

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Hodnocení vodního stresu porostu pomocí metod dálkového průzkumu povrchu

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D.

Autor práce: Jiří Erben

Studijní program: N4106 zemědělská specializace

Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí

Katedra: Katedra krajinného managementu

Vedoucí katedry: doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.

Prohlášení autora

Student na tomto místě prohlašuje, že se jedná pouze o jeho dílo, předepsanou formulací: Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské – diplomové – rigorózní – disertační práce, a to v nezkrácené podobě. V úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných fakultou - elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

Datum:

Podpis studenta:

Zadání

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUĎEJOVICÍCH
Fakulta zemědělská
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří ERBEN**
Osobní číslo: **Z15321**
Studijní program: **N4106 Zemědělská specializace**
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**
Název tématu: **Hodnocení vodního stresu porostu pomocí metod dálkového průzkumu povrchu**
Zadávající katedra: **Katedra krajinného managementu**

Zásady pro vypracování:

Náplní diplomové práce bude analýza prostorové distribuce vodního stresu porostu na vybrané lokalitě. Vodní stres porostu bude hodnocen pomocí nekontaktních metod na základě měření teplotní distribuce termovizní kamerou. Doplnková měření vlastností a stavu porostu budou provedena pomocí multispektrální kamery (bude-li k dispozici) a přímým odběrem biomasy. Hodnocení vodního stresu porostu bude založeno na principu výpočtu energetické bilance stanoviště a jejich složek z termovizních snímků. Jako referenční ukazatel stavu vodního stresu porostu bude sloužit destruktivní analýza biomasy porostu, např. relativní obsah vody apod. Práce bude zahrnovat následující části:

1. Vypracování literární rešerše problematiky stanovení vodního stresu porostu pomocí metod dálkového průzkumu.
2. Seznámení se se studovanými lokalitami a praktické zvládnutí metodického postupu měření pomocí termovizního a multispektrálního systému a destruktivní analýzy biomasy porostu.
3. Zpracování získaných dat a materiálů a jejich adekvátní statistické vyhodnocení.
4. Diskuse výsledků v širších souvislostech možností využít přístupy dálkového průzkumu pro hodnocení vodního stresu porostu.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **50 stran textu**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- Brutsaert, W., 1982. Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications, Environmental fluid mechanics. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Boston.
- Jones, H., 1992. Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology, 2nd ed. ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones, H.G., Schofield, P., 2008. Thermal and other remote sensing of plant stress. Gen. Appl. Plant Physiology 34, 19-32.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Research 17, 1133. doi:10.1029/WR017i004p01133
- Jackson, R.D., Kustas, W.P., Choudhury, B.J., 1988. A reexamination of the crop water stress index. Irig. Sci. 9, 309-317.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub BROM, Ph.D.**
Katedra krajinného managementu

Datum zadání diplomové práce: **14. března 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **30. dubna 2017**


prof. Ing. Miroslav Šoch, CSc., dr. h. c.
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEJMĚŘENĚ FAKULTA
STŘEŽENÍ ODBŮRNÍ
Katedra 1060, 370 06 České Budějovice
L.S.


doc. Ing. David Ondr, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 14. března 2016

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jakubu Bromovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, za trpělivost a čas, který mi věnoval při průběžných konzultacích při vypracování mé diplomové práce.

Za pomoc a podporu děkuji i své rodině.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá hodnocením vodního stresu porostu pomocí dálkového průzkumu Země. V první části se výzkum soustředil na posouzení vodního stresu u listů slunečnic v laboratorním prostředí, pomocí spektrální analýzy odraženého záření a termovizního snímkování. Druhá část se soustředila na hodnocení vodního stresu na úrovni povodí IV. Řádu, konkrétně na Dehtářském povodí nedaleko Pelhřimova. K vodnímu stresu byly ještě vypočteny spektrální indexy, které nám značily stav vegetace a které byly dále porovnávány s indexem vodního stresu (plodinový vodní stresový index; CWSI).

Hodnoceny byly teploty listů slunečnic, ze kterých byl vypočten index vodního stresu CWSI. Dále byly hodnoceny odrazivosti listů ve vlnových délkách 350 – 2500 nm. Z nich byly vypočteny spektrální indexy – NDVI (Normalizovaný rozdílový vegetační index) využívaný ke zjištění přítomnosti živé zelené vegetace, WI (Vodní index) sloužící k výpočtu přibližného množství vody v porostu a RVI (Jednoduchý poměrový vegetační index) používaný ke zjištění obsahu biomasy listu nebo fotosyntetické kapacity. Následně byly porovnány s CWSI. Nakonec byly indexy porovnány se spektrálními daty a z výsledných korelací byly patrné vlnové délky, které s daným indexem korelovaly více a které méně.

Po výpočtu indexů NDVI, RVI a WI pro listy slunečnic bylo zjištěno, že na jejich hodnoty nemá zmenšení množství vody žádný vliv.

Vodní stres listů slunečnic, se významně lišil hlavně v intenzitě během měření a v celkových hodnotách. U všech listů slunečnic se hodnota CWSI během úbytku vody zvyšovala. Největší rozdíly byly zjištěny v hodnotách na počátku a na konci procesu ubývání vody.

U indexů NDVI, RVI a WI, které byly porovnány s CWSI pro zjištění případné korelace (shody), vyšlo najevo, že ani jeden z vypočtených indexů nekoreluje s vodním stresem průkazně.

U indexu CWSI docházelo k významným korelacím v několika vlnových délkách s maximem v 1550 nm.

V druhé části práce, prováděné pro povodí Dehtáře, byly hodnoceny tři největší plochy – pole pšenice ozimé, pole kukuřice seté a TTP.

Teplota vzduchu měla u celého povodí konstantní hodnoty 14 – 14,5 °C. Pole pšenice mělo nejnižší teplotu (16 – 19 °C). Teploty TTP se pohybovaly mezi hodnotami 17 – 20 °C. Nejvyšší teplotu si udržovala kukuřice, a to 20 – 23 °C.

Albedo pole pšenice bylo velmi nízké, mezi 12 – 16 %. U TTP se pohybovalo mezi 16 – 20 % a u kukuřice až v rozmezí 18 – 22 %.

NDVI nabývalo menších hodnot u pole pšenice (0,6 – 0,8). Vysoké hodnoty NDVI byly zaznamenány jak na poli kukuřice (0,8 – 0,87) tak na TTP (0,83 – 0,9).

Na poli pšenice byl naměřen nejmenší vodní stres v rozmezí pouze 0 – 0,3. Velmi nízký vodní stres s hodnotami 0,1 – 0,4 se vyskytoval i na TTP. Vysokou mírou působil vodní stres na pole kukuřice (0,3 – 0,9).

Klíčová slova: Vodní stres, teplota, spektrální reflektance, NDVI, CWSI

Abstract

The present thesis deals with evaluation of crop water stress by means of remote sensing. The first part of the research is focused on the assessment of water stress of sunflowers in a laboratory environment using spectral analysis of the reflected radiation and thermography. The second part is focused on the assessment of water stress in terms of 4th. level catchment, specifically on catchment „Dehtáře“ near Pelhřimov. In addition to water stress, spectral indices were calculated. They marked the state of vegetation, and they were compared with the index of crop water stress (crop water stress index; CWSI).

Leaf of sunflowers temperature were evaluated and using them, the index of water stress CWSI were calculated. Reflection of leaf was evaluated in the wavelengths 350 - 2500 nm. From these wavelengths spectral indexes were calculated - NDVI (Normalized difference vegetation index) which detect the presence of living green vegetation, WI (Water Index) which serve to calculate the approximate amount of water in the vegetation and RVI (simple ratio vegetation index) which determine the content of biomass or photosynthetic capacity. After that, they were compared with CWSI. Finally CWSI was compared with the spectral data, and from the resulting correlations they were apparent wavelengths, which correlated with given index more or less.

After calculation of indices NDVI, RVI and WI on sunflower leaves it was found, that smaller content of water had no effect on their values.

Water stress of sunflowers leaves differed considerably mainly in intensity during the measurement and in total values. For all the leaves of sunflowers, the value of CWSI raise during the process of losing water. The biggest differences were observed in the values at the beginning and at the end of losing water.

After calculation of indices NDVI, RVI and WI which were compared with CWSI for a possible correlation became clear that none of the calculated indexes conclusively correlate with water stress.

For index CWSI there were a significant correlations of several wavelengths with a peak at 1550 nm.

In the second part of the work performed for the catchment Dehtáře, they were primarily evaluated three biggest areas - fields of winter wheat, field corn and TTP.

The air temperature had in the whole catchment constant value of 14 - 14.5 °C. The temperature of the vegetations varied in dependence on the kind of vegetation. Wheat field had a lowest temperature (16 to 19 °C). Temperatures of TTP resembled temperatures of wheat and ranged between values of 17-20 °C. The highest temperature had corn (20 to 23 °C).

Albedo of wheat field was very low, between 12 - 16 %. TTP was between 16 - 20 % and the corn within the range of 18 - 22 %.

NDVI had smaller values in the wheat field (0.6 to 0.8). NDVI values were recorded almost as high on field of corn (0.8 to 0.87) as on TTP (0.83 to 0.9).

The smallest water stress was measured in the range of only 0 - 0.3 on the field of wheat. Very low water stress with values of 0.1 to 0.4 occurred on TTP as well. High water stress was measured on field of corn (0.3 to 0.9).

Keywords: Water stress, temperature, spectral reflectance, NDVI, CWSI

Obsah

1. ÚVOD	12
2. CÍL PRÁCE	14
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	15
3.1 Dálkový průzkum země a jeho využití	15
3.2 Klimatické faktory	17
3.2.1 Sluneční energie	17
3.2.1.1 Elektromagnetické spektrum.....	18
3.2.1.2 Spektrální reflektance.....	19
3.2.1.3 Vegetační indexy.....	20
3.2.2 Teplota.....	22
3.2.2.1 Teplota vzduchu	22
3.2.2.2 Teplota půdy.....	24
3.2.3 Výpar	25
3.3 Rostliny	28
3.3.1 Voda v rostlině	28
3.3.1.1 Vodní bilance rostlin.....	31
3.3.1.2 Vodní stres rostlin	31
3.3.2 Vliv zeleně na krajinu.....	33
4. PRAKTICKÁ ČÁST.....	35
4.1 Laboratorní měření.....	35
4.1.1 Místo a čas laboratorního měření	35
4.1.2 Použité pomůcky	35
4.1.3 Postup při získávání dat.....	35
4.1.4 Zpracování získaných dat.....	36
4.2 Analýza povodí	38
4.2.1 Lokalita.....	38
4.2.2 Snímky použité pro analýzu	40
4.2.3 Zpracování získaných dat.....	40
5. VÝSLEDKY	43

5.1 Vodní stres slunečnic.....	43
5.2 Vodní stres povodí Dehtáře.....	55
6. DISKUZE.....	60
7. ZÁVĚR.....	64
8. ZDROJE.....	66

1. ÚVOD

D'Odorico a Porporato (2006), popisují vodní stres jako komplexní fyziologickou reakci k omezené dostupnosti vody v rostlině. Vodní stres v rostlině vzniká, pokud dojde k jakékoli nevyváženosti ve vodní bilanci rostliny, tedy pokud rostlina vodu absorbuje pomaleji, než ji transpiruje, nebo naopak.

Dle Wilkinsona (1994) se s nedostatkem vody, který může být způsoben nadměrným suchem, vysokými teplotami, či přílišným zasolením půdy, rostlina vypořádává několika způsoby. Jedním ze způsobů je dormance či odpad listů, kterým si rostlina zmenšuje plochu, kterou vydává vodu (transpirace). Dalším je přizpůsobení se nedostatku vody růstem struktur, které zabrání výdeji vody, či množství vody potřebné pro přežití. V neposlední řadě si rostlina přizpůsobí své vnitřní pochody nedostatku vody, a to například snížením rychlosti růstu, nebo úpravou enzymů či fotosyntézy.

Fitter a Hay (2002) ve své knize píše, že vodní stres neznamena jen nedostatek vody v rostlině, ale i její nadbytek. Při přítomnosti vodního stresu aktivuje rostlina různé obranné mechanismy, které mají za úkol se s těmito nepříznivými podmínkami vypořádat. Například při zaplavení rostliny vodou dochází k nedostatečnému proudění vzduchu do rostliny, s čímž se rostlina vypořádá například růstem vzdušných kořenů, které vzduch zachytávají a u kterých je růst zpomalen či úplně zastaven pokud zaplavení zmizí.

Pro hodnocení vodního stresu porostu je využívána metoda dálkového průzkumu Země (DPZ). Ta využívá především termálních a multispektrálních dat.

Z multispektrálních dat získaných z družic, můžeme získat dobrou představu o vlhkosti povrchu a o stavu a množství vegetace. Používají se také pro výzkum reakcí rostlin na záření, zjištění obsahu chlorofylu v rostlině, či reflektance půdy a rostlin, a také schopnosti vyzařování energie z půdy a listů. Vyzařování energie z listů je úzce spojeno s teplotou listů. Toho se využívá k určení stresu rostliny a zlepšení hospodaření s vodou (Hatfield a kol., 2008).

Termální snímky nám zase prozradí jaká je teplota určitého vegetačního pokryvu, či části vegetace, nebo teplota povrchu rozsáhlých území. V agronomii se

využívají termální snímky hlavně pro měření teplot listů, které jsou určeny faktory prostředí a transpiračním ochlazováním listu v důsledku určitých stresů (Keener a Kircher, 1982).

Dle Laury a Dominique (2000) je dálkový průzkum země velmi cenným nástrojem hlavně pro agroekonomii, kde poskytuje informace o plodinách vědcům, konzultantům a výrobcům. I když je tato oblast zaměření ještě relativně nová, prokázaly se informace získané z tohoto odvětví jako nesmírně cenné pro rozhodování v managementu plodin. Pomocí nástrojů DPZ dokážeme velmi dobře pochopit stav funkčních procesů v krajině. Známe-li funkční procesy v krajině a číselné vyjádření jejich charakteristik, můžeme i do určité míry předejít negativním účinkům na krajinu způsobených různými problémy, které by za normálních okolností nebyly patrné, nebo dokonce nezjistitelné. K těmto negativním účinkům se řadí i vodní stres porostů na polích, který výrazně snižuje výnosy plodin.

2. CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo posouzení vodního stresu porostu pomocí dálkového průzkumu Země. Rešeršní část této práce se soustředí na popis vodního stresu, jeho příčin i následků. Dále se také zabývá procesy v rostlinách souvisejících s vodou a jejich vodním stresem. První část experimentálního oddílu se zabývá posouzením projevu vodního stresu na pokusných rostlinách a jeho případného výpočtu pomocí spektrálních dat. Druhá část experimentálního oddílu popisuje a posuzuje vodní stres vybraného území.

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 Dálkový průzkum země a jeho využití

Dálkový průzkum Země je způsob získávání informací o zemském povrchu i vodních plochách s využitím snímků pořízených z ptačí perspektivy. Využívá elektromagnetického záření v jednom nebo i více intervalech spektra, a toto záření je odraženo nebo emitováno ze zemského povrchu.

Dálkový průzkum země (DPZ) se dělí na konvenční a nekonvenční. Data získané konvenční metodou se interpretují v analogové podobě a vznikají z nich fotografické snímky. Tyto snímky se pořídí díky několika objektivům většinou připevněných na letadlo. Data získaná nekonvenční metodou se zaznamenávají v digitální podobě v číselné podobě.

Dále se DPZ dělí na aktivní a pasivní metody. Aktivní metody využívají například radaru či laseru, který signál odešle a zpětně přijme. Pasivní se ještě rozdělují na přímé a nepřímé. Pasivní přímé metody využívají odrazu slunečního záření od zemského povrchu. Pasivní nepřímé metody využívají například termovize, díky které získávají informace o teplotních vlastnostech objektu (Campbell 1987).

Metoda dálkového průzkumu země není nová záležitost a je velmi využívaná hlavně ke sledování a hodnocení stavu vegetace, a také pro analýzu strukturálních charakteristik krajiny jako je například rozmístění a tvar krajinných prvků a krajinného pokryvu. Využívá se také pro sledování a hodnocení prostorových a časových změn krajiny. Toto ovšem není jeho jedinou funkcí. Dálkový průzkum země se soustředí i na daleko detailnější funkce, jako je hodnocení funkčních aspektů krajiny, jako například energetické výměny mezi vegetací a atmosférou, tepelné toky ve vegetaci či reflektanci porostu. Z multispektrálních dat získaných z družic můžeme získat dobrou představu o vlhkosti povrchu a o stavu a množství vegetace. Termální snímky nám zase prozradí jaká je teplota určitého vegetačního pokryvu, či části vegetace, nebo teplota povrchu rozsáhlých území. Díky nástrojům DPZ dokážeme velmi dobře pochopit stav těchto funkčních procesů v krajině. Známe-li funkční procesy v krajině a číselné vyjádření jejich charakteristik, můžeme i do určité míry předejít negativním účinkům na krajinu

způsobených různými problémy, které by za normálních okolností nebyly patrné, nebo dokonce nezjistitelné.

Dle Laury a Dominique (2000) se dálkový průzkum země i nadále vyvíjí a je velmi cenným nástrojem hlavně pro agroekonomii, kde poskytuje informace o plodinách vědcům, konzultantům a výrobcům. I když je tato oblast zaměření ještě relativně nová, prokázaly se informace získané z tohoto odvětví jako nesmírně cenné pro rozhodování v managementu plodin. Při DPZ se nejvíce používají multispektrální snímky a v menší míře také termální snímky.

Termální snímky nám umožňují vizuální zachycení teplot povrchů plodin tím, že detekují vyzářené infračervené záření. V agronomii se využívají termální snímky hlavně pro měření teplot listů, které jsou určeny faktory prostředí a transpiračním ochlazováním listu v důsledku určitých stresů. Podle stavu vody v rostlině se mění i míra transpirace tím, že se aktivně otevírají a zavírají průduchy rostliny. Tyto změny se dají velice dobře pozorovat termálním snímkováním. Jako další využití termálního snímkování se uvádí pozorování procesů při mrznutí. Naproti transpiraci, která list ochlazuje, mrznutí vody uvolňuje latentní teplo výparu a produkuje teplo. Díky vizualizaci teplotních procesů při zamrzání můžeme navrhnout a vyzkoušet efektivní ochranu proti zamrzání. V neposlední řadě můžeme díky termálním snímkům zjišťovat obsah vody v listech, a toho se nedá docílit běžnými prostředky bez destruktivní metody. Tento proces se provádí postupným zahříváním listu, a získaná data se pak vloží do matematického modelu, který vytvoří obraz distribuce tepla na povrchu listu. Žíly listu mají vyšší teplotu než jejich okolí, a to díky vyššímu obsahu vody.

Multispektrální snímky využívají převážně viditelnou a blízkou infračervenou část elektromagnetického spektra. Tyto snímky se využívají jako zdroj informací o běžném stavu a růstu rostliny a také o jejím stavu při nedostatku výživy, poškození škůdci nebo různých abiotických jevech způsobujících stres rostliny. Využívají se také pro výzkum reakcí rostlin na záření, zjištění obsahu chlorofylu v rostlině, či reflektance půdy a rostlin, a také schopnosti vyzařování energie z půdy a listů. Vyzařování energie z listů je úzce spojeno s teplotou listů. Toho se využívá k určení stresu rostliny a zlepšení hospodaření s vodou. DPZ ovšem nevyužívá pouze viditelné a blízké

infračervené spektrum, ale také krátkovlnné infračervené záření a mikrovlnné záření. Toto všechno se aplikuje na řešení určitých agronomických problémů. Jedním z těchto problémů je i vodní stres porostu (Hatfield a kol., 2008).

3.2 Klimatické faktory

3.2.1 Sluneční energie

Slunce je zdrojem života na zemi. Svou velikostí hmotou i zářivostí patří mezi hvězdy střední třídy. Je to plynné těleso, které je tvořeno převážně vodíkem, jež je ve svém středu stlačen a zahřát natolik že umožňuje nukleární syntézu v jejíž průběhu je vodík přeměňován na heliová jádra. Teplota slunce prudce klesá směrem k povrchu (Kachlík, Chlupáč, 2001).

Slunce je zdrojem slunečního záření. Jedná se o elektromagnetické vlnění o různých vlnových délkách, které dopadá na zemský povrch s intenzitou $1380 \text{ J.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (solární konstanta). Zhruba 43 % záření se však po odrazu z atmosférických složek a ze zemského povrchu vrátí zpět do prostoru. Odrazivost (albedo) se v jednotlivých případech velice liší. Například čerstvě napadaný sníh má až 90 % odrazivost, zatímco les má zhruba 15 %. Dále 14 % záření pohltí atmosféra a zbylých 43 % absorbuje zemský povrch. Toto záření můžeme rozdělit na 2 části – rozptýlené a přímé. Přímé záření je tvořeno prakticky rovnoběžnými paprsky, které přichází do oka pozorovatele ze slunečního disku. Rozptýlené sluneční záření pak vzniká rozptylem přímých slunečních paprsků na plynných molekulách a na pevných částicích atmosféry, jako jsou vodní kapičky, ledové krystalky či různé aerosolové částice vyskytující se v atmosféře. Toto záření pozorujeme jako světlo oblohy, která by bez něj byla černá.

Množství energie, tedy světla a tepla, které dopadá na zemský povrch, je závislé na úhlu dopadu slunečních paprsků. Velkou roli v tom tedy hraje mnoho faktorů, jako třeba pohyb země kolem slunce a kolem své osy, zeměpisná šířka, orientace vůči světovým stranám či úhel sklonu ozařované plochy (Polášková, 2011).

3.2.1.1 Elektromagnetické spektrum

Bednář (1989) uvádí, že slunce vyzařuje záření o všech vlnových délkách, ale s odlišnou intenzitou. Sluneční spektrum se dělí na čtyři hlavní části:

Ultrafialové záření (100 – 400 nm). Toto sluneční záření tvoří jen asi 7 % z celkového elektromagnetického záření vyzářeného sluncem na zemi. Většina tohoto záření je pohlcena ozonovou vrstvou ve stratosféře (100 - 280 nm). Malá část je pohlcena a rozptýlena v atmosféře (285 – 315 nm). Zbylá část dopadá na zemský povrch, kde ovlivňuje rostliny i organismy (315 – 400 nm).

Viditelné záření (400 – 750 nm). Toto sluneční záření tvoří přibližně 48% z celkového elektromagnetického záření vyzářeného sluncem na zemi. Tato část záření vytváří spektrum barev od fialové po červenou. Jen díky tomuto záření je většina organismů schopná orientace v prostoru a je to jedna z nejdůležitějších částí elektromagnetického spektra (Svatoňová a Lauermann, 2010).

	Vlnová délka
Červená	625 - 750 nm
Oranžová	590 - 625 nm
Žlutá	565 - 590 nm
Zelená	520 - 565 nm
Azurová	500 - 520 nm
Modrá	430 - 500 nm
Fialová	400 - 430 nm

Nm - nanometry

Infračervené záření (0,75 μm – 1000 μm). Zhruba 42 % záření ze slunce, které dopadá na zemi, je tvořeno infračerveným zářením. Jedná se o tepelnou složku elektromagnetického spektra, díky níž se šíří teplo. Oproti ultrafialovému záření je infračervené záření jen minimálně zadržováno atmosférou - má významný vliv na organismy a růstovou fázi rostlin. Infračervené záření se dále dělí na tři části:

- *Blízké IF* (0,75 μm – 5 μm) – Používá se pro určení určitých hodnot koncentrací látek ve vzorcích, dále potom u optických vláken. V těchto vlnových délkách značně roste vodní absorpce. Vlnové délky blízkého IF se využívají pro určení obsahu vody v rostlině a vyhodnocení jejího vodního stresu (Wold a kol., 1998).

- *Střední IF* (5 μm – 30 μm) – Využívá se v meteorologii, klimatologii, termografii, geologii a astronomii pro zobrazení objektů. Uplatňuje se díky dobrému rozlišení druhu vegetace a jejího zdravotního stavu, k odlišení oblačnosti a druhů minerálů.
- *Dlouhé IF* (30 μm – 1000 μm) – Používá se především v astronomii, protože dokáže dobře zobrazit plyny, které doprovázejí vznik nových hvězd. Dlouhé IF používají i různá topná tělesa. Umožňuje získat poznatky o tepelné bilanci objektu, tepelném znečištění jezer a krajiny a lokalizaci lesních požárů (Svatoňová a Lauermann, 2010).

Infračervené záření můžeme zobrazit pomocí termálních kamer, jejichž výstupem je termogram neboli termální snímek. Díky těmto snímkům můžeme určit teplotu v jednotlivých bodech termogramu. Určení teploty tělesa ovšem závisí na emisivitě (vyzařování) tělesa, kdy ideálně černé těleso má emisivitu 1 a lesklé těleso 0,1. Čím nižší emisivita tím nižší je i přesnost měření. Měření může ovlivňovat i zdánlivá odražená teplota.

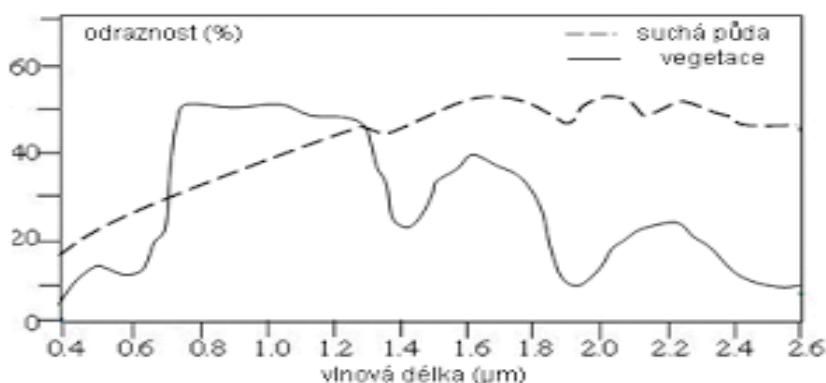
Mikrovlny (0,03 mm – 1 m). Svým rozsahem patří a přebírá vlastnosti infračerveného záření a rádiových vln. Používáme je v mnoha odvětvích lidské činnosti, jako třeba bezdrátový přenos dat či ohřev potravin.

3.2.1.2 Spektrální reflektance

Ždímal a kol. (2011) ve své práci uvádí, že reflektance, neboli odrazivost elektromagnetického záření vegetací, se projevuje především v blízké infračervené části spektra (700 nm – 1100 nm), kde se běžně odráží kolem 60 % dopadajícího záření, u viditelného spektra je to už jen kolem 20 %.

Odrazivost rostliny je dána mnoha faktory. Například na ní působí okolní prostředí a obsah chlorofylu a jiných pigmentů (karoteny, anthokyanidy, xanthofyly). Zásadní je i obsah vody v buňce a v mezibuněčných prostorech a také povrchová struktura listu. Čím kolměji, je postavena stěna buňky k dopadajícímu záření, tím je větší její odrazivost. Neméně důležitý je i počet buněčných vrstev listu a jejich struktura.

Morfologie listu a buněčná struktura, má velký vliv na odrazivost i v blízké infračervené části spektra.



Obr. č. 1 Obecný průběh spektrální odrazivosti vegetace a půdy

Zdroj: www.ecologie.upol.cz

Optické projevy vegetace, zjišťované pomocí detektorů jako je radiometr či spektrometr, jsou popisovány pomocí různých spektrálních koeficientů odrazu, které ovšem nemají žádnou obecnou platnost. Je mnoho vlivů, které ovlivňují proměnlivost spektrálních koeficientů: druh a barva plodiny, výška porostu, zápoj porostu, obsah chlorofylu a jiných látek v rostlině, fenologická fáze rostliny nebo výskyt plevelu.

3.2.1.3 Vegetační indexy

Pro zpracování a zvýraznění dat získaných pomocí DPZ se používají tzv. vegetační indexy, které pomocí reflektance ve viditelném a blízkém infračerveném spektru určují stavy rostliny. Indexů je velké množství a každý určuje něco jiného. Jedním z těchto indexů je **normalizovaný rozdílový vegetační index (NDVI)**. Dle Pettorelli a kol. (2011) se NDVI prokázal jako extrémně užitečný v oblasti ekologie rostlin. Byl vytvořen jako zásadní nástroj pro vyhodnocování změn, které může způsobovat změna klimatu a působit tak na populaci a biodiverzitu krajiny, stejně jako na fenologii vegetace a její primární produkci. NDVI se především používá pro monitorování fotosyntézy vegetace, jelikož zelené listy velmi dobře pohlcují viditelnou část spektra spolu s blízkou infračervenou částí spektra, což vyústí v pozitivní hodnoty NDVI. Může být také využit k mapování, vyhodnocení či předpovědi výskytu a dopadu

negativních jevů, jako je třeba sucho, mráz či záplavy. Stejně tak může pomáhat k určování rozsahu degenerace půdy. Vypočítá se dle následujícího vzorce:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} = \frac{R850 - R680}{R850 + R680}$$

NIR – Hodnota reflektance blízkého infračerveného záření

R – Hodnota reflektance červené části viditelného spektra

R850 – Hodnota reflektance v 850 nm

R680 – Hodnota reflektance v 680 nm

Dalším důležitým spektrálním indexem je **vodní index (WI)**. Penuelas a kol. (1997) píše, že WI zaznamenává poměr mezi reflektancí ve vodním pásmu vlnových délek a referenčními vlnovými délkami, které nemají žádnou absorpci záření díky variabilitě vodního obsahu. WI slouží k výpočtu přibližného množství vody v porostu. Můžeme ho vypočítat pomocí vztahu:

$$WI = \frac{R900}{R970}$$

R900 – Reflektance při vlnové délce 900 nm

R970 – Reflektance při vlnové délce 970 nm

Index fotochemické reflektance (PRI) je rozdíl dvou různých odrazivostí které jsou ovlivněny obsahem xanthofilního pigmentu. Změny v obsahu pigmentu vedou k tomu, že se snižuje reflektance u vlnové délky 531 nm ale na vlnovou délku 570 nm nemá téměř žádný vliv. Fotochemický index odrazivosti se používá kvůli dobrému odhadu fotosyntetické účinnosti světla v listu. Vypočítá se díky poměru výše uvedených odrazivostí (Barton a North, 2001):

$$PRI = \frac{R531 - R570}{R531 + R570}$$

R531 – Reflektance při vlnové délce 531 nm

R570 – Reflektance při vlnové délce 570 nm

Broge a Leblanc (2001) ve své práci píše, že **jednoduchý poměrový vegetační index (RVI či SR)** je nejjednodušším indexem, který se používá ke zjištění množství přítomné zelené vegetace či konkrétně obsahu biomasy listu nebo fotosyntetické kapacity. Hodnoty RVI jsou velice rozdílné, například jeho hodnota pro holou půdu bez vegetace je kolem 1, a čím více vegetace se na snímku objeví, tím větších hodnot RVI dosáhne. Velmi vysoké hodnoty RVI, dosahují až hodnoty 30. Spočítat ho lze díky jednoduchému poměru dvou reflektancí:

$$RVI = \frac{R850}{R680}$$

R680 – Reflektance při vlnové délce 680 nm

R850 – Reflektance při vlnové délce 850 nm

3.2.2 Teplota

Petrík a kol. (1986) uvádí, že teplota je jedna z nejdůležitějších veličin a je definována jako fyzikální veličina charakterizující tepelný stav těles a látek. Pro měření teploty se používají dvě stupnice – Kelvinova a Celsiova. Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly (273,16 °C nebo 0 K), které se dá přiblížit, nikdy však dosáhnout.

3.2.2.1 Teplota vzduchu

Hlavním zdrojem tepla pro ohřev vzduchu je zemský povrch, nikoli slunce, jelikož je teplo vyzářené sluncem pohlcováno atmosférou jen minimálně. Slunce je podstatné pro ohřev vzduchu jen v případě, že je ve vzduchu zvýšený počet aerosolových částic (prach, kapičky vody), nebo pokud je ve vzduchu obsaženo velké množství vodní páry. Jones a kol. (1999) navíc uvádějí, že průměrná teplota země je 14 °C s minimem v lednu (12,2 °C) a maximem v červenci (15,9 °C). Petřík a kol. (1986) a Havlíček (1986) ve svých pracích uvádějí podobná tvrzení o tom, že základním údajem o teplotě vzduchu je hodnota měřená ve 2 m nad zemí. Také se shodují na tom, že teplota ze zemského povrchu přechází do atmosféry čtyřmi způsoby:

1. *Molekulárním vedením* – Provádí se při styku zemského povrchu a atmosféry mezi jednotlivými částicemi vzduchu. Uplatňuje se jen do nepatrné vzdálenosti, jelikož je vzduch špatným vodičem tepla.
2. *Termickou konvekcí* – Jde o vertikální pohyb vzduchu, který je vyvolán teplotními rozdíly mezi vzduchovými částicemi a okolní atmosférou. Pokud má tedy vzduchová částice větší teplotu než okolní atmosféra, má i nižší hustotu, a tedy i nižší hmotnost a začne stoupat vzhůru. Stoupá až do takové výšky, kdy se jeho pohybová energie vyčerpá třením, turbulentní výměnou a tepelnou výměnou a pak začne opět klesat. Tímto způsobem se předává většina tepla z půdy.
3. *Dlouhovlnným vyzařováním* – Jedná se o předávání tepla ze zemského povrchu do atmosféry a mezi vrstvami vzduchu navzájem. Takto se vzduch ohřeje jen minimálně, jelikož suchý vzduch pohlcuje záření jen slabě a většinu ho propustí.
4. *Výparem a kondenzací* – Při výparu tepla z půdy se uvolňuje energie, a okolní vzduch se ochlazuje, zatímco při kondenzaci se zase okolní vzduch otepluje. Tento výdej tepla je velmi významný při ohřevu vzduchu.

Denní chod teploty vzduchu – Nejvýrazněji se denní změny teplot vyznačují během jasného počasí. Maximální teplota během dne se vyskytuje během 13 - 14 hodiny a minimální teplota před východem slunce. Dle Havlíčka (1986) a Petříka a kol. (1986) působí na denní chod teplot vzduchu několik činitelů:

- A) *Vzdálenost od oceánů* – čím vyšší vzdálenost, tím vyšší amplituda teplot.
- B) *Zeměpisná šířka* – čím blíže je místo k pólu, tím menší je denní amplituda.
- C) *Charakter počasí* – během jasných dnů a nocí jsou amplitudy velké, při oblačnosti naopak malé.
- D) *Nadmořská výška* – čím výše zájmové místo je, tím nižší je amplituda teplot. Vliv zemského povrchu je patrný do výšky přibližně 2000 m.
- E) *Roční období* – v zimě je amplituda teplot malá a v létě zase velká. Na jaře je větší než na podzim díky chladnějšímu povrchu půdy.
- F) *Podklad* – na pevnině je větší amplituda v porovnání s vodní plochou. Na vodní ploše, jakožto celistvém a jednolitým povrchu, je denní amplituda teploty

minimální (1,5 °C), zatímco na pevnině se směrem do vnitrozemí zvětšuje a dosahuje amplitudy i větší než 30 °C.

- G) *Rostlinný kryt* – zmírňuje amplitudu teploty.
- H) *Reliéf terénu* – vypouklé tvary terénu jako jsou kopce či hřebeny mají menší amplitudu teploty než depresní charakter reliéfu.
- I) *Množství vody v půdě* – čím větší je množství vody v půdě, tím menší je amplituda.

Roční chod teploty vzduchu – vyznačuje se jedním maximem (červenec) a jedním minimem (leden). Na roční chod teploty vzduchu působí stejní činitelé jako na denní chod teploty vzduchu, s rozdílem zeměpisné šířky, kde se amplituda zvětšuje, čím blíže je místo k pólu.

3.2.2.2 Teplota půdy

Dle Šálka (1997) teplota půdy přímo ovlivňuje průběh biochemických a biologických procesů v půdě. Jejím zdrojem je sluneční záření, které je pohlcováno půdou. Habětín a kol. (1973) ve své knize uvádí, že teplota půdy závisí na:

- *Schopnosti půdy zadržovat teplo* (tepelná jímavost)
- *Tepelné vodivosti půd* – stejně jako jímavost je závislá na obsahu vody v půdě. Čím vlhčí půdy, tím se pomaleji zahřívají, ale déle teplo podrží. Vodivost půd se také odvíjí od druhu půd. Lehké písčité půdy se například lehce ohřejí na povrchu, ale špatně teplo akumulují a mají špatnou tepelnou vodivost (Šálek, 1997)
- *Množství tepla, které povrch půdy zachytí ze slunečního záření*

Teplo, které půda zachytí ze slunce je navíc ovlivňováno:

- *Vegetačním pokryvem* – a s ním spojeným albedem (odrazivostí) povrchu, které je pro každý povrch jiné, a které nám udává, kolik tepla se odrazí od povrchu půdy bez užítka zpět do atmosféry (Stoutjesdijk a Barkman, 1992).
- *Strukturou a barvou půd* – ovlivněna množstvím humusu, vody a zbarvením minerálních složek v půdní hmotě.
- *Sklonem a expozicí svahů vůči světovým stranám*

Velký vliv na teplotu půdy má také půdní druh, který se rozděluje podle procentuálního zastoupení jednotlivých frakcí ve vzorku. Na světě existuje mnoho klasifikačních systémů pro rozdělení půdních druhů, v ČR se ovšem využívají nejčastěji klasifikační stupnic dle Nováka a dle Kopeckého.

Kopeckého klasifikační stupnice

- Písčité půdy (lehké) – sypké, snadno propustné pro vodu a vzduch s malou vodní a vysokou vzdušnou kapacitou. Tyto půdy snadno vysychají a mají dobrý tepelný režim. Pěstují se tu mírně náročné plodiny.
- Hlinité půdy (střední) – Vyskytují se nejvíce a jsou nejúrodnější s příznivými biologickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Mají optimální vsakování a vyrovnanou vodní a vzdušnou kapacitu.
- Jílovité půdy (těžké) – Jsou to půdy jen minimálně propustné pro vodu a vzduch, s malou vzdušnou a vysokou vodní kapacitou. Obdělávají se jen minimálně, protože trpí zamokřením.

Novákova klasifikační stupnice – Půdy se rozdělují podle % obsahu jílnatých částic ve vzorku.

- Těžké půdy – Jíl (75 %), Jílovitá půda (60-75 %), Jílovitohlinitá půda (45-60 %)
- Střední půdy – Hlinitá (30-45 %), Písčitohlinitá (20-30 %)
- Lehké půdy – Hlinitopísčité (10–20 %), Písčité (0-10 %)

V České republice se vyskytují hlavně písčitohlinité až hlinité půdy (Šálek, 1997).

3.2.3 Výpar

Transpirace - Šebánek (1983) uvádí, že transpirací rozumíme výdej vodních par z povrchu orgánů rostlin, tedy produktivní výpar rostlin. Je to děj, který nevyžaduje žádnou energii. Transpirace se různí v závislosti na typu rostliny. U nižších rostlin probíhá celým tělem, u vyšších rostlin pak nejčastěji pomocí průduchů. Existují dva typy transpirace, a to *transpirace pokožková* (kutikulární) a *průduchová* (stomatární). Transpirace pokožková probíhá celým povrchem listu přes kutikulu. U mladých rostlin je velice využívána (až 50%), u starších už téměř vůbec (méně než 10%). Transpirace

průduchová je zase regulována samotnou rostlinou, která při nedostatku vody sníží turgor svěřacích buněk průduchů, ty se uzavírají a výdej vody se zmenší. Při nadbytku vody své průduchy otvírá a výdej vody se zvětšuje (Jarvis, Mcnaughton, 1985). Penka (1985) navíc rozděluje transpiraci na listovou a mimolistovou. Transpirace listová neznamena výpar pouze z listů rostliny ale spíše z jejích asimilačních orgánů, do kterých se řadí hlavně listy ale také mladé zelené stonky a všechny části rostlin, které mohou vykonávat asimilační funkci. Transpirace mimolistová je uskutečňována ostatními orgány rostlin.

Díky transpiraci není v rostlině nadbytek vody a je dobře zásobena minerálními živinami. Slouží i k tomu, aby se rostlina nepřehřála. Zodpovídá také za správný průběh fotosyntézy a dýchání, neboť snížení množství vody vede k zavírání průduchů, a tím k menšímu příjmu CO₂ potřebného k fotosyntéze. Transpirace pomáhá rostlinám vyrovnávat rozdíly teplot mezi dnem a nocí.

Denní mechanismus rostlin je takový, že v noci převládá spíše příjem vody, zatímco ve dne transpirace, která je regulována zavíráním a otevíráním průduchů. Většina vody, kterou rostlina přijme, se z ní zase vypaří pomocí transpirace (Šálek, 1997).

Dle Hudáka (1989) se pro určení poměru obsahu vody a množství sušiny rostliny používá *transpirační koeficient* a *water use efficiency* (WUE)

- *Transpirační koeficient* – udává, kolik g sušiny vytvoří rostlina vypařením jednoho litru vody.
- *Water use efficiency* – naopak udává, kolik litrů vody musí rostlina vypařit, aby vytvořila 1 g sušiny.

Evaporace – Evaporace je na rozdíl od transpirace přímý a neproduktivní výpar z povrchu těles. Při vypařování se odebírá teplo svému okolí (skupenské teplo výparu). Evaporace závisí na mnoha faktorech, které se ještě dle Bedient a Huber (2002) liší v různých prostředích. Jako příklad uvádějí výpar z vodní hladiny, který je závislý na slunečním záření, rozdílu vodních tlaků mezi vodou a přilehlým vzduchem, rychlostí větru a na teplotě vzduchu a vody. Výpar z povrchu půdy může ještě navíc ovlivňovat nerovnost terénu, jeho sklon, zrnitost půdy či porost. V uzavřeném prostoru a při

konstantní teplotě probíhá evaporace až do té doby, dokud není tlak vodní páry okolního vzduchu roven tlaku vodní páry povrchu země.

Evapotranspirace – Evapotranspirace je tvořena kombinací produktivního výparu z rostlin (transpirace) a výparu vlhkosti z půdy (evaporace). Je to celkový výpar vztahující se k určitému území.

3.3 Rostliny

3.3.1 Voda v rostlině

Šebánek (1983) tvrdí že pro správnou funkci rostliny, jejich buněk a pletiv je potřeba voda ve velkém množství, a to většinou mezi 70 – 90 %. Obsah vody potřebné v rostlině se ovšem liší v závislosti na druhu rostliny. Například pletivo lišejníků potřebuje pouhých 5 - 7 % vody, zatímco řasy 96 - 98 % a listy trav 85 %. Přesné určení obsahu vody pro jednotlivé druhy rostlin závisí na jejich ontogenezi a na prostředí ve kterém se vyskytují. S určitostí se dá ovšem tvrdit to, že rostoucí, mladé orgány potřebují více vody než orgány staré.

Lambers (1998) a Jones (1992) uvádějí, že význam vody pro rostliny je různorodý. Slouží například jako rozpouštědlo živin nebo součást některých důležitých procesů v rostlině jako je třeba fotosyntéza, termoregulace (zabránění nadměrného přehřívání pletiv) nebo transport látek. Pro některé rostliny je voda prostředím, ve kterém dokáží žít nebo je dokonce nutná pro jejich přežití. Voda je navíc v rostlině přítomná ve sloučeninách stavebních složek. Je nutná pro růst rostliny a její obsah v atmosféře určuje množství příjmu či výdeje vody rostliny. Při vysokém nasycení atmosféry vodní párou bude voda z rostliny unikat jen minimálně, zatímco při nízkém bude její výdej vysoký a zároveň se zvýší i síly, které vodu v rostlině zadržují. V neposlední řadě má zásobní funkci v pletivech, čímž umožňuje přežít rostlině delší období bez příjmu vody.

Příjem vody

Kolek (1988) píše, že voda do rostliny vstupuje jen tehdy, působí-li na ní síla. Pohybuje se ve směru síly s intenzitou, které odpovídá velikosti působící síly. Primárním zdrojem vody pro rostliny je půda nebo vodní prostředí, které je ovšem v kontaktu s jejími kořeny. Kořen nasaje vodu procesem pasivního osmotického sání a aktivním transportem ji žene přes strukturu endodermu primárního kořene do centrálního válce a cév. U nižších rostlin probíhá příjem vody pomocí celého těla rostliny. U vyšších rostlin se na jejím příjmu podílí hlavně kořen a jeho kořenové vlásky. Rostliny mohou přijímat vodu dvěma způsoby:

1. Pasivně – Bez spotřeby energie, buněčnými stěnami a mezibuněčnými prostory.
2. Aktivně – Za spotřeby energie, přes membránu a cytoplazmu mezi buňkami.

Příjem vody je ovlivněn několika faktory:

1. Intenzitou transpirace
2. Obsahem kyslíku v půdě
3. Teplotou půdy
4. Složením půdního roztoku

Příjem vody rostlinou je základem pro její další transport (Larcher, 1988).

Vedení vody

Transport vody v rostlině probíhá v celém jejím těle. U nižších rostlin je voda vedena pomocí osmózy z buňky do buňky, a u cévnatých rostlin pomocí jejich dřevnatých částí (xylem).

Dle Procházky a kol. (1998) se voda v rostlině pohybuje třemi způsoby:

1. Difúzí kapalné vody v pletivech rostliny skládajících se z buněk, která prostupuje dvěma spojitými soustavami, oddělenými plasmatickou membránou.
2. Difúzí vodní páry ve vzduchu, vyplňujícím mezibuněčné prostory listů.
3. Proudem kapalné vody ve vodivých prvcích dřeva a lýka (cévy, cévice).

Vedení vody a jejích rozpuštěných látek je dále možné díky transpiračnímu proudu, který také udržuje tlak vnitřního prostředí na buněčnou stěnu (turgor).

Transpirační proud je umožněn několika jevy:

Kapilarita – jedná se o vzlínání vody v úzkých trubicích, které v rostlině představují cévy a cévice. Čím užší je céva tím větší je kapilární síla a voda postupuje rychleji vzhůru (Rowlinson, 2013).

Adheze – znamená schopnost dvou rozdílných látek k sobě přilnout, v tomto případě je to přilnavost vody ke stěnám cév.

Koheze – kohezní síly jsou síly, které udržují soudržnost vodního sloupce a tím zaručují jeho nepřetržitost.

Transpirační sání – funguje na principu podtlaku v cévách rostliny, který je způsoben neustálým odpařováním vody z rostliny transpirací. Díky tomuto podtlaku je rostlina schopna nasávat vodu kořeny.

Kořenový vztlak – Kořenový vztlak funguje jako čerpadlo, které čerpá vodu z kořene do cév do nadzemní části rostliny, kde se hromadí a je tlačena vzhůru. Nevýhodou je energetická náročnost.

Výdej vody

Šebánek (1983) ve své knize píše, že listy a stonky rostlin jsou vlastně tělesa plné vody, ze kterých rostlina vodu buď odpařuje pomocí transpirace, nebo ji vytlačuje díky exosmóze nebo gutace.

Transpirace – (viz kapitola 3.2.3)

Exosmóza – jedná se o proces, při kterém vytéká roztok z buňky. Může být vyvolána buď poškozením protoplastu, nebo vnějším roztokem. Zůstane-li membránový systém neporušen, vytéká hlavně voda, která je uvolňována do volných prostor buněčných stěn.

Gutace – je to schopnost rostliny vylučovat vodu v podobě drobných kapiček. Voda je vylučována pomocí speciálních štěrbin – hydátod, které ztratily svou schopnost otevírání a zavírání průduchů a které jsou vyplněny tzv. epithemem ve kterém je ukončen cévní svazek přivádějící vodu. Vyskytuje se mnohem méně než transpirace a to pouze při přesycení vzduchu vodními parami, které se vyskytuje například při teplé noci, nebo pokud přikryjeme rostliny fólií. Rostliny postupně vylučují vodu a až přesycení vzduchu vodními parami ustane a nastává transpirace. Tekutina vytlačená gutací není pouze voda, ale obsahuje látky jako třeba NaCl, MgCl₂, CaCl₂ nebo KCl. Po odpaření vody z listu zde zůstává tenký povlak soli, který se opětovně vsakuje do listu (Stocking, 1956).

3.3.1.1 Vodní bilance rostlin

Vodní bilance představuje poměr mezi příjmem a výdejem vody rostliny. Voda je pro její pochody nezbytně důležitá a většina rostlin jí pohlcuje z půdy kořeny a dále jí pak vede stonkem do listů a květů. Vodní bilanci můžeme vyjádřit rovnicí (Larcher, 1988):

$$\text{Vodní bilance} = \text{Příjem vody} - \text{transpirace}$$

Vodní bilance může být buď kladná, záporná či rovnovážná. Rovnovážná může být jen tehdy, pokud je rychlost výdeje a příjmu vody stejná. Většinou bývá buď kladná či záporná. Kladná je v období dešťů, kdy má rostlina dostatek nebo i nadbytek vody k růstu. Záporná je v období sucha, kdy rostlina trpí nedostatkem vody díky její malé míře v půdě. V tomto období se půda vysušuje a vodní bilance rostliny se neustále zhoršuje. Rostliny se proti tomu začnou bránit tím, že začnou uzavírat průduchy a zabraňovat tak transpiraci. Nejprve se transpirace snižuje v poledne, pak odpoledne a nakonec probíhá jen v ranních hodinách. Nedostatkem vody může rostlina trpět i v zimním období, kdy nemůže přijmout vodu v tekuté podobě díky jejímu zamrznutí (Procházka, 2007).

3.3.1.2 Vodní stres rostlin

D'Odorico a Porporato (2006), popisují vodní stres jako komplexní fyziologickou reakci k omezené dostupnosti vody v rostlině. Vodní stres v rostlině vzniká, pokud dojde k jakékoli nevyváženosti ve vodní bilanci rostliny, tedy pokud rostlina vodu absorbuje pomaleji, než ji transpiruje. Probíhající vodní stres může být identifikován například zvýšenou koncentrací rozpuštěných látek v rostlině, zmenšeným objemem buněk, změnou hydratačního obalu či napětí na membráně.

Nedostatek vody neboli vodní deficit, je množství vody, které rostlině schází do úplného nasycení jejich pletiv. Při vodním deficitu začne rostlina vadnout, při doplnění určitého množství vody ale zaujme svůj původní tvar. Při překročení určité hranice vodního deficitu jsou poškozena pletiva a rostlina nenávratně hyne. D'Odorico a Porporato (2006) uvádějí pochody, které vodní stres v rostlině ovlivňuje:

- Odstranění a tvorba reaktivních forem kyslíku
- Urychlení stárnutí
- Zpomalení prodlužovací fáze buněk
- Zpomalení či zrychlení aktivity enzymů
- Tvorba stresových proteinů
- Zpomalení transportu asimilátu z listu a potlačení fotosyntézy
- Způsobí rychlejší růst podzemních orgánů rostliny a pomalejší růst nadzemních
- Změna v transportu a příjmu iontů

Pro rostlinu je důležité, jak přežítí vodního stresu s co nejmenším poškozením, tak i její následná rychlá obnova. Fitter a Hay (2002) ve své knize píší, že vodní stres neznamená jen nedostatek vody v rostlině, ale i její nadbytek. Při přítomnosti vodního stresu aktivuje rostlina různé obranné mechanismy, které mají za úkol se s těmito nepříznivými podmínkami vypořádat. Při zaplavení rostliny vodou dochází k nedostatečnému proudění vzduchu do rostliny, s čímž se rostlina vypořádá například růstem vzdušných kořenů, které vzduch zachytávají a u kterých je růst zpomalen či úplně zastaven pokud zaplavení zmizí. Dle Wilkinsona (1994) se s nedostatkem vody, který může být způsoben nadměrným suchem, vysokými teplotami, či přílišným zasolení půdy, rostlina vypořádává několika způsoby. Jedním ze způsobů je dormace či odpad listů, kterým si rostlina zmenšuje plochu, kterou vydává vodu (transpirace). Dalším je přizpůsobení se nedostatku vody růstem struktur, které zabrání výdeji vody, či množství vody potřebné pro přežití. V neposlední řadě si rostlina přizpůsobí své vnitřní pochody nedostatku vody, a to například snížením rychlosti růstu, nebo úpravou enzymů či fotosyntézy.

Rostliny se dělí na tři skupiny z hlediska adaptace na dostupnost vody v půdě a jejich požadavků na vodu. Hydrofilní rostliny jsou takové rostliny, které potřebují k životu dostatek vody a kvetou jen tam, kde je voda dostupná téměř vždy. Rostliny, které nepotřebují neustálou přítomnost vody a jsou přizpůsobené na místní klimatické podmínky, se nazývají mezofilní rostliny. Xerofilní rostliny jsou opakem hydrofilních rostlin, dokáží nejen přežít, ale i kvést v dlouhých obdobích sucha. U každého tohoto

typu rostlin se vodní stres projevuje jinak, nastupuje v jinou dobu a rostlina se s ním vypořádává odlišným způsobem.

K vodnímu stresu rostliny přispívá i nízká vlhkost půdy. Pro zachycení potřebné vláhy půdou je důležitá její retenční schopnost a také hloubka kořenového systému. Jaké množství srážek je pro rostlinu potřebné a jaká evapotranspirace je už naopak škodlivá, závisí na druhu rostliny a také na její vývojové fázi D'Odorico a Porporato (2006). Vodní stres se může projevit na rostlinách s dlouhou vegetační dobou, ale u raných plodin s hlubokými kořeny se nemusí projevit téměř vůbec. Při srážkových obdobích se zvyšuje zásoba vláhy ve vrchních vrstvách půdy, která pomůže rostlinám přežít následné, nebo i předchozí období sucha. Postupným vysycháním půdy se vody dostává pouze rostlinám s hlubšími kořeny a ty s povrchovými kořeny trpí vodním stresem (Havlíček a kol., 1986).

3.3.2 Vliv zeleně na krajinu

Teplota vzduchu

Kavka a Šindelářová (1978) tvrdí, že rostliny pohlcují mnoho tepelné energie, část jí absorbují svými listy a část je spotřebována na fyziologické procesy, jako je například transpirace či fotosyntéza. Těmito procesy ochlazují své okolí. Mezi ochlazujícími účinky jednotlivých dřevin je ovšem veliký rozdíl. Například mohutný strom, který je dobře zásoben vodou, dokáže chladit v takové intenzitě jako několik klimatizačních zařízení. Stíny stromů a keřů působí také velmi příznivě na ochlazování okolí. Celková sluneční energie uprostřed zeleně je mnohonásobně menší než na otevřeném prostranství. Strom s průměrně hustou korunou zachycuje kolem 70 % slunečního záření, duby a javory až 90 %. Velká část této energie je využita pro výpar vody, čímž stromy své bezprostřední okolí ochlazují. Dále je prokázáno, že teplota vzduchu ve městech je v průměru o 1,5 °C vyšší než na volném prostoru. Přítomnost zeleně ve městě tuto teplotu snižuje. Důvodem vyšší teploty městské zástavby je schopnost určitých městských povrchů zachycovat více tepelné energie než dokáže povrch pokrytý rostlinstvem. Díky zeleni se také zmírňují rozdíly teplot mezi dnem a nocí.

Vlhkost vzduchu

Dřeviny mají také příznivý vliv na zvyšování vlhkosti vzduchu. Uvádí se, že městský vzduch je sušší než venkovský a to o 20 – 30 %. Rozdíly ve vlhkostech vzduchu uvnitř města a na venkově je dán především plochami zeleně. Největší vliv na vlhkost vzduchu mají lesní komplexy a vodní plochy. Místní význam však mají také jednotlivé stromy, vysoká zeleň či trávník. Některé dřeviny jako třeba olše, buk či bříza mají vyšší odpařovací účinek, jiné, například borovice zase nižší (Wilkinson, 1994).

Jakost vzduchu

Rostliny a zejména lesní porosty při fotosyntéze produkují kyslík a spotřebovávají oxid uhličitý, čímž zlepšují chemické složení vzduchu. Vyprodukuje obrovské množství kyslíku a doplňují ho do atmosféry. Vzhledem k neustálému zvětšování zastavěných ploch a neustálé industrializaci se množství oxidu uhličitého zvyšuje a množství vyprodukovaného kyslíku snižuje. Zeleň také čistí vzduch od škodlivých plynů, jako je třeba oxid uhelnatý, siřičitý nebo oxidu dusíku. Dalším prvkem, který zeleň čistí je olovo, což bylo velmi důležité hlavně v minulých letech vzhledem ke vzrůstajícímu provozu motorových vozidel, v jejichž palivu se vyskytovalo (Kavka a Šindelářová, 1978).

Prašnost vzduchu

Wilkinson (1994) uvádí, že zachycování prachu rostlinami je jedna z jejich nejvýznamnějších funkcí. Nejvíce nečistot a prachových částic zachycuje rostlina svými listy. Tuto schopnost mají jak byliny, keře, tak i stromy. Stromy jsou ovšem v tomto ohledu nejúčinnější, uvádí se, že koruna stromu profiltruje kolem 60 – 70 % prachu ze vzduchu, zatímco souvislý pruh keřů asi 44 %. Princip snižování prašnosti ovzduší zelení spočívá ve dvou faktorech:

- a) Zeleň produkuje minimální množství prachových částic a sama je svými listy zachycuje. Poté je déšť spláchne přímo na zem.
- b) Zeleň snižuje proudění vzduchu, čímž usnadňuje prachovým částicám jejich usazování.

4. PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Laboratorní měření

4.1.1 Místo a čas laboratorního měření

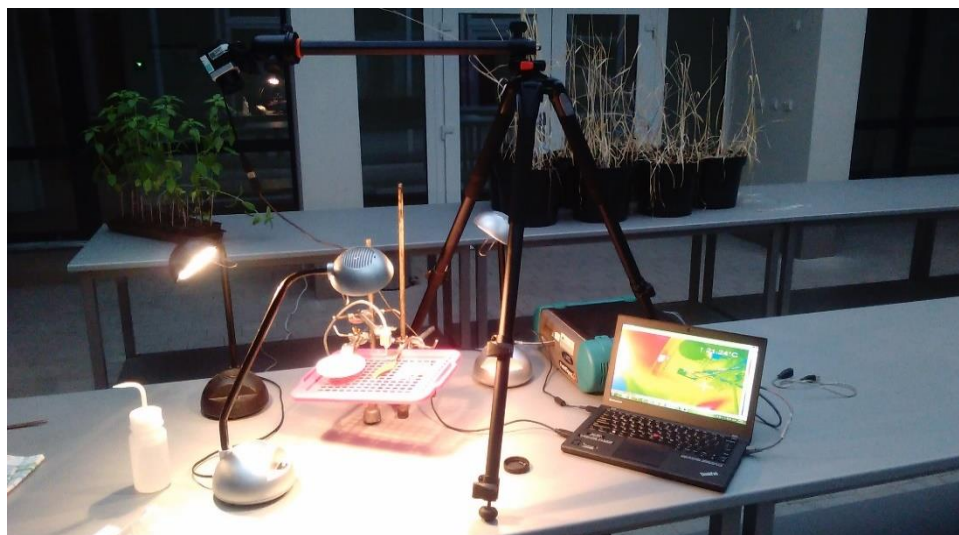
Laboratorní měření bylo prováděno ve dnech 24, 28 a 29 listopadu v laboratoři na Jihočeské univerzitě.

4.1.2 Použité pomůcky

Stolní lampička 3x, stativ, termální kamera (Optris PI 450 Light Weight Kit, frekvence 35 Hz), spektrometr (ASD FieldSpec 4 Wide-Res, rozlišení 10 - 2500 nm), notebook, spektralon, stojan s úchyty, ploška pro list, stříčka s vodou, filtrační papír, nůžky, analytická váha, sušárna, listy slunečnice.

4.1.3 Postup při získávání dat

Všechny pomůcky byly rozmístěny dle obrázku č. 2. Do držáku byla chycena podkladová plocha, na kterou byl položen čerstvě utržený list, filtrační papírek, který se vždy před každým měřením namočil stříčkou, aby byl dostatečně vlhký, a referenční suchý list. Na druhý držák byl přichycen spektralon, který byl následně umístěn v těsné blízkosti měřených listů. Lampičky byly nastaveny do různých úhlů od podkladové plochy a do takové vzdálenosti, aby nevrhaly na list, či na spektralon, stín. Optické vlákno spektrometru bylo opatrně chyceno do držáku a nastavilo se tak, aby bylo kolmo k měřené ploše. Termální kamera byla přichycena ke stativu a nesměrována tak, aby jí nic nepřekáželo v nahrávání sledované plochy.



Obr. č.2 Aparatura po sestavení

Na začátku měření byl nůžkami odstříhnut ze slunečnice list. List nesměl být poškozený či uschlý. Tento list byl zvážen na analytické váze, a jeho hmotnost byla zapsána. Poté byl co nejrychleji položen na mřížku vedle filtračního papíru. Po vložení na sledovanou plochu bylo spuštěno nahrávání termální kamery a spektrometru. Spektrometr snímkoval každé 2 minuty po dobu 28 minut, výsledný počet snímků pro každý list byl tedy 15. Termální kamera nahrávala nepřetržitě celých 28 minut při frekvenci nahrávání 40 snímků za sekundu. Po uplynutí této doby byl list opět vložen na analytickou váhu a zvážen. Poté byl list položen na filtrační papír a vložen do sušičky, kde byl vysušen do konstantní hmotnosti při 85 °C. Tento postup byl opakován pro všech 20 měření.

4.1.4 Zpracování získaných dat

Kromě základních měřených veličin byly vypočteny následující ukazatele:

1. **Index vodního stresu porostu:** Používá se pro určení vodního stresu porostu a pro plánování zavlažování rostlin v zemědělství kvůli úspoře vody a maximální produkci rostlin.

$$CWSI = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$

T – Teplota povrchu živého listu (°C)

T_{min} - Teplota vlhkého terčíku (°C)

T_{max} - Teplota referenčního suchého listu (°C)

2. **Vodní index:** Slouží k výpočtu přibližného množství vody v porostu.

$$WI = \frac{R900}{R970}$$

$R900$ – Spektrální reflektance při vlnové délce 900 nm

$R970$ – Spektrální reflektance při vlnové délce 970 nm

3. **Normalizovaný rozdílový vegetační index:** Využívá se ke zjištění přítomnosti živé zelené vegetace.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} = \frac{R850 - R680}{R850 + R680}$$

NIR – Hodnota spektrální reflektance blízkého infračerveného záření

R – Hodnota spektrální reflektance červené části viditelného spektra

4. **Relativní obsah vody:** Udává přibližný obsah vody.

$$RWC = \frac{100 * (FM - DM)}{SM - DM}$$

FM – Hmotnost živého listu (g)

DM – Hmotnost sušiny (g)

SM – Hmotnost saturovaného listu (g)

5. Jednoduchý poměrový vegetační index: Používá se ke zjištění množství přítomné zelené vegetace, či konkrétně obsahu biomasy listu nebo fotosyntetické kapacity.

$$RVI = \frac{R850}{R680}$$

R850 – Spektrální reflektance při vlnové délce 850 nm

R680 – Spektrální reflektance při vlnové délce 680 nm

Výše uvedené ukazatele byly vypočteny a byl vytvořen graf s jejich průběhem během měření. Následně byly ukazatele porovnány s indexem vodního stresu CWSI pomocí lineární regresní analýzy a to tak, že se vypočetla jejich hodnota pro každý list (20) a každé měření (15). Následně se hodnoty každého listu porovnaly mezi sebou. Z výsledných hodnot vznikl regresní koeficient R^2 , který nám značil, jak moc mezi sebou indexy a CWSI korelují.

Indexy CWSI, NDVI a WI, byly také porovnány se spektrálními daty, k čemuž byla použita korelační analýza. Spektrální data se skládala z vlnových délek od 350 – 2500 nm a jejich reflektancí při každém z 15 měření a pro každý z 20 listů. Z těchto hodnot byl poté vypočten medián, průměr a regresní koeficient R^2 pro každou vlnovou délku, a následně vytvořen korelogram. Na korelogramu byly vyznačeny vlnové délky, které korelovaly významně a které naopak nekorelovaly vůbec.

4.2 Analýza povodí

4.2.1 Lokalita

Zkoumaná lokalita se nachází v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce (okr. Pelhřimov, kraj Vysočina) a zaujímá plochu 59,6 Ha. Konkrétně se oblast nachází mezi obcemi Dehtáře a Kojčice. Podle geomorfologického členění spadá řešené území do Hercinského systému, Česko-Moravské subprovincie a českomoravské vrchoviny. Nadmořská výška se zde pohybuje mezi 497-550 m.n.m (Demek, 1987). Vzhledem k agroklimatickému členění patří lokalita do oblasti mírně chladné a vlhké. Průměrné roční teploty jsou zde 7 °C. Průměrný roční úhrn srážek je 660 mm. Substrátem jsou zde

částečně migmatizované pararuly. Hlavním půdním typem je tu kambiem oglejená, modální arenická a pseudoglej modální. Z hlediska zrnitosti jsou zde půdy písčité, hlinitopísčité, písčitohlinité a hlinité (Tolasz, 2007).



Mapa č. 1 **Mapa okolí řešeného území**

Experimentální údaje byly získány na dvou různých porostech, a to na trvalém travním porostu (TTP), (20,3%) a orné půdě (79,7%). Jedná se o stanoviště lišící se charakterem aktivního povrchu. Na orné půdě se v dané době (květen) pěstovala na většině území pšenice ozimá (*Triticum aestivum*) a na menší jižní ploše kukuřice setá (*Zea mays*). Na TTP se vyskytuje především ovsík (*Arrhenatherum*) a ostřice (*Carex*).

4.2.2 Snímky použité pro analýzu

Snímky byly pořízeny v květnu 2015. Využity byly data z družic Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, které jsou k dispozici od roku 1984. Data využívají kartografické zobrazení WGS 84. Pro samotnou analýzu snímků byl použit program QGIS 2.18.

Pro výpočty byly použity snímky ze zájmového území:

Teploty povrchu, digitálního modelu terénu, teploty vzduchu ve 2 m, rychlosti větru, minimální výšky porostu, maximální výšky porostu, spektrální reflektance 680 a 850 nm a masky.

Z těchto snímků QGIS vypočítal další hodnoty, z kterých vytvořil další snímky.

4.2.3 Zpracování získaných dat

Kromě základních veličin získaných z map byl vypočten index vodního stresu, který byl získán díky následujícím výpočtům:

1. Index vodního stresu porostu:

$$CWSI = 1 - \frac{\Delta + \gamma^*}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

Δ - je sklon teplotního gradientu vůči vlhkostnímu gradientu ($K.kPa^{-1}$)

γ - je psychrometrická konstanta ($kPa.K^{-1}$)

r_c - představuje odpor porostu pro přenos vodní páry ($s.m^{-1}$)

r_a - je aerodynamický odpor povrchu pro přenos tepla a hybnosti ($s.m^{-1}$)

γ^* - je modifikovaná psychrometrická konstanta ($kPa.K^{-1}$)

2. Modifikovaná psychrometrická konstanta

$$\gamma^* = \gamma + \left(1 + \frac{r_{cp}}{r_a}\right)$$

r_{cp} - je odpor porostu pro přenos vodní páry za podmínek potenciálního výparu z povrchu ($s \cdot m^{-1}$)

3. Odpor porostu pro přenos vodní páry

$$r_e = \left[\left(\frac{\Delta + \gamma}{\Omega} - \Delta \right) \frac{1}{\gamma} - 1 \right] r_a$$

Ω - je tzv. decoupling koeficient nebo též relativní výpar (rel.).

4. Aerodynamický odpor povrchu pro přenos tepla a hybnosti

$$r_a = \frac{\left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0m}} \right) - \Psi_m(\zeta) \right] \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0h}} \right) - \Psi_h(\zeta) \right]}{U \cdot \kappa^2}$$

z - je výška nad povrchem odpovídající tzv. mixing layer ($z = 200$ m)

d - je efektivní výška porostu (m)

z_{0m} a z_{0h} - jsou aerodynamické drsnosti porostu pro přenos vodní páry, tepla a hybnosti.

U - je rychlost proudění větru přepočtená podle logaritmického zákona pro výšku z ($m \cdot s^{-1}$).

k - je Kármánova konstanta ($k = 0,41$)

$\Psi_h(\zeta)$ a $\Psi_m(\zeta)$ - jsou stabilitní koeficienty pro přenos tepla a hybnosti v mezní vrstvě atmosféry vypočtené v závislosti na její stabilitě.

5. Odpor porostu pro přenos vodní páry

$$r_{cp} = \frac{(E_s - e_a) \rho c_p}{\gamma \cdot LE_p} - r_a$$

E_s - je tlak nasycené vodní páry na úrovni porostu (kPa)

e_a - je tlak vodní páry vzduchu (kPa)

ρ - je hustota vzduchu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

c_p - je tepelná kapacita suchého vzduchu ($c_p= 1012 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

LE_p - je tok latentního tepla výparu pro potenciální výpar ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Všechny výše uvedené výpočty byly provedeny pro každý obrazový bod (pixel) zájmového území na základě datových vstupů z leteckého snímkování a pozemních měření. Pro výpočty byl použit software SEBCS SA for QGIS (Brom 2016, nepublikováno), který z výše uvedených snímků vypočetl indexy CWSI, NDVI a albedo.

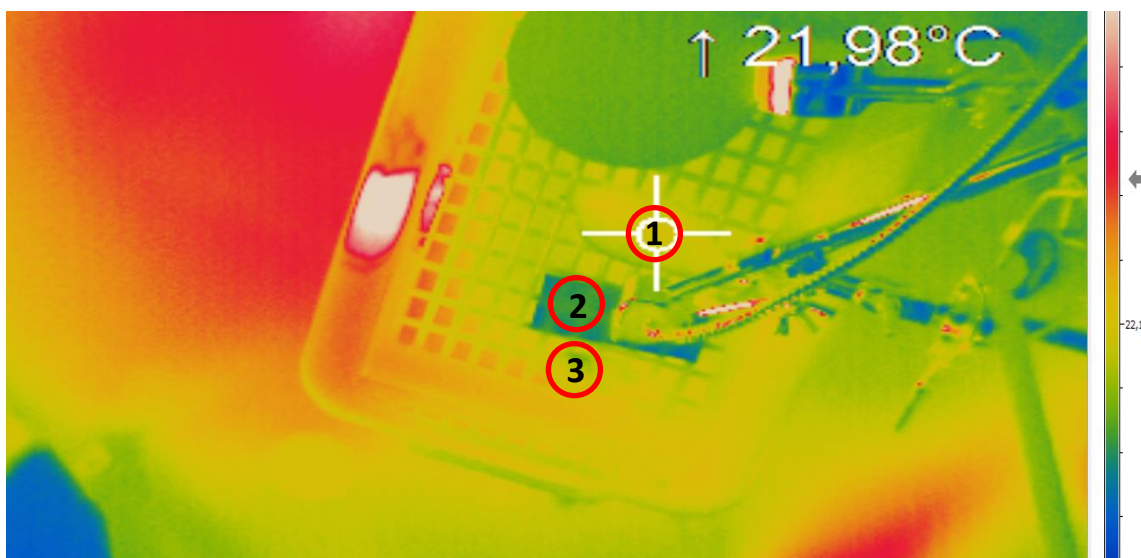
Cílem výzkumu bylo na rozdíl od laboratorního pokusu, zhodnocení indexů CWSI a NDVI, teploty povrchu a albeda z hlediska povodí. Analýza povodí byla prováděna kvůli zjištění funkčnosti a rozložení těchto hodnot v krajině a také pro porovnání rozdílů mezi jednotlivými pokrývky půdy. Porovnávány byly 3 typy vegetace – kukuřice setá, pšenice ozimá a TTP (ovsík, ostřice).

5. VÝSLEDKY

5.1 Vodní stres slunečnic

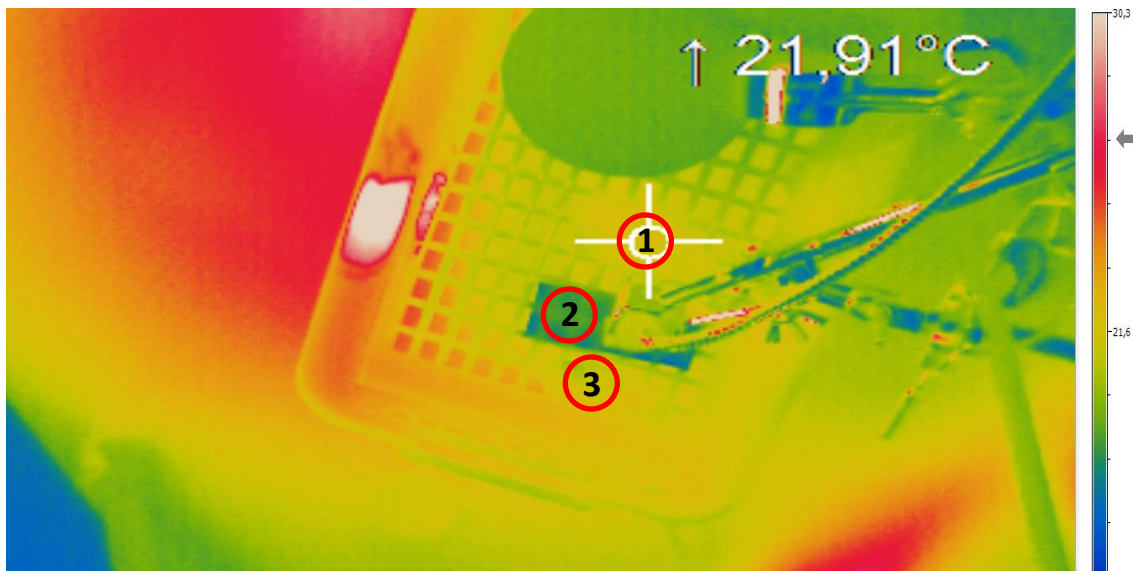
Z analýzy vyšlo najevo, že rychlost úbytku vody v listu a jeho teplota se mezi zkoumanými listy velice lišila, stejně jako vypočítané charakteristiky mezi sebou. Největší roli v rozdílech teplot však hrála velikost a hmotnost listu.

Teplota se na různých místech na listu lišila, což je vidět na obrázku níže. Na tomto obrázku můžeme vidět snímek z termální kamery, který nám ukazuje, jaká byla teplota živého listu (1), vlhkého terčíku (2) a referenčního listu (3) na počátku měření. Živý list si po celé středové ploše udržoval teplotu přibližně 22 °C, zatímco při okrajích byla jeho teplota o zhruba 3 °C menší. Referenční list měl na celé ploše na začátku měření téměř stejnou teplotu, jako list živý. Vlhký terčík měl na všech bodech konstantní teplotu 14 °C.



Obr. č. 3 Teplotní snímek listu č. 1 na začátku měření

Na obrázku můžeme vidět snímek z termální kamery, který nám ukazuje, jaká byla teplota živého listu, referenčního listu a vlhkého terčíku na konci měření. Na tomto snímku můžeme vidět, že teplota celého listu už nebyla jiná ve středu a na okrajích, ale byla stejná po celé ploše listu, a o 1 °C vyšší než na počátku měření. Teplota celého referenčního listu se také zvýšila o 1 °C. Teplota vlhkého terčíku zůstala téměř neměnná.



Obr. č. 4 Teplotní snímek listu č. 1 na konci měření (28 min)

V tabulce č. 1 můžeme vidět různé váhy listů po odstříhnutí a po 28 minutovém měření, kdy rostlina trpěla nedostatkem vody a zvyšovala se tak jejich teplota. Celé měření bylo provedeno ve 3 dnech a v různých časech. Měření hmotnosti bylo provedeno vždy po 28 minutách nedostatku vody. V prvním sloupci jsou váhy listu těsně po odstříhnutí, které se pohybují mezi hodnotami 0,30 g – 0,45 g. V druhém sloupci je váha listu, který byl zvážen bezprostředně po 28 minutovém měření. Třetí a čtvrtý sloupec je výpočtem změny váhy po 28 minutovém nedostatku vody v gramech (g) a procentech (%). Zde je patrné, že na váze listu po odstříhnutí byla závislá pouze hmotnost listu po měření. Podíváme-li se ovšem na procentuální změnu hmotnosti listu po měření, zjistíme, že byla u každého listu odlišná a pohybovala se mezi 8 – 18 %, a to nezávisle na váze listu po odstříhnutí. Například u listu č. 17 byla počáteční hmotnost listu po odstříhnutí 0,316 g a po měření 0,270 g, což se rovná zmenšení hmotnosti o 14,4 %. U listu č. 13 byla zase počáteční hmotnost listu po odstříhnutí 0,312 g, což bylo podobné, jako u listu č. 17, a po měření 0,279 g, což se rovnalo změně hmotnosti o 10,6 %.

List	Čas měření	Váha listu po odstříhnutí (g)	Váha listu po měření (g)	Změna váhy po měření (g)	Změna váhy po měření (%)
1	15:06 - 15:34	0,3312	0,3048	0,0264	7,97
2	15:41 - 16:09	0,3251	0,2982	0,0269	8,27
3	9:19 - 9:47	0,4127	0,3465	0,0662	16,04
4	10:01 - 10:29	0,3936	0,3221	0,0715	18,17
5	10:37 - 11:05	0,3123	0,2699	0,0424	13,58
6	11:10 - 11:38	0,3983	0,3402	0,0581	14,59
7	11:42 - 12:10	0,3191	0,2804	0,0387	12,13
8	12:16 - 12:44	0,3744	0,3266	0,0478	12,77
9	12:50 - 13:18	0,4294	0,3771	0,0523	12,18
10	13:24 - 13:52	0,3852	0,3445	0,0407	10,57
11	13:57 - 14:25	0,3351	0,2919	0,0432	12,89
12	9:20 - 9:48	0,3245	0,2906	0,0339	10,45
13	9:53 - 10:21	0,3116	0,2786	0,0330	10,59
14	10:25 - 10:53	0,4491	0,4013	0,0478	10,64
15	10:58 - 11:26	0,3536	0,3106	0,0430	12,16
16	11:31 - 11:59	0,3534	0,3065	0,0469	13,27
17	12:04 - 12:32	0,3158	0,2703	0,0455	14,41
18	12:38 - 13:06	0,3539	0,3052	0,0487	13,76
19	13:11 - 13:39	0,3062	0,2641	0,0421	13,75
20	13:44 - 14:12	0,3579	0,3182	0,0397	11,09

Tabulka č. 1 Váhy listů po 28 minutovém měření při nedostatku vody

V tabulce č. 2 můžeme vidět různé váhy listů před a po vysušení. Celé toto měření bylo prováděno po 28 minutách nedostatku vody, kdy byly listy vloženy do sušičky a zbavily se tak veškeré vody. Naměřená hmotnost po vysušení je pouze hmotnost sušiny. V prvním sloupci jsou váhy listů těsně po odstříhnutí, které se pohybují mezi hodnotami 0,30 g – 0,45 g. V druhém sloupci jsou váhy listu bezprostředně po vysušení. Třetí a čtvrtý sloupec je výpočtem změny váhy po vysušení v gramech (g) a procentech (%). Z těchto sloupců je patrné, že list zbavený veškeré vody změnil drasticky svou hmotnost. Toto můžeme nejlépe vidět ve čtvrtém sloupci, který nám znázorňuje, že změna hmotnosti po vysušení se pohybuje mezi 88 - 92 %. Změna váhy po vysušení se mezi jednotlivými listy už tolik nelišila, jako tomu bylo v případě 28 minutového měření. Po měření byl rozptýl změny hmotnosti 10 %, zatímco po vysušení pouze 4 %.

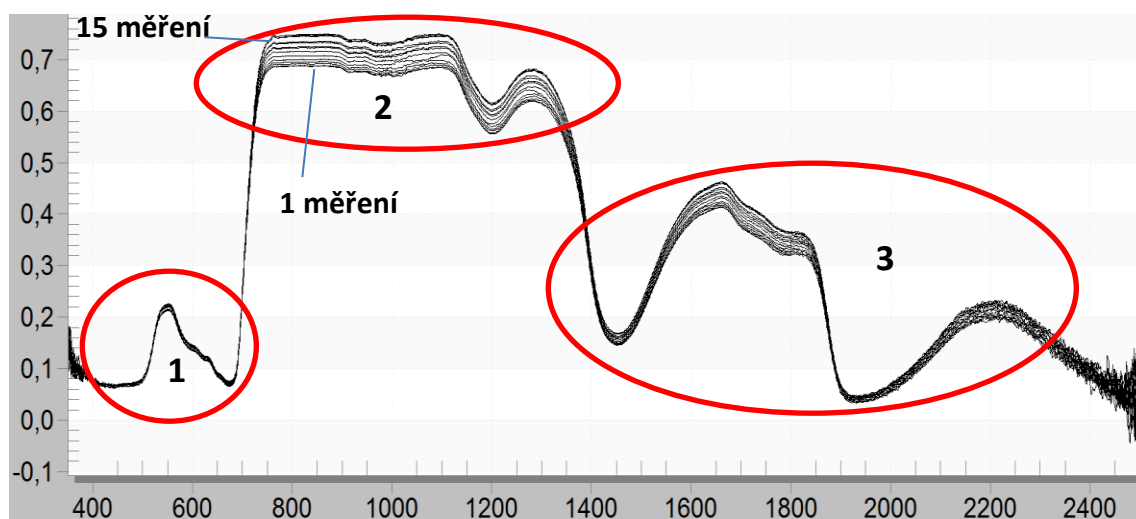
List	Čas měření	Váha listu po odstříhnutí (g)	Váha listu po vysušení (g)	Změna váhy po vysušení (g)	Změna váhy po vysušení (%)
1	15:06 - 15:34	0,3312	0,0366	0,2946	88,95
2	15:41 - 16:09	0,3251	0,0402	0,2849	87,63
3	9:19 - 9:47	0,4127	0,0406	0,3721	90,16
4	10:01 - 10:29	0,3936	0,0366	0,3570	90,70
5	10:37 - 11:05	0,3123	0,0297	0,2826	90,49
6	11:10 - 11:38	0,3983	0,0361	0,3622	90,94
7	11:42 - 12:10	0,3191	0,0317	0,2874	90,07
8	12:16 - 12:44	0,3744	0,0303	0,3441	91,91
9	12:50 - 13:18	0,4294	0,0391	0,3903	90,89
10	13:24 - 13:52	0,3852	0,0351	0,3501	90,89
11	13:57 - 14:25	0,3351	0,0322	0,3029	90,39
12	9:20 - 9:48	0,3245	0,0299	0,2946	90,79
13	9:53 - 10:21	0,3116	0,0296	0,2820	90,50
14	10:25 - 10:53	0,4491	0,0431	0,4060	90,40
15	10:58 - 11:26	0,3536	0,0297	0,3239	91,60
16	11:31 - 11:59	0,3534	0,0297	0,3237	91,60
17	12:04 - 12:32	0,3158	0,0304	0,2854	90,37
18	12:38 - 13:06	0,3539	0,0323	0,3216	90,87
19	13:11 - 13:39	0,3062	0,0287	0,2775	90,63
20	13:44 - 14:12	0,3579	0,0333	0,3246	90,70

Tabulka č. 2 **Váhy listů po vysušení**

Kromě teplotních snímků a měření různých teplot listů byly pořízeny ještě spektrální snímky listu. Ty byly zachyceny spektrometrem, a to každé 2 minuty po celou dobu měření. Výsledný graf tedy obsahuje 15 různých křivek. Na grafu můžeme vidět odrazivost listu při různých vlnových délkách. Na levé straně grafu je albedo (odrazivost) a na spodní straně vlnové délky v rozsahu 350 – 2500 nm. Odrazivost listů při každém dalším měření klesala, takže horní křivka grafu je zachycena při počátku měření a spodní na konci měření. Na hodnotě přibližně 500 nm začínal první výrazný růst odrazivosti, a to až na hodnotu 0,25, který byl způsoben zelenou barvou světelného spektra, jež má rozsah 520-565 nm, poté docházelo k opětovnému poklesu odrazivosti přes žlutou (565 – 590 nm), oranžovou (590 – 625 nm) a červenou (625 – 740 nm) barvu světelného spektra. Na hodnotě kolem 700 nm se hodnota odrazivosti prudce zvýšila až na hodnotu kolem 0,7. Na vlnové délce 760 nm začínalo krátkovlnné infračervené pásmo, které končilo na hodnotě 1400 nm. Kolem hodnoty 1400 nm docházelo opět k prudkému poklesu odrazivosti až k hodnotě 0,17. Na vlnové délce 1500 nm se odrazivost pozvolna zvyšovala a zastavila se na vlnové délce 1700 nm a odrazivosti 0,45. Poté začala opět pozvolna klesat a na hodnotě 1900 nm dosáhla svého minima 0,05. Od vlnové délky 1900 nm došlo k poslednímu nárůstu odrazivosti, který se zastavil

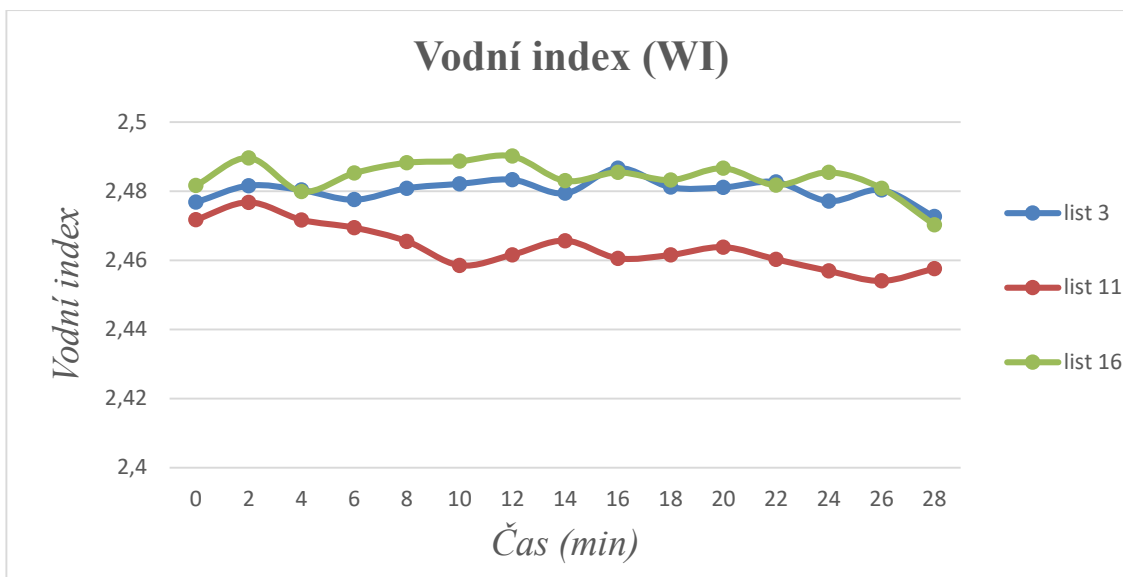
na vlnové délce 2200 nm a odrazivosti 0,2. Po tomto výstupu docházelo k poklesu až do nulových hodnot reflektance, která končila na vlnové délce 2500 nm. Větší rozptyl na začátku a na konci vlnového pásma je pro tato měření typický. Na grafu jsou nejpatrnější změny v krátkovlnném infračerveném pásmu, kdy se odrazivost lišila o zhruba 0,01 mezi jednotlivými měřeními. Ve viditelném spektru nebyly změny téměř patrné.

Pokud porovnáme reflektanci mezi jednotlivými listy, byl tvar křivky odrazivosti identický u všech listů s rozdílem v hodnotách reflektance. U některých listů se reflektance v průběhu měření měnila podstatně, u některých téměř vůbec.



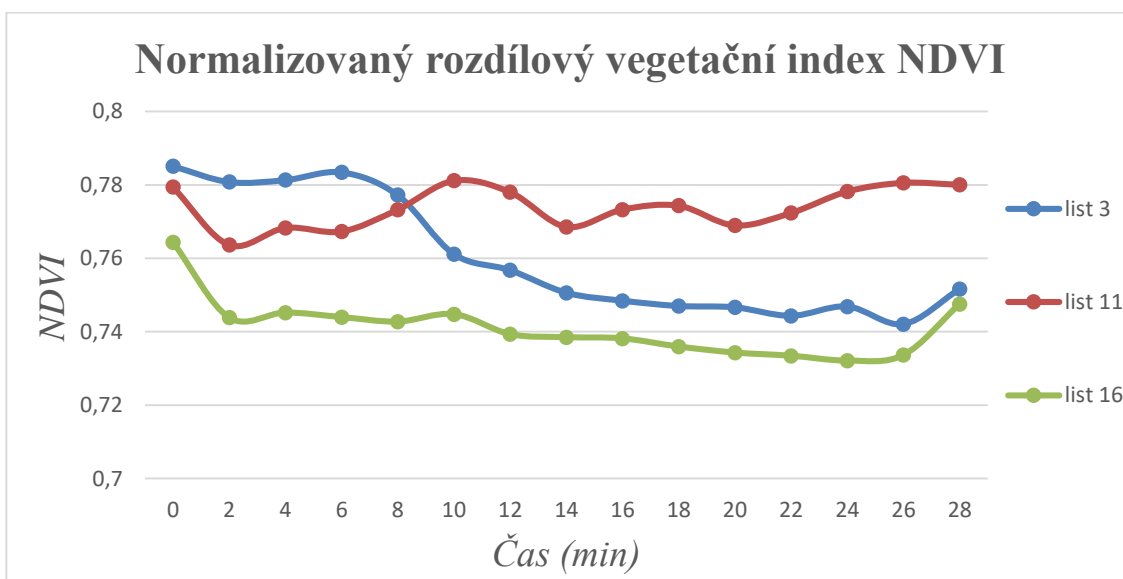
Graf č. 1 Odrazivost listu č. 1 při různých vlnových délkách v průběhu měření

Pro hlubší analýzu stavu listů, a pro porovnání vodního stresu, byly vypočteny indexy RVI, NDVI, WI, CWSI a RWC které byly získány na základě naměřené reflektance v průběhu měření. Do grafů č. 2, 3 a 4 byly vyneseny průběhy tří vybraných listů v rámci 28 minutového měření. První z těchto hodnot byl vodní index, který sloužil k výpočtu přibližného množství vody v porostu. Na grafu můžeme vidět tři vybrané listy, a hodnoty jejich vodního indexu v průběhu měření. Hodnoty vodního indexu v průběhu měření zůstávaly téměř na konstantních hodnotách s minimálním rozpětím 0,02. Lišila se pouze míra vodního indexu pro jednotlivé listy, kdy měl list č. 3 průměrnou hodnotu vodního indexu 2,48, list č. 11 - 2,46 a list č. 16 - 2,48.



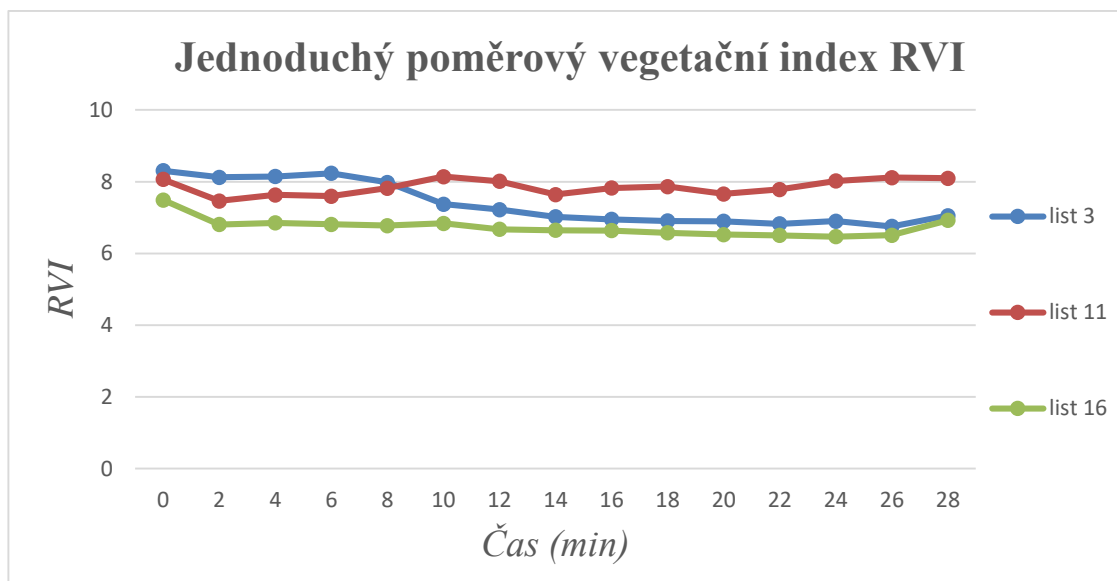
Graf č. 2 **Vodní index 3 vybraných listů v průběhu měření**

Další z hodnot byl Normalizovaný rozdílový vegetační index (NDVI), který se využívá ke zjištění přítomnosti živé zelené vegetace. Graf ukazuje, že hodnoty NDVI byly u listu č. 11 a 16 po celý průběh měření přibližně stejné a držely se u hodnot 0,77 a 0,74. List č. 3 vykazoval drobný výkyv. V prvních 8 minutách měření byla hodnota NDVI - 0,78, poté klesla až na 0,74.



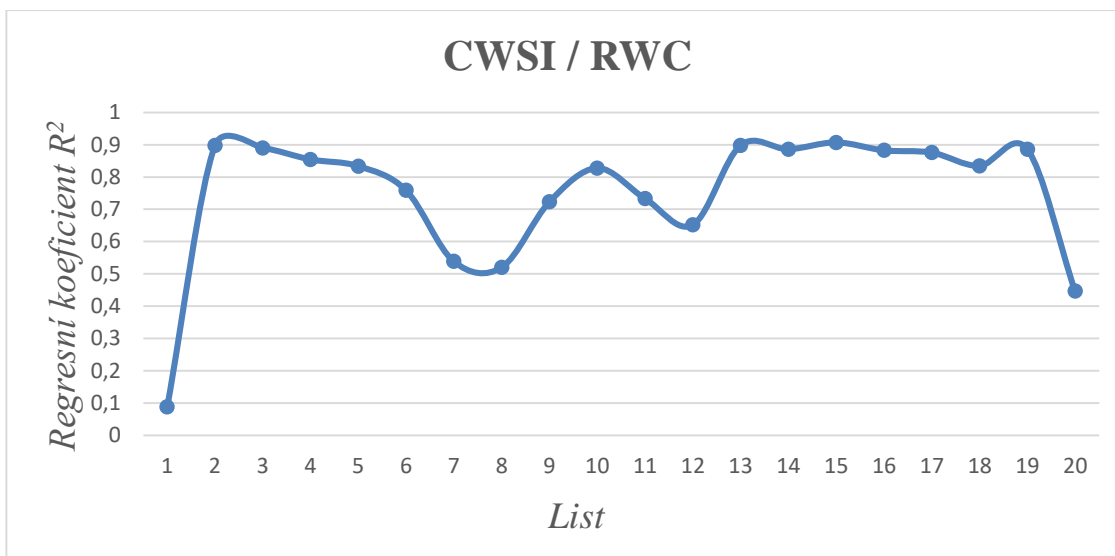
Graf č. 3 **Normalizovaný rozdílový vegetační index 3 vybraných listů v průběhu měření**

Jednoduchý poměrový vegetační index (RVI) je nejjednodušším indexem, který se používá ke zjištění množství přítomné zelené vegetace, či konkrétně obsahu biomasy listu nebo fotosyntetické kapacity. Z grafu je patrné, že byl průběh hodnot během měření u všech listů stejný, podobně jako u předchozích indexů. Lišila se jen hodnota RVI, která byla u listu č. 16 přibližně 7, a u listů č. 3 a 11 přibližně 7,5.



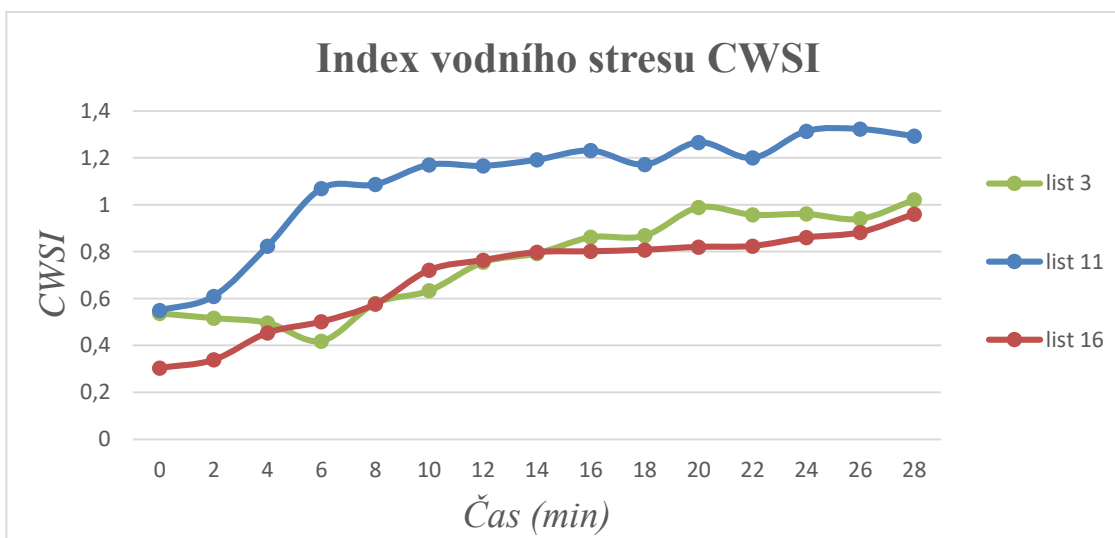
Graf č. 4 **Jednoduchý poměrový vegetační index 3 vybraných listů v průběhu měření**

Jedním ze základních ukazatelů obsahu vody v listu a vodního stresu, je relativní obsah vody (RWC), který již ovšem není počítán pomocí reflektance na různých vlnových délkách, nýbrž za pomoci hmotností listu po odstříhnutí, 28 minutovém měření a vysušení. Na grafu můžeme vidět porovnání indexu CWSI s relativním obsahem vody během zahřívání. Kromě listů č. 1, 7, 8 a 20, jejichž korelace byly nízké ($R^2 \leq 0,5$), byly korelace mezi oběma hodnotami významné. Závislost mezi oběma hodnotami se u většiny listů pohybovala mezi hodnotami $R^2 = 0,8 - 0,9$. Nízká korelace v případě listu č. 1, mohla být způsobena nedostatečným vysušením referenčního listu.



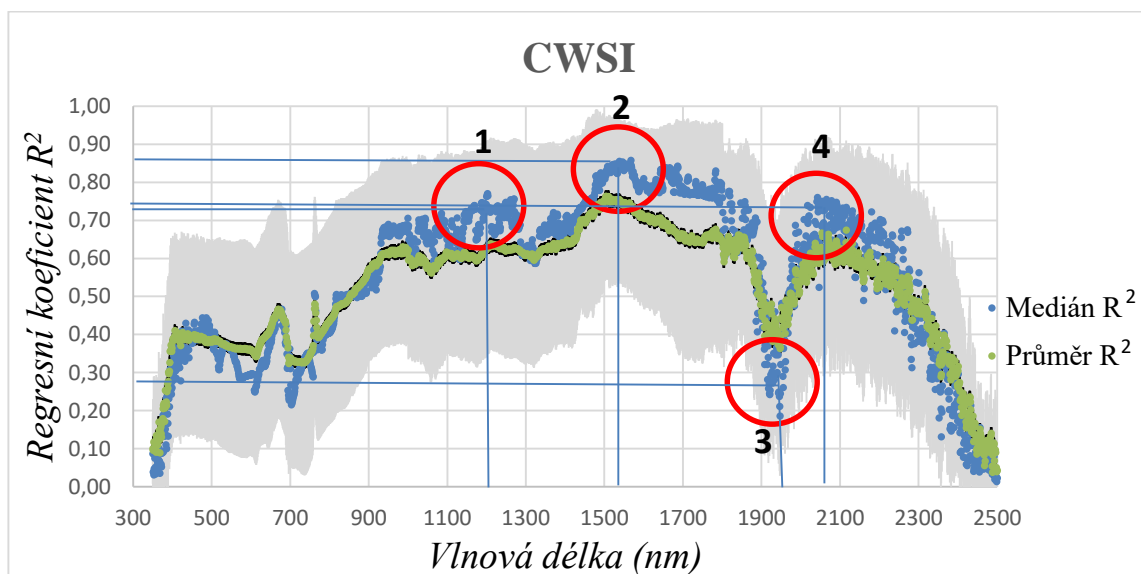
Graf č. 5 Porovnání relativního obsahu vody s indexem CWSI

Index vodního stresu (CWSI) porostu je používán pro určení vodního stresu porostu a pro plánování zavlažování rostlin v zemědělství kvůli úspoře vody a maximální produkci rostlin. Na grafu je znázorněn průběh vodního stresu tří vybraných listů během měření. Na všech listech se index vodního stresu postupně zvyšoval s různou mírou intenzity. U listu č. 3 je například počáteční hodnota CWSI - 0,5 a na konci měření přibližně 1. Naproti tomu dosáhl list č. 11, jehož počáteční hodnota je stejná s listem č. 3, koncové hodnoty 1,3.



Graf č. 6 Index vodního stresu 3 vybraných listů v průběhu měření

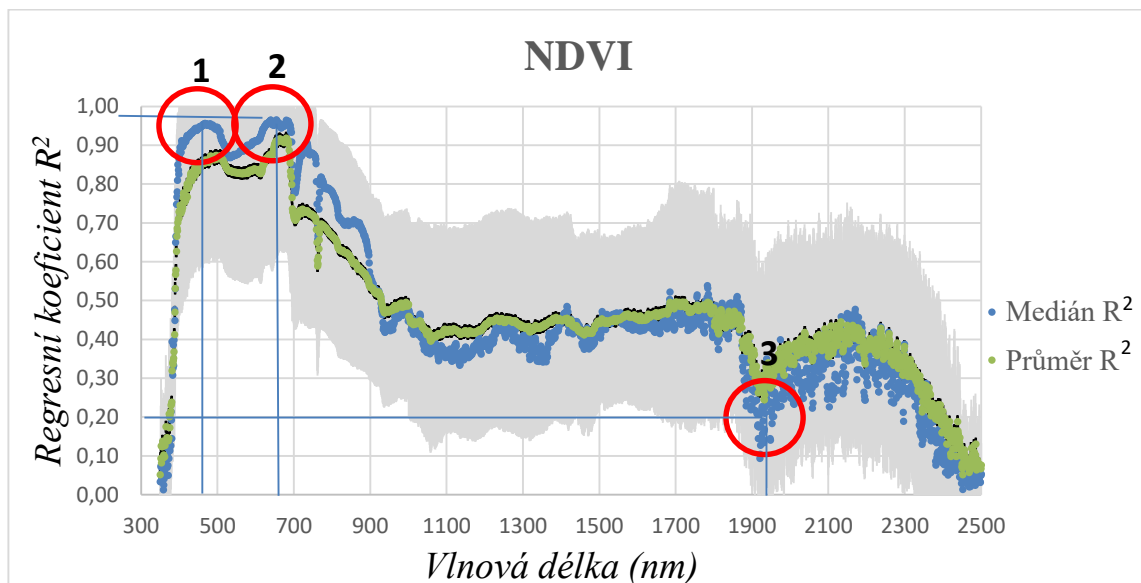
V následující části byla porovnána reflektance listů při jednotlivých měření ve všech vlnových délkách s vybranými indexy. Na grafech jsou zobrazeny vlnové délky a jejich míra korelace s daným indexem. Na grafu můžeme vidět korelaci jednotlivých vlnových délek s indexem CWSI. Regresní koeficient se zde pohyboval v hodnotách mezi $R^2 = 0,30 - 0,86$. Nejnižších hodnot bylo dosaženo ve viditelné části spektra (400 - 750 nm), kde se výsledný regresní koeficient pohyboval mezi $R^2 = 0,3 - 0,4$. V blízké části infračerveného spektra se začala míra korelace pozvolna zvyšovat, až dosáhla svého vrcholu ($R^2 = 0,86$) ve vlnové délce přibližně 1550 nm, kde se držela až do 1800 nm. Zde korelace prudce poklesla až na hodnotu regresního koeficientu $R^2 = 0,28$, a to na 1950 nm. V tomto bodě opět prudce vzrostla, až k hodnotě 0,75 ve 2050 nm, která zde byla druhou nejvyšší mírou korelace. Od tohoto okamžiku korelace už pouze klesala.



Graf č. 7 Porovnání indexu vodního stresu (CWSI) se spektrálními daty (350 – 2500 nm). Graf zobrazuje střední hodnoty (aritmetický průměr a medián) regresního koeficientu pro vztah mezi změnou indexu CWSI v čase a spektrální reflektance jednotlivých sledovaných spektrálních pásem.

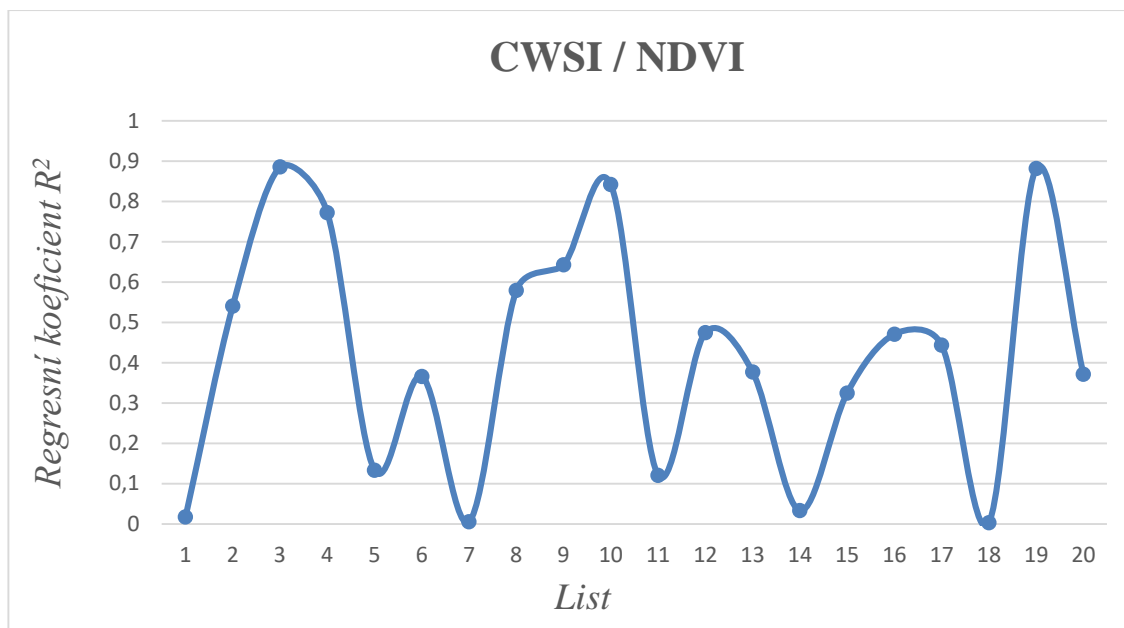
Na grafu můžeme vidět korelaci jednotlivých vlnových délek s indexem NDVI. Korelogram dosahuje v bodě 1 (470 nm) druhé nejvyšší hodnoty $R^2 = 0,95$. Dále nastupuje mírný pokles ve vlnové délce 550 nm na $R^2 = 0,86$. Poté zde korelace dosahují svého maxima $R^2 = 0,97$ v bodě 2 a vlnové délce 670 nm. Po této vlnové délce se

hodnoty R^2 snižují, až dosáhnou průměrné hodnoty 0,45 v rozpětí 900 – 1800 nm. V bodě 3 a vlnové délce 1900 nm dochází k náhlému prudkému poklesu korelace k hodnotě $R^2 = 0,20$ a následnému opětovnému vzrůstu k hodnotě $R^2 = 0,40$.



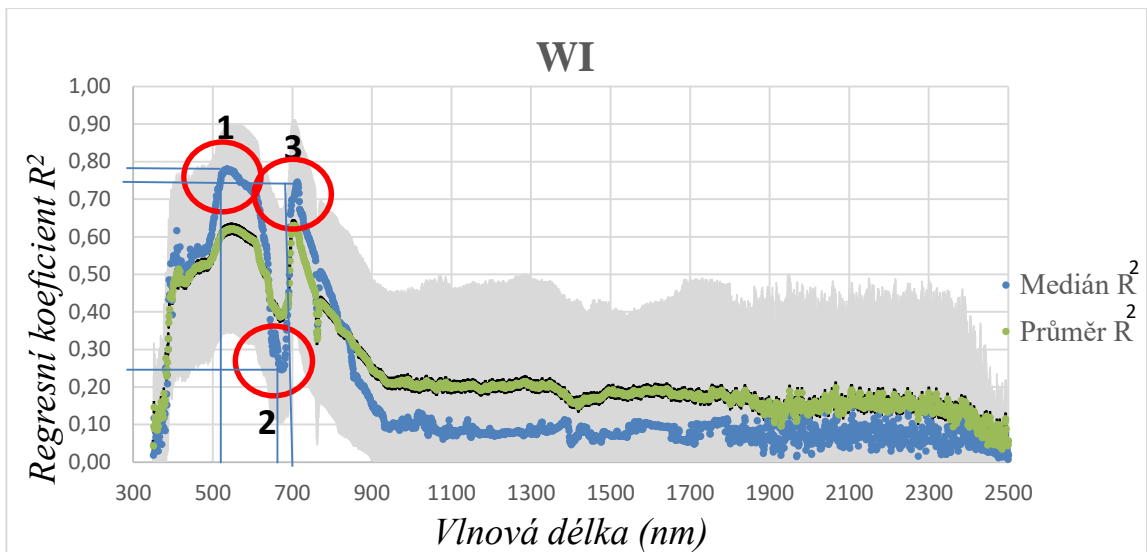
Graf č. 8 **Porovnání indexu NDVI se spektrálními daty (350 – 2500 nm).** Graf zobrazuje střední hodnoty (aritmetický průměr a medián) regresního koeficientu pro vztah mezi změnou indexu NDVI v čase a spektrální reflektance jednotlivých sledovaných spektrálních pásem.

Na grafu je znázorněna závislost indexu NDVI na indexu vodního stresu CWSI. U některých listů – 3, 4, 10, 19 závislost kulminovala k vysokým hodnotám ($R^2 = 0,8$). Ty znamenaly, že oba indexy na sobě významně závisely a hodnoty jednoho indexu se měnily v závislosti na druhém. U některých byla ovšem korelace zanedbatelná a téměř rovna 0. To znamenalo, že změna hodnot jednoho indexu neměla žádný vliv na hodnoty druhého indexu. Dá se tedy tvrdit, že závislost indexu CWSI a NDVI je neprůkazná.



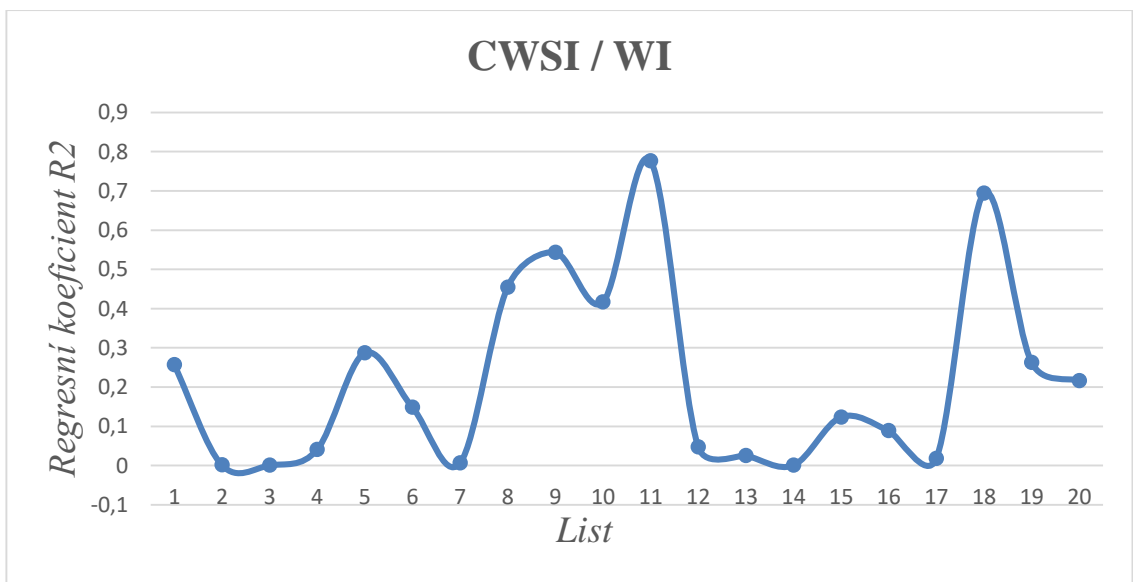
Graf č. 9 Porovnání indexu NDVI s indexem CWSI

Na grafu je znázorněna korelace jednotlivých vlnových délek s indexem WI. Na začátku viditelného spektra, tedy ve 400 nm byl zaznamenán prudký vzrůst korelace, až k bodu 1 na vlnové délce 530 nm a regresním koeficientu $R^2 = 0,79$, který dosahoval maxima indexu WI. Poté docházelo k prudkému poklesu korelace mezi hodnotami 600 – 700 nm, kde regresní koeficient dosahoval hodnot pouze $R^2 = 0,24$ v 650 nm v bodě 2. V tomto bodě docházelo k opětovnému prudkému nárůstu, kdy se v bodě 3 na vlnové délce 700 nm nacházela druhá nejvyšší hodnota $R^2 = 0,75$. Poté docházelo k opětovnému propadu až k hodnotě $R^2 = 0,10$, která je pro vlnové délky 900 – 2500 nm stejná.



Graf č. 10 Porovnání indexu WI se spektrálními daty. Graf zobrazuje střední hodnoty (aritmetický průměr a medián) regresního koeficientu pro vztah mezi změnou indexu WI v čase a spektrální reflektance jednotlivých sledovaných spektrálních pásem.

Na grafu můžeme vidět porovnání indexu WI s indexem vodního stresu CWSI. Z grafu je patrné, že u některých listů byly korelace větší jako například u listu č. 11 a 18, u většiny byly ovšem korelace zanedbatelné, tudíž byla závislost těchto dvou indexů spíše náhodná.

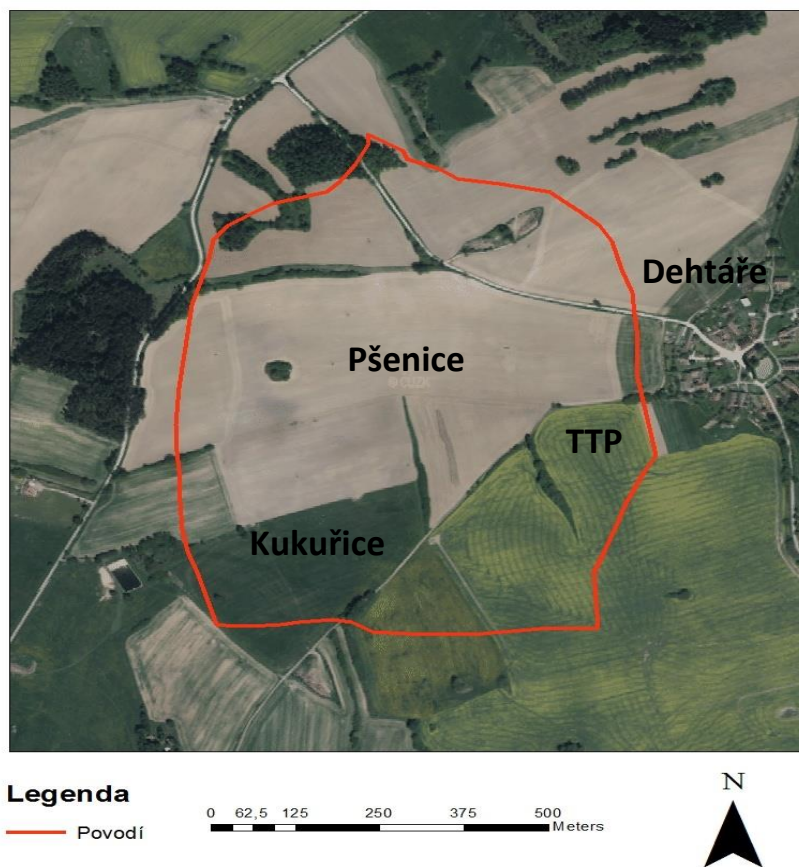


Graf č. 11 Porovnání indexu WI s indexem CWSI

5.2 Vodní stres povodí Dehtáře

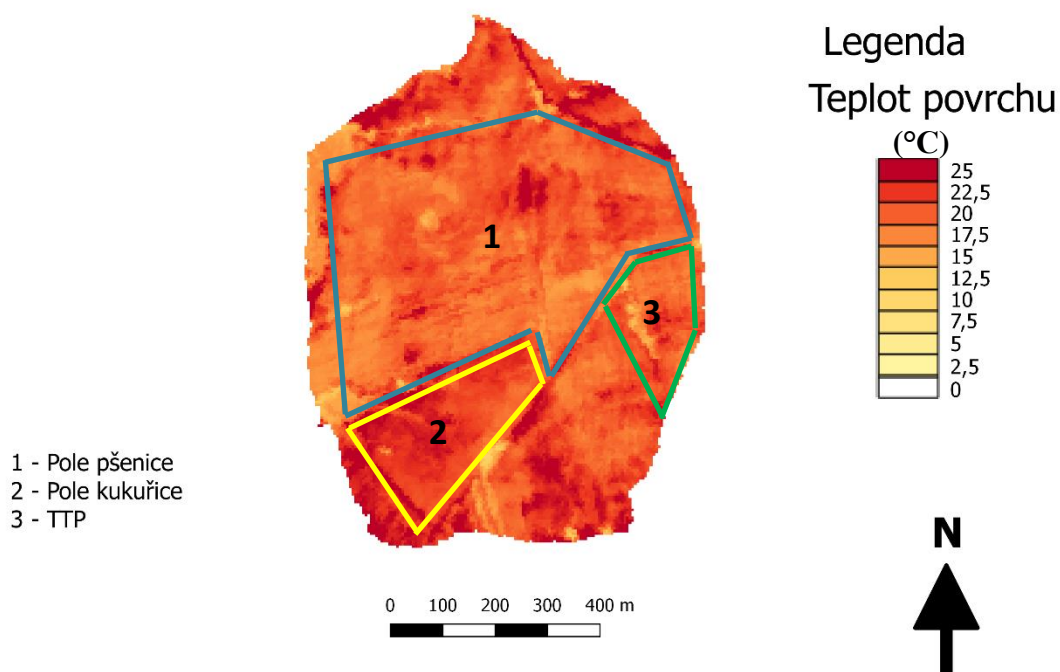
Poznatky, které byly získány při analýze vodního stresu konkrétního porostu, byly aplikovány na prostor ve větším měřítku, konkrétně na celé povodí Dehtáře. Pro tento účel byly vytvořeny mapy indexů NDVI, CWSI, albeda a teploty povrchu. Tyto mapy byly vytvořeny pomocí dílčích map (Teploty povrchu, digitálního modelu terénu, teploty vzduchu ve 2 m, rychlosti větru, minimální výšky porostu, maximální výšky porostu, spektrální reflektance 680 a 850 nm a masky), pomocí nichž se v programu QGIS a softwaru SEBCS SA vypočítaly charakteristiky pro celé povodí. Na těchto mapách můžeme vidět výřez, který představuje přesnou plochu daného povodí.

Na obrázku vidíme vymezené zájmové povodí z leteckého pohledu. Povodí je situováno vedle obce Dehtáře. Nachází se zde 3 hlavní druhy porostů – pšenice ozimá, kukuřice setá a TTP, kde převažuje Ovsík a Ostrice. Přes povodí vedou 2 cesty.



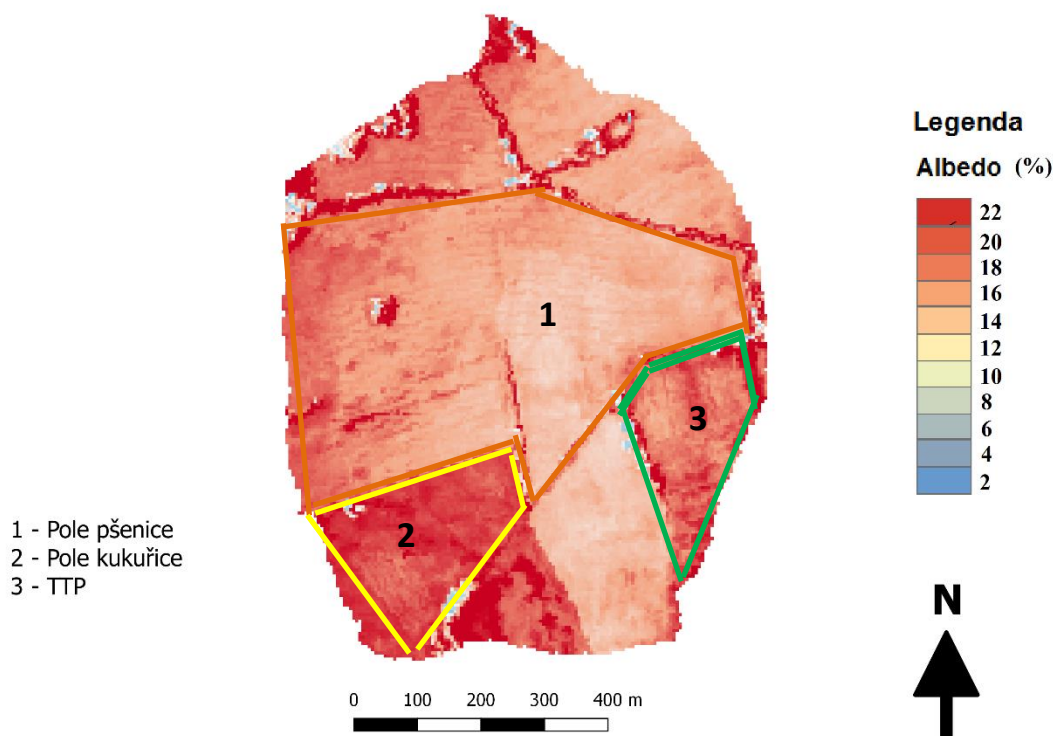
Obr. č. 5 Povodí Dehtáře

První a nejdůležitější veličinou pro výpočet vodního stresu je teplota. Ta se v tomto případě zjišťovala pomocí přepočtu na nadmořskou výšku podle adiabatického gradientu. Teplota vzduchu ve 2 metrech byla téměř konstantní na celém povodí a pohybovala se v rozmezí 14,5 – 15 °C. Teploty povrchu v povodí se pohybovaly mezi 10 – 23 °C. Teplota povrchu závisela na druhu vegetace, která se na daném bodě zrovna nacházela. Na povodí Dehtáře se nacházelo několik polí a luk s odlišnou pokryvností, která způsobovala odlišné teploty. Pole a louky byly vymezeny oblastmi, které jsou na obrázku reprezentovány odlišnými barvami a čísly. V oblasti č. 1 byla například v této době pěstována pšenice ozimá, která si udržovala teplotu mezi 15 - 18 °C. V oblasti č. 2 byla pěstována kukuřice setá, která udržovala teplotu o poznání vyšší a to mezi 20 – 23 °C. V oblasti č. 3 se vyskytovalo TTP s teplotou v rozmezí 17 – 20 °C



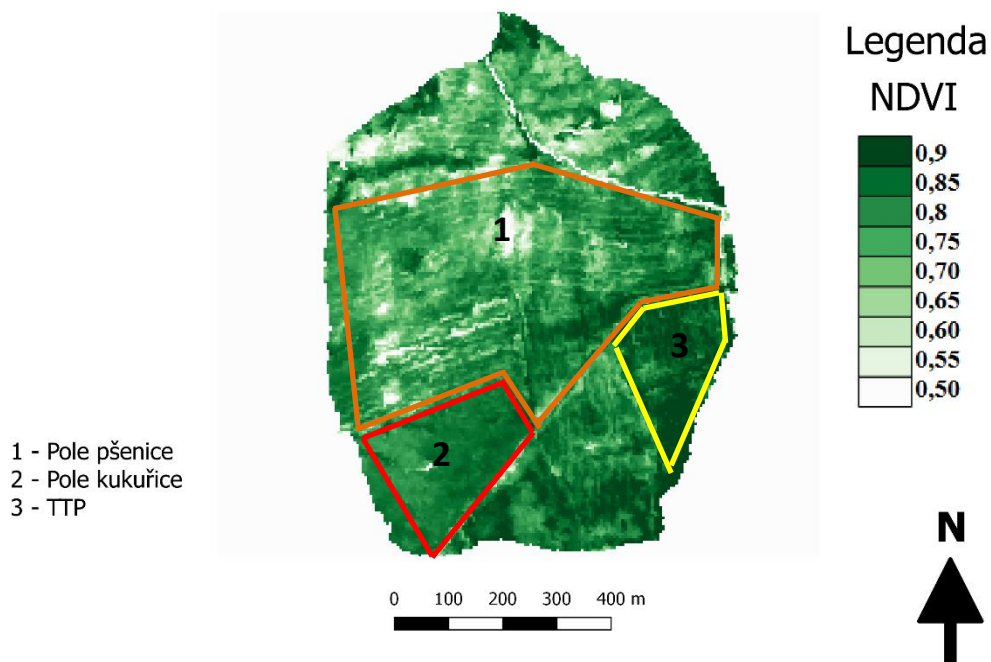
Obr. č. 6 Teplota povrchu povodí Dehtáře

Níže uvedený obrázek ukazuje, jaká je míra odrazivosti jednotlivých povrchů pro Dehtářské povodí. Albedo povrchu se lišilo v závislosti na druhu povrchu a na druhu a míře vegetace přítomné na daném povrchu. Ze snímku je patrné, kam až daný druh vegetace zasahoval, a jak moc se lišily odrazivosti jednotlivých kultur. Pole pšenice (1) odráželo záření ze 12 – 16 %, zatímco pole kukuřice (2) až 18 – 22 %. Albedo TTP (3) bylo 16 - 20 %.



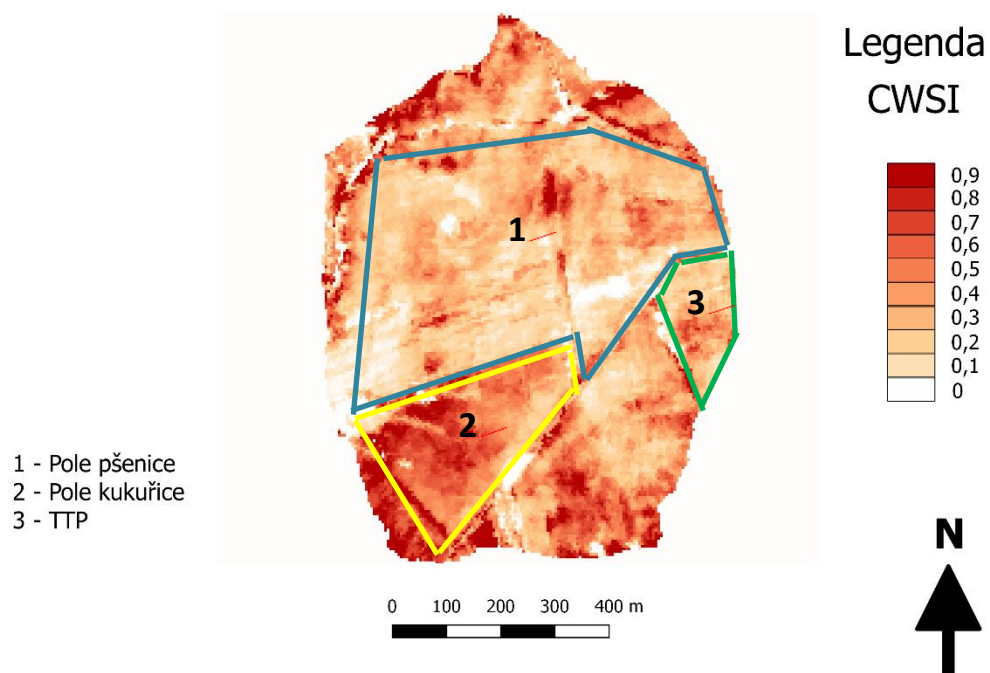
Obr. č. 7 Albedo povrchu povodí Dehtáře

Obrázek znázorňuje rozložení Normalizovaného rozdílového vegetačního indexu na povodí Dehtáře. Na území č. 1, kde rostla pšenice, je zřetelně vidět její řádkové vysazení. Mezi řádky bylo nižší NDVI než tam, kde byla vysazená pšenice. Hodnota NDVI se zde pohybovala mezi 0,6 – 0,8. Na území 2, kde rostla kukuřice, dosahoval NDVI vyšších hodnot s nižším rozpětím – 0,8 – 0,87. Na území 3, kde se vyskytoval TTP a převažoval ovsík a ostřice, bylo NDVI největší – 0,83 – 0,9.



Obr. č. 8 **NDVI povodí Dehtáře**

S jakou intenzitou v dané době projevoval vodní stres na plochu povodí Dehtáře, vidíme na následujícím obrázku. Na poli pšenice (1) se projevoval vodní stres v malé míře na celé jeho ploše (0 – 0,3). Vysokou mírou se vodní stres projevoval na pole kukuřice (2), kde bylo široké rozmezí indexu CWSI s hodnotami v rozmezí 0,3 – 0,9, které značí, že rostliny kukuřice byly ve velkém vodním stresu. Vyšší míra vodního stresu byla zjištěna na poli kukuřice na západní straně. I přes větší množství biomasy byly na TTP (3) poměrně nízké hodnoty CWSI (0,1 – 0,4).



Obr. č. 9 CWSI povodí Dehtáře

6. DISKUZE

Reflektance rostliny je dána mnoha faktory. Například na ní působí okolní prostředí a obsah chlorofylu a jiných pigmentů (karoteny, anthokyanidy, xanthofyly). Zásadní je i obsah vody v buňce a v mezibuněčných prostorech a také povrchová struktura listu. Neméně důležitý je i počet buněčných vrstev listu a jejich struktura.

Míra reflektance rostliny je v různých vlnových délkách odlišná. Tyto vlnové délky mohou být rozděleny do tří kategorií:

Dle Yu a kol. (2000) je první oblastí reflektance viditelné spektrum, které je určeno rozmezím vlnových délek 500 – 750 nm. Dominantní roli zde hraje obsah pigmentů, především chlorofylu, karotenu a xantofylu. Druhou oblastí je reflektance krátkovlnného blízkého infračerveného záření v rozmezí 750 – 1350 nm, která je typická svou vysokou reflektancí a malou absorpcí záření, která je navíc ovlivněná především vnitřní strukturou listu. Třetí oblastí je reflektance středního a dlouhovlnného blízkého infračerveného záření v rozmezí 1350 – 2500 nm Gillon a kol. (2003).

Odrazivosti ostatních listů se mezi sebou nelišily z hlediska celkového průběhu reflektance v měřeném rozsahu vlnových délek, ale spíše z hlediska změn reflektance v průběhu úbytku vody, kdy se odrazivosti lišily u každého listu v rozsahu 1 - 3 %. Podobné závěry uvádějí Richardson a kol (2003) i Penuelas (1999).

Průběh jednotlivých indexů v rámci jednotlivých měření je znázorněn v grafech č. 2, 3, 4 a 6. Výsledné hodnoty ukazují, že indexy se během měření téměř neměnily a zůstávaly na konstantních hodnotách. Výjimkou je graf č. 6 vodního stresu, který začínal na určité hodnotě, a v průběhu měření se tato hodnota zvyšovala. Konkrétně u listu č. 16 byla počáteční hodnota vodního stresu 0,3 a po 28 minutovém zahřívání vystoupala až k hodnotě 0,95. Wang (2005) tvrdí, že je to způsobeno zvyšující se teplotou listu a tím i vyšší mírou transpirace. Jednoduše řečeno, čím vyšší je teplota listu oproti svému okolí, tím se index vodního stresu zvyšuje. Míra vodního stresu je ovšem závislá jak na době a míře ohřívání, tak na množství vody obsažené v listu a na struktuře a velikosti listu (Jones a kol. 2002).

Celkové hodnoty indexů, NDVI a WI, měly u všech listů téměř stejné hodnoty s rozdílem dosahujícím několika setin. Index RVI se u listů lišil o hodnoty 1-2. Každý list měl hodnoty a průběh CWSI odlišný podle toho, v jaké míře se u něj vodní stres projevoval. Na počátku měření, kdy byl list ještě dostatečně nasycen vodou, se vodní stres pohyboval mezi hodnotami 0,30 – 0,94, a na konci měření, kdy už list trpěl nedostatkem vody, mezi hodnotami 0,83 - 1,48. U každé rostliny se vodní stres projevoval v jiné míře a s jinou intenzitou. Míru vodního stresu určoval hlavně obsah vody a hmotnost a velikost listu. Jak ukazuje graf č. 5, relativní obsah vody se ovšem nijak průkazně nepodílel na míře CWSI.

CWSI byl dále porovnán s indexy NDVI, RVI a WI, kvůli případné korelaci, podle které by se dal vodní stres vypočítat bez pomoci teplot, ale pouze pomocí spektrálních dat. Po porovnání jednotlivých indexů s CWSI vyšlo najevo, že ani jeden z vypočtených indexů nekoreloval s vodním stresem. Výsledný regresní koeficient R^2 vycházel u každého indexu průměrně 0,2, což nenaznačuje žádnou spojitost mezi indexem CWSI a ostatními indexy.

Indexy NDVI, CWSI a WI byly navíc porovnány se spektrálními daty v rozsahu 350 – 2500 nm. Cílem tohoto porovnání bylo zjistit, jaké vlnové délky korelují s danými indexy.

Prvním porovnávaným indexem byl CWSI (graf č. 7). Zvýšené korelace indexu ($R^2 = 0,7$) s naměřenými reflektancemi byly naměřeny ve třech pásmech: 1150 – 1300 nm (bod 1), 1500 – 1600 nm (bod 2) a 2000 – 2200 nm (bod 4), které kulminovaly v 1200, 1550 a 2050 nm s maximem v 1550 nm ($R^2 = 0,86$). Výrazný propad ($R^2 = 0,24$) byl naměřen na vlnové délce 1950 nm, který se nacházel mezi dvěma největšími korelacemi v bodě 3. Velmi nízké korelace ($R^2 \leq 0,5$) byly také naměřeny v 350 - 900 nm a 2300 – 2500 nm.

Dalším porovnávaným indexem byl NDVI (graf č. 8). Zde bylo zjištěno, že dochází k velké korelaci ($R^2 = 0,9$) ve dvou rozmezích vlnových délek, a to 400 – 550 nm (bod 1) a 600 – 700 nm (bod 2). Korelace kulminovaly ve 470, 650 a 700 nm s maximem v 700 nm ($R^2 = 0,96$). Naopak nízké korelace ($R^2 \leq 0,5$) byly naměřeny mezi vlnovými délkami 900 – 2500 nm s minimem v 1900 nm ($R^2 = 0,26$), (bod 3).

Posledním porovnávaným indexem byl WI (graf č. 10). Z tohoto grafu je vidět, že korelace již nedosahovaly tak průkazných hodnot, jako v případě indexu NDVI. I zde ovšem byly naměřeny dvě rozmezí vlnových délek, kde docházelo ke zvýšené korelaci ($R^2 = 0,7$) a to 500 – 600 nm (bod 1) a 700 – 730 nm (bod 3), které kulminovaly v 530 a 720 nm s maximem v 530 nm ($R^2 = 0,79$). Velký propad ($R^2 = 0,26$) na vlnové délce 650 nm byl naměřen v bodě 5.

Analýza vodního stresu a jeho faktorů, byla prováděna i ve větším měřítku, konkrétně pro povodí Dehtáře (mapa č. 1), kde se hodnotily tři největší plochy, které se zde nacházely – pole pšenice ozimé, pole kukuřice seté a TTP. Na výsledných obrázcích je zobrazeno plošné rozložení jednotlivých ukazatelů, a jsou zde patrné rozdíly mezi jednotlivými stanovišti.

Jelikož se na celém povodí nevyskytovalo žádné velké převýšení či zamokření, měla teplota vzduchu u celého povodí konstantní hodnoty 14 – 14,5 °C. Obrázek č. 6 nám ukazuje, jaké bylo rozložení teplot při povrchu vegetace. Pole pšenice mělo oproti kukuřici o mnoho menší teplotu – 16 – 19 °C. Keener a Kircher (1982) ve svém článku píší, že pokud má rostlina dostatek vody a plně transpiruje, tak chladicí vlastnosti transpirace udržují teplotu listu na relativně nízkých hodnotách. Hodnoty byly měřené v polovině května, kdy byla pšenice již plně vzrostlá a funkční a plně transpirovala, čímž ochlazovala své okolí mnohem více než kukuřice. Kukuřice, která si udržovala teplotu 20 – 23 °C, byla na druhou stranu vysazena teprve nedávno, a ještě se nestačila plně zapojit a zakořenit. Navíc byla v rané fázi vývoje, kdy potřebovala větší teplotu a množství vody pro svůj růst a hlavně průběh fotosyntézy. Její biomasa ještě nebyla natolik rozrostlá a tím pádem nemohla ochlazovat své okolí transpirací tolik jako pšenice. Teploty TTP se více podobaly teplotám pšenice, i přesto, že byla louka zarostlá travinami, nebyly ovšem ještě natolik vzrostlé aby docházelo k většímu ochlazení, a proto se její teploty pohybovaly mezi hodnotami 17 – 20 °C.

Obrázek č. 7 znázorňuje albedo povodí Dehtáře. Albedo pole pšenice bylo velmi nízké, mezi 12 – 16 %. Důvodem pro tak nízké hodnoty na rozdíl od kukuřice či TTP je, že vegetace pšenice byla již plně vzrostlá a měla více vrstev listů, přes které muselo sluneční záření procházet, to se pak odrazilo od půdy a zpět od listů, čímž se velká část

odraženého záření uvěznila mezi vrstvami vegetace. Albedo TTP se pohybovalo mezi 16 – 20 % a kukuřice až na 18 – 22 %. Hodnoty zde byly vyšší, protože oba porosty ještě nebyly natolik vzrostlé a jejich listy ještě netvořily tolik vrstev, jako v případě pšenice. Příčinou vyšších hodnot albeda mohla být i nižší vlhkost půdy (Lal, 2005).

Obrázek č. 8 nám zobrazuje, jaké byly hodnoty indexu NDVI. Jak již bylo dříve řečeno, NDVI se především používá pro monitorování fotosyntézy vegetace, jelikož zelené listy velmi dobře pohlcují viditelnou část spektra, což vyústí v pozitivní NDVI hodnoty (Matsushita, 2007). Díky menší ploše zelené vegetace nabývalo NDVI menších hodnot u pole pšenice (0,6 – 0,8) a to na celé ploše. Vysoké hodnoty NDVI byly zaznamenány na poli kukuřice (0,8 – 0,87) i na TTP (0,83 – 0,9), a to i přesto, že nebyly ještě příliš vzrostlé. Důvodem je větší plocha, kterou listy dané kultury zabíraly i v raném období svého růstu.

Index vodního stresu porostu CWSI, který je zachycen na obrázku č. 9 se významně lišil na každém zkoumaném porostu. Díky malé ploše listů, pomocí níž se rostlina pomaleji zahřívala, a nižší teplotě povrchu listu, byl na poli pšenice naměřen nejmenší vodní stres, který měl v danou dobu hodnoty v rozmezí pouze 0 – 0,3. Za nižší CWSI může i nižší náročnost pšenice na vodu v porovnání s kukuřicí (Wang a kol., 2005), které bylo v dané době v půdě dostatek. I přes vyšší míru vegetace byly na TTP naměřeny hodnoty vodního stresu od 0,1 do 0,4. Důvodem mohou být lepší hydrologické podmínky stanoviště a také dosud nepříliš vzrostlá vegetace, která byla v nedávné době pokosena. Vysokou mírou se projevoval vodní stres na poli kukuřice, kde bylo široké rozmezí indexu CWSI s hodnotami mezi 0,3 – 0,9. Je zajímavé, že vyšší míra vodního stresu se vyskytovala na západní straně pole, kde se držela u hodnot 0,8. Příčinou mohl být jiný typ půdy a také její vlhkostní režim, nebo jiná sklonitost terénu. Podíváme-li se na teploty povrchu, je vidět, že v této oblasti byly vyšší teploty, což značí, že zde byla velmi málo vyvinutá kukuřice, která potřebovala ke svému růstu více vody (Gonzáles-Dugo a kol., 2005).

7. ZÁVĚR

Vodní stres byl hodnocen na porostu slunečnice během měření, které trvalo 28 minut a kdy listy slunečnice trpěly stále větším nedostatkem vody. Během měření byly pořízeny termální a spektrální data, díky nimž byl vypočten vodní stres a další příslušné indexy, které byly dále použity pro vzájemné porovnání. Z naměřených a vypočtených dat byly vytvořeny tabulky a grafy, které znázorňovaly průběh jednotlivých indexů, jejich vzájemné porovnání a porovnání se spektrálními daty. Z výsledných hodnot vodního stresu vyplynulo, že se významně lišil jak v intenzitě u jednotlivých listů, tak i mezi listy navzájem. Z výsledků porovnání spektrálních dat s indexy byly patrné vlnové délky, které významně korelovaly s daným indexem a vlnové délky, kde docházelo k výrazným propadům korelace.

Odrazivost listů, získaná z měřených spektrálních dat, měla pro každý měřený list téměř identický průběh a hodnoty s charakteristickými kulminacemi a propady v určitých vlnových délkách. V průběhu vysušování se ve větší míře odrazivost měnila pouze v určitých vlnových délkách, konkrétně 750 – 1350 nm a 1600 – 1850 nm.

Vodní stres listů slunečnic se významně lišil jak v intenzitě během měření, tak v celkových hodnotách. U všech listů slunečnic se hodnota CWSI během měření navyšovala, což značilo, že se rostlina dostávala do velkého vodního stresu. Největších rozdílů se dosahovalo v hodnotách CWSI na počátku a na konci měření, kdy se od sebe jednotlivé listy odlišovaly o hodnoty 0,1 - 0,6. Během měření nebyly rozdíly průběhu CWSI pro jednotlivé listy tak markantní, každý list ovšem reagoval na teplotu odlišnou mírou vodního stresu a podle toho se jeho míra zvyšovala více či méně, nebo dokonce mírně klesala. Celkově index CWSI závisel na velikosti listu a na jeho obsahu vody.

Porovnáním spektrálních dat s jednotlivými indexy v průběhu měření vyšly vlnové délky, které významně korelovaly s daným indexem a podle kterých by se dal index přibližně vypočítat, a některé, které nekorelovaly téměř vůbec, a které neměly pro daný index žádný význam.

V případě indexu CWSI docházelo k významným kulminacím regresního koeficientu R^2 ve vlnových délkách 1100 – 1300 nm, 1500 – 1800 nm a 2000 – 2200 nm

s maximem v 1550 nm ($R^2 = 0,87$). Naopak k výraznému propadu korelace docházelo ve vlnových délkách 1900 – 2000 nm s minimem v 1950 nm ($R^2 = 0,26$).

Regresní koeficient indexu NDVI velmi výrazně kulminoval ve viditelném spektru a vlnových délkách 400 – 800 nm, kde $R^2 \geq 0,9$. Maximum bylo naměřeno ve vlnové délce 670 nm ($R^2 = 0,97$). Výrazný propad a zároveň minimum bylo zaznamenáno ve vlnové délce 1900 nm ($R^2 = 0,20$).

V případě indexu WI již nedosahoval regresní koeficient tak vysokých hodnot. Nejvyšší hodnoty korelace, kde byl $R^2 \geq 0,7$, byly naměřeny ve vlnových délkách 500 – 600 nm a 700 – 730 nm s maximem v 530 nm ($R^2 = 0,79$). Výrazný propad korelace byl zaznamenán mezi dvěma kulminacemi ve vlnové délce 650 nm ($R^2 = 0,26$).

Analýza vodního stresu a jeho faktorů, byla prováděna i ve větším měřítku, konkrétně pro povodí Dehtáře (mapa č. 1), kde se hodnotily tři největší plochy, které se zde nacházely – pole pšenice ozimé, pole kukuřice seté a TTP. Na výsledných obrázcích je zobrazeno plošné rozložení jednotlivých ukazatelů, a jsou zde patrné rozdíly mezi jednotlivými stanovišti.

Teplota vzduchu měla u celého povodí konstantní hodnoty 14 – 14,5 °C. Pole pšenice, které bylo plně vyvinuté a zapojené mělo teplotu – 16 – 19 °C. Teploty TTP se podobaly teplotám pšenice, a pohybovaly se mezi hodnotami 17 – 20 °C. Nejvyšší teplotu si udržovala kukuřice, z důvodu své rané fázi vývoje a nedostatečnému zakořenění a zapojení do krajiny, a to 20 – 23 °C.

Albedo pole pšenice bylo velmi nízké, mezi 12 – 16 %. U TTP byly hodnoty albeda vyšší a pohybovaly se mezi 16 – 20 %, a u kukuřice až v rozmezí 18 – 22 %.

NDVI nabývalo menších hodnot u pole pšenice (0,6 – 0,8) a to na celé jeho ploše. Vysoké hodnoty NDVI byly zaznamenány na poli kukuřice (0,8 – 0,87) i na TTP (0,83 - 0,9).

Na poli pšenice byl naměřen nejmenší vodní stres, který měl v danou dobu hodnoty v rozmezí pouze 0 – 0,3. Velmi nízký vodní stres s hodnotami 0,1 – 0,4 se vyskytoval i na TTP. Vysokou mírou se projevoval vodní stres na pole kukuřice, kde vyšlo široké rozmezí indexu CWSI s hodnotami mezi 0,3 – 0,9.

8. ZDROJE

- BARTON, C. V. M., NORTH, P. R. J. *Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index: Model and sensitivity analysis*. Remote Sensing of Environment, vol. 78, issue 3, Calgary, December 2001, 264 - 273 s.
- BEDIENT, Philip, B., a Wayne Charles HUBER. *Hydrology and floodplain analysis*. 3rd ed. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall, 2002, 767 s. ISBN 0-13-032222-9.
- BEDNÁŘ, Jan. *Pozoruhodné jevy v atmosféře: atmosférická optika, akustika a elektřina*. Praha: Academia, 1989, 236 s. ISBN 80-200-0054-2.
- BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ (eds.). *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. V Praze: Karolinum, 2009, 351 s. ISBN 978-80-246-1598-1.
- BROGE, N. H., LEBLANC, E. *Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density*. Remote Sensing of Environment, vol. 76, issue 2, Calgary, May 2001, 156 – 172 s.
- CAMPBELL, James B. *Introduction to remote sensing*. New York: Guilford Press, 1987, 662 s. ISBN 0-89862-776-1.
- DEMEK, J. *Obecná geomorfologie*. Academia. Praha. 1987, 476 s.
- DETAR, W. R., PENNER, J. V., FUNK, H. A. *Airborne remote sensing to detect plant water stress in full canopy cotton*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, vol. 49, California, May 2006, 655 – 665 s.
- D'ODORICO, Paolo a Amilcare PORPORATO. *Dryland ecohydrology*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2006, 153 s. ISBN 1402042604.
- FITTER, Alastair a Robert HAY. *Environmental physiology of plants*. 3rd ed. San Diego: Academic press, 2002, 367 s. ISBN 0-12-257766-3.
- GILLON, D., DAURIAC, F., DESHAYES, M., VALETTE, J. C., MORO, C. *Foliage moisture content and spectral characteristics using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS)*. France, Montpellier, 2002, 13 s.

GONNzáLE-DUGO, M. P., MORAN, M. S., MATEOS, L., BRYANT, R. *Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity*. Irrig Sci, vol. 24, Spain, 2006, 233 - 240 s.

HABĚTÍN, Vladimír, Zdeněk TRDLIČKA a Eduard KOČÁREK. *Geologické vědy: přehled mineralogie, petrografie a geologie*. 2., upr. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1976, 400 s.

HATFIELD, J. L., GITELSON, A. A., SCHEPERS, J. S., WALTHALL, C. L. *Application of Spectral Remote Sensing for agronomic decision*. Celebrate the Centennial (Supplement to Agronomy Journal), 2008, 117 – 131 s.

HAVLÍČEK, V. a kol. *Agrometeorologie*. 1. vydání. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1986, 262 s.

HUDÁK, Ján. *Biológia rastlín*. Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo, 1989, 396 s. ISBN 80-08-00065-1.

JARVIS, P. G., MCNAUGHTON, P. G. *Stomatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region*. Advances in Ecological Research, vol. 15, Calgary, 1986, 49 s.

JONES, P. D., NEW, M., PARKER, D. E., MARTIN, S., RIGOR, I. G. *Surface air temperature and its changes over the past 150 years*. Reviews of Geophysics, vol. 37, Issue 2, Manchester, May 1999, 199 s.

JONES, Hamlyn, G. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. 2nd ed., USA: Cambridge University Press, New York, 1992, 428 s. ISBN 0-521-42524-7.

JONES, Hamlyn, G., STOLL, M., SANTOS, T., DE SOUSA, C., CHAVES, M. M., GRANT, O. M. *Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine*. Journal of Experimental Botany, vol. 53, No. 378, Portugal, November 2002, 2249 – 2260 s.

KACHLÍK, Václav a Ivo CHLUPÁČ. *Základy geologie, Historická geologie*. Praha: Karolinum, 2001, 342 s. ISBN 80-246-0212-1.

- KAVKA, Bohumil a Jaroslava ŠINDELÁŘOVÁ. *Funkce zeleně v životním prostředí*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1978, 240 s.
- KEENER, M. E., KIRCHER, P. L. *The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions*. Agricultural Meteorology, vol. 28, Amsterdam, 1983, 339 – 349 s.
- KOLEK, Jozef a Vladimír KOZINKA (eds.). *Physiology of the Plant Root System*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992, 382 s.
- LAL, R., *Encyclopedia of Soil Science*. 2nd ed., Hungary: CRC Press, 2005, 2060 s. ISBN 978-0-8493-3830-4.
- LAMBERS, Johannes Thieo, F. Stuart CHAPIN a Thijs Leendert PONS. *Plant physiological ecology*. New York: Springer-Verlag, 1998, 540 s. ISBN 0-387-98326-0.
- LARCHER, Walter. *Fyziologická ekologie rostlin*. Praha: Academia, 1988, 361 s.
- LAURY, CH., DOMINIQUE, V., R., S. *Imaging techniques and the early detection of plant stress*. Trends in Plant Science, vol. 5, November 2000, 495-501 s.
- MATSUSHITA, B., WEI, Y., CHEN, J., ONDA, Y., QIU, G. *Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-Density Cypress Forest*. Sensors, vol. 7, Japan, 2007, 2636 – 2651 s.
- NETOPIIL, Rostislav. *Fyzická geografie*. Vyd. 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1981, 258 s.
- PENKA, Miroslav. *Transpirace a spotřeba vody rostlinami*. Praha: Académia, 1985, 25 s.
- PENUELAS, J., INQUE, Y. *Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves*. Photosynthetica, vol. 36, Barcelona, 1999, 355 – 360 s.
- PENUELAS, J., PINOL, J., OGAYA, R., FILELLA, I. *Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970)*. Remote Sensing, vol. 18, no. 13, Barcelona, 1997, 2869 – 2875 s.

PETTORELLI, N., RYAN, S., MUELLER, T., BUNNEFELD, N., JEDREJEWSKA, B., LIMA, M., KAUSRUD, K. *The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology*. Climate Research, vol. 46, London, January 2011, 15 – 27 s.

POLÁŠKOVÁ, Anna. *Úvod do ekologie a ochrany životního prostředí*. Praha: Karolinum, 2011, 284 s. ISBN 978-80-246-1927-9.

PROCHÁZKA, Stanislav. *Botanika: morfologie a fyziologie rostlin*. Vyd. 3., V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2007, 242 s. ISBN 978-80-7375-125-8.

PROCHÁZKA, S., MACHÁČKOVÁ, I., KREKULE, J., ŠEBÁNEK, J. a kol. *Fyziologie rostlin*. Academia Praha, 1998, 484 s.

RICHARDSON, A. D., DUIGAN, S. P., BERLYN, G. P. *An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content*. USA: New Haven, New Phytologist, 2002, 185 – 194 s.

RICHARDSON, A. D., REEVES, J. B., GREGOIRE, T. G. *Multivariate analyses of visible/near infrared (VIS/NIR) absorbance spectra reveal underlying spectral differences among dried, ground conifer needle samples from different growth environments*. USA: New Haven, New Phytologist, 2003, 291 – 301 s.

ROWLINSON, J. S., WIDOM, B. *Molecular theory of capillarity*. Courier Corporation, 2013, 338 s.

STOCKING, C. R. *Guttation and bleeding*, Encyclopedia of Plant Physiology, vol. 3, Heidelberg, 1956, 489 - 502 s.

STOUTJESDIJK, Flip, BRKMANNJ. J. *Microclimate, vegetation and fauna*. Sweden: Upsala, 1992. 218 s. ISBN 971622-2-1.

SVATOŇOVÁ, Hana a Lubomír LAUERMAN. *Dálkový průzkum Země - aktuální zdroj geografických informací*. Brno: Masarykova univerzita, 2010, 100 s. ISBN 978-80-210-5162-1.

ŠÁLEK, Jan. *Vodní hospodářství krajiny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1997, 153 s. ISBN 80-214-0949-5.

ŠEBÁNEK, Jiří. *Fyziologie rostlin: vysokoškolská učebnice pro vysoké školy zemědělské*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1983, 560 s.

TOLASZ, Radim. *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. 232 s. ISBN 978-80-86690-26-1.

TONG, Q., TIAN, Q., PU, R., ZHAO, C., GUO, X. *Spectroscopic determination of wheat water status using 1650 – 1850 nm spectral absorption features*. Remote Sensing, vol. 22, no. 12, China, 2001, 2329 – 2338 s.

WANG, L., QIU, Y., G., ZHANG, X. *Application of a new method to evaluate crop water stress index*. Beijing: Shijiahuang Institute of agricultural modernization, Irrig, Sci, Volume 24, 2005, 49 – 54 s.

WILKINSON, R. E. *Plant-environment interactions*. New York: M. Dekker, 1994, 599 s. ISBN 0824789407.

WOLD, S., ANTTI, H., LINDGREN, F., ÖHMAN, J. *Orthogonal signal correction of near-infrared spektra*. Sweden: Upsala, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Volume 44, Issues 1–2, December, 1998, 175–185 s.

YU, G., MIWA, T., NAKAYAMA, K., MATSUOKA, N., KON, H. *A proposal for universal formulas for estimating leaf water status of herbaceous and woody plants based on spectral reflectance properties*. China: Matsudo, Kluwer Academic Publishers, Plant and Soil, vol. 227, 2000, s. 47 - 58.

ŽDÍMAL, V., POSPÍŠIL, J., ŠAFÁŘ, V. *Remote sensing and yield maps*. Ostrava: Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky, 2011, s. 5.