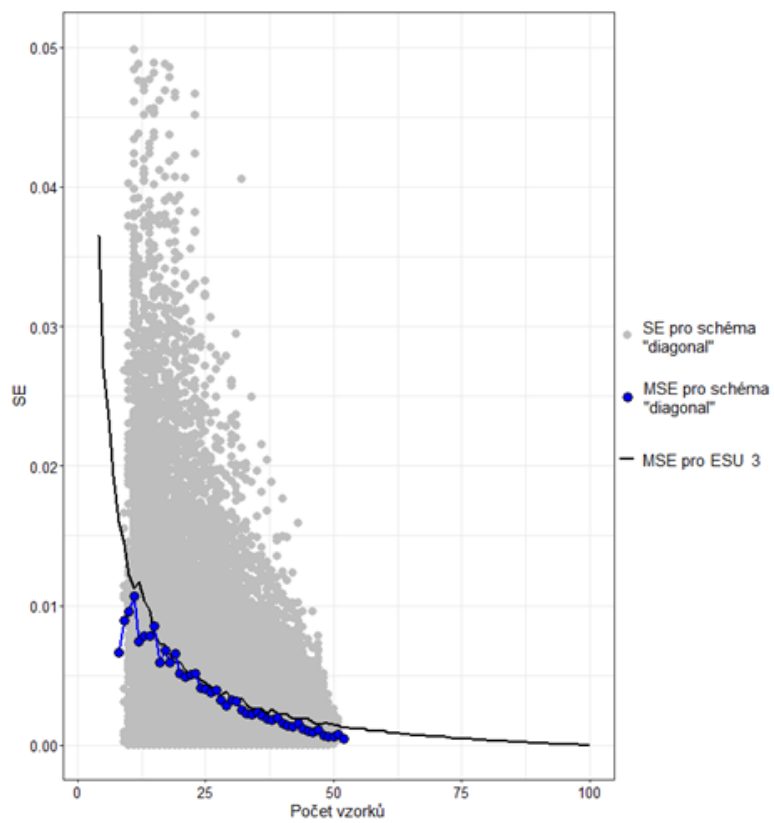


Obr. 33: MSE podle počtu vzorků pro schéma *diagonal* - ESU 1

Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 34: MSE podle počtu vzorků pro schéma *diagonal* - ESU 2
Zdroj: vlastní tvorba

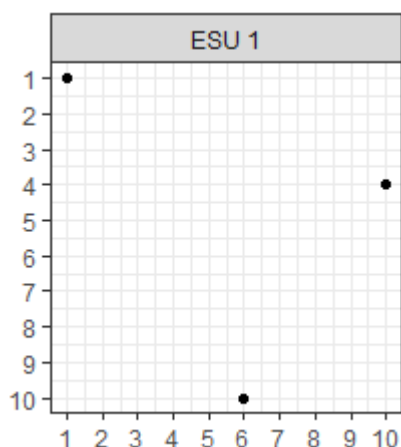


Obr. 35: MSE podle počtu vzorků pro schéma *diagonal* - ESU 3
Zdroj: vlastní tvorba

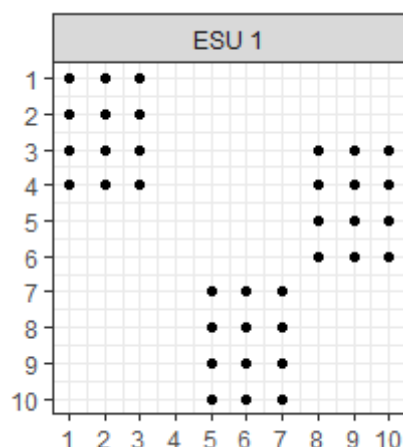
Z výsledků je patrné, že hodnota MSE pro schéma *diagonal* dosahuje ve všech třech případech nižších hodnot než hodnota MSE pro celou ESU. Nejlepších hodnot MSE dosáhla ESU 2. Z toho lze vyvodit, že schéma *diagonal* představuje vhodné vzorkovací schéma, zejména díky rovnoměrnému rozložení dílčích vzorkovacích bodů. Vysoké hodnoty MSE pro malý počet měření (tj. 8-11 měření) pro ESU 2 je způsobeno lokálním průměrným maximem v rohové části jednotky ESU (viz Příloha 7). Zároveň je zde dosaženo nízkých hodnot směrodatné odchylky, tedy že naměřené body se vzájemně liší minimálně (viz Příloha 8). Naopak pro ESU 1 a ESU 3 jsou v této části minimální průměrné hodnoty LAI a nižší hodnoty směrodatné odchylky hodnot LAI. Nárůst hodnot MSE je způsoben následným přidáváním bodů dosahujících vyšších hodnot LAI tak, aby bylo pokryto schéma diagonály (viz Příloha 5 a 9). Zároveň hodnoty směrodatné odchylky dosahují hodnot kolem 0,4 (viz Příloha 6 a 10).

Schéma dle Weiss a Baret (2011)

Pro schéma dle Weiss a Baret (2011) byly vzorkovací body voleny v rámci 3 oblastí jednotky ESU. Byly voleny minimálně 3 vzorkovací body, každý do jedné oblasti v ESU (viz Obr. 36). Následně byly přidávány jednotlivé vzorkovací body, dokud nebyla pokryta celá oblast 4 x 3, tj. celkem 36 bodů (viz Obr. 37).

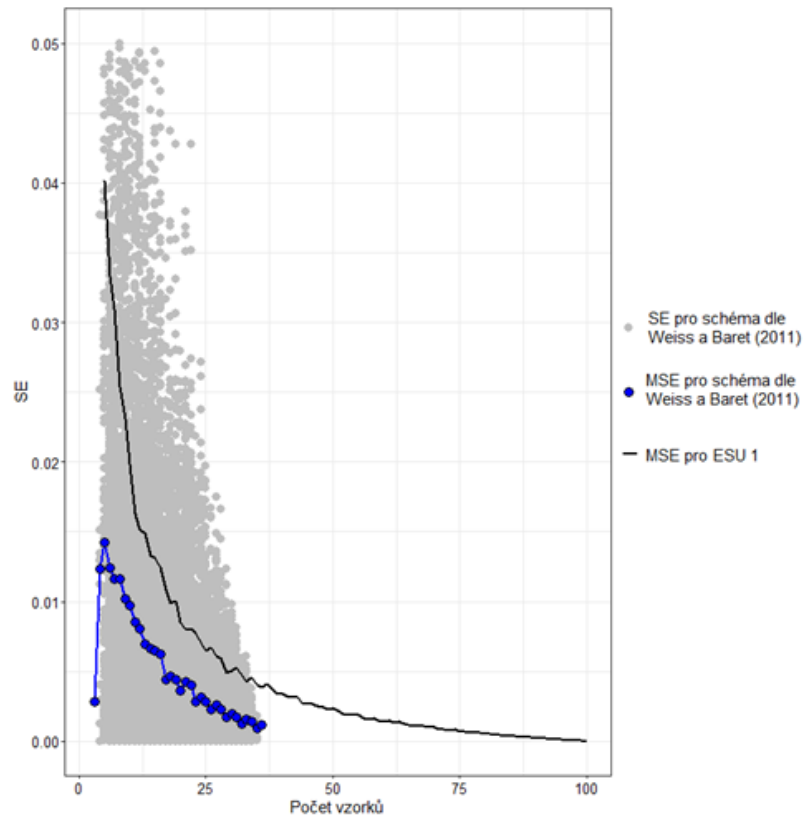


Obr. 36: Počáteční počet a rozložení vzorkovacích bodů
Zdroj: vlastní tvorba



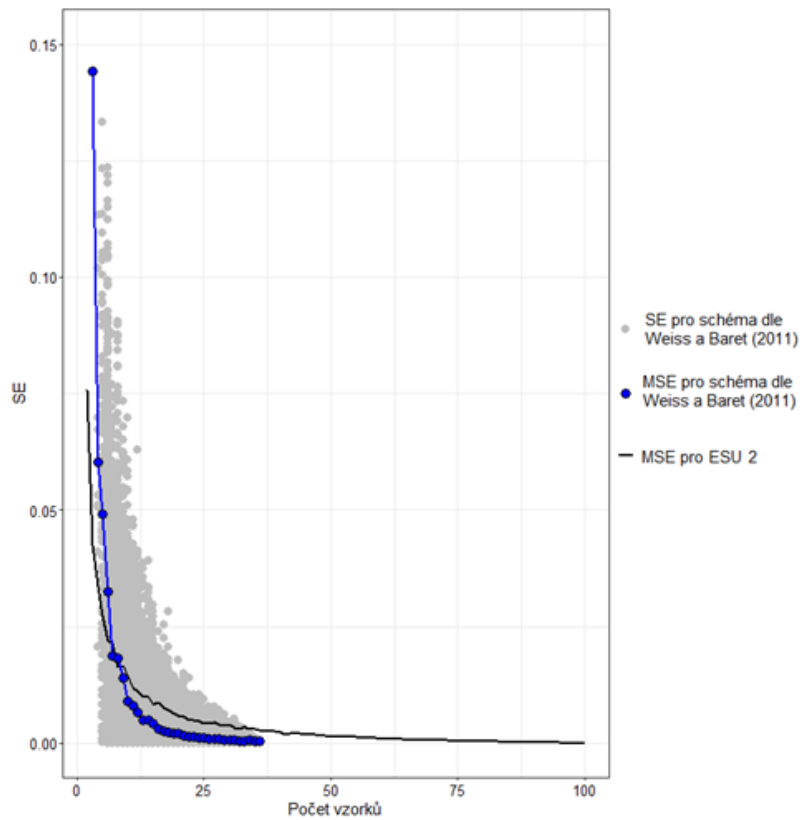
Obr. 37: Konečný počet a rozložení vzorkovacích bodů
Zdroj: vlastní tvorba

Rozmístění vzorkovacích bodů podle schématu dle Weiss a Baret (2011) bylo následně aplikováno zvlášť na každou ze tří jednotek ESU (viz Obr. 38 - 40). Grafické znázornění porovnává MSE pro celou jednotku ESU a MSE pro volené vzorkovací schéma. Dále jsou zobrazeny body SE pro vybrané vzorkovací schéma.

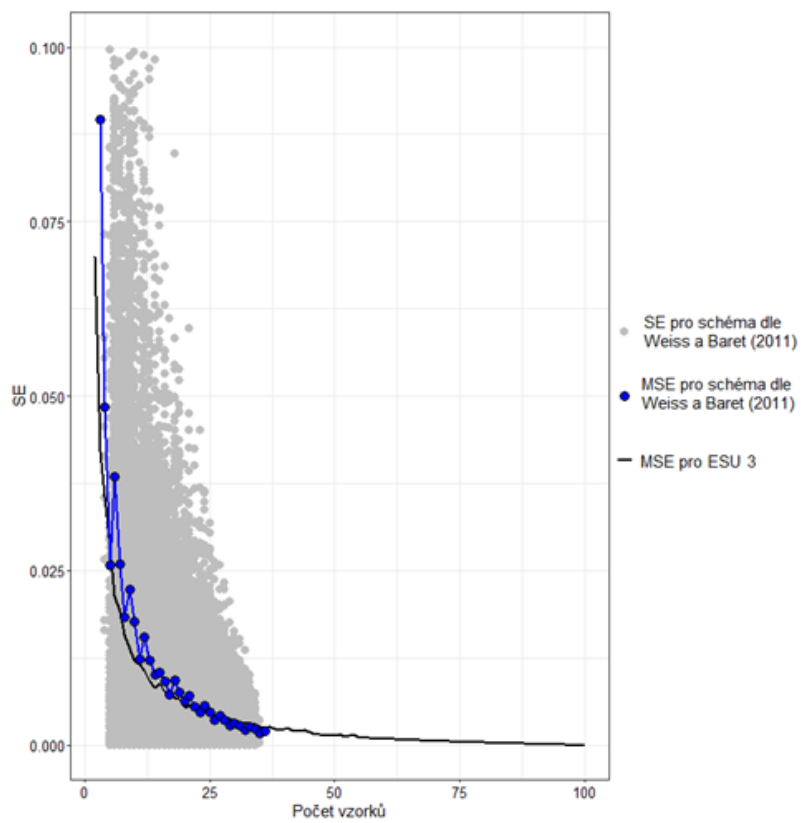


Obr. 38: MSE podle počtu vzorků pro schéma dle Weiss a Baret (2011) - ESU 1

Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 39: MSE podle počtu vzorků pro schéma dle Weiss a Baret (2011) - ESU 2
Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 40: MSE podle počtu vzorků pro schéma dle Weiss a Baret (2011) - ESU 3
Zdroj: vlastní tvorba

Při porovnání jednotlivých grafů je patrný podobný trend průběhu bodů MSE pro schéma dle Weiss a Baret (2011) u všech ESU. Nejlepších hodnot MSE pro schéma dle Weiss a Baret (2011) dosáhla ESU 1 a ESU 2. Nízké hodnoty pro ESU 1 pro malý počet dílčích bodů je způsobeno nižšími naměřenými hodnotami LAI nacházejícími se v této oblasti (viz Příloha 5) při porovnání s ESU 2 a ESU 3 (viz Příloha 7 a Příloha 9). Naopak pro ESU 3 dosahují hodnoty MSE pro schéma dle Weiss a Baret (2011) částečně vyšších hodnot než je hodnota MSE pro celou ESU 3. Z toho lze vyvodit, že schéma dle Weiss a Baret (2011) představuje možné vzorkovací schéma.

Zhodnocení výsledků

Pro porovnání a vymezení nejvhodnějšího vzorkovacího schématu je třeba vzít v potaz dosažené hodnoty MSE pro dané schéma, porovnání hodnot MSE pro dané schéma s hodnotou MSE pro celou jednotku ESU a celkový trend bodů MSE pro dané schéma.

Při hodnocení schématu *corners* je patrné, že ačkoliv s postupným přidáváním dílčích bodů dochází ke snížení hodnot MSE, dosahují hodnoty MSE pro schéma *corners* pro všechny jednotky ESU vyšších hodnot než je celková hodnota MSE za ESU. Z toho důvodu lze schéma *corners* považovat za nevhodné pro praktické využití v terénu.

Při hodnocení schématu *cross* je patrné, že s postupným přidáváním dílčích bodů dochází ke snížení hodnot MSE. Zároveň se hodnoty MSE pohybují pod hodnotou 0,01. Ovšem pro ESU 3 dosahují hodnoty MSE pro schéma *cross* vyšších hodnot (0,02 - 0,01) než je MSE pro celou jednotku ESU. Při porovnání se vzorkovacími schémata *diagonal* a dle Weiss a Baret (2011) dosahují hodnoty MSE pro všechny tři ESU vyšších hodnot. Z toho důvodu nebylo vzorkovací schéma *cross* vybráno jako nejvhodnější pro praktické měření v terénu.

Při hodnocení schématu *diagonal* je patrné, že s postupným přidáváním dílčích bodů dochází ke snížení hodnot MSE. Pro ESU 1 a ESU 3 dosahují hodnoty MSE pro vzorkovací schéma nižších hodnot než MSE za celou jednotku. Pro ESU 2 je pro malé množství bodů dosaženo vyšších hodnot MSE pro vzorkovací schéma, s postupným přidáváním jednotlivých bodů je hodnota MSE snížena na méně jak 0,01. Zároveň je patrná jistá podobnost v průběhu hodnot MSE pro schéma *diagonal* a schéma dle Weiss a Baret (2011). Oproti schématu dle Weiss a Baret (2011) dosahuje schéma *diagonal* pro všechny tři jednotky ESU nižších hodnot MSE. Z toho důvodu bylo vzorkovací schéma *diagonal* vyhodnoceno jako nejvhodnější pro praktické měření v terénu.

Při hodnocení schématu dle Weiss a Baret (2011) je patrné, že s postupným přidáváním dílčích bodů dochází ke snížení hodnot MSE. Pro ESU 1 dosahují hodnoty MSE pro vzorkovací schéma nižších hodnot než MSE za celou jednotku. Pro ESU 2 je pro malé množství bodů dosaženo vyšších hodnot MSE pro vzorkovací schéma, s postupným přidáváním jednotlivých bodů je hodnota MSE snížena na méně jak 0,01. Pro ESU 3 je třeba pro získání nižších hodnot MSE než je hodnota MSE za celou ESU přidat větší množství bodů. Doporučené počty dílčích měření pro daná vzorkovací schémata v závislosti na volbě maximální přípustné chyby měření zobrazuje Tab. 8.

Tab. 8: Počet dílčích měření pro daná schémata v závislosti maximální přípustné chybě

Maximální přípustná chyba	Schéma corners	Schéma cross	Schéma diagonal	Schéma dle Weiss a Baret (2011)	Schéma dle Camacho a kol. (2014)
ESU 1					
5%	4	6	8	3	13
4%	17	6	8	3	13
3%	xxx	8	8	3	13
2%	xxx	11	12	13	xxx
1%	xxx	xxx	42	30	xxx
ESU 2					
5%	6	6	8	4	13
4%	8	6	8	6	13
3%	14	6	8	7	13
2%	22	6	12	10	xxx
1%	xxx	12	21	16	xxx

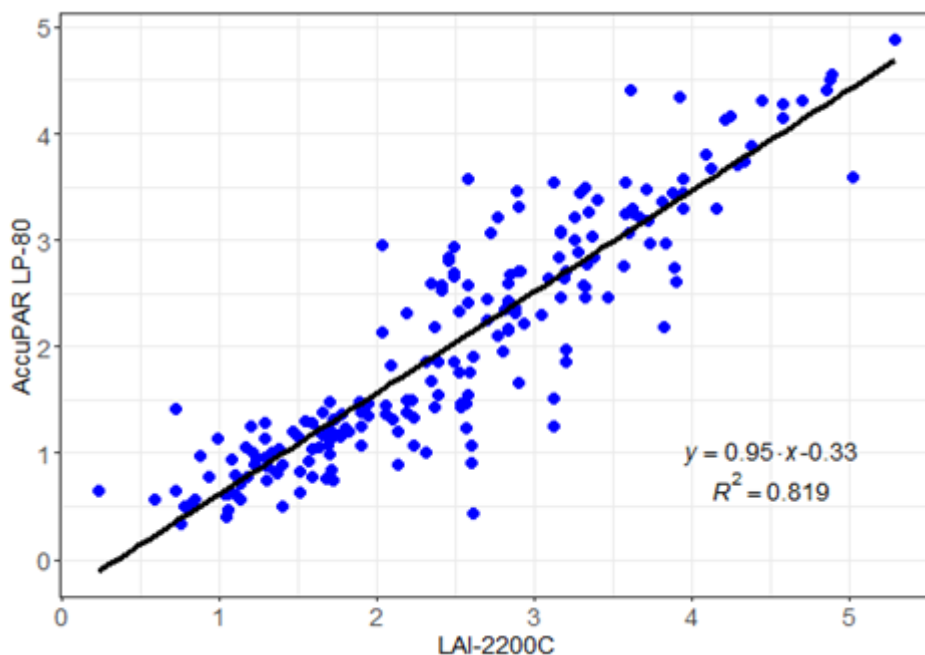
ESU 3					
5%	10	6	8	7	13
4%	22	15	8	10	13
3%	xxx	23	8	12	13
2%	xxx	36	24	22	xxx
1%	xxx	xxx	48	xxx	xxx

(xxx není dosaženo požadované přesnosti měření)

Zdroj: vlastní tvorba

6.3. Porovnání přístrojů LAI-2200C a AccuPAR LP-80

Pro zhodnocení vhodnosti využití přístroje LAI-2200C byl proveden experiment, v rámci kterého bylo porovnáno měření pomocí LAI-2200C a AccuPAR LP-80. Hlavní nevýhodou při terénním měření pomocí dvou měřicích přístrojů představuje neshoda v naměřených hodnotách. Z výsledků je patrné, že při terénním měření přístrojem LAI-2200C a AccuPAR LP-80 na stejném místě a při stejných slunečních podmínkách dochází k naměření rozdílných hodnot LAI. Při porovnání dílčích výsledků získaných přístrojem LAI-2200C a AccuPAR LP-80 bylo zjištěno, že hodnoty LAI naměřené přístrojem AccuPAR LP-80 jsou podhodnocovány v průměru o 20 % oproti přístroji LAI-2200C. Pro zhodnocení naměřených dat a popsání lineární regrese mezi daty byla vytvořena srovnávací statistika. Při vytvoření srovnávací statistiky pro naměřené hodnoty LAI, tj. 13 ESU bylo dosaženo dobré shody, kde $R^2 = 0,819$ (viz Obr. 41).



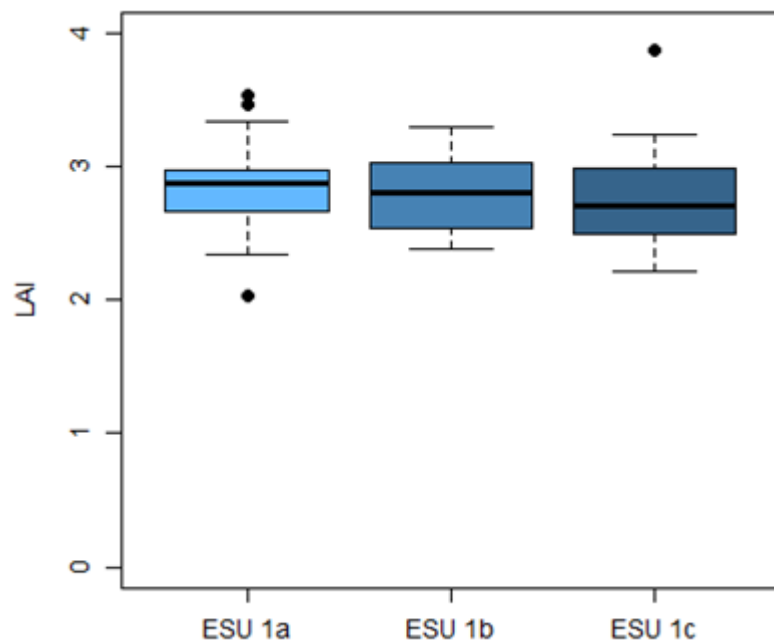
Obr. 41: Srovnávací statistika pro naměřené hodnoty LAI

Zdroj: vlastní tvorba

Z výsledků lze vyvodit, že pro zajištění přesného terénního měření a snížení množství chyb vzniklých během měření je vhodnější využít pouze jeden měřicí přístroj. V případě, že budou k měření využity dva přístroje, je třeba určit vzájemnou korelaci dat a regresní rovnice, aby mohlo dojít k vzájemnému přepočtení naměřených hodnot.

6.4. Ověření opakovatelnosti měření

Pro zhodnocení opakovatelnosti měřených dat byl proveden experiment, v rámci kterého byly použity navrhované parametry protokolu tj. počet dílčích měření a vzorkovací schéma ESU. V rámci tohoto experimentu bylo měřeno 24 dílčích měření, která byla uspořádána podle diagonálního schématu. Celkem byly změřeny 3 jednotky ESU (ESU 1a, ESU 1b a ESU 1c). Pro zajištění opakovatelnosti dat byla měření pro všechny 3 ESU provedena na identickém místě. Při určení opakovatelnosti dat předpokládáme, že při měření dat různými osobami při použití stejné metody měření, na stejném místě a za stejných podmínek získáme totožné výsledky. V rámci předzpracování dat bylo provedeno grafické znázornění statistických charakteristik pomocí krabicového grafu (viz Obr. 42). Pomocí toho byly určeny odlehle hodnoty měření, které byly pro další statistické zpracování vyloučeny, tj. 3 hodnoty pro ESU 1a a jedna hodnota pro ESU 1c.



Obr. 42: Grafické znázornění statistických charakteristik

Zdroj: vlastní tvorba

Statistické ukazatele pro všechny naměřené hodnoty, tj. průměr, medián, rozptyl, MAD, a vliv na výsledky po odstranění odlehlých hodnot zobrazuje Tab. 9 – 10.

Tab. 9: Statistické ukazatele pro všechny naměřené hodnoty

	Počet měření	Průměr	Medián	Rozptyl	MAD
ESU 1a	24	2,855	2,869	0,114	0,246
ESU 1b	24	2,808	2,805	0,079	0,231
ESU 1c	24	2,739	2,702	0,133	0,257

Zdroj: vlastní tvorba

Tab. 10: Statistické ukazatele po odstranění odlehlých hodnot

	Počet měření	Průměr	Medián	Rozptyl	MAD
ESU 1a	21	2,833	2,848	0,054	0,181
ESU 1b	24	2,808	2,805	0,079	0,231
ESU 1c	23	2,690	2,700	0,078	0,214

Zdroj: vlastní tvorba

Z výsledků je patrné, že po odstranění odlehlých hodnot pro jednotky ESU 1a a ESU 1c dojde ke snížení hodnot pro všechny statistické ukazatele.

Pro zpracování naměřených dat a zhodnocení shodnosti průměrů a rozptylů mezi jednotkami ESU 1a, ESU 1b a ESU 1c byl použit ANOVA test pro průměr a dvouvýběrový F-test pro rozptyl. Statistické charakteristiky získané pomocí testu ANOVA zobrazuje Tab. 11. Dle nulové hypotézy předpokládáme shodnost středních hodnot souboru, tj. $H_0 = \mu_{ESU\ 1a} = \mu_{ESU\ 1b} = \mu_{ESU\ 1c}$. Alternativní hypotéza předpokládá opak, tedy že alespoň v jednom souboru se střední hodnota liší od ostatních.

Tab. 11: Výsledky ANOVA testu

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	0,264	2	0,132	1,857	0,164	3,138
Všechny výběry	4,622	65	0,071			
Celkem	4,886	67				

Zdroj: vlastní tvorba

Pro vyhodnocení výsledků ANOVA testu jsou důležitými parametry hodnota F a F krit a hodnota P, na základě kterých rozhodneme, zda bude nulová hypotéza zamítnuta. Pokud je hodnota $F < F\ krit$ pro zvolenou úroveň $\alpha = 0,05$ je potvrzen předpoklad nulové hypotézy H_0 . Nulovou hypotézu lze zamítnout tehdy, že hodnota $p < \alpha$. V tomto případě je hodnota $p = 0,164$. Z toho lze vyvodit, že platí nulová hypotéza H_0 , tedy že střední hodnoty naměřených souborů jsou statisticky nerozdílné.

Pomocí dvouvýběrového F-testu byly zhodnoceny shodnosti rozptylů mezi jednotlivými ESU. Dle nulové hypotézy předpokládáme shodnost rozptylů mezi soubory, tj. $H_0 = \sigma^2_{ESU\ 1a} = \sigma^2_{ESU\ 1b} = \sigma^2_{ESU\ 1c}$. Statistické charakteristiky získané pomocí dvouvýběrového F-testu zobrazuje Tab. 12.

Tab. 12: Výsledky dvouvýběrového F-testu

	ESU 1a	ESU 1b	ESU 1b	ESU 1c	ESU 1a	ESU 1c
Stř. hodnota	2,833	2,808	2,808	2,690	2,833	2,690
Rozptyl	0,054	0,079	0,079	0,078	0,054	0,078
Pozorování	21	24	24	23	21	23
Rozdíl	20	23	23	22	20	22
F	0,689		1,011		0,696	
P(F<=f) (1)	0,201		0,491		0,210	
F krit (1)	0,478		2,038		0,476	

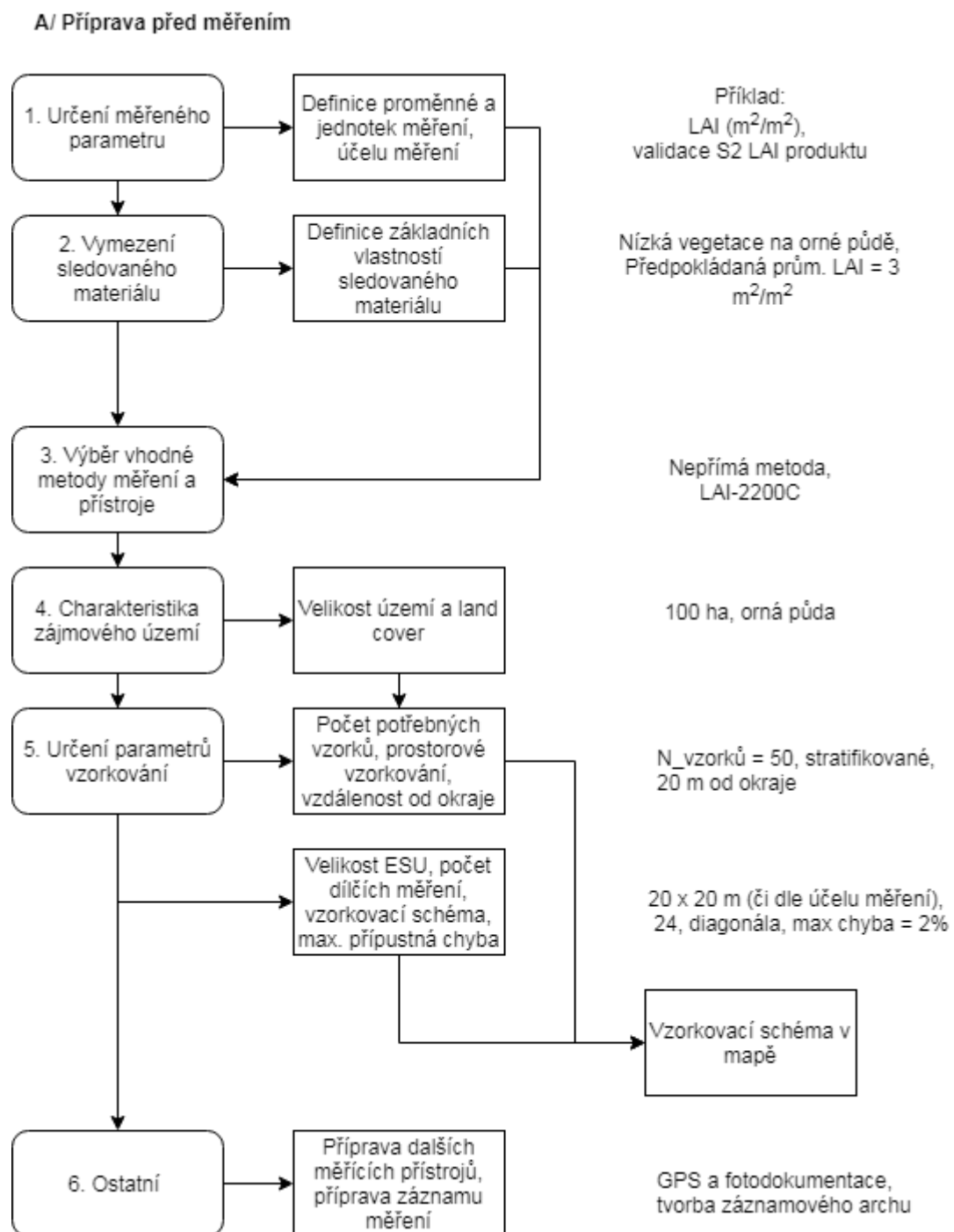
Zdroj: vlastní tvorba

Při aplikaci dvouvýběrového F-testu na dvojici ESU 1a ESU 1b nabývá p hodnota pro zvolenou úroveň $\alpha = 0,05$ hodnoty 0,201, pro dvojici ESU 1b a ESU 1c hodnoty 0,491 a pro dvojici ESU 1a a ESU 1c hodnoty 0,210. Nulovou hypotézu lze zamítnout tehdy, že hodnota $p < \alpha$. Na základě toho lze vyvodit, platí nulová hypotéza H_0 , tedy že rozptyly naměřených souborů jsou statisticky nerozdílné.

6.5. Návrh protokolu pro měření LAI dat v terénu

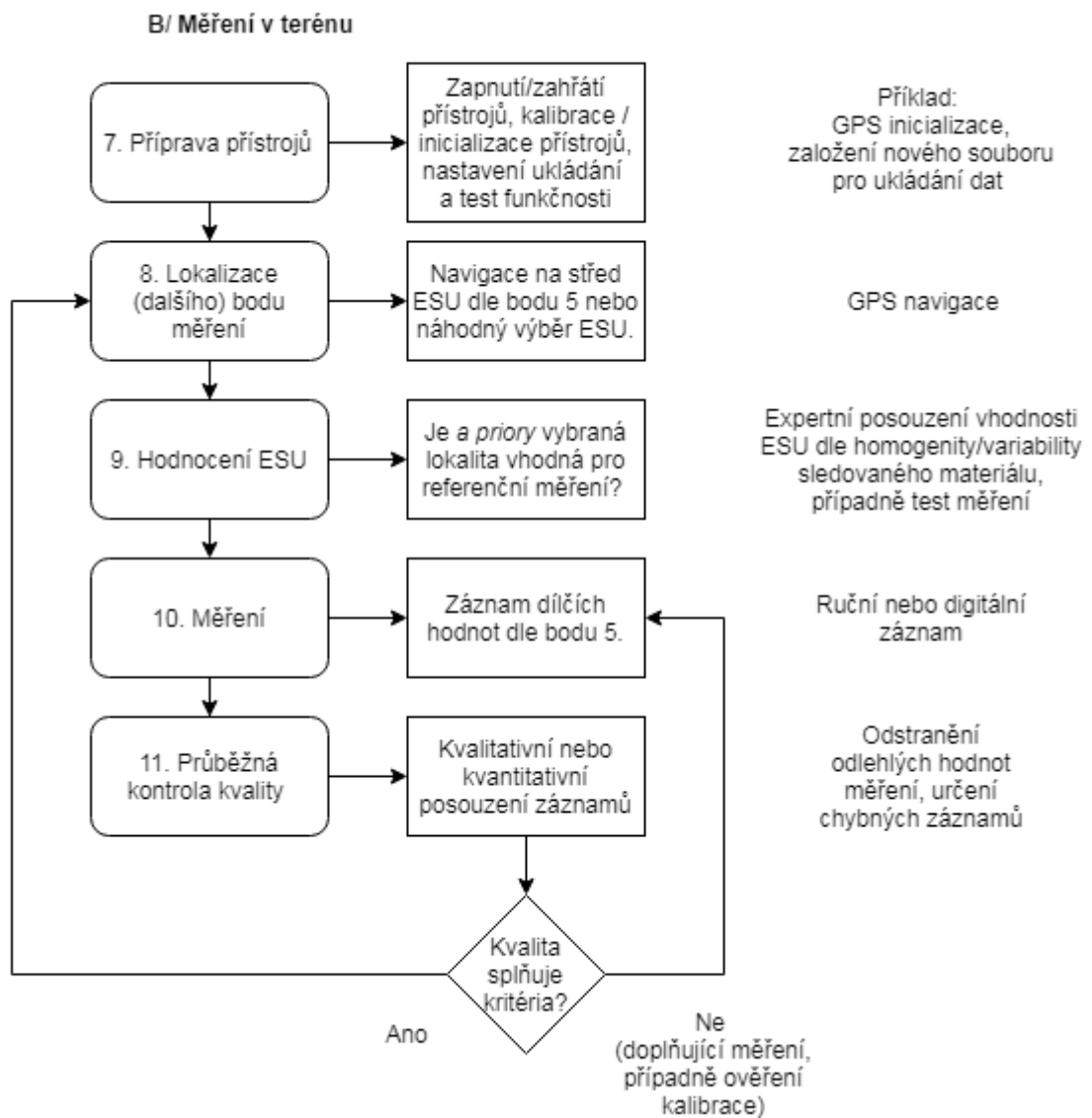
Na základě experimentů v praktické části práce byl vytvořen jednotný doporučený postup (protokol) pro sběr LAI dat pro obiloviny. Terénní měření na základě tohoto protokolu by mělo uživateli zaručit naměření reprezentativních a opakovatelných dat. Protokol je rozdělen na A) Příprava před měřením, B) Měření v terénu a C) Zpracování naměřených dat (post-processing) tak, aby zachycoval důležité fáze měření. První část protokolu představuje vymezení protokolu před měřením, v rámci kterého je třeba určit všechny důležité parametry tak, aby bylo zajištěno následné spolehlivé měření v terénu. Druhá část protokolu obsahuje doporučený postup pro práci v terénu. Poslední část protokolu - zpracování naměřených dat (post-processing) obsahuje doporučené statistické zpracování naměřených terénních dat. Jednotlivé kroky protokolu pro sběr dat v terénu a jejich vzájemný vztah zobrazují vývojové diagramy (Obr. 43 – 45).

Dodržení jednotlivých kroků protokolu zajistí naměření reprezentativních, přenositelných a opakovatelných terénních dat.



Obr. 43: Vývojový diagram pro přípravu před měřením

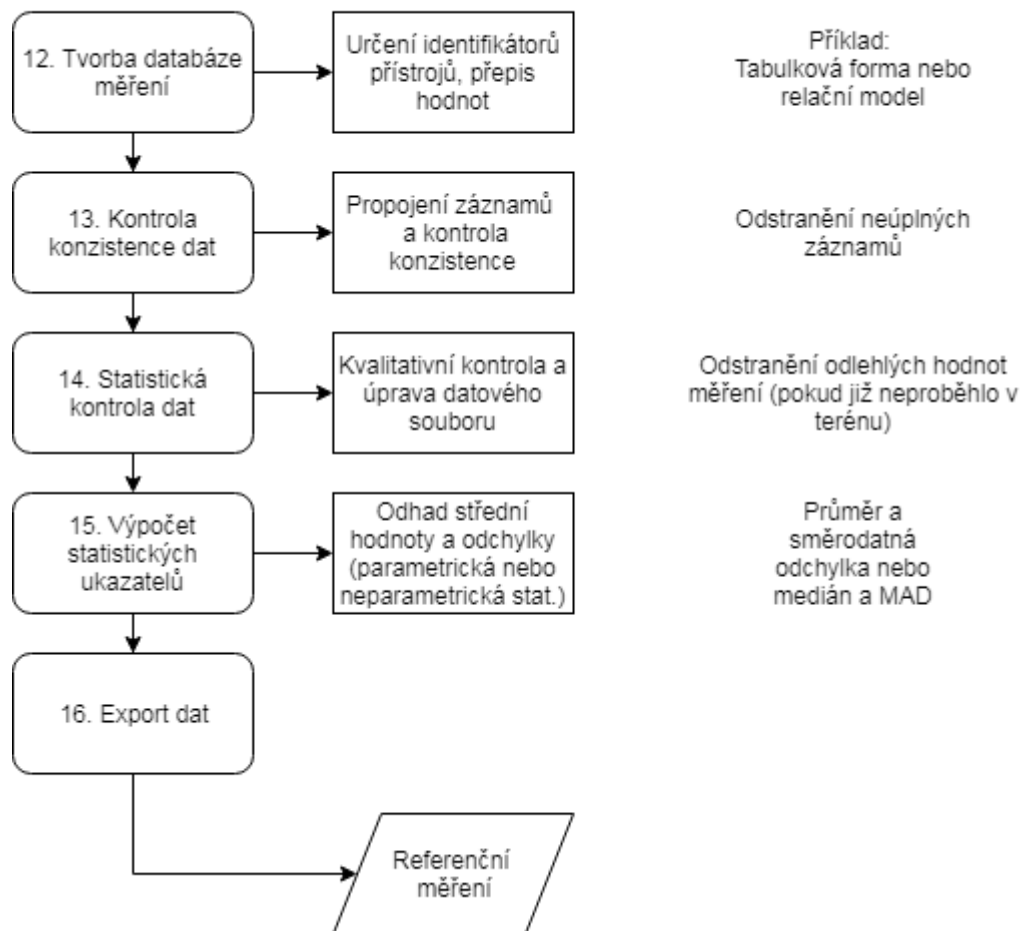
Zdroj: vlastní tvorba



Obr. 44: Vývojový diagram pro měření v terénu

Zdroj: vlastní tvorba

C/ Zpracování naměřených dat (post-processing)



Obr. 45: Vývojový diagram pro zpracování naměřených dat (post-processing)

Zdroj: vlastní tvorba

7. Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo vytvořit jednotný komplexní protokol pro sběr dat v terénu, konkrétně pro LAI obilovin. Terénní sběr dat představuje důležitou roli při kalibraci a validaci produktů získaných z družicových snímků. Přesto konkrétní parametrizace a návrh protokolu pro sběr dat v terénu nebyl doposud v literatuře sjednocen.

V první části práce byly na základě rozsáhlého rozboru současných metodik měření LAI dat v terénu vymezeny základní parametry protokolu. Zároveň je z tohoto rozboru metodik dobře patrná různorodost a nejednotnost metodik měření terénních dat. Následně byly stanoveny teoretické základy pro dílčí parametry protokolu.

V praktické části práce byla statisticky zpracována vlastní naměřená data tak, aby bylo odpovězeno na dílčí cíle práce. Určení vhodného počtu dílčích měření lze určit na základě maximální chyby měření, kterou je uživatel schopen akceptovat. Na základě hodnoty MSE bylo určeno 12 – 24 vhodných dílčích měření LAI pro obiloviny při akceptaci 2% chyby měření. Praktické naměření 12 – 24 dílčích měření nepředstavuje výraznou časovou náročnost a splňuje nároky na proveditelnost měření v terénu. Vymezení vhodného počtu dílčích měření je ale závislé na voleném typu vegetace či fázi růstu vegetace. Dále byla srovnána vhodnost použití vzorkovacích schémat uváděných v literatuře. Při porovnání vzorkovacích schémat *corners*, *cross*, *diagonal* a schémata dle Weiss a Baret (2011) bylo na základě hodnoty MSE stanoveno jako nejvhodnější vzorkovací schéma *diagonal*.

Pro zhodnocení vhodnosti měření více měřicími přístroji bylo provedeno praktické měření v terénu pomocí přístrojů AccuPAR LP-80 a LAI-2200C, na základě kterého byla zhodnocena vhodnost použití těchto přístrojů. Po porovnání hodnot bylo zjištěno, že LAI data naměřená přístrojem AccuPAR LP-80 jsou podhodnocena v průměru o 20 %. Zároveň byla pomocí srovnávací statistiky stanovena těsnost dat na 82 %. Na základě vlastního rozboru používaných metodik měření LAI a vlastního experimentálního měření byl stanoven přístroj LAI-2200C jako vhodnější. V případě, že by bylo měřeno paralelně také s přístrojem AccuPAR LP-80 je třeba určit vzájemný vztah mezi naměřenými hodnotami pomocí kalibrační křivky.

Cíle diplomové práce byly naplněny. Výsledkem práce je obecný protokol pro sběr dat v terénu a konkrétní protokol pro sběr LAI pro obiloviny v terénu. Při dodržování pravidel měření nastavených v protokolu je zajištěno uživateli naměření reprezentativních, přenositelných a opakovatelných terénních dat. Navržený protokol pro sběr dat v terénu splňuje kritéria, která uvedl Baret a kol. (2014), tj. jednotný postup při výběru používaných přístrojů, vytvoření protokolu pro všechny fáze sběru dat, vzorkování a zpracování naměřených údajů. Hlavním přínosem diplomové práce je rozsáhlý rozbor použitých metodik měření LAI dat v terénu a vytvoření jednotného protokolu pro sběr dat v terénu, u kterého byla prokázána opakovatelnost měření na základě statistických testů.

POUŽITÁ LITERATURA

- ASNER, G. P. a kol. (2003): *Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies*. Global Ecology and Biogeography, roč. 12, č. 3, s. 191-205
- BARET, F. a kol. (2005): *VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products*. Remote Sensing of Environment, roč. 76, č. 3, s. 36-39.
- BEADLE, C. L. (1993): *Growth analysis*. In: Hall, D.O., a kol. (Eds.), Photosynthesis and Production in a Changing Environment. Springer, Dordrecht, s. 36-46
- CAMACHO, F. a kol. (2014): *A network of sites for ground biophysical measurements in support of Copernicus Global Land Product Validation*. In Proceedings of the IV RAQRS conference, Torrent, s. 22-26
- FERNANDES, R. a kol. (2014): *Global leaf area index product validation good practices*. CEOS Working Group on Calibration and Validation-Land Product Validation Sub-Group. Version, 2
- LANG, A. R. G a kol. (1991): *Validity of surface area indices of Pinus radiata estimated from transmittance of the sun's beam*. Agricultural and Forest Meteorology, roč. 57, č. 1-3, s. 157-170
- LIANG, S. (2004): *Quantitative remote sensing of land surfaces*. John Wiley & Sons, Inc., New York, s. 534
- LU, L. a kol. (2005): *Investigating the relationship between ground-measured LAI and vegetation indices in an alpine meadow, north-west China*. International Journal of Remote Sensing, roč. 26, č. 20, s. 4471-4484
- MAJASALMI, T. a kol. (2012). *Optimizing the sampling scheme for LAI-2000 measurements in a boreal forest*. Agricultural and forest meteorology, roč. 154, s. 38-43.
- MARTÍNEZ, B. a kol. (2009): *Derivation of high-resolution leaf area index maps in support of validation activities: Application to the cropland Barrax site*. Agricultural and Forest Meteorology, roč. 149, č. 1, s. 130-145
- MONSI, M. (1953): *Über den Lichtfaktor in den Pflanzen-gesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion*. Japanese Journal of Botany, č. 14, s. 22-52

- MYNENI, R. B. a kol. (1997): *Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models*. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, roč. 35, č. 6, s. 1380-1393
- NAPPO, C. J. a kol. (1982): *The Workshop on the Representativeness of Meteorological Observations*. Bulletin of the American Meteorological Society, roč. 63, č. 7, s. 761-764
- NILSON, T. (1971): *A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands*. Agricultural meteorology, roč. 8, s. 25-38
- RICHTER, K. a kol. (2010): *Evaluation of sentinel-2 spectral sampling for radiative transfer model based LAI estimation of wheat, sugar beet, and maize*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, roč. 4, č. 2, s. 458-464
- NORMAN, J. M., CAMPBELL, G. S. (1989): *Canopy structure*. In: Pearcy, R.W. a kol., Plant Physiological Ecology. Springer, Dordrecht, s. 301-325
- ROSELL, J. R., SANZ, R. (2012). *A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities*. Computers and electronics in agriculture, roč. 81, s. 124-141
- SCHULZE, E. D. (1982): *Plant life forms and their carbon, water, and nutrient relations*. In: Encyclopedia of Plant Physiology, New Series, Springer-Verlag, Berlin, č. 12B, s. 615-676
- WATSON, D. J. (1947): *Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years*. Annals of botany, roč. 11, č. 41, s. 41-76
- WEISS, M., BARET, F. (2011): *fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) estimates at various scale*. In Proceedings of the 34th International Symposium for Remote Sensing of the Environment (ISRSE), s. 10-15
- WOODGATE, W. a kol. (2012): *Searching for the Optimal Sampling Design for Measuring LAI in an Upland Rainforest*. Proceedings of the Geospatial Science Research Symposium GSR2
- XU, B. a kol. (2014): *A methodology to estimate representativeness of LAI station observation for validation: A case study with Chinese Ecosystem Research Network (CERN) in situ data*. Land Surface Remote Sensing II, roč. 9260, s.1-15
- YANG, W. a kol. (2006): *MODIS leaf area index products: From validation to algorithm improvement*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, roč. 44, č. 7, s. 1885-1898

ZHENG, G., MOSKAL, L. M. (2009): *Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors*. Sensors, roč. 9, č.4, s. 2719-2745

Citované zdroje v tabulce k rozboru metodik (Příloha 1), které nebyly použity v textu práce:

ARAGAO, L. E. O. a kol. (2005): *Spatial validation of the collection 4 MODIS LAI product in Eastern Amazonia*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, roč. 43, č. 11, s. 2526-2534

ATZBERGER, C., RICHTER, K. (2012): *Spatially constrained inversion of radiative transfer models for improved LAI mapping from future Sentinel-2 imagery*. Remote Sensing of Environment, roč. 120, s. 208-218

BERGER, K. a kol. (2018): *Simulation of Spaceborne Hyperspectral Remote Sensing to Assist Crop Nitrogen Content Monitoring in Agricultural Crops*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, s. 3801-3804

CAICEDO, J. P. R. a kol. (2014): *Toward a semiautomatic machine learning retrieval of biophysical parameters*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, roč. 7, č. 4, s. 1249-1259

CAMPOS-TABERNER, M. a kol. (2015a): *Mapping leaf area index with a smartphone and Gaussian processes*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, roč. 12, č.12, s. 2501-2505

CAMPOS-TABERNER, M. a kol. (2015b): *Intercomparison of instruments for measuring leaf area index over rice*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), s. 3389-3392

CAMPOS-TABERNER, M. a kol. (2016): *Multitemporal monitoring of plant area index in the Valencia rice district with PocketLAI*. Remote Sensing, roč. 8, č. 3, s. 202

CAMPOS-TABERNER, M. a kol. (2017): *Exploitation of SAR and optical Sentinel data to detect rice crop and estimate seasonal dynamics of leaf area index*. Remote Sensing, roč. 9, č. 3, s. 248

CAMPOS-TABERNER, M. a kol. (2018): *A Critical Comparison of Remote Sensing Leaf Area Index Estimates over Rice-Cultivated Areas: From Sentinel-2 and Landsat-7/8 to MODIS, GEOVI and EUMETSAT Polar System*. Remote Sensing, roč. 10, č. 5, s. 763

CUI, Z., KEREKES, J. (2018): *Potential of red edge spectral bands in future landsat satellites on agroecosystem canopy green leaf area index retrieval*. Remote Sensing, roč. 10, č. 9, s. 1458

- DARVISHZADEH, R. a kol. (2008a): *LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements*. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, roč. 63, č. 4, s. 409-426
- DE KAUWE, M. G. a kol. (2011): *An assessment of the MODIS collection 5 leaf area index product for a region of mixed coniferous forest*. Remote Sensing of Environment, roč. 115, č. 2, s. 767-780
- DINI, L. a kol. (2006): *Leaf Area Index retrieval from SPARC data: assessment of radiative transfer model inversion*. AIP Conference Proceedings, roč. 852, č. 1, s. 219-226
- DORAISWAMY, P. C. a kol. (2004): *Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS*. Remote sensing of environment, roč. 92, č. 4, s. 548-559
- D'URSO, G. a kol. (2009): *Estimation of land surface parameters through modeling inversion of earth observation optical data*. Advances in Modeling Agricultural Systems, s. 317-338
- FANG, H. a kol. (2014): *Paddy Rice Experiment in the Sanjiang Plain (PRESF)*. Field Measurements Report, s. 32
- FANG, H. a kol. (2017): *Hailun Experiment for LAI Measurement (HELM 2016)*, Field Report
- FANG, H. a kol. (2018): *Estimation of the directional and whole apparent clumping index (ACI) from indirect optical measurements*. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, roč. 144, s. 1-13
- GARRIGUES, S. a kol. (2008): *Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands*. Agricultural and Forest Meteorology, roč. 148, č. 8-9, s. 1193-1209
- GOSA, A. G. a kol. (2007): *Estimation of leaf area index using optical field instruments and imaging spectroscopy*. Proceedings 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy
- GUYON, D. a kol. (2003): VALERI-2001 campaigns in Nezer site (France): 01-17 April 2001 and 18-29 June 2001
- HUFKENS, K. a kol. (2008): *Impacts and uncertainties of upscaling of remote-sensing data validation for a semi-arid woodland*. Journal of arid environments, roč. 72, č. 8, s. 1490-1505
- HWANG, T. a kol. (2011): *Downscaling real-time vegetation dynamics by fusing multi-temporal MODIS and Landsat NDVI in topographically complex terrain*. Remote Sensing of Environment, roč. 115, č. 10, s. 2499-2512

- JOHNSON, R. L. a kol. (2000): *A modeled-based sub-pixel scale mountain terrain normalization algorithm for improved LAI estimation from airborne CASI imagery*. Proc. 22nd Can. Symp. Remote Sensing, s. 21-25
- KOVACS, J. M. a kol. (2009): *Evaluating the condition of a mangrove forest of the Mexican Pacific based on an estimated leaf area index mapping approach*. Environmental monitoring and assessment, roč. 157, č.1-4, s. 137-149
- LATORRE, C. a kol. (2014): *Vegetation field data and production of ground-based maps: "Ottawa site, Canada"*, Field Campaign and Data processing report
- LI, Z. a kol. (2015): *Evaluation and intercomparison of MODIS and GEOVI global leaf area index products over four sites in North China*. Sensors, 15, č. 3, s. 6196-6216
- LI, Z. a kol. (2017): *Estimating grassland LAI using the Random Forests approach and Landsat imagery in the meadow steppe of Hulunber, China*. Journal of Integrative Agriculture, roč. 16, č. 2, s. 286-297
- LU, L. a kol. (2005): *Investigating the relationship between ground-measured LAI and vegetation indices in an alpine meadow, north-west China*. International Journal of Remote Sensing, roč. 26, č. 20, s. 4471-4484
- MADUGUNDU, R. a kol. (2008): *Estimation of LAI and above-ground biomass in deciduous forests: Western Ghats of Karnataka, India*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, roč. 10, č. 2, s. 211-219
- MANNINEN, T. a kol. (2005): *LAI estimation of boreal forest with ENVISAT ASAR*. Envisat & ERS Symposium, roč. 572
- MARTINEZ, B. a kol. (2004): *Validation of MSG vegetation products: Part I. Field retrieval of LAI and FVC from hemispherical photographs*. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VI, roč. 5568, s. 57-69
- MARTINEZ, B. a kol. (2010): *Geostatistics for mapping leaf area index over a cropland landscape: efficiency sampling assessment*. Remote Sensing, roč. 2, č. 11, s. 2584-2606
- MAYR, M., SAMIMI, C. (2015): *Comparing the dry season in-situ Leaf Area Index (LAI) derived from high-resolution rapideye imagery with MODIS LAI in a namibian Savanna*. Remote Sensing, roč. 7, č. 4, s. 4834-4857
- MENGESHA, T. G. (2005): *Validation of ground biophysical products using imaging spectroscopy in a soft wood forest*. Geo-Information Science. Thesis Report: GIRS-2005-14, s. 78
- MOLIJN, R. A. a kol. (2018): *Ground reference data for sugarcane biomass estimation in São Paulo state, Brazil*. Scientific data, 5

- PASQUALOTTO, N. a kol. (2018): *Retrieval of canopy water content of different crop types with two new hyperspectral indices: Water Absorption Area Index and Depth Water Index*. International journal of applied earth observation and geoinformation, roč. 67, s. 69-78
- QU, Y. a kol. (2017): *Potential and limits of retrieving conifer leaf area index using smartphone-based method*. Forests, roč. 8, č. 6, s. 217
- RICHTER, K., TIMMERMANS, W. J. (2009): *Physically based retrieval of crop characteristics for improved water use estimates*. Hydrology & Earth System Sciences, roč. 13, č.5, s. 663-674
- RICHTER, K. a kol. (2012): *Optimal exploitation of the Sentinel-2 spectral capabilities for crop leaf area index mapping*. Remote Sensing, roč. 4, č. 3, s. 561-582
- RIVERA, J. a kol. (2013): *Multiple cost functions and regularization options for improved retrieval of leaf chlorophyll content and LAI through inversion of the PROSAIL model*. Remote Sensing, roč. 5, č. 7, s. 3280-3304
- RIVERA, J. P. a kol. (2014): *On the semi-automatic retrieval of biophysical parameters based on spectral index optimization*. Remote Sensing, roč. 6, č. 6, s. 4927-4951
- RIVERA CAICEDO, J. P. (2014). *Optimized and automated estimation of vegetation properties: Opportunities for Sentinel-2*. Doctoral dissertation, Universitat de València, s. 145
- ROSSELLO, P. (2007): *Ground Data Processing & Production of the Level 1 High Resolution Maps*. Valeri Report, s. 35
- SIMIC, A. a kol. (2009): *Improving clumping and LAI algorithms based on multiangle airborne imagery and ground measurements*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, roč. 48, č. 4, s. 1742-1759
- SOLBERG, S. a kol. (2009): *Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning*. Remote Sensing of Environment, roč. 113, č. 11, s. 2317-2327
- STENBERG, P. a kol. (2008): *Boreal forest leaf area index from optical satellite images: model simulations and empirical analyses using data from central Finland*. Boreal Environment Research, roč. 13, s. 433-443
- SVENDSEN, D. H. a kol. (2017): *Joint Gaussian processes for biophysical parameter retrieval*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, roč. 56, č. 3, s. 1718-1727
- TRUCKENBRODT, S. C., SCHMULLIUS, C. C. (2018): *Seasonal evolution of soil and plant parameters on the agricultural Gebesee test site: a database for the set-up and validation of EO-LDAS and satellite-aided retrieval models*. Earth System Science Data, roč. 10, č. 1, s. 525-548

- TUIA, D. a kol. (2011): *Multioutput support vector regression for remote sensing biophysical parameter estimation*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, roč. 8, č. 4, s. 804-808
- VAN WIJK, M. T., WILLIAMS, M. (2005): *Optical instruments for measuring leaf area index in low vegetation: application in arctic ecosystems*. Ecological Applications, roč. 15, č. 4, s. 1462-1470
- VERGER, A. a kol. (2011): *Optimal modalities for radiative transfer-neural network estimation of canopy biophysical characteristics: Evaluation over an agricultural area with CHRIS/PROBA observations*. Remote Sensing of Environment, roč. 115, č. 2, s. 415-426
- VERRELST, J. a kol. (2011): *Gaussian processes regression for biophysical parameter retrieval from imaging spectroscopy data: opportunities for Sentinel-2 and -3*. Image Processing Laboratory (IPL), s. 8
- VERRELST, J. a kol. (2013): *Gaussian processes uncertainty estimates in experimental Sentinel-2 LAI and leaf chlorophyll content retrieval*. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, roč. 86, s. 157-167
- VERRELST, J. a kol. (2015): *Experimental Sentinel-2 LAI estimation using parametric, non-parametric and physical retrieval methods—A comparison*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, roč. 108, s. 260-272
- VUOLO, F. a kol. (2012): *Methodologies and uncertainties in the use of the terrestrial chlorophyll index for the sentinel-3 mission*. Remote Sensing, roč. 4, č. 5, s. 1112-1133
- VUOLO, F. a kol. (2005): *Assessment of LAI retrieval accuracy by inverting a RT model and a simple empirical model with multiangular and hyperspectral CHRIS/PROBA data from SPARC*. Proc. 3rd CHRIS/Proba Workshop, s. 8
- VUOLO, F., DINI, L. (2005). *Comparing accuracy for leaf area index estimation inverting a simple empirical model and a radiative transfer model by using multiangular and hyperspectral data*. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VII, roč. 5976, s. 1-11
- VUOLO, F. a kol. (2006): *Cost-effectiveness of vegetation biophysical parameters retrieval from remote sensing data*. IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, s. 1949-1952
- WHITE, J. D. a kol. (1997): *Measurement and remote sensing of LAI in Rocky Mountain montane ecosystems*. Canadian Journal of Forest Research, roč. 27, č. 11, s. 1714-1727

INTERNETOVÉ ZDROJE

- ARTEL (2019): *Lab Report 4: Defining Accuracy, Precision and Trueness* [online]. Dostupné z: <https://www.artel-usa.com/resource-library/defining-accuracy-precision-and-trueness/> [cit. 1. 7. 2019]
- BARET, F. a kol. (2014): *Validation of Sentinel-2 Biophysical Prototype Products using ESA Field Campaigns* [online]. ESA VALSE project. Dostupné z: https://earth.esa.int/documents/700255/2126406/Validation+of+Sentinel-2_VALSE2.pdf [cit. 4. 4. 2019]
- ESA Sentinel-2 Team (2010): *GMES Sentinel - 2 mission requirements document* [online]. European Space Agency. Dostupné z: http://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/Sentinel-2_MRD.pdf [cit. 1. 6. 2019]
- FARKOVÁ, M. (2013): *Nová metrologická terminologie*. [online prezentace]. Dostupné z: <https://www.sci.muni.cz/~analchem/files/pdf/terminologie.pdf> [cit. 1. 7. 2019]
- FERNANDES, R. A. a kol. (2006): *Leaf area index maps at 30-m resolution, VALERI site, Larose, Canada* [online]. ORNL DAAC. Dostupné z: https://daac.ornl.gov/LAND_VAL/guides/Fernandes_LAI_Valeri.html [cit. 1. 5. 2019]
- GEO/COPERNICUS V ČESKÉ REPUBLICE (2016a): *In-situ komponenta* [online]. Dostupné z: <http://copernicus.gov.cz/in-situ-komponenta> [cit. 2. 4. 2019]
- GEO/COPERNICUS V ČESKÉ REPUBLICE (2016b): *Monitorování území* [online]. Dostupné z: <http://copernicus.gov.cz/uzemi> [cit. 7. 5. 2019]
- JONCKHEERE, I. a kol. (2003): *A review of in situ leaf area index estimation focused on hemispherical photography* [online]. Dostupné z: <http://www.fao.org/3/XII/0808-B1.htm#fn1> [cit. 16. 11. 2018]
- LI-COR (2009): *LAI-2200 Plant Canopy Analyzer* [online]. Dostupné z: <https://www.licor.com/documents/6n3conpja6uj9aq1ruyn> [cit. 21. 7. 2019]
- LI-COR (2014): *LAI-2200C Plant Canopy Analyzer* [online]. Dostupné z: <https://www.licor.com/documents/ny34xgfry9ewxma8p97y> [cit. 1. 11. 2018]
- LI-COR (2019): *LAI-2200C Plant Canopy Analyzer* [online]. Dostupné z: https://www.licor.com/env/products/leaf_area/LAI-2200C/ [cit. 2. 11. 2018]

- METER ENVIRONMENT (2018): *ACCUPAR LP-80* [online]. Dostupné z: <https://www.metergroup.com/environment/products/accupar-lp-80-leaf-area-index> [cit. 24. 10. 2018]
- NOAA (2019): *GCOS Land ECV - Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR)* [online]. Dostupné z: <https://www.ncdc.noaa.gov/gosic/gcos-essential-climate-variable-ecv-data-access-matrix/gcos-land-ecv-fraction-absorbed-photosynthetically-active-radiation-fapar> [cit. 16. 4. 2019]
- OPTI-SCIENCES, Inc. (2011): *CCM-300* [online]. Dostupné z: <https://www.optisci.com/ccm-300.html> [cit. 5. 11. 2018]
- POKORNÝ, R. (2015): *Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin*. Dostupné z: <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-180899>
- USGS (2018): *Hemispherical Photo* [online]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/media/images/hemispherical-photo-2> [cit. 6. 11. 2018]
- VALERI (2002): *Methodology* [online]. Dostupné z: http://w3.avignon.inra.fr/valerific_htm/methodology/main.php [cit. 23.7. 2019]

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Rozbor metodik měření LAI dat v terénu
- Příloha 2: Kvadratická chyba podle počtu vzorků pro $N = 50$, $N = 200$, $N = 500$
- Příloha 3: MSE podle počtu vzorků pro ESU 2
- Příloha 4: MSE podle počtu vzorků pro ESU 3
- Příloha 5: Mapa průměrných hodnot LAI pro ESU 1
- Příloha 6: Mapa směrodatných odchylek hodnot LAI pro ESU 1
- Příloha 7: Mapa průměrných hodnot LAI pro ESU 2
- Příloha 8: Mapa směrodatných odchylek hodnot LAI pro ESU 2
- Příloha 9: Mapa průměrných hodnot LAI pro ESU 3
- Příloha 10: Mapa směrodatných odchylek hodnot LAI pro ESU 3
- Příloha 11: Formulář pro sběr dat v terénu
- Příloha 12: Obsah přiloženého CD

Příloha 1: Rozbor metodik měření LAI dat v terénu

Autor	Přístroj	Sluneční podmínky	Počet opakování	Počet měř. v ESU	Vzorkování (schéma)	Velikost měř. území	Vegetace	RMSE	Směrodat. odchylka	R ²	Hodnocení výsledků
Aragão a kol. (2005)	LAI - 2000	západ/východ slunce	xxx	25	pravidelná mřížka	50 x 50 m	lesní plochy	xxx	0,89	xxx	xxx
Atzberger a kol. (2012)	LAI - 2000	xxx	xxx	24	náhodné	kruh s poloměrem 15 m	vojtěška, cukrová řepa, česnek	1,39	xxx	xxx	xxx
Berger a kol. (2018)	LAI - 2200	xxx	xxx	5	xxx	10 x 10 m	pšenice	xxx	xxx	xxx	xxx
Caicedo a kol. (2014)	LAI - 2000	xxx	xxx	24	xxx	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice	xxx	xxx	xxx	xxx
Camacho a kol. (2014)	LAI - 2000, AccuPAR, DHP	xxx	xxx	13	schéma dle Camacho a kol. (2014)	20 x 20 m	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Campos-Taberner a kol. (2015a)	LAI - 2000, DHP	xxx	1x NAD, 8x POD	xxx	xxx	20 x 20 m	rýže	0,62	xxx	xxx	eliminace chyb při zpracování dat

Campos-Taberner a kol. (2015b)	LAI - 2000, DHP	xxx	1x NAD, 8x POD	12	dle VALERI, square	20 x 20 m	rýže	0,48	xxx	xxx	xxx
Campos-Taberner a kol. (2016)	LAI - 2000, DHP	xxx	xxx	xxx	dle VALERI, square	20 x 20 m	rýže	0,21	xxx	0,95	xxx
Campos-Taberner a kol. (2017)	PocketLAI	xxx	xxx	18 až 24	dle VALERI	xxx	rýže	xxx	4,5	xxx	shoda in-situ dat a odhadů ze Sentinel-2A
Campos-Taberner a kol. (2018)	PocketLAI	xxx	xxx	18 až 24	dle VALERI	20 x 20 m	rýže	xxx	xxx	xxx	xxx
Cui, Kerekes (2018)	LAI - 2000	xxx	xxx	xxx	xxx	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice	xxx	xxx	xxx	xxx
Darvishzadeh a kol. (2008)	LAI - 2000	západ/východ slunce	1x NAD, 5x POD	xxx	náhodné	1 x 1 m	travní porost	1,28	xxx	xxx	xxx
Darvishzadeh a kol. (2008a)	LAI - 2000	západ/východ slunce	1x NAD, 5x POD	xxx	xxx	30 x 30 m	travní porost	xxx	xxx	xxx	xxx
De Kauwe a kol. (2011)	LAI - 2000	západ/východ slunce	xxx	12	dle VALERI, kříž	30 x 30 m	jehličnatý les	xxx	xxx	xxx	xxx

Dini a kol. (2006)	LAI - 2000	západ/východ slunce	1x NAD, 8x POD	24	xxx	xxx	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa	xxx	xxx	xxx	xxx
Doraiswamy a kol. (2004)	AccuPAR LP-80	xxx	3x POD	6	náhodné	xxx	kukuřice, sója	0,63	xxx	xxx	xxx
D'Urso a kol. (2009)	LAI - 2000	xxx	xxx	24	náhodné	xxx	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa	xxx	xxx	xxx	xxx
Fang a kol. (2014)	LAI - 2200, DHP	západ/východ slunce	xxx	4	dle VALERI	15 x 15 m či 20 x 20 m	rýže	xxx	xxx	xxx	nepřesné měření, přímé osvětlení přístroje
Fang a kol. (2016)	LAI - 2200, DHP	západ/východ slunce	xxx	5	xxx	20 x 20 m	kukuřice, sója	xxx	xxx	xxx	xxx
Fang a kol. (2018)	LAI - 2200, DHP	západ slunce, zataženo	1x NAD, 4x POD	5	náhodné	xxx	rýže	xxx	xxx	xxx	xxx
Fensholt a kol. (2004)	LAI - 2000	západ/východ slunce	xxx	xxx	xxx	30 x 30 m	travní porost	xxx	xxx	xxx	dobrá shoda mezi in-situ a satelitními daty
Garrigues a kol. (2008)	LAI - 2000, AccuPAR, DHP	západ/východ slunce, přímý sluneční svit	xxx	13	kříž	xxx	vojtěška, kukuřice, sója, čirok	xxx	xxx	xxx	xxx

Gosa a kol. (2007)	LAI - 2000, DHP	polojasno	1x NAD, 1x POD	12	dle VALERI, square	20 x 20 m	travní porost, křoviny, lesní plochy	xxx	xxx	xxx	xxx
Guyon a kol. (2003)	LAI - 2000, DHP	jasno, zataženo	3x	16	kříž	20 x 20 m	jehličnatý les	xxx	xxx	xxx	xxx
Hufkens a kol. (2008)	LAI - 2000	západ/východ slunce	1x NAD, 1x POD	13	schéma dle Camacho a kol. (2014)	20 x 20 m	křovinatá vegetace	xxx	xxx	xxx	xxx
Hwang a kol. (2011)	LAI - 2000	západ/východ slunce	1x NAD, 1x POD	5	xxx	20 x 20 m	listnatý les	xxx	xxx	xxx	xxx
Johnson a kol. (2000)	LAI - 2000	jasno	1x NAD, 5x POD	xxx	xxx	10 x 10 m	lesní plochy	xxx	xxx	xxx	xxx
Kovacs a kol. (2009)	AccuPAR LP-80	přímé sluneční světlo	8x POD	xxx	xxx	xxx	mangrovový les	xxx	xxx	xxx	xxx
Latorre a kol. (2015)	LI-3100C	xxx	xxx	12	pravidelné	20 x 20 m	kukuřice, pšenice, řepka, sója	xxx	xxx	xxx	xxx
Li a kol. (2015)	LAI - 2000	xxx	1x NAD, 6x POD	5	dle VALERI	30 x 30 m	kukuřice, jehličnatý les	xxx	0,2	xxx	xxx
Li a kol. (2017)	LAI - 2200C	západ/východ slunce	1x NAD, 6x POD	5	dle VALERI, kříž	30 x 30 m	travní porost	xxx	0,63	xxx	rozšířit zkoumanou oblast

Lu a kol. (2005)	LAI - 2000	xxx	xxx	9	dle VALERI, pravidelná mřížka	20 x 20 m	travní porost	xxx	xxx	xxx	chyby měření - oblačnost a povětrnostní podmínky, měření prováděné různými osobami v terénu
Madugundu a kol. (2008)	PCA - 2000	xxx	1x NAD, 5x POD	xxx	xxx	20 x 20 m	listnatý les	xxx	xxx	xxx	xxx
Majasalmi a kol. (2012)	LAI - 2000	polojasno	1x NAD, 1x POD	81	pravidelná mřížka	36 x 36 m	lesní plochy	xxx	xxx	xxx	xxx
Manninen a kol. (2005)	LAI - 2000	xxx	1x NAD, 1x POD	5	xxx	50 x 50 m	jehličnatý les	xxx	xxx	xxx	xxx
Martinez a kol. (2004)	LAI - 2000, DHP	západ/východ slunce	1x NAD, 8x POD	24	dle VALERI	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa	xxx	xxx	xxx	xxx
Martinez a kol. (2010)	LAI - 2000, DHP	xxx	xxx	12	náhodné	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa	xxx	1,47	xxx	xxx

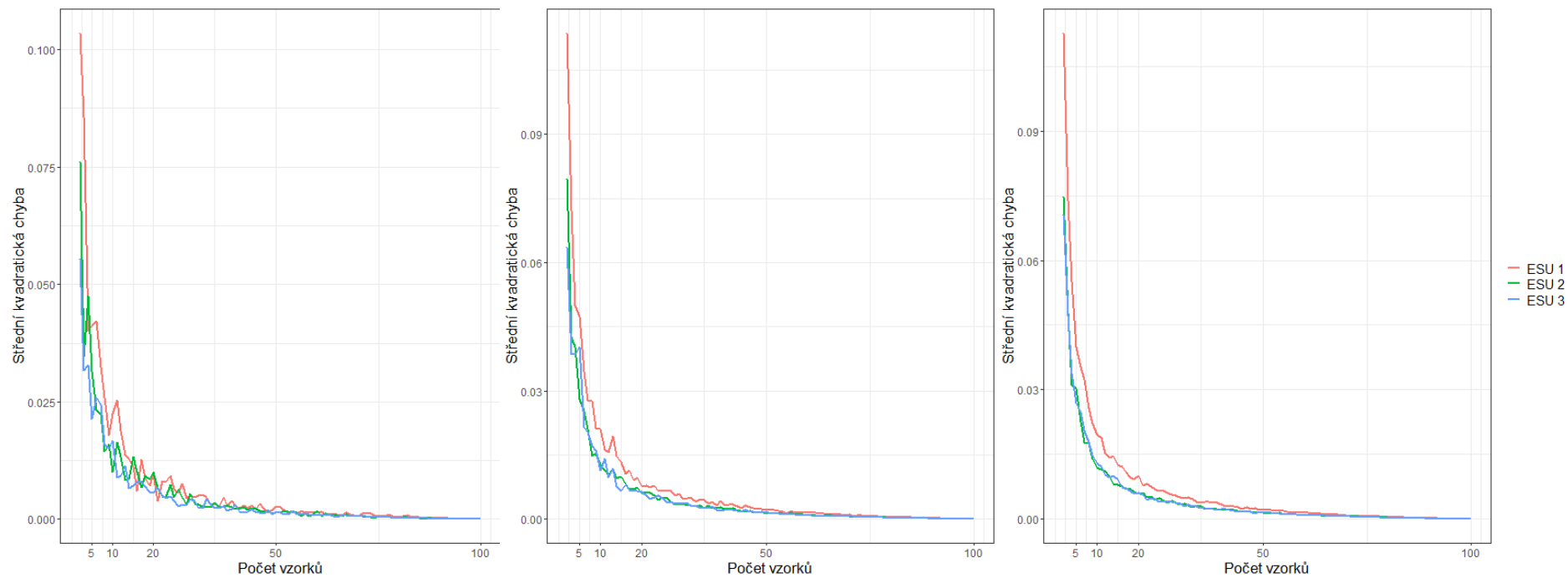
Mayr, Samimi (2015)	LAI - 2200	západ/východ slunce	1 x NAD, X-krát POD	15	xxx	30 x 30 m	savana	xxx	xxx	xxx	xxx
Mengesha (2005)	DHP	xxx	xxx	12	dle VALERI	20 x 20 m	lesní plochy	xxx	xxx	xxx	xxx
Molijn a kol. (2018)	LAI - 2000	xxx	1x NAD, 9x POD	12	xxx	20 x 20 m	cukrová třtina	xxx	xxx	xxx	xxx
Pasqualotto a kol. (2018)	LAI - 2000	xxx	xxx	xxx	xxx	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa	xxx	xxx	xxx	xxx
Qu a kol. (2017)	LAI - 2000	zataženo	1x NAD, 1x POD	8	xxx	20 x 20 m	jehličnatý les	xxx	1,32	0,97	xxx
Richter, Timmermans (2009)	LAI - 2000	západ/východ slunce	xxx	24	náhodné	15 x 15 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice	xxx	xxx	xxx	xxx
Richter a kol. (2011)	LAI - 2000	xxx	1x NAD, 8x POD	24	náhodné	20 x 20 m	kukuřice, cukrová řepa, pšenice	0,4 - 0,6	xxx	xxx	doporučeno definovat postup pro sběr in-situ LAI, včetně vhodných nástrojů a schémat

Richter a kol. (2012)	LAI - 2000	xxx	xxx	12	náhodné	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa	xxx	2	xxx	xxx
Rivera a kol. (2013)	LAI - 2000	xxx	8 měření × 3 opakování	24	xxx	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice	xxx	2	xxx	xxx
Rivera a kol. (2014)	LAI - 2000	xxx	8 měření × 3 opakování	24	xxx	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice	xxx	xxx	xxx	xxx
Rivera Caicedo (2014)	LAI - 2000	xxx	8 měření × 3 opakování	24	xxx	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice	xxx	xxx	xxx	xxx
Rossello (2007)	LAI - 2000	xxx	xxx	42	xxx	20 x 20 m	lesní plochy	xxx	xxx	xxx	xxx
Simic a kol. (2010)	LAI - 2000	západ slunce	xxx	xxx	xxx	30 x 30 m	lesní plochy	xxx	xxx	xxx	xxx
Solberg a kol. (2009)	LAI - 2000, DHP	polojasno	1x NAD, 1x POD	4	xxx	6 x 6 m	lesní plochy	0,36	xxx	0,9	xxx
Stenberg a kol. (2008)	LAI - 2000	xxx	1x NAD, 1x POD	24	dle VALERI, kříž	xxx	lesní plochy	xxx	xxx	xxx	xxx
Svendsen a kol. (2018)	PocketLAI	xxx	xxx	18 až 24	dle VALERI	xxx	rýže	xxx	xxx	xxx	xxx

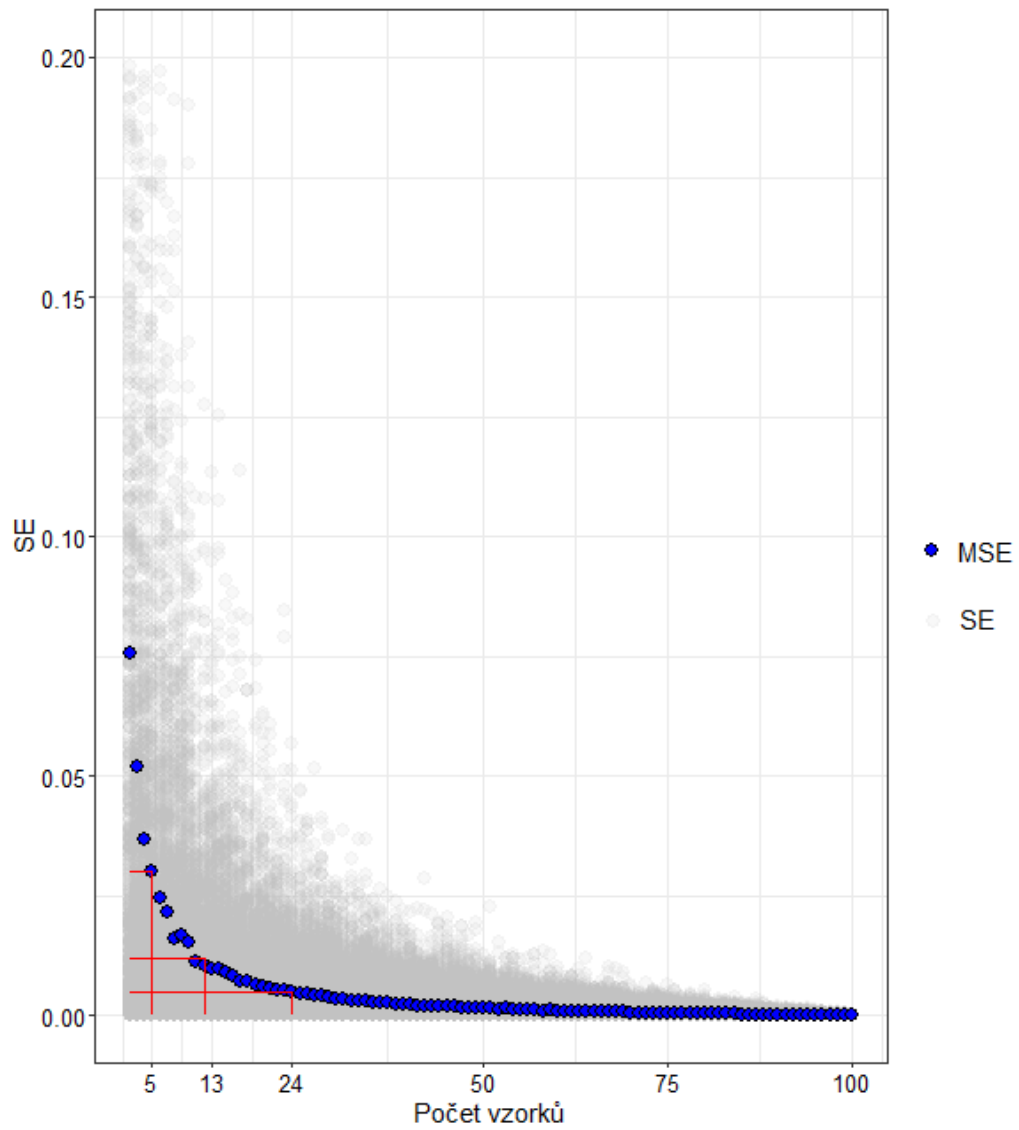
Truckenbrodt, Schmulius (2018)	LAI - 2200, DHP	Jasno	xxx	5x na diagonále, 10 DHP na ESU	xxx	17 x 17 m	ječmen, pšenice, brambory	0,5 - 1,4	xxx	xxx	xxx
Tuia a kol. (2011)	LAI - 2000	Xxx	xxx	24	xxx	10 x 10 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice	xxx	xxx	xxx	xxx
Van Wijk, Williams (2005)	LAI - 2000	zataženo	1x NAD, 1x POD	xxx	xxx	10 x 10 m	křovinatá vegetace	xxx	xxx	xxx	xxx
Verger a kol. (2011)	LAI - 2000, DHP	Xxx	1x NAD, 8x POD	24	dle VALERI	20 x 20 m	kukuřice, slunečnice, oves	xxx	1,8	xxx	xxx
Verrelst a kol. (2009)	LAI - 2000	Xxx	8 měření × 3 opakování	24	xxx	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice	xxx	xxx	xxx	xxx
Verrelst a kol. (2013)	LAI - 2000	Xxx	8 měření × 3 opakování	24	xxx	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice	xxx	xxx	xxx	xxx
Verrelst a kol. (2015)	LAI - 2000	Xxx	xxx	24	xxx	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa, česnek	xxx	xxx	xxx	xxx

Vuolo a kol. (2012)	LAI - 2000	západ/východ slunce	1x NAD, 9x POD	18	náhodné	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, stromy	0,64	1,3	xxx	xxx
Vuolo a kol. (2005)	LAI - 2000	západ/východ slunce	1x NAD, 8x POD	24	xxx	xxx	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa	0,46	xxx	xxx	xxx
Vuolo, Dini (2005)	LAI - 2000	západ/východ slunce	1x NAD, 8x POD	24	xxx	xxx	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa	0,46	xxx	xxx	xxx
Vuolo a kol. (2006)	LAI - 2000	západ/východ slunce	xxx	24	xxx	xxx	vojtěška, kukuřice, cukrová řepa	xxx	xxx	xxx	xxx
White a kol. (1997)	LAI - 2000	jasno, polojasno, zataženo	xxx	9	pravidelná mřížka	xxx	lesní plochy	xxx	0,27 (zataženo), 0,60 (polojasno) , 0,46 (jasno)	xxx	xxx
NEJČASTĚ JŠÍ HODNOTA	LAI - 2000	západ/východ slunce	1x NAD, 1x POD	24	náhodné	20 x 20 m	vojtěška, kukuřice, slunečnice , cukrová řepa	0,2 - 1,4	0,2 - 4,5	Ø 0,94	

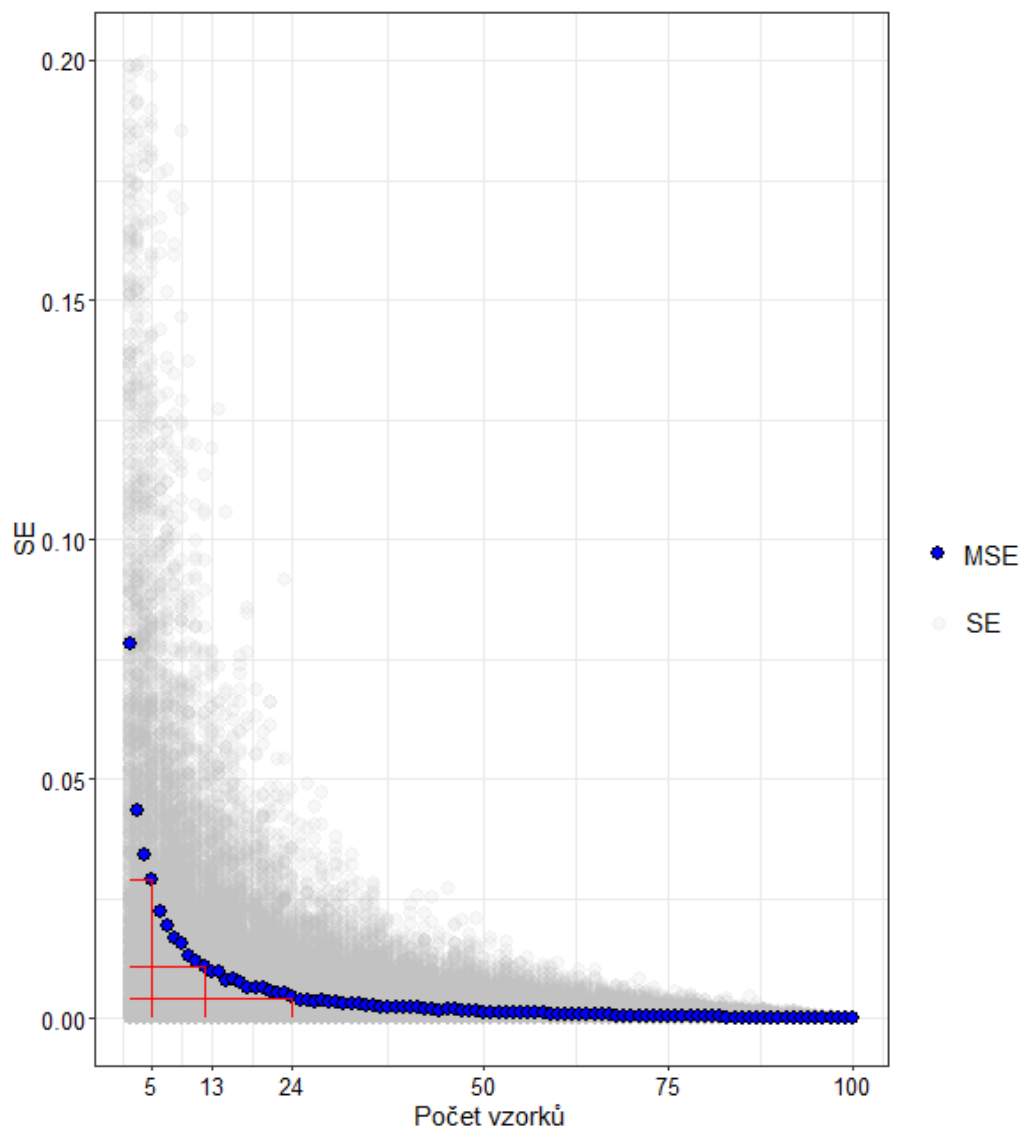
**Příloha 2: Střední kvadratická chyba podle počtu vzorků pro
N = 50 , N = 200, N = 500**



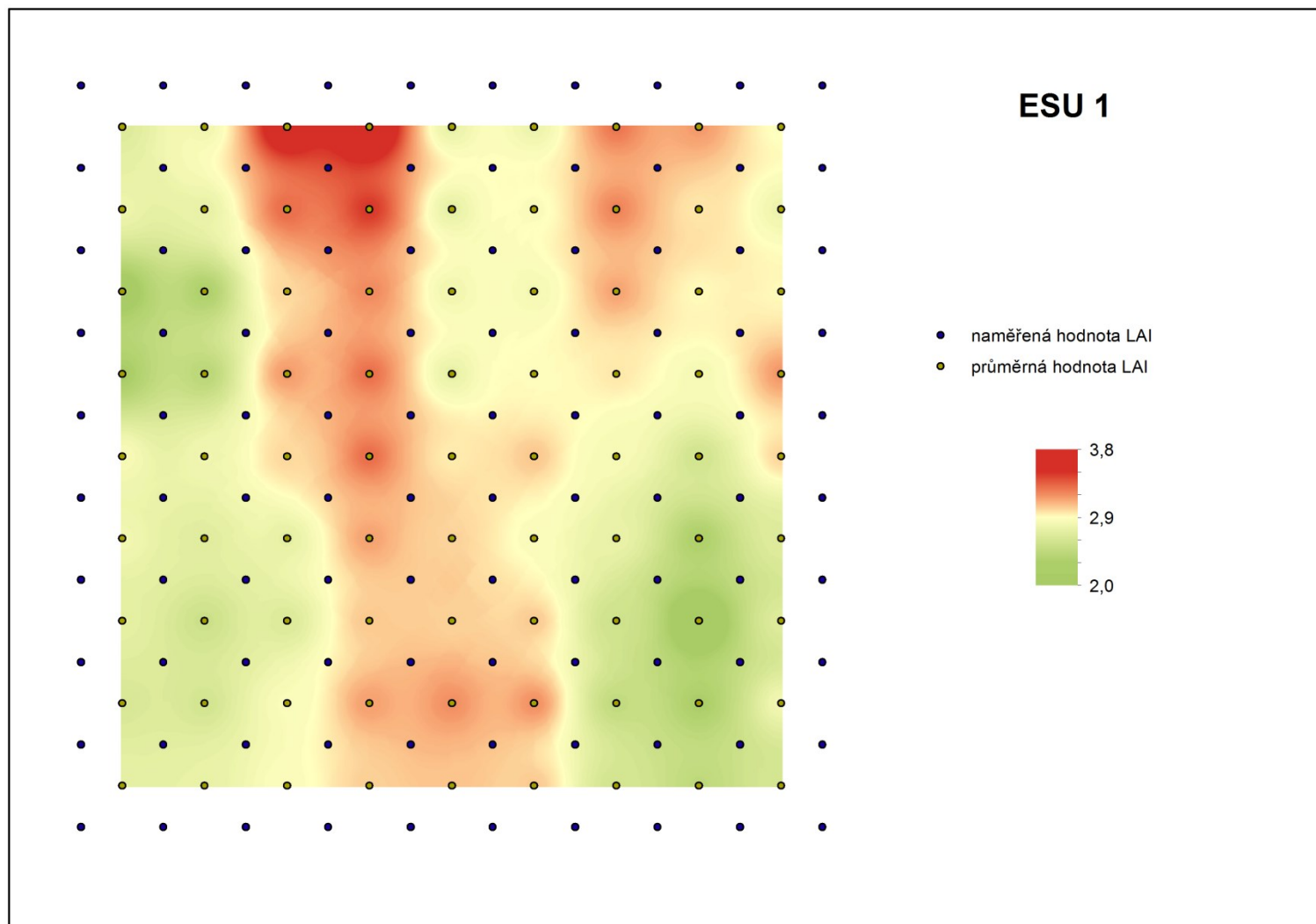
Příloha 3: MSE podle počtu vzorků pro ESU 2



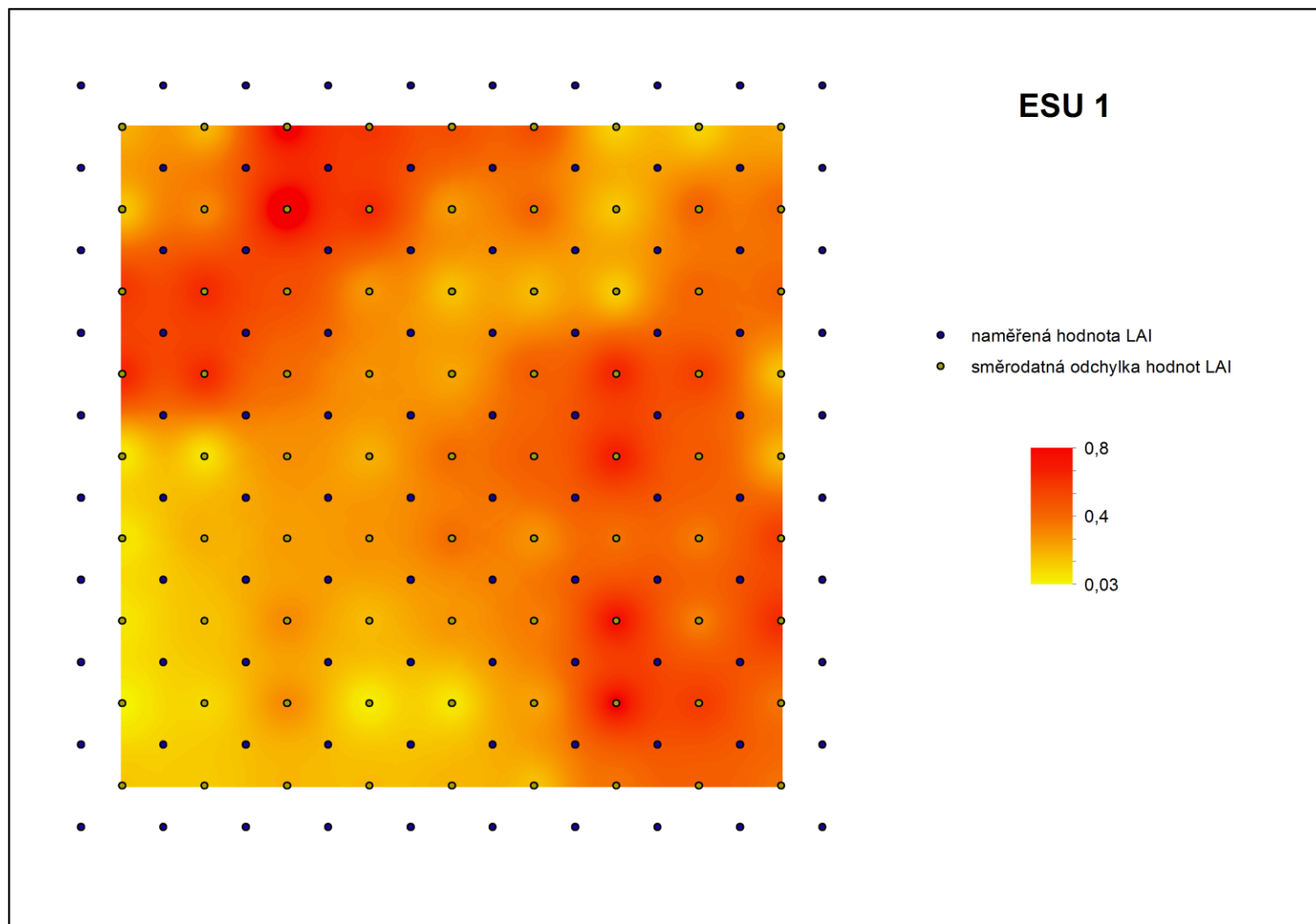
Příloha 4: MSE podle počtu vzorků pro ESU 3



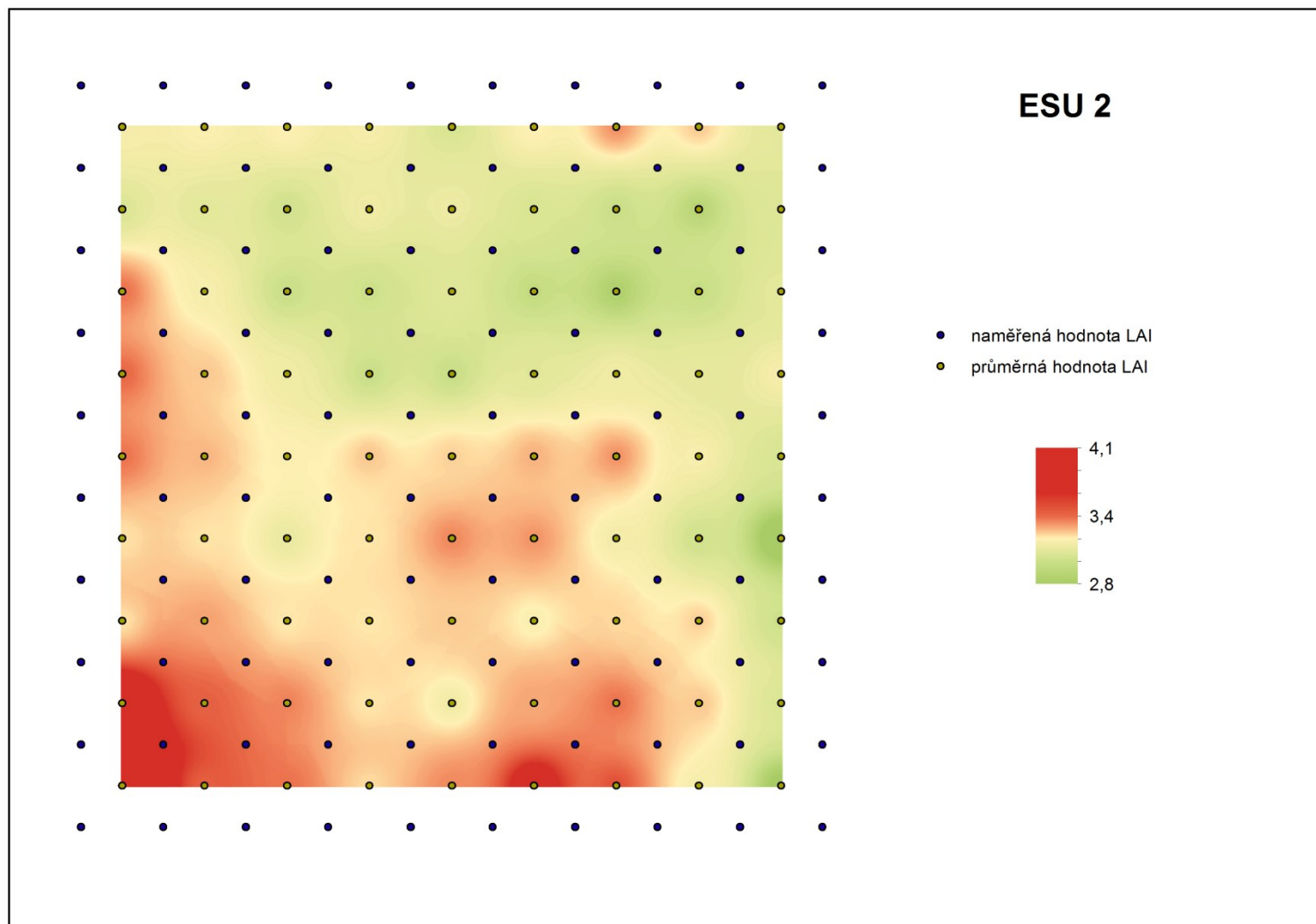
Příloha 5: Mapa průměrných hodnot LAI pro ESU 1



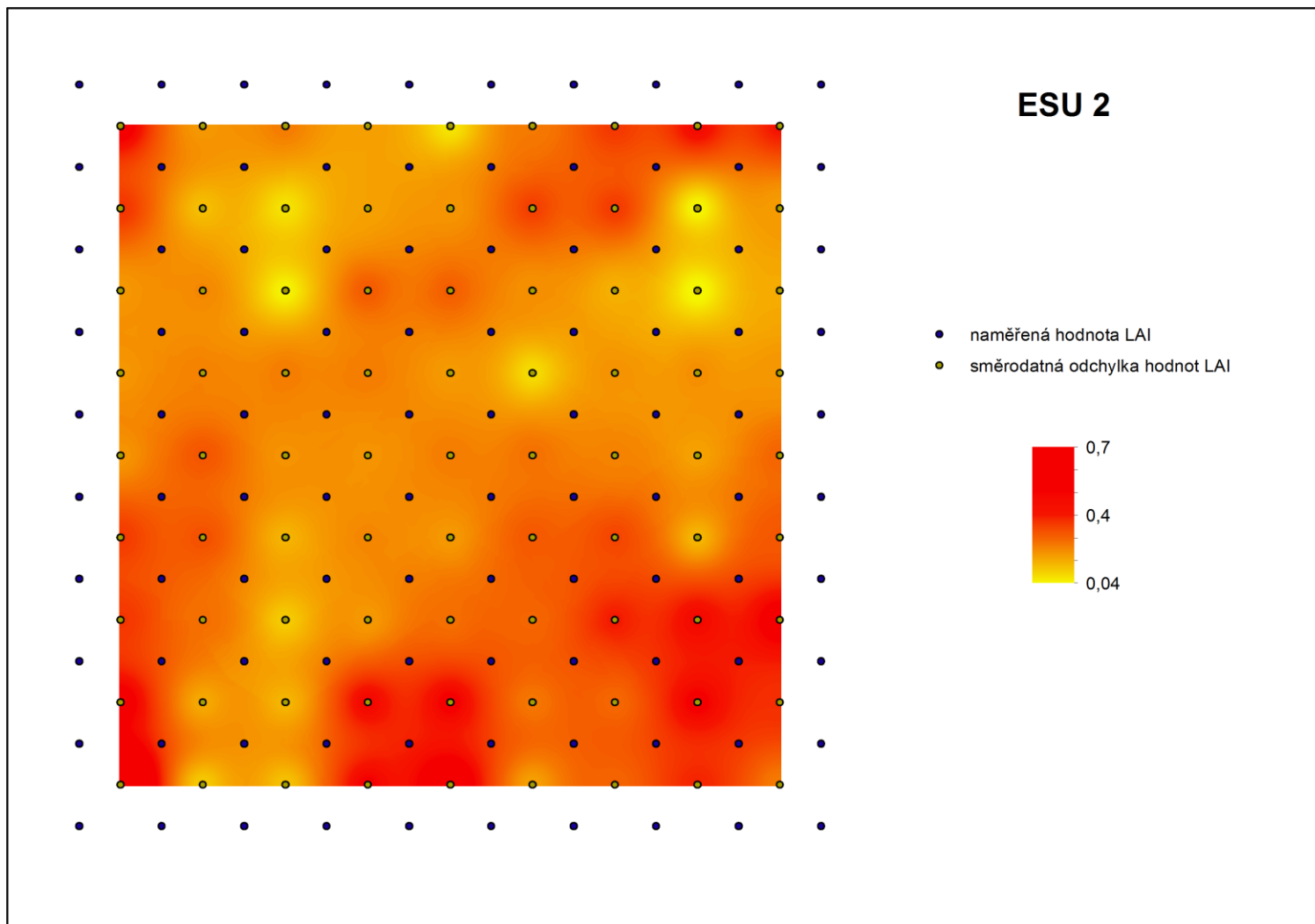
Příloha 6: Mapa směrodatných odchylek hodnot LAI pro ESU 1



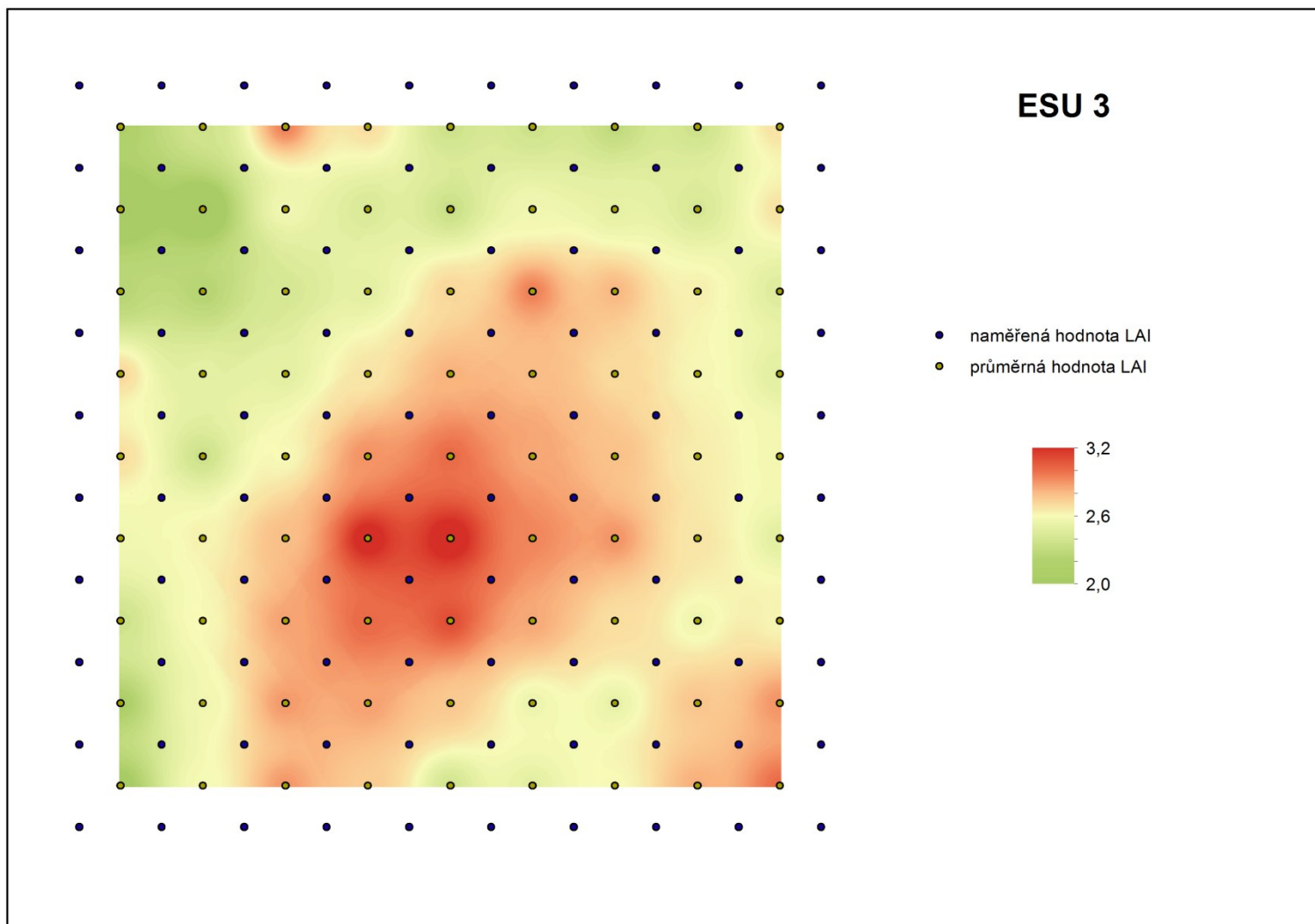
Příloha 7: Mapa průměrných hodnot LAI pro ESU 2



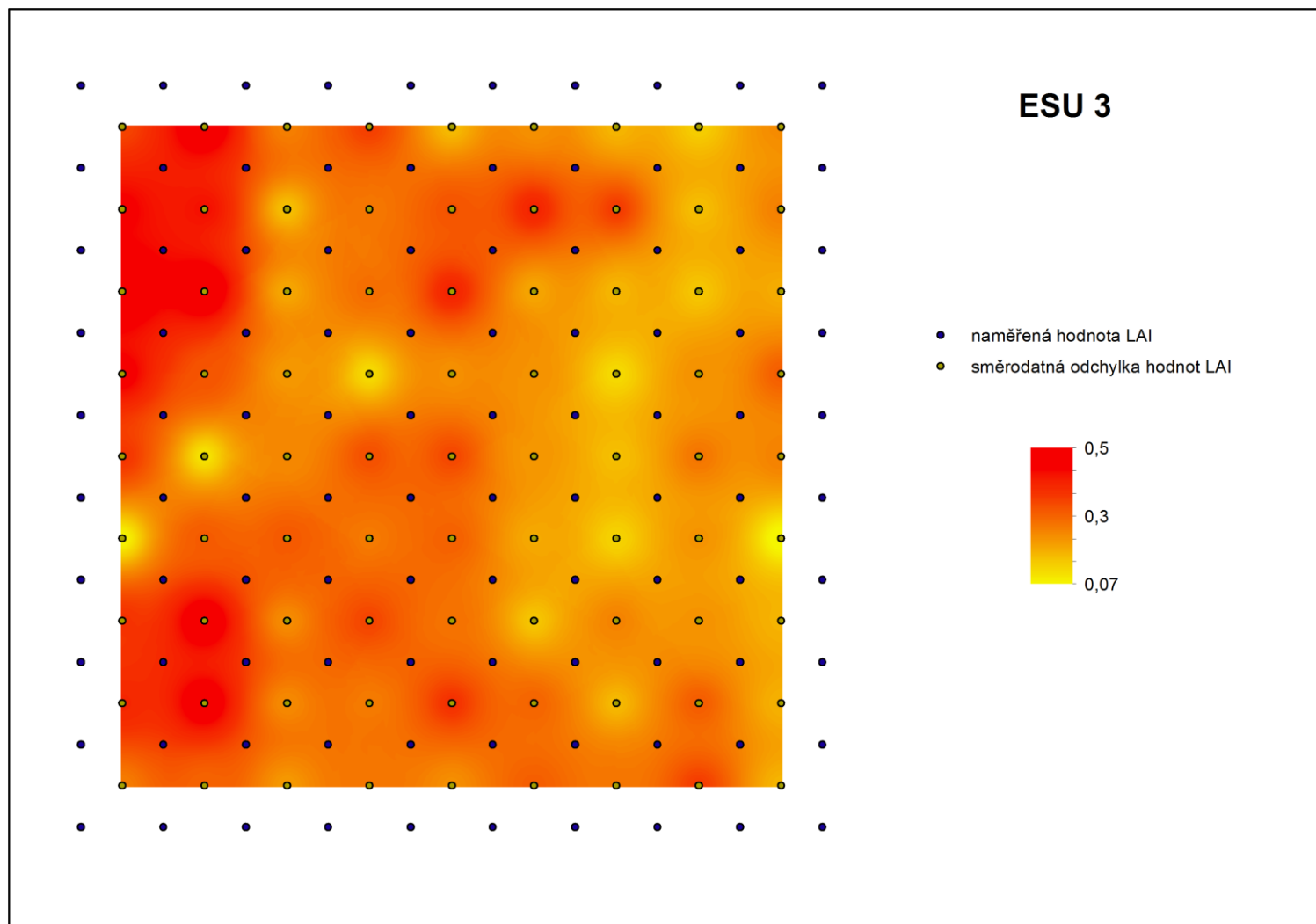
Příloha 8: Mapa směrodatných odchylek hodnot LAI pro ESU 2



Příloha 9: Mapa průměrných hodnot LAI pro ESU 3



Příloha 10: Mapa směrodatných odchylek hodnot LAI pro ESU 3



Příloha 11: Formulář pro sběr dat v terénu

FORMULÁŘ PRO SBĚR DAT V TERÉNU

Datum měření:.....

Místo měření:

Měřené parametry:.....

Poznámky:

Měření číslo:.....

Použitý přístroj:.....

Sluneční podmínky:

GPS:

Foto č.:.....

Plodina:.....

Velikost měřeného území:.....

Poznámky:

Zákres polohy dílčích měření:

The diagram consists of a large outer square frame. Inside this frame, there is a smaller square divided into four equal quadrants by a vertical line and a horizontal line. This represents the spatial layout of sub-measurements within a larger measurement area.

Příloha 12: Obsah přiloženého CD

- Text práce ve formátu PDF
- Naměřená terénní data ve formátu XLS