

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra přírodních zdrojů



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Monitorování dopadů sucha na vegetaci ve střední a
východní Evropě**

Bakalářská práce

Autor práce: Tomáš Tesárek

Obor studia Rozvoj venkova

Vedoucí práce: doc. Dr. Mgr. Vera Potopová

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Monitoring dopadů sucha ve střední a východní Evropě" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 10. 4. 2021

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Dr. Mgr. Vere Potopové za její odborné vedení, pomoc při získávání potřebných informací a podkladů a za cenné rady.

Monitorování dopadů sucha na vegetaci ve střední a východní Evropě

Souhrn

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvořit přehled vývoje indexů dálkové detekce sucha a uvést jejich uplatnění v predikci výnosů a kondice vegetace. Dále analyzovat metody monitorování vývoje plodin a zásoby vody v půdě během vegetačního období ve střední a východní Evropě. Práce má informační charakter a je zaměřena převážně na hodnocení následků sucha na zemědělskou produkci ve střední a východní Evropě. V práci jsou předloženy výsledky některých metod analýzy časoprostorového monitoringu sucha na základě družicových dat, která jsou získávána spektrometrem MODIS na družici Terra. Ve formě map byly zpracovány informace o dopadech sucha na vegetaci a výnos zemědělských plodin. V práci také bylo použito a následně zpracovány informace z Evropské databáze sucha. V současné době jsou pro podobné účely stále častěji využívána data pořízená v rámci tzv. dálkového průzkumu Země (DPZ). Jedná se o snímání zemského povrchu pomocí senzorů nesených satelity, letouny, drony či jsou umístěny na různých plošinách. Pro potřeby predikce výnosů na regionální úrovni převažuje použití senzorů nesených satelity. Touto cestou je snímáno záření odražené či vyzařované povrchem. Tyto postupy přinášejí možnost prostorově kontinuálního snímání povrchu napříč velkými územními celky (od úrovně pozemků, regionů, států až po celosvětový pohled), v pravidelných intervalech a se známou historií měření.

Klíčová slova: MODIS družice Terra, dálkový průzkum Země, index vegetace, EVI, ESI, NDVI, TCI, VCI

Monitoring impacts of drought on vegetation in Central and Eastern Europe

The main objective of this bachelor thesis was to make review progress of the indexes remote drought detection and introduce their application in the forecast of yield and vegetation condition. Then analyze methods of monitoring crops and water supply in the soil during the vegetation period in the central and eastern Europe. Thesis has information character and it's focused mostly on the assessment of the drought result on agriculture production in the central and eastern Europe. It'll present result of some methods analysis of spatio-temporal drought monitoring based on satellite data, which are used by Spectroradiometr MODIS on satellite Terra. Informations of drought impact on vegetation yield agricultural crops were processed by the maps. The work also used and processed information from the European drought database. Right now data are increasingly being used for similar purposes taken by the remote sensing. This is a sensing of the earth surface by sensors on the satellites, planes, drones or they're placed on different platforms. For the purpose of yield prediction at regional level used it's dominate sensors carried by satellites. In this way, radiation is reflected or emitted by the surface is sensed. These methods brings the possibility of spatially continuous surface sensing across large territorial units (from the level of land, regions, states to global view) in regular intervals with known history of measurement.

Keywords: MODIS satellite Terra, remote sensing, vegetation index, EVI, ESI, NDVI, TCI, VCI

Obsah

Úvod.....	9
Cíl práce	10
3. Literární rešerše	11
3.1.Charakteristika dálkového průzkumu Země.....	11
3.1.1. Dělení Dálkového průzkumu Země	12
3.1.2. Systém dálkového průzkumu Země.....	13
3.1.3. Možnosti využití poznatků z DPZ.....	14
3.2. Systém družic	15
3.2.1. Polární družice.....	15
3.2.1.1. NOAA 19 a Metop – B.....	16
3.2.1.2. Družice Terra	16
3.2.1.3.MODIS	16
3.2.2. Geostacionární družice.....	17
3.2.2.1. Meteosat druhé generace - MSG.....	18
3.3. Vegetační indexy	18
3.3.1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, Normalizovaný index změny vegetace).....	19
3.3.2. Enhanced Vegetation Index (EVI, vylepšený vegetační index)	22
3.3.3. Evaporative Stress Index (ESI, Evaporační index stresu).....	22
3.3.4. Vegetation Condition Index (VCI, Vegetační kondiční index)	23
3.3.5. Temperature Condition Index (TCI, Index teplotních podmínek)	24
3.4. Spektrální chování vegetace.....	25
4.Monitoring sucha	27
4.1. Monitoring sucha dle NDVI	27
4.2.Monitoring sucha dle VCI	31
4.3.Monitoring sucha dle TCI	35
4.4.Monitoring sucha dle ESI.....	40
4.5.Monitoring sucha dle EVI	44
5. Dopady sucha	48
5.1. Dopady sucha na vegetaci.....	48
5.2. Dopady sucha na zemědělství	49
5.3. Hodnocení výnosů plodin spojených se suchem	50
5.4. Dopady sucha na stav podzemních vod.....	52
5.4.1. Hodnocení situace vod ve střední a východní Evropě	53

Závěr	55
Literatura	56
Seznam použitých zkratk a symbolů	60
Seznam obrázků	60

Úvod

Problémy se suchem se do budoucna stanou velkým problémem, který bude potřeba vyřešit. Region střední Evropy se stane vůbec nejpostiženějším místem v rámci Evropy, jelikož v mnohých částech je odstřižen od mořské vody a mraků, které s sebou přinášejí nezbytné srážky.

Obecné označení sucha je období, při němž je v atmosféře či půdě nedostatek vody, což má za následek kvalitativní i kvantitativní snížení výnosů plodin, které pěstujeme. Možnosti jak zamezit zhoršování stavu lze rozdělit na dvě základní části. Prvně jde o neschopnost zadržet vodu v krajině, zejména v posledních letech, kdy je častá přítomnost mimořádných průtrží. Druhým je nekvalitní hospodaření a sázení nevhodných plodin, přitom pěstování půdě prospěšných plodin může razantně pomoci k zadržení většího množství vody v krajině podobně jako zakládání rybníků či nádrží.

Pro studium problematiky sucha je potřeba znát mimo jiné podklady pro jeho předpověď a zkoumání. Ke sledování vegetace se v dnešní době využívá zejména dálkový průzkum Země z vesmíru. S jeho pomocí lze monitorovat zemskou plochu s pravidelnou přesností. Důvodem pro intenzivní studování zmíněného problému je v poslední době zejména změna klimatu zasahující i do ekonomické sféry, na kterou má sucho zdrcující dopad.

Veřejným zájmem o jeho zmírnění je také fakt, že v případě udržení oteplování pod 2 °C, ceny potravin zůstanou na podobné výši jako dnes. K tomu razantně pomáhají nové kultivary, závlahy či kvalitní osevní postupy, jak zmíním.

Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je vytvořit přehled vývoje indexů dálkové detekce sucha a uvést jejich uplatnění v predikci výnosů a kondice vegetace. Dále analyzovat metody monitorování vývoje plodin a zásoby vody v půdě během vegetačního období ve střední a východní Evropě.

3. Literární rešerše

3.1. Charakteristika dálkového průzkumu Země

Dálkový průzkum Země (dále také jako DPZ) spočívá ve zkoumání, měření a zobrazování objektů a jevů v krajině bez přítomnosti fyzického kontaktu s nimi. Hlavním předmětem zájmu Dálkového průzkumu Země je snímat a měřit zemský povrch, což je voda i souš. Dále snímáním zjistit stav spodní vrstvy atmosféry a vrstvu sedimentu. Informace, které nám DPZ poskytuje, jsou především z palub letadel, satelitů, bezpilotních systémů nebo družic, které obíhají a mapují Zemi (Svatoňová & Lauermann 2010). K záznamu informací o objektech a jevech je zapotřebí přenosné medium v podobě elektromagnetického záření. Výstupem zaznamenaných informací jsou letecké snímky a družicové obrazové záznamy (Honetschlager 2016).

Definice

Existují dvě známé definice dálkového průzkumu a to konvenční a nekonvenční. Jestliže se dálkový průzkum Země zabývá pořizováním leteckých a družicových snímků, jejich zpracováním a analýzou za účelem tvorby topografických nebo tematických map jedná se o konvenční definici. Naopak nekonvenční definice říká, že dálkový průzkum Země je nejdražší způsob jak vytvořit obraz. Dále říká, že DPZ rozděluje svět na malé barevné čtverečky, které je možné dále upravovat a hrát si s nimi a odhalit neuvěřitelný potenciál (Dobrovolný 2015).

Historie

Za prvopočátky snímání objektu bezkontaktně můžeme označit počátky oboru fotogrammetrie (Campbell & Wynne 2011). Založení tohoto oboru je přisuzováno kartografovi a zeměměřiči Aimé Laussedatovi, kdy se však jednalo pouze o pozemní metody snímání. S příchodem možnosti létat byla fotogrammetrie následovně využívána k leteckému snímání (Böhm 2002).

K rozmachu letecké fotogrammetrie došlo v průběhu první světové války, kdy byl ovšem proces snímání stále na nízké úrovni, protože snímky museli manuálně pořizovat piloti letadla. K následnému zlepšení kvalit snímání docházelo až v meziválečném období. Elektromagnetické spektrum se rozšířilo z úzké oblasti viditelného světla o další záření lidskému oku neviditelné, jednalo se o infračervené a mikrovlnné záření (Campbell & Wynne 2011).

Velký rozmach dálkového průzkumu byl zaznamenán zejména během doby studené války, kdy značně vzrostl, kvůli snaze získávání informací a špionáži. Následně se letecké platformy rozšířily i mimo armádní sektor. Pojem dálkový průzkum byl ustanoven v šedesátých letech, kdy nahradil termín letecké fotografování (Baumann 2014).

Největšího rozšíření se ale DPZ dostalo pochopitelně s přístupem nové a levnější technologie, kdy došlo k přesunu z analogových snímků na digitální a také přechod od snímání především z letadel na modernější satelity. Roku 1972 byl vyslán první satelit Landsat na zemskou orbitu. To byl velký průlom a zároveň přínos pro mnoho vědních odvětví. Satelit zkoumal zemský povrch v několika úrovních elektromagnetického spektra. Osmdesátá léta přinesla druhou generaci nástrojů snímací techniky, umožňující pořízení snímků s prostorovým detailem v řádu 10-30 m. V průběhu devadesátých let pak bylo dosaženo prostorového rozlišení v hodnotách 1 m a podrobnější (Baumann 2014; Campbell & Wynne 2011).

Metoda Dálkové průzkumu Země

Metoda se zaměřuje na stanovení vlastností sledovaných objektů v obtížně přístupných oblastech. Hlavní výhodou metody DPZ je její horizontální spojitost získaných dat (informace z velkého území), vertikální spokojenost (informace z různých komponentů geosféry) a dynamické spojitosti (získat informace jedním technickým zařízením) (Plánka 2021).

3.1.1. Dělení Dálkového průzkumu Země

A. Dle způsobu záznamu obrazu

Konvenční metoda - myšleny především fotografie, které vznikají najednou neboli centrální projekcí, snímek v papírové podobě, metoda je ovlivněna počasím a je geometricky přesná.

Nekonvenční metoda - jedná se o systém rozkladových snímacích zařízení. Obraz se zde vytváří postupně a ne v jednu chvíli, výstupem je digitální snímek, má však menší geometrickou přesnost, není závislý na počasí (Plánka 2021).

B. Podle zdroje energie

Metody snímačů DPZ je možno dělit na dva základní druhy podle zdroje elektromagnetického záření, na pasivní a aktivní. Pasivní metody dále dělíme na přímé, kam patří využívání odraženého slunečního světla a nepřímé, které využívá vlastní vyzařování objektu. Aktivní metody pracují se zářením vysílaným ze zdroje umístěného na nosiči a jeho zpětného odrazu a následném zachycení na nosiči, jako je radar. Jedná se o umělý zdroj záření (Svatoňová & Lauermann 2010).

C. Druhu nosiče

Družice, modely, balony atd. Nosiče mohou být velice jednoduché i složité systémy. Snímací zařízení zastupuje variace digitálních kamer vysokého rozlišení, multispektrální, hyperspektrální a termální snímače, případně radarové a laserové systémy (Lillesand et al. 2015).

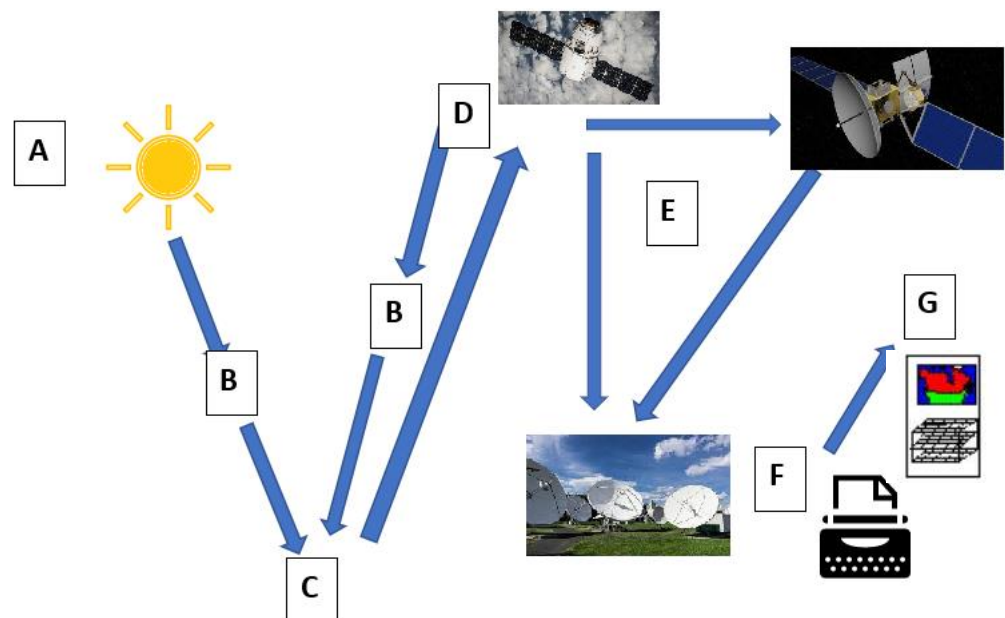
- D. Elektromagnetického spektra: panchromatické, infračervené, tepelné, radarové, spektrální, multispektrální
- E. Zorného pole kamery: malý úhel záběru, normální či širokoúhlé
- F. Osy záběru: svislé (požívají se pro mapování a dokumentaci jevů a procesů) a šikmé (zachycují terénní reliéf)
- G. Velikosti snímaného území: globální, lokální, podrobné, oblastní (DPZ online).

3.1.2. Systém dálkového průzkumu Země

Jedná se o sběr dat a jejich přenosu. Dělíme dále na dva subsystémy a to na sběr informací, přenos dat a na analýzu a interpretaci dat (Plánka 2021).

Každý systém DPZ se skládá ze čtyř základních složek:

- *krajiny*- jako zdroje záření a atmosféry, kterými záření prochází, do tohoto subsystému patří faktory, které formují velikost měřené fyzikální veličiny
- *energetické zdroje* – fyzikální pole Země a dalších zdrojů elektromagnetických a mechanických vln
- *měřící aparatura* – pořizují soubor dat o krajině a fyzikálním prostředí
- *zpracovatelského systému* – sem patří oblast předzpracování a zpracování dat, výstupem jsou materiály pro popis objektů a jevů, které jsou pozorovány (Plánka 2021).



Obr. č. 1 Systém pořizování dat

A. Zdroj záření – všechny objekty zájmu vyzařují elektromagnetickou energii.

- B. Atmosféra – zde energie postupuje od svého zdroje k danému objektu a dostává se do interakce s atmosférou, kterou prochází. A znovu k této interakci dojde, když energie postupuje od daného objektu ke snímači.
- C. Kontakt záření s objekty (obraz a pohlcování, emise) – poté co energie prostoupí atmosférou dojde k interakci s objektem, které jsou závislé na vlastnostech objektu a záření.
- D. Registrace odraženého a záznam energie snímacím zařízením – zde se zaznamená energie snímaná zařízením, poté co se odrazí energie od objektu dojde k záznamu elektromagnetické záření snímacím zařízením (bez přímého kontaktu).
- E. Přenos, příjem a předzpracování dat – v této fázi dochází k tomu, že se energie zaznamenaná snímačem přenesou do zpracovatelské stanice, kde jsou informace zpracovány do obrazového záznamu.
- F. Analýza a interpretace dat - obrazový záznam se podrobí analýze a interpretaci, aby získal informace o objektu zájmu.
- G. Využije získané informace získané zpracováním obrazového záznamu (Plánka 2021).

System snímání

Princip snímání je založen na ozáření vybraného prostoru elektromagnetickým zářením, skládající se z elektrického a magnetického pole. Každá forma odrážené energie od zemského povrchu může být zaznamenána do obrazové polohy (Richards & Xiuping 2006). Rozlišujeme však schopnosti snímacích systémů na:

A. spektrální – zaznamenává jemné intervaly vlnových délek, Čím jemnější je spektrální rozlišení, tím užší je interval vlnových délek pro určité pásmo (kanál). Dále rozdělujeme podle spektrálního rozlišení na panchromatické, multispektrální, superspektrální a hyperspektrální

B. radiometrická – hloubka pixelu, nejmenší změna v intenzitě záření, kterou snímací systém dokáže rozlišit

C. prostorová – je reprezentováno velikostí jednoho (bodu) pixelu, prostorové rozlišení snímacího zařízení se vztahuje k velikosti nejmenšího možného objektu

D. časová – jak často je zemský povrch zaznamenáván (DPZ, online)

3.1.3. Možnosti využití poznatků z DPZ

Data získaná za pomoci DPZ určují hodnoty v mnoha vědních disciplínách, které s daty následně pracují. V oblasti vegetace se jedná především o disciplíny, jako jsou zemědělství, ekologie či lesnictví. Sbíraná data poskytují přehled o rozlohách lesů a polí nebo dále ukazují zdravotní stav vegetace v určitých oblastech, dávají povědomí o tom, jak na tom jsou lesy a vegetace z pohledu zdraví, či ukazují změny rozloh polí, lesů nebo luk (Svatoňová & Lauer mann 2010).

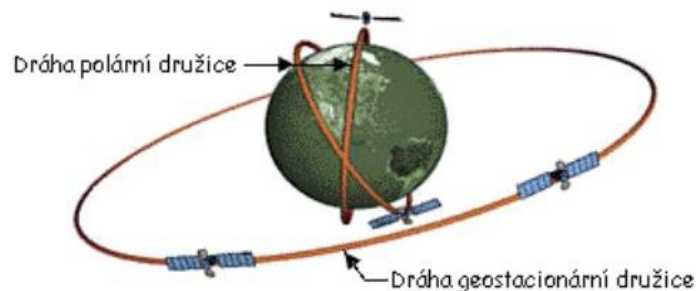
Jako příklad využití dat DPZ širokou veřejností lze uvést službu Google Earth z roku 2005, která je jí přímo určena. Přístup k datům je snadný a spočívá v jeho jednoduchosti a snadné použitelnosti v internetovém vyhledávači Google (Campbell & Wynne 2011). Hlavním přínosem je dnes ovšem zejména na úrovni vědeckých výzkumů, jako je snímání zemského povrchu a reliéfu, mapování LAND USE/LAND COVER, geologická a pedologická mapování, zkoumání vegetačních pokryvů a ekosystémů, monitoring sucha a vodních zdrojů, meteorologie, využití v zemědělství atd. (Lillesand et al. 2015).

3.2. Systém družic

Na oběžné dráze se pohybují družice, které zachycují infračervené a mikrovlnné záření ze Země pod nimi. Následně pořizují snímky nebo měří rychlost větrů a atmosférickou vlhkost. Informace z meteorologických družic se často využívají pro sledování nebezpečných jevů, které v atmosféře probíhají – např. pohyb hurikánů, a také zemského povrchu (povodně, eroze, požáry, výbuchy sopek, vegetační indexy, monitorování dopadů sucha)

Systém meteorologických družic je tvořen třemi základními kategoriemi. První z nich jsou operativní družice na nízkých polárních dráhách například NOAA. Dále jsou zde družice operativní na geostacionární dráze, jedná se o družice Meteosat nebo GOES. Poslední z kategorie jsou výzkumné a vývojové družice označované jako R&D (Research and Development) kam spadá družice Terra, Aqua nebo TRMM aj. (Setvák 2004).

Družice dělíme na dva typy podle dráhy oběhu kolem Země na polární a geostacionární.



Obr 2. Dva typy družic

(Dostupné z <http://metmladez.wz.cz/metdeti/i17.htm>)

3.2.1. Polární družice

Pohybují se po helio-synchronní cirkulární kvazipolární dráze a oblétaávají Zemi dokola přes póly. Při obletu vždy protnou severní a jižní pól. Jejich střední výška letu 810–870 km (výrazně níže než geostacionární družice) a doba obletu Země je 100–120 minut. Sklon dráhy je 98 až 100 stupňů vůči rovině rovníku. Pohybuje se stejně, jako se pohybuje

slunce; pootočení na rovníku o 25,6° na západ a snímkuje zeměkouli kolem dokola (Setvák 2011).

Do skupiny polárních družic patří NOAA, Terra, Aqua a mnoho dalších.

3.2.1.1. NOAA 19 a Metop – B

V České republice se využívají družice NOAA 19 (vlastnictví USA) a Metop (vlastnictví EU) – A, B, Metop C listopad 2018. Data z Metop C jdou přímo do numerického modelu předpovědi počasí, také se využívají k monitorování klimatu (Majer 2018).

NOAA 19 byl vypuštěn 6. února 2009 z paluby rakety Delta 2. Shromažďuje data o oblačnosti, povrchové podmínky, sníh a vegetaci, atmosférické teploty, aerosol a ozon. Družice zahrnuje dva radiometry (NASA 2021). Jako hlavní je šestikanálový skenovací radiometr AVHRR celým názvem Advanced Very High Resolution Radiometer pracující ve spektrálním rozsahu 0,58–12,5 μm (infračervené spektrum) (Baran 2008). Tato družice snímá pás široký 3000 km (Setvák 2011).

Metop – B je družice, kterou vytvořila Evropská kosmická agentura (ESA) se společností Astrium. Je součástí kosmického segmentu polárního systému EUMETSAT. Byla vypuštěna v září 2012 (ESA 2012). Data, která dodává, ukazují například ozonové díry. Nasbírání data slouží k předpovědi počasí i 10 dní dopředu (EUMETSAT 2020).

3.2.1.2. Družice Terra

Družice Terra je polární družice, jejímž vlastníkem je americká společnost NASA. Na oběžnou dráhu byla družice Terra vynesena 18. 12. 1999, raketou Atlas IIAS z letecké základny Vandenberg. Nad územím Evropy prolétá družice Terra přibližně v 11 hodin místního času (Xiaoxiong 2005).

Družice se pohybuje na heliosynchronních kvazipolárních drahách. Dráhy jsou nad zemským povrchem ve výšce 700 km. Doba, kdy družice oběhne kolem Země, je necelých 99 minut a je synchronizovaná se Sluncem takovým způsobem, že se nachází vždy ve stejný čas na stejném místě. Sklon oběžné dráhy družice Terra vůči rovině rovníku činí 98,2° (Optal 2011).

3.2.1.3. MODIS

Spektroradiometr MODIS se středním rozlišením pracuje na oběžné dráze a poskytuje nepřetržitá globální data pro studium zemské půdy, atmosféry a oceánů (Xiaoxiong 2005).

Funguje na palubě kosmické lodi NASA EOE Terra a jedná se o velice stabilní systém, který snímá zemský povrch ve 36 spektrálních pásmech v rozmezí vlnových délek od 0,4 μm do 14,4 μm . Celý povrch Země sleduje jeden až dva dny a získává data ve třech prostorových rozlišeních - 250 m, 500 m a 1 000 m. První letový přístroj MODIS byl vypuštěn na kosmické lodi Terra (EOS AM-1) v roce 1999 a druhý přístroj MODIS, Flight Model 1 (FM1) byl vložen do kosmické lodi Aqua a byl vypuštěn v roce 2002. Tyto nástroje MODIS nabízejí bezprecedentní pohled na pozemskou, atmosférickou a oceánskou fenomenologii pro širokou a různorodou komunitu uživatelů po celém světě (NASA 2020).

Ke sběru dat pomocí snímání je využita sestava Scan Mirror Assembly, která se kontinuálně otáčí a využívá k tomu oboustranné zrcadlo o ± 55 stupňů. Optický systém se skládá z dvouzrcadlového mimoosého afokálního dalekohledu, který směřuje energii do čtyř refrakčních objektivních sestav, jeden pro každou ze spektrálních oblastí VIS, NIR, SWIR / MWIR a LWIR pro pokrytí celkového spektrálního rozsahu 0,4 až 14,4 μm (NASA 2020).

Získává informace hlavně o druzích povrchů oceánů i pevného zemského povrchu, teploty, primární produktivity, oblačnosti, výparu, teplotním a vlhkostním profilu, požárech, barvě mořské vody, globálních mapách vegetace, detekce změn, charakteristik oblačnosti, koncentraci a vlastnosti aerosolů, charakteristik sněhové pokrývky a mořských proudů (Dobrovolný et al. 2021).

Nasbíraná data MODIS na družici Terra jsou následně přenášena kupříkladu přenosem na stanici ve White Sands v Novém Mexiku, za pomoci satelitního systému pro sledování a přenos dat TDRSS. Data jsou poté odeslána do systému EOS Data and Operations System (EDOS) v Goddardově vesmírném letovém centru. Každopádně MODIS má několik úrovní, takže různá data lze získávat přímo ze sondy pomocí signálu MODIS Direct Broadcast nebo nástrojem Land Processes DAAC. Existuje také možnost získání dat pomocí internetu nebo přenosem přes jiné družice (NASA 2020).

MODIS je bezesporu důležitým systémem pro sběr a získávání informací, které mohou vědcům v několika vědních disciplínách pomoci globálně předvídat změny, které mohou mít zásadní dopad na životní prostředí.

3.2.2. Geostacionární družice

Její střední výška letu je 35 790 km (aby snímaly co největší povrch Země, ale „nevidí“ do polárních oblastí). Doba oběhu družice kolem Země je totožná s dobou rotací Země, jelikož má stále stejné souřadnice. Je jich celkem sedm, všechny jsou nad rovníkem (deklinace 0°) (Setvák 2011).

Mají tvar válec o průměru 3,7 m a výšce 3,8 m. Váha družice při uvedení na oběžnou dráhu činí přibližně 2035 kg (z toho 365 kg paliva mono-methyl hydrazinu a 603 kg

okysličovadla – oxidu dusíku). Hlavní meteorologický přístroj je radiometr SEVIRI (hmotnost 260 kg), který skenuje atmosféru a povrch ve 12 spektrálních kanálech. Plášť družice je pokrytý slunečními panely s celkovým výkonem 600 W a její předpokládaná životnost je 7 let (ČHMÚ 2019).

3.2.2.1. Meteosat druhé generace - MSG

Jedná se o jednu z geostacionálních družic. Nástupci předchozích družic byli označovány jako Meteosaty první generace. Mají nový radiometr SEVERI, který poskytuje snímky v 12 kanálech. Jsou celkem 4 (MSG8 až MSG11) Evropa, Afrika a Indický oceán (Setvák 2011). Družice Meteosat jsou provozovány jako dvou-satelitní systém poskytující podrobné snímky celého disku po celé Evropě a Africe každých 15 minut a snímky rychlého skenování po celé Evropě každých pět minut (EUMETSAT 2020). Jejich rozlišovací schopnosti jsou: 1×1 km v oblasti viditelného záření a 3×3 km v oblasti infračerveného záření. Kromě pořizování obrazových dat sbírá a předává meteorologické údaje, naměřené automatickými stanicemi a bójemi, a distribuuje zpracované informace z několika významných meteorologických center (EUMETSAT 2020).

Hlavní data, se kterými pracuje Česká republika, poskytuje satelit MSG11. Byl vypuštěn v roce 2015, měl by fungovat do roku 2033. Snímkuje Evropu se souřadnicemi 0° z. š., 0° z. d. (je zavěšena na Guinejském zálivem) a snímky ve full disc snanu jsou pořizovány každých 15 minut. Snímá celou zeměkouli tak, jak ji v pozici vidí (Pešková 2019).

Další je MSG10, který byl vypuštěn v roce 2012 a jeho životnost by měla být do roku 2030. Jeho pozice je $9,5^\circ$ na východ od MSG11 (EUMETSAT 2020). Pořizuje každých 5 min tzv. rapid scan, který pokrývá oblasti mezi $15.$ a $70.$ stupněm severní šířky (Pešková 2019).

3.3. Vegetační indexy

Jedná se o indexy, které ukazují míru přítomnosti zelené hmoty, těsně koreluje s množstvím biomasy a zdravotního stavu vegetace. Vyjadřují vztahy mezi odrazivostí v intervalu červené viditelné části spektra 600 – 700 nm (RED) a v blízké infračervené části spektra, které je přibližně 700 – 900 nm (NIR).

Výsledky ze spektrálního měření DPZ jsou prezentovány právě v podobě vegetačních indexů (Hlavinka et al. 2018). Tyto indexy následně umožňují mapování nejen podle kvantitativního hodnocení, ale i kvalitativního hodnocení stavu vegetace. Díky reálným datům, která jsou získávána, lze následně vytvořit jasný souhrn a stav vegetace po celé Zemi (Oprchal et al. 2017). Také zde vytvořit metody jak sledovat predikci výnosů plodin.

V této části práce se zaměřím na vegetační indexy potřebné k monitoringu sucha. Mapování a následnému zjištění prostorového uspořádání na zemském povrchu, odhadům a hodnocení jejich změn v čase.

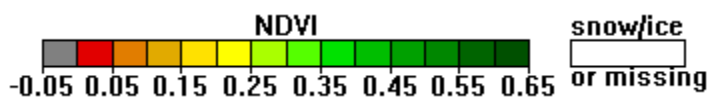
3.3.1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, Normalizovaný index změny vegetace)

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, Kogan 1995) je vegetační index určený na základě sledování odrazivosti vegetace. NDVI je stanoven na základě použití družicových dat od roku 2000, která jsou získávána spektrometrem MODIS družice Terra. Změny v odrazivosti povrchu vegetace jsou používány k identifikaci období sucha. Úbytek zelené hmoty v důsledku usychání vegetace v období sucha se primárně projeví snížením odrazivosti v části blízké infračervenému spektru. Hodnoty kolísají v rozmezí -1 až 1. Dle hustoty vegetace roste jeho hodnota, hustý porost (0,500), holá půda (0,025). Úbytek zelené hmoty v důsledku usychání vegetace se primárně projeví snížením odrazivosti v části blízké infračervenému spektru, a tedy i nižšími hodnotami NDVI. Je jeden z nejčastěji používaných vegetačních indexů, který se využívá k rozpoznání vegetace a určení jejího celkového stavu. V zásadě se jedná o index založený na pozorování fotosyntetických aktivit, který odráží různé druhy světla odlišně. V současné době existuje několik datových sad NDVI, které se liší z hlediska prostorového a časového rozlišení a pokrytím časového období (Páscoa et al. 2018). NDVI odlišuje zeleň od ostatních druhů povrchu na základě odrazových vlastností vegetace. Stal se primárním nástrojem pro popis vegetační fenologie, kontinentální zemský pokryv, klasifikaci a dynamiku vegetace a také plodin. Je široce používán jako indikátor environmentálních zdrojů (Kogan 1995). Kromě toho se NDVI často používá po celém světě k monitorování sucha, předpovídání zemědělské produkce, či k určení požárních zón a míst, na kterých hrozí vznik pouští.

Vstupní parametry (družicová data):

$$NDVI = \frac{N - R}{N + R}$$

kde N a R jsou odrazy v blízké infračervené oblasti (NIR) a červených pásmech.



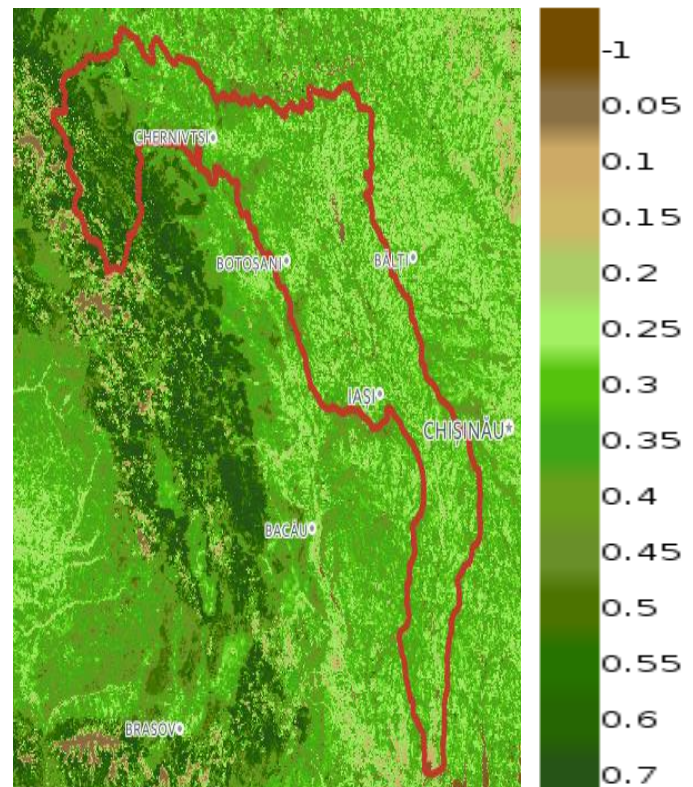
Hodnotící škála indexů: Místo bez vegetace je označeno hnědou barvou, s přicházející vegetací vidíme tmavě žlutou barvu, s postupným přibýváním rostlin stoupá barva přes světle žlutou k světle zelené. Tmavě zelená barva pak značí lesy či vrcholnou vegetaci. Naopak červená barva značí kritický případ, případně vodní plochu. V případě barvy bílé jde o sněhovou pokrývku.

S vyššími hodnotami vzrůstá pravděpodobnost, že má oblast hustý pokryv zelenou vegetací. NDVI hodnoty vyšší než 0 indikují přítomnost vegetace. Hodnoty naopak menší než 0 nemají žádný vegetační význam (Honková 2008). Negativní hodnoty indikují území bez vegetace, často korespondují s přítomností vodních těles, neboť voda odráží velice málo světla NIR (Kiage et al. 2007). V RED spektru je záření zdravou, fotosyntetizující vegetací silně absorbováno hlavně díky pigmentačním látkám, zejména zelenému barvivu (chlorofylu), obsaženému v listech rostlin. Odrazivost zde tak nabývá velmi nízkých hodnot. Naopak v přechodu z vlnových délek RED do NIR odrazivost prudce roste. To je dáno morfologickou strukturou listů, která se u jednotlivých druhů rostlin značně odlišuje. Pokud je vegetace vystavena určitému stresu, odrazivost v NIR se snižuje. Naproti tomu v RED odrazivost stoupá vlivem nižší produkce chlorofylu (Gaja 2013). Jelikož se NDVI snadno používá, je využíváno k monitorování dynamiky vegetace, či fenologických změn rostlin. Kromě fenologie se NDVI využívá k monitoringu požárů, případně spáleného povrchu na určitém území. Dále je monitorována vlhkost půdy, produkce biomasy nebo změna stavu pastvin. Slabou stránkou NDVI je fakt, že hodnoty při plné vegetační pokrývce rychle nabývají maximálních, a není tak možné jej využít ke kvantifikaci a sledování změn u husté vegetace (Bohovic 2016). Nyní se ještě zastavím u vyhodnocování dat z indexů. Každá mapa musí mít legendu a také vysvětlivky. Prvním z hodnocených indexů je NDVI, který nám prakticky ukazuje množství pokrytí Země vegetací. U tohoto indexu je místo bez vegetace značeno šedou barvou, s přicházející vegetací vidíme tmavě hnědou až žlutou barvu, s postupným přibýváním rostlin stoupá barva přes světle žlutou k světle zelené. Tmavě zelená barva pak značí lesy či vrcholnou vegetaci. Naopak červená barva značí kritický případ, případně vodní plochu. V případě barvy bílé jde o sněhovou pokrývku.

(a) 2010



(b) 2012



Obr. 3 Družicové snímání stavu vegetace na úrovni povodí v Moldávii (plocha povodí: 2 837 073 ha, polní plodiny: 2 230 152 ha, travní porosty: 98 777 ha). Mezinárodní projekt „Sucho – Povodně“ v povodí řeky Průt (Potopová et al. 2019).

NDVI $\geq 0,65$ za červenec 2010 – vysoké srážkové úhrny vedoucí k povodním ($Q = 1910 \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$), které doprovázel bujný stav vegetace (Obr. 3a). NDVI $\leq 0,35$ za červenec 2012 – nejteplejší a nejsušší ($Q = 20 \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$) s rekordní absolutní maximální teplotou vzduchu ($42,4 \text{ }^\circ\text{C}$) (nízké hodnoty detekují stres rostlin) (Obr. 3b).

Tab. 1 – Hodnoty NDVI pro různé druhy povrchů (Honková 2008).

Povrch	NDVI
Velmi hustá vegetace	0,500
Středně hustá vegetace	0,140
Řídká vegetace	0,090
Holá půda	0,025
Oblačnost	0,002
Sníh a led	-0,046

Voda	-0,257
------	--------

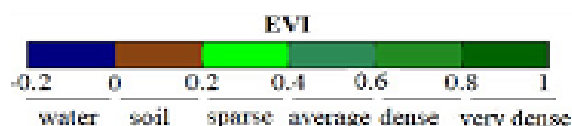
3.3.2. Enhanced Vegetation Index (EVI, vylepšený vegetační index)

Enhanced Vegetation Index (EVI, Huete et al. 2002) je stanoven na základě použití družicových dat, která jsou získávána spektrometrem MODIS družice Terra. Hlavní funkcí EVI je zjišťování vegetačního stresu, který souvisí se suchem v různých oblastech a jeho ovlivňováním zemědělské produkce. Rozdíl ve srovnání mezi NDVI a EVI spočívá v tom: (i) za přítomnosti sněhu NDVI klesá, zatímco EVI roste, (ii) EVI je navíc omezena na senzorové systémy navržené s modrým pruhem do červených a blízkých infračervených pásem. Jeho hlavní výhodou je vysoké rozšíření a pokrytí v různých terénech s širokým spektrem pokrytí vegetace. Nevýhodou je, že EVI neodděluje sucho od jiných forem stresu na vegetaci (ten může být způsoben i jinak než jen suchem, a proto může být v tomto ohledu někdy nepřesný) (Liu & Huete 1995).

Vstupní parametry (družicová data):

$$EVI = G \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C1 \times RED - C2 \times Blue + L)}$$

kde N , R a B jsou atmosféricky korigované nebo částečně atmosféricky korigované (Rayleighův rozptyl a absorpce ozónu) povrchové odrazy v blízkém infračerveném, červeném a modrém pásmu; G je faktor zisku; C1, C2 jsou koeficienty termínu odolnosti vůči aerosolu, který používá modré pásmo ke korekci vlivů aerosolu v červeném pásmu, a L funguje jako faktor úpravy půdy.

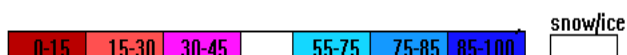


Hodnotící škála indexů: Bílá barva značí sníh. Kriticky stresovanou vegetaci značí růžová barva. Následují odstíny červené, světlejší je méně silný stres, následuje oranžová a žlutá. Příznivé podmínky začínají světle zelenou barvou, následuje modrá a nejlepší podmínky jsou v případě tmavě modré barvy. S jeho pomocí lze vysledovat postupný začátek sucha a zkoumat množství škod, které způsobí.

3.3.3. Evaporative Stress Index (ESI, Evaporační index stresu)

Evaporative Stress Index (ESI, Anderson et al. 2011) vyjadřuje časovou standardizovanou anomálii poměru aktuální a referenční evapotranspirace (ET_a/ET_o). Stanovení ET_a je provedeno pomocí diagnostického modelu ALEXI (Atmosphere–Land

Exchange Inverse model), jehož jádro představuje dvouzdrojový (půda a porost) model energetické bilance. Samotný index ESI je pak stanoven jako poměr ETa/ETo pouze za jasných dnů. Díky této poslední podmínce není zapotřebí data globální radiace, protože globální radiace pro bezoblačné dny lze poměrně spolehlivě stanovit ze zeměpisné šířky a nadmořské výšky. Navíc globální radiace je vstupní veličinou jak pro ETa tak pro ETo a vzhledem, že pro index ESI pracujeme s poměrem těchto dvou veličin, chyba určení globální radiace je téměř matematicky vyrušena. Následně jsou stanoveny dva základní typy kompozitů: - 4-týdenní a 12-týdenní představující průměr ETa/ETo za posledních 4 či 12 týdnů (Hlavinka et al. 2018). Nakonec je index ESI vyjádřen jako časová standardizovaná anomálie ETa/ETo vzhledem k referenčnímu období. Toto referenční období začíná rokem 2001 (počátek kontinuálních dat povrchové teploty z MODISu) a končí k poslednímu dni předcházejícího roku (např. 2017). Index ESI je stanoven pro každý sedmý den v roce, kde časová anomálie je navíc normalizována směrodatnou odchylkou ETa/ETo pro daný den v roce (standardizace). Většina hodnot ESI se tedy obvykle pohybuje v rozmezí -3,5 až 3,5, kde záporné hodnoty indikují sníženou ETa (např. stres suchem), hodnoty okolo nuly stav normální, a kladné hodnoty nadprůměrnou ETa a tedy např. vysokou zásobu vody v půdě či fenologickou anomálii (např. časnější příchod jara). Obecně lze říct, že stres suchem se projevuje mnohem dříve ve snížení ETa/ETo než v poklesu listové plochy či kondice vegetace. Proto je index ESI citlivějším ukazatelem začínajícího stresu suchem, než je tomu u anomálií vegetačních indexů. U klasických prognostických ETa modelů zásoba vody v půdě limituje ETa , respektive poměr ETa/ETo , jenž následně ovlivňuje zásobu vody v půdě. Ta je navíc ovlivňována řadou dalších procesů jako např. infiltrace, povrchový a podpovrchový odtok/přítok či kapilární zdvih a perkolace (zpětnovazebný cyklus řešený systémem diferenciálních rovnic). To znamená, že pro správné modelování ETa je zapotřebí správně simulovat zásobu vody v půdě, která je výsledkem řady vzájemně propojených procesů (Globaland30 2020).



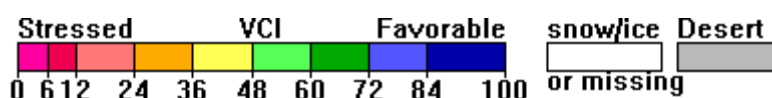
3.3.4. Vegetation Condition Index (VCI, Vegetační kondiční index)

Vegetation Condition Index (VCI, Kogan 1995) se využívá v heterogenních oblastech, kde je NDVI zkreslován. Umožňuje detekovat sucho, jeho začátek, intenzitu a délku trvání. Vyjádřen v %, kdy nízké hodnoty detekují stres rostlin (≤ 35 % extrémní sucho). Je úzce spjatý s TCI a NDVI a jejich hodnotami. Tyto hodnoty VCI porovnává s aktuální NDVI a s daty z předchozích let. Zdravotní stav vegetace vyjádřený pomocí VCI je vyjádřen v procentech. Hodnoty vždy závisí na počasí. Pokud je vegetace ve správném zdravotním stavu, tak vykazuje vysoké hodnoty a naopak, kdy nízká hodnota poukazuje na stres rostlin. Hraniční hodnotou je 35 %, nižší hodnoty již popisují extrémně suché podmínky.

Za účelem odhadu dopadu počasí na zdravotní stav vegetace je tedy třeba efekty související s přírodními podmínkami odfiltrovat (Oprchal et al. 2017). Toho můžeme dosáhnout využitím tzv. indexu vegetačního (VCI) (Kogan 1995).

$$VCI_{yc} = 100 \frac{NDVI_{yc} - NDVI_{minc}}{NDVI_{maxc} - NDVI_{minc}}$$

kde VCI značí hodnotu indexu vegetačního, NDVI_{min} a NDVI_{max} představují víceleté minimální a maximální hodnoty NDVI pro každý pixel v dané oblasti, y je číslo roku a c je číslo kompozice. Minima a maxima NDVI obsahují extrémní meteorologické události. (Kogan 1995).



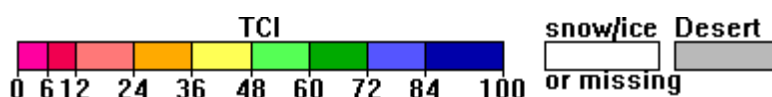
Hodnotící škála indexů: Bílá barva značí sněhovou pokrývku. Kriticky stresovanou vegetaci značí růžová barva. Následují odstíny červené, světlejší je méně silný stres, následuje oranžová a žlutá. Příznivé podmínky začínají světle zelenou barvou, následuje modrá a nejlepší podmínky jsou v případě tmavě modré barvy. S jeho pomocí lze vysledovat postupný začátek sucha a zkoumat množství škod, které způsobí.

3.3.5. Temperature Condition Index (TCI, Index teplotních podmínek)

Temperature Condition Index (TCI, Kogan 1995) slouží ke stanovení stresu vegetace v důsledku teploty a nadměrné vlhkosti. Má velice dobré rozlišení a pokrytí a používá se ve spojení s NVDI a VCI. TCI poskytuje doplňkové informace o rostlinném stresu. Pomocí něj lze určit, zdali je stres způsoben převládajícím suchem anebo nadměrnou vlhkostí. Při výpočtu se využívá radiační teplota (BT). Pokud je teplota vysoká, značí to nevyhovující podmínky a naopak, nízká teplota ukazuje podmínky příznivé. **Vstupní parametry:**

$$TCI_{yc} = 100 \frac{BT_{maxc} - BT_{yc}}{BT_{maxc} - BT_{minc}}$$

kde *BT_{max}* a *BT_{min}* je dlouhodobá maximální a minimální teplota, y je číslo roku a c je číslo kompozice. TCI nabývá, stejně jako VCI hodnot od 0 do 100. Nízká hodnota TCI naznačuje velmi vysoké teploty, a tedy výskyt sucha (Kogan 1995).

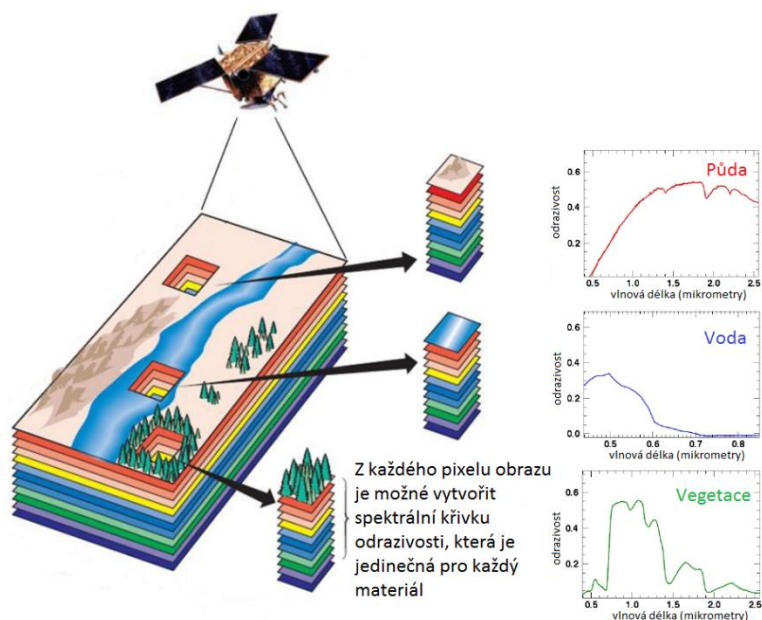


Hodnotící škála indexů: TCI je silně provázaný s VCI. To má za následek to, že barevná stupnice na hodnocení je zcela shodná se stupnicí indexu vegetace. Díky tomuto indexu můžeme určit množství, nástup a dobu působení teplotních abnormalit.

3.4. Spektrální chování vegetace

Na planetě Zemi je velké množství vegetace, která se vyskytuje vyjma pouští a polárních oblastí všude na Zemi.

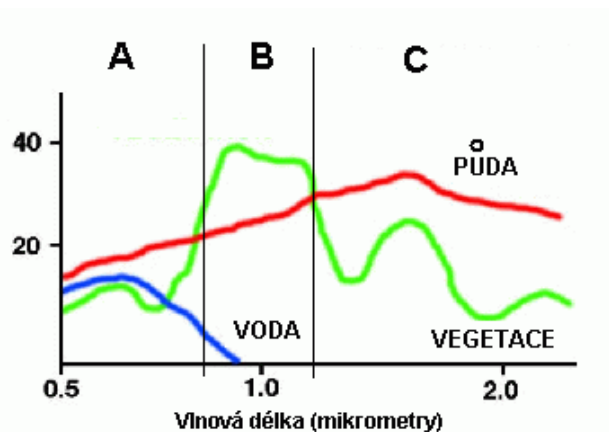
Elektromagnetické záření se při průchodu atmosférou a následně po jejím dopadu na zemský povrch modifikuje. Pro objekty lze sestavit závislost mezi jeho odrazivostí a vlnovou délkou. Jedná se o křivku odrazivosti, která je projevem spektrálního chování a má velký vliv na výběr vlnové délky, ve které je dobré data o objektu získat. Je možné dále vhodně porovnávat více druhů povrchů, protože lze zvolit interval vlnových délek, ve kterém uvidíme jasné odlišení látky od objektu. Tím, že máme znalost spektrálního chování můžeme rozpoznat jednotlivé druhy povrchů a jejich mapování metodou dálkového průzkumu a indikovat procesy, které jsou na vegetaci viditelné až později (Dobrovolný et al. 2021).



Obr. č. 4 Spektrální křivka odrazivosti

(Dostupné z: <https://www.slideshare.net/jirms/2-dpz-uvodfyzikalnimetody2011>)

Vzhled povrchů pokrytých vegetací je na družicových snímcích ovlivněn především faktory jako jsou: vodní obsah, zdravotní stav, vnitřní struktura vlastností půdního substrátu, vnějším uspořádání vegetačního krytů a vlastnosti půdního substrátu (Dobrovolný et al. 2021)



Obr. č. 5 Křivka odrazivosti listu

(Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky_povrch_vegetace.html)

Podíváme-li se na obrázek, uvidíme spektrální křivku odrazivosti listu, které se v oblasti viditelného a blízkého infračerveného záření dělí na tři části, které odpovídají faktorům určujícím velikost spektrální odrazivosti (Dobrovolný et al. 2021).

- A. Pigmentační absorpce (400-700nm) – způsobuje zelené zbarvení rostlin. Které ovlivňuje chlorofyl, který pohlcuje 70 až 90 % dopadajícího záření v modré a červené části spektra.
- B. Buněčné struktury (700 – 1300) – ovlivňuje odrazivost listů, jejich hustotu a je používán pro charakteristiku míry hustoty vegetačního krytu.
- C. Oblast vodní absorpce (1300-3000)- absorpční pásy vody. Jedná se o látku, která je homogenní a může se na snímcích ukazovat v různých skupenstvích, takže se odrazové vlastnosti mohou lišit. Voda se vyznačuje velmi nízkou odrazivostí vlnových délek. Avšak odrazivost čerstvě napadaného sněhu má větší odrazivost než ostatní povrchy. Propustnost vody na vlnovou délku je 0,48 μm a proniká do hloubky 20 metrů. Voda se na snímcích jeví nejtmaší (Dobrovolný et al. 2021).

K mapování vegetace se dále používá i odrazivost vegetace v různých intervalech elektromagnetického spektra. Viditelná část spektra je pohlcována zejména zeleným barvivem neboli chlorofylem. Důsledek je ten, že vegetace na černobílých fotografiích je obvykle velmi tmavá. Pohlcování záření je nejsilnější v červené a modré části záření v oblastech 550 nm, proto na nás vegetace působí jako zelená. Oblasti mezi 700 až 800 nm působí silnější odrazivost a v blízkosti infračerveného spektra (mezi 700 až 1300 nm) je odrazivost dána uspořádání buněk rostlin, na které působí nejvíce slunečního záření. Na snímcích lze také dobře rozlišit jehličnatý a listnatý les, jelikož listnatý je výrazně světlejší (Dobrovolný et al. 2021).

4. Monitoring sucha

Všechna využitá data jsou shromažďována z dálkového průzkumu Země ze senzoru MODIS naneseného na družici Terra. Nyní bude poukázáno, jak jsou na tom se suchem již konkrétní části Evropy. Zaměříme se na sucho ve východní a střední Evropě, kam spadají země, jako jsou Česká republika, Slovensko, Ukrajina, Moldavsko, Maďarsko či Rumunsko a pobaltské státy. Monitoring bude na základě konkrétního popisu indexů v průběhu let 2005 až 2020. Každý z indexů bude popsán, na základě zobrazené mapy a její hodnotící škály. Jako postup byl zvolen vždy konkrétní týden v průběhu roku 2005 až 2020. Bude se jednat o opakování období, půjde vždy o 5. týden roku, dále 14., 31. a posledním je 49. týden. Prvně bude zhodnocen index NDVI, který patří mezi nejpodstatnější. Následovat bude index TCI a VCI, index stresu vegetace a index EVI, u kterého bude jako u jediného ukázána mapa z některého týdne v identickém měsíci z důvodu špatné dohledatelnosti indexu. Snímky jsou využity z družice Terra a dat z webu společnosti NASA.

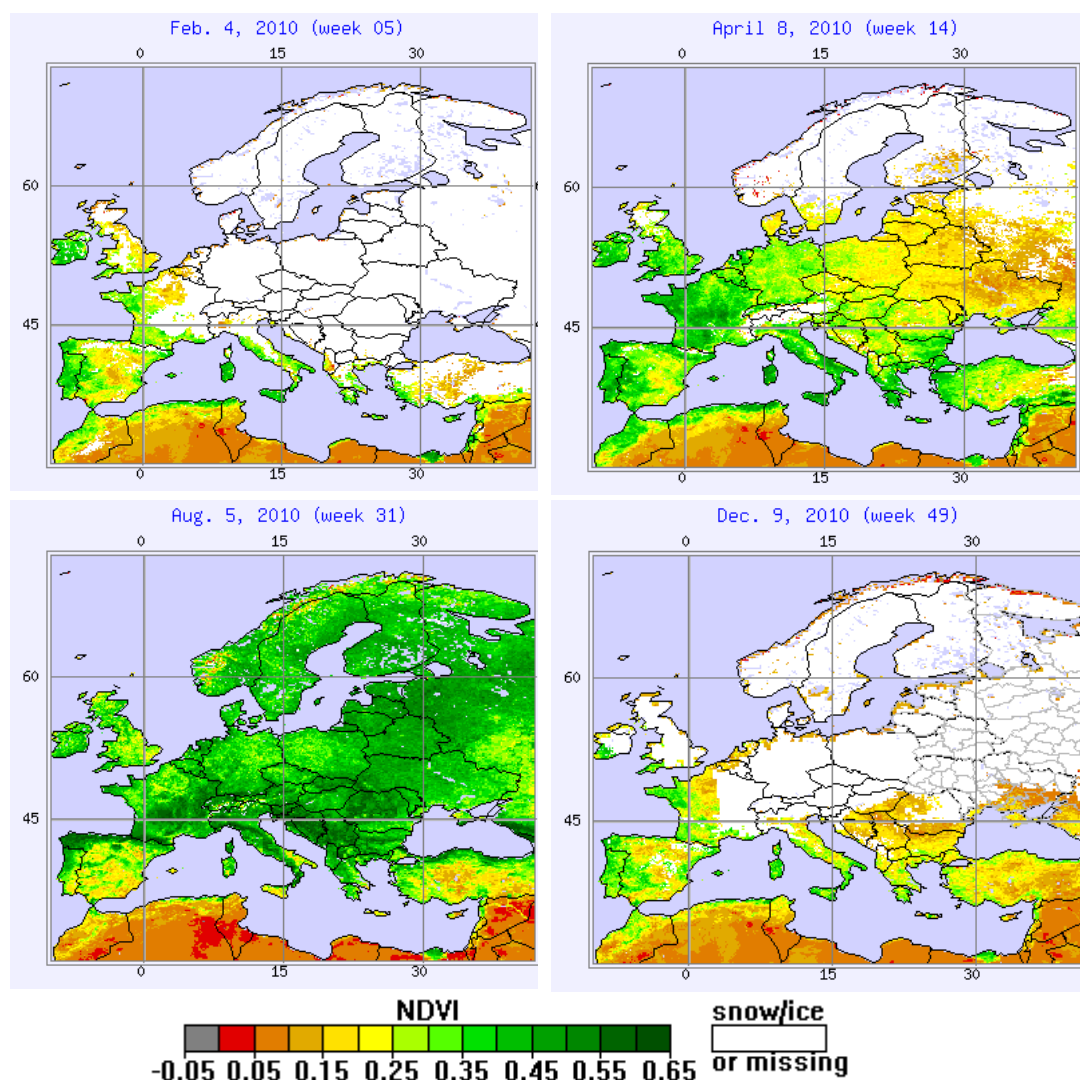


Obr. č. 6. Mapa zemí, které budou monitorovány za pomoci indexů.

4.1. Monitoring sucha dle NDVI

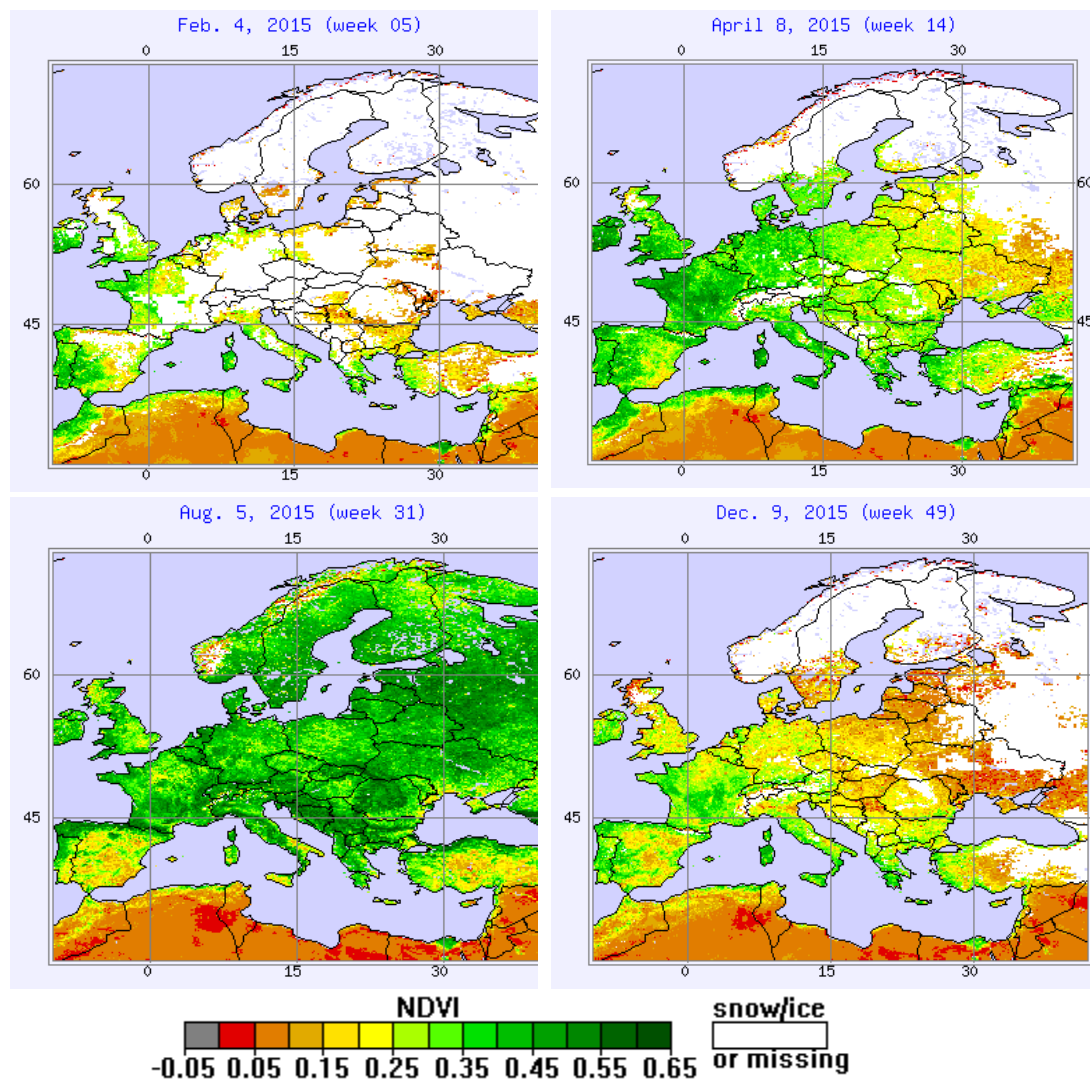
Prvním indexem bude ten nejpodstatnější a to NDVI, s jeho pomocí lze dobře popsat množství a hustotu vegetace. Rok 2010 byl specifický tím, že bylo velké množství sněhové pokrývky takřka na území celé střední i východní Evropy. Celkově se jednalo o vlhký rok. V zimě bylo jediným místem s malým výskytem vegetace střední Maďarsko. Po nástupu jara byly hodnoty indexu mezi 0,25 až 0,30, což lze definovat jako středně hustou vegetaci, východní část kontinentu definovaly hodnoty okolo 0,15. Z důvodu dostatku srážek můžeme také

pozorovat brzký nástup vegetace zejména ve střední Evropě. Na východě je nástup pozvolnější, pouze na jihu Rakouska v oblastech Alp se stále nacházelo určité množství sněhu. V průběhu letních měsíců je vidět krásně rovnoměrný růst vegetace po celém území. Nejvyšší vegetaci můžeme pozorovat v oblastech Rumunska, Slovenska a Běloruska a Pobaltí, detekují ji hodnoty nad 0,55, to značí velmi hustou vegetaci, zatímco zbytek střední Evropy působil spíše jako začátek jara, než vrchol vegetace, jelikož hodnoty byly maximálně 0,40. Na začátku prosince také můžeme vysledovat celý střed Evropy zasypaný sněhovou pokrývkou, vyjma jihu Maďarska, kde se stále nacházely zbytky vegetace. Na východě byla situace identická kromě jihovýchodní Ukrajiny, která se vymykala jejímu okolí. Hodnoty byly mezi 0,05 až 0,10 a šlo o velmi řídkou vegetaci.



Obr. 7. Prostorové rozlišení NDVI v průběhu vegetačního období chladného roku 2010 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

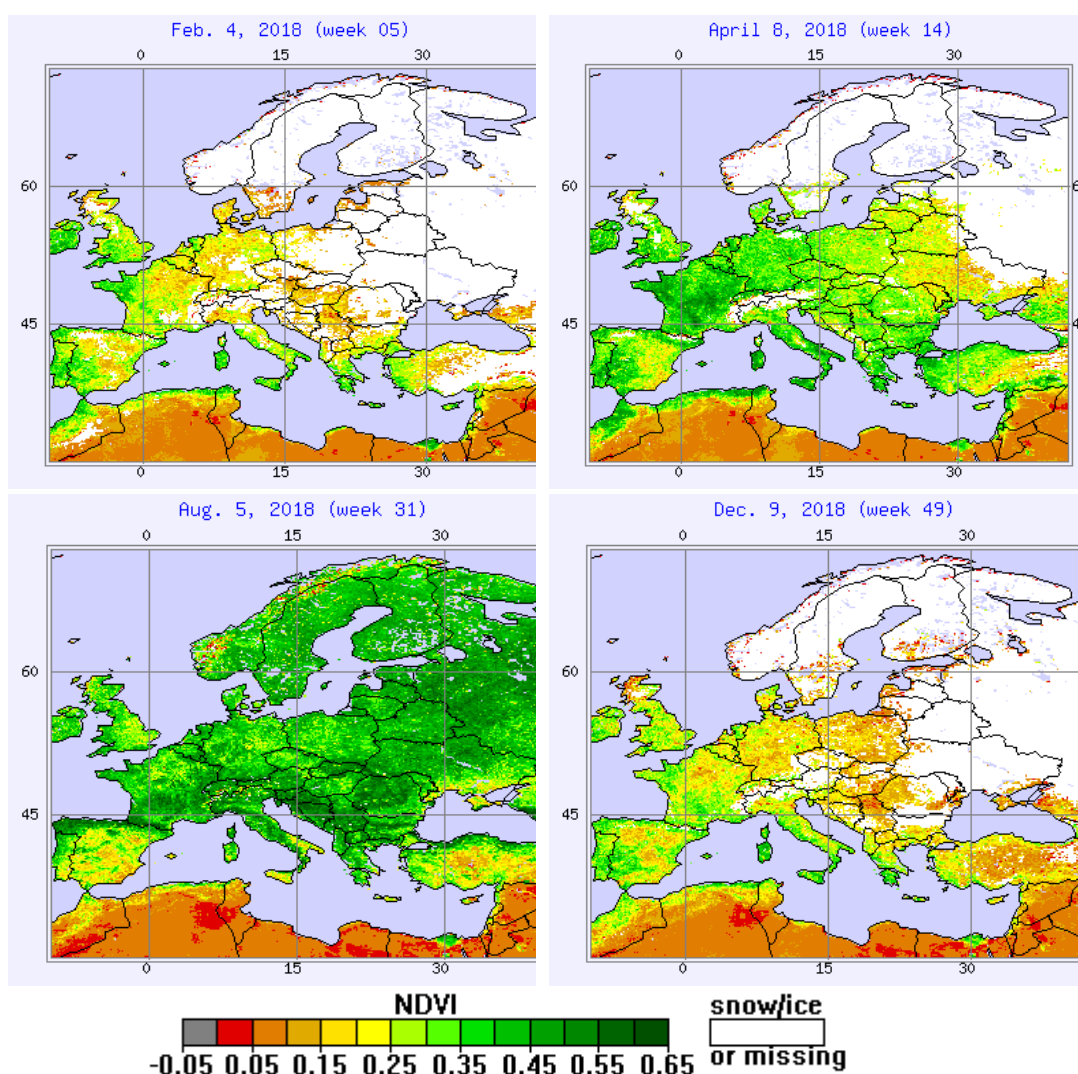
Rok 2015 byl suchý, v průběhu února se nacházela sněhová pokrývka na většině sledovaného území. S příchodem jarních měsíců byl však pozvolnější nástup vegetace, než je obvyklé. V oblasti Slovenska a Rakouska se ještě stále nacházela sněhová pokrývka. Východ Evropy se teprve probouzel a vegetace v něm byla spíše minoritní. Šlo o hodnoty mezi 0,25 až 0,30, byla tedy průměrná. I v létě lze pozorovat menší množství a řidší vegetaci oproti normálu, na jižní Ukrajině lze také pozorovat místy holou půdu až velmi slabou vegetaci v hodnotách 0,15 až 0,20. Tento problém byl však opravdu pouze lokální. V prosinci však zatím nenapadla téměř žádná sněhová pokrývka, vegetace výrazně ustoupila zejména na východě k hodnotám 0,05 až 0,15, definující ji jako velmi řídkou.



Obr. 8. Prostorové rozlišení NDVI v průběhu vegetačního období 2015 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browser.php)

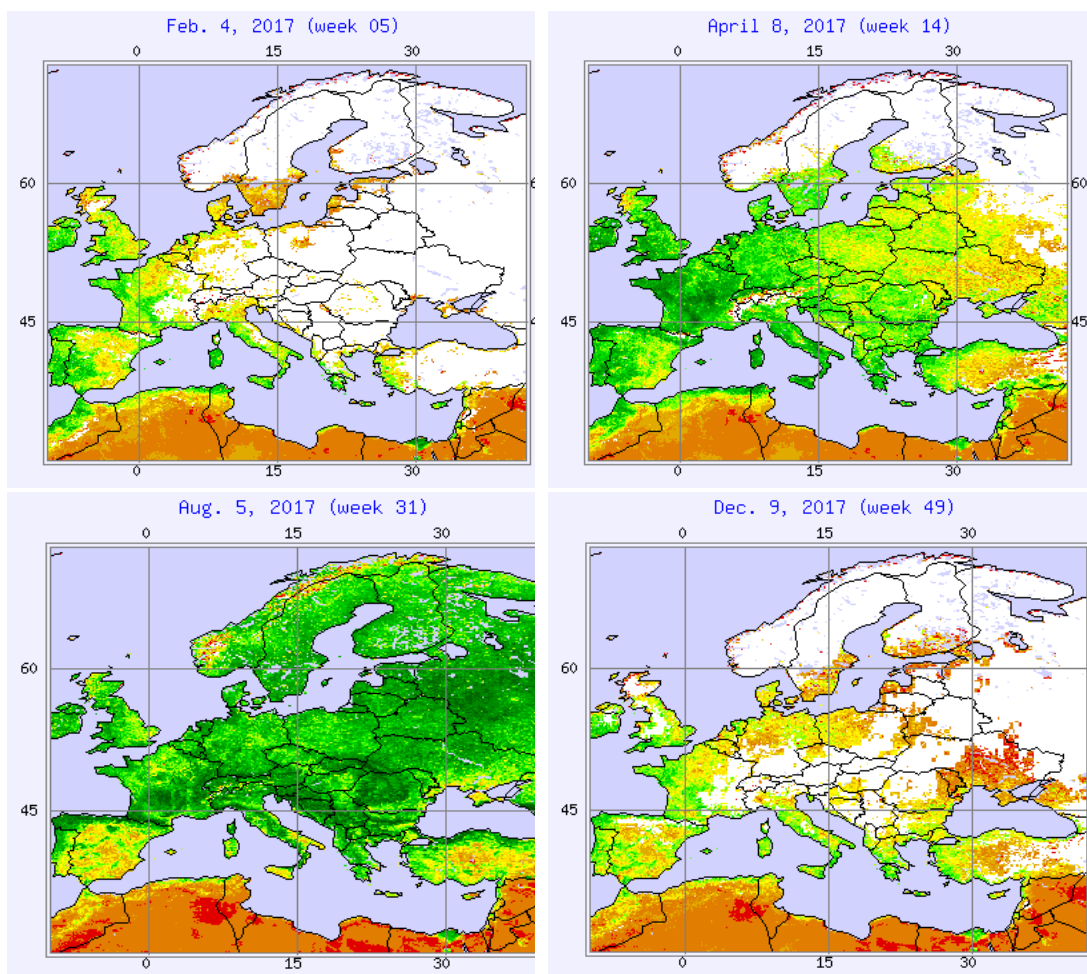
Mezi vegetačně nejlepší roky patřil rok 2017 i 2018. V roce 2018 se v průběhu února vyskytovala pokrývka sněhu pouze mírně na východě, ve střední Evropě se prakticky nenacházel. Můžeme ho pozorovat zejména v oblastech Ukrajiny, středního Rumunska

případně východního Polska. Naopak ve středu Evropy bylo možné pozorovat postupný nárůst nové vegetace, hodnoty indexu nad 0,10. V průběhu pozdního jara již byla přítomna kompletně rozvinutá flóra v celé centrální části kontinentu a dále postupný nástup v oblastech východu. Nejpozdější rozvoj byl v oblastech Běloruska, Ukrajiny a Moldavska. V polovině léta již byla patrná enormně rozvinutá vegetace po prakticky celé Evropě, pouze na jihu Ukrajiny byl patrný její ústup. Hodnoty indexu jsou 0,40, tudíž skvělý stav. Viditelný byl také rozdíl mezi středem a východem kontinentu, jelikož sucho se v mnohem větší síle projevilo v centrální části kontinentu. Východní část kontinentu dosahovala hodnot nad 0,55, což značí bujnou a velmi hustou vegetaci. Ani s příchodem zimy nelze pozorovat výraznou změnu, jelikož se sníh nacházel pouze v oblasti Běloruska, Moldavska, Rakouska a Ukrajiny. Celý střed kontinentu byl stále mírně zarostlý vegetací a i v zimních měsících byla teplota o přibližně dva stupně vyšší, než je průměr, hodnoty indexu korelují mezi 0,10 až 0,15.



Obr. 9. Prostorové rozlišení NDVI v průběhu vegetačního období 2018 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

Druhým nejlepším obdobím v pořadí byl rok 2017. V počátku roku se nacházel sníh prakticky po celém kontinentu, výjimkou je sever Lotyšska, kde touto dobou nebyl přítomen. Lokální hodnoty byly mezi 0,05 až 0,10 značící velmi řídkou vegetaci. S příchodem jarních měsíců byl viditelný nástup vegetace na celém středu kontinentu. Na východě kontinentu byl nástup pozvolnější, rozdíl byl znatelný v hodnotách indexu. Zatímco střed kontinentu držel 0,40, východ se nacházel ve stavu hodnot 0,20. V letních měsících byl stav vegetace zcela optimální všude, vyjma jihu Ukrajiny, kde nebyla vegetace v tak bujném stavu jako jinde. Střed kontinentu jako celek měl řidší vegetaci než východní část, kde hodnoty NDVI dosahovaly nad 0,50, což značí velmi hustou vegetaci. Příchod zimy byl ve znamení množství první sněhové pokrývky, stále lze však najít velké množství oblastí, ve kterých bylo možné vyčistit špatný stav. Zmínit lze například Moldavsko, jihovýchodní Ukrajinu, či západ Polska, kde byla stále přítomná velmi řídká vegetace detekovaná v hodnotách nad 0,10.

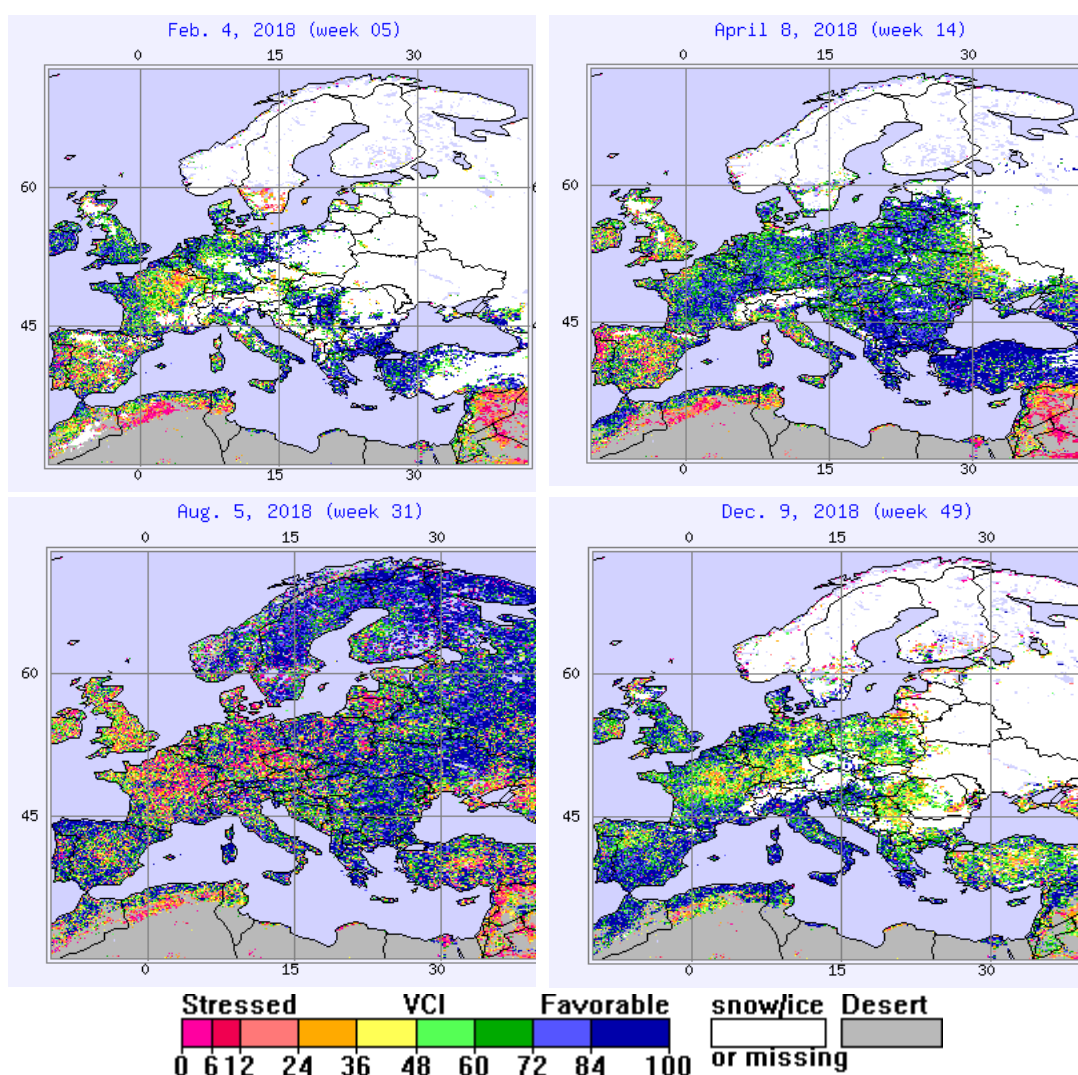


Obr. 10. Prostorové rozlišení NDVI v průběhu vegetačního období 2017 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

4.2. Monitoring sucha dle VCI

Pomocí indexu VCI je možné sledovat nedostatečnou sněhovou pokrývkou ve druhé polovině zimy, vyjma východu. Zejména v Rumunsku a Maďarsku vidíme nestresovanou

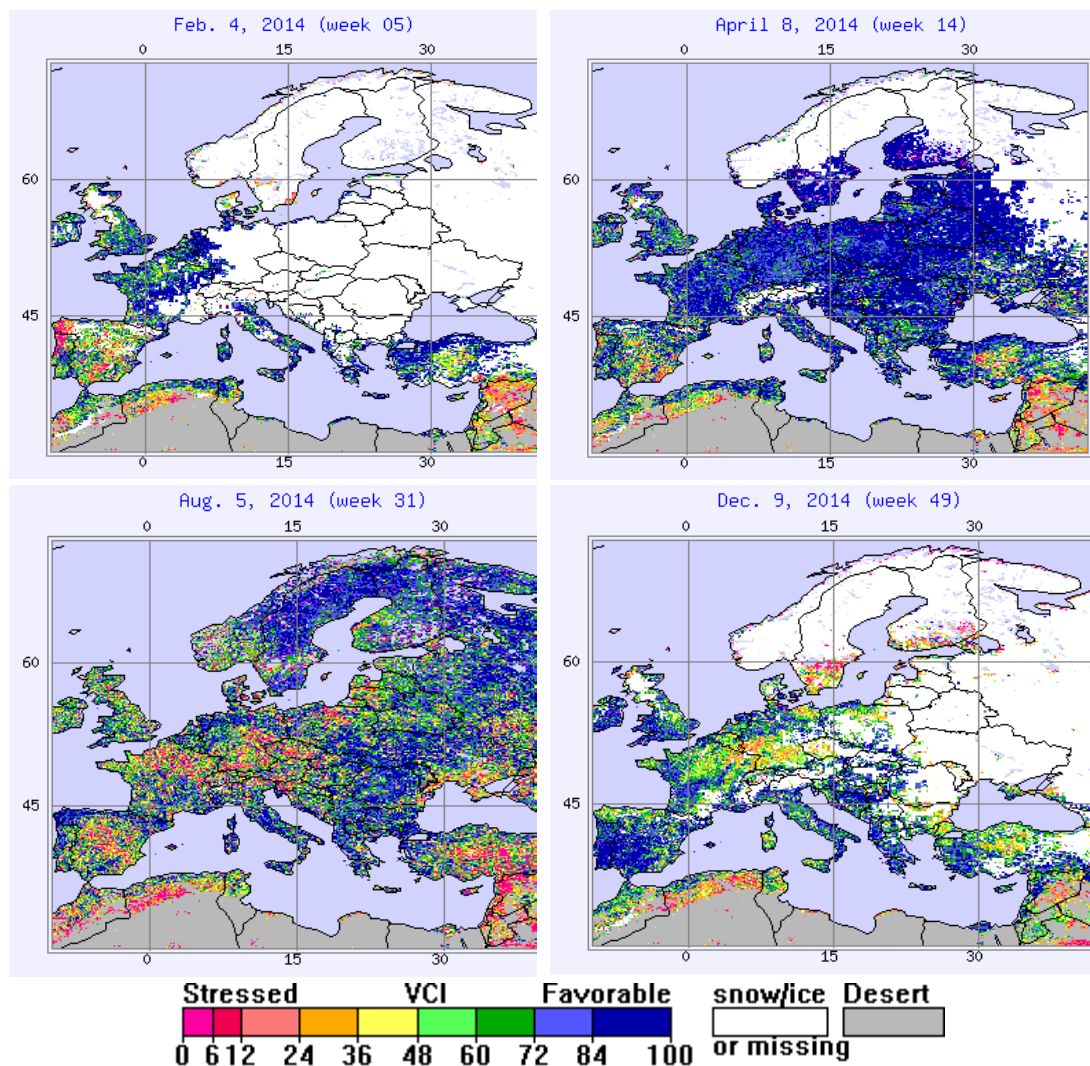
vegetaci, v hodnotách 84 % a vyšší, což značí velmi nízkou přítomnost sucha. I po nástupu jara se ve středu kontinentu stále nacházela relativně zdravá vegetace, přestože na Ukrajině již při nástupu vegetace nebyla situace příznivá, stejně jako v Česku a Bělorusku, hodnoty indexu jsou na východě oblastně 50 - 60 % značící přítomný stres, zbytek kontinentu má hodnoty mezi 70 - 85 % značící lehké sucho. Kritickou situaci lze vysledovat v průběhu léta, zejména v Česku a Lotyšsku a východním Polsku, zde byla hodnota indexu pouhých 10 - 25 % značící extrémní sucho. Přesto jsou mnohé země na východě stále bez výraznějších problémů v hodnotách mezi 70 a 80 %. V zimním období již vegetační stres opustil prakticky celý kontinent, vyjma západu Lotyšska, východu Rumunska a jihu Moldavska, kde byla situace v hodnotách mezi 50 - 60 %. Naštěstí šlo touto dobou již pouze o malá lokální území, situaci změnil i příchod sněhové pokrývky do východní oblasti Evropy.



Obr. 11. Prostorové rozlišení VCI v průběhu vegetačního období suchého roku 2018 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

Druhým nejpostiženějším obdobím z pohledu sucha, byl rok 2014, přestože byl v zimě dostatek sněhové pokrývky v oblasti celého kontinentu. S příchodem jara byla situace v

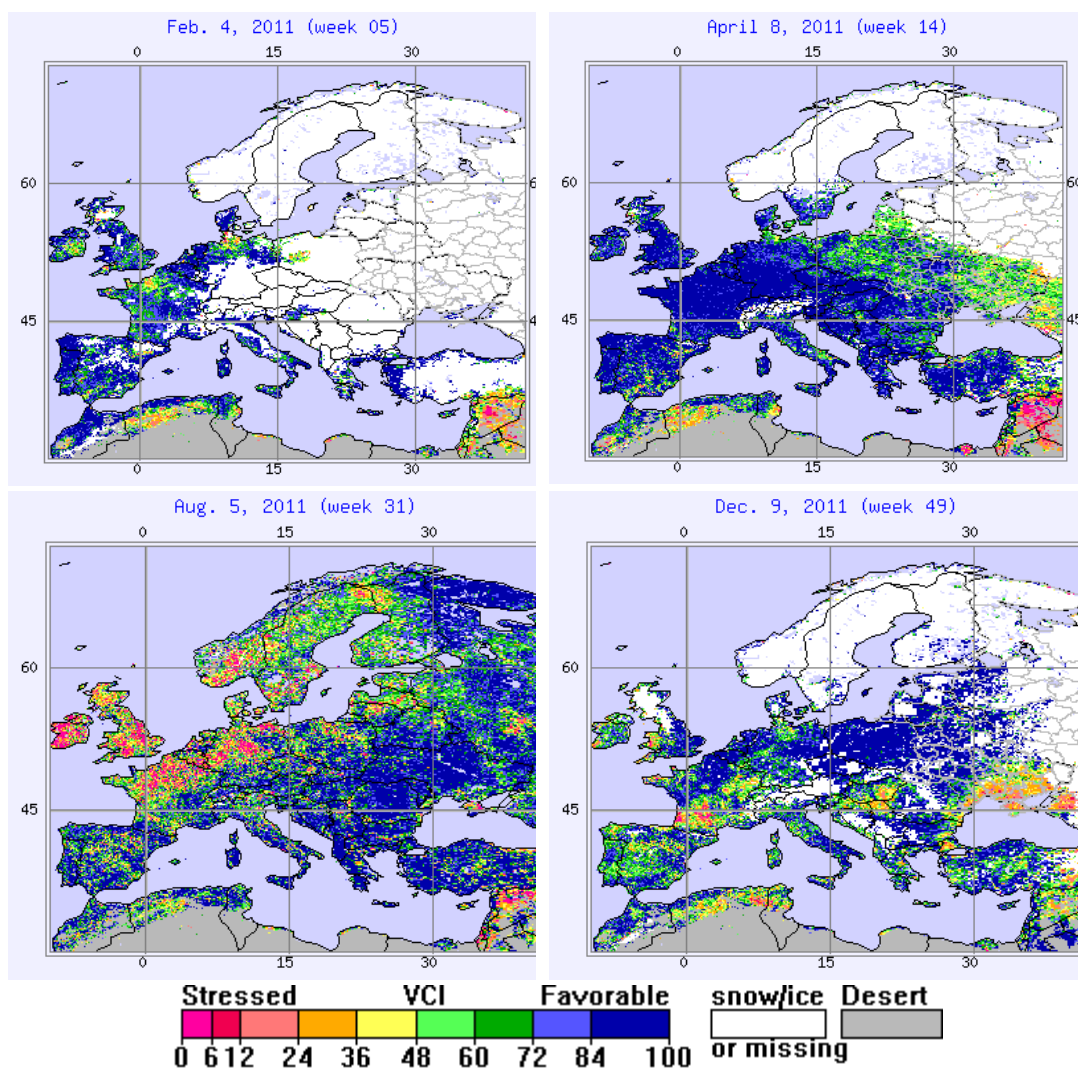
dobrém stavu rovnoměrně po celém území, výjimkou byl lokální intenzivní stres v oblasti Moldavska a také lokální problémy v prakticky každé zemi. Hodnoty však zůstávaly nad 80 %, tudíž bylo nadále velmi mírné sucho. S příchodem léta se situace výrazně změnila a kritická situace se vyskytovala na území celé České republiky, Slovenska, Moldavska a také velké části jižní Ukrajiny a Pobaltí, sucho bylo kritické s hodnotami do 25 %. Stále pozitivní stav bylo možno vidět v Bělorusku a velké části Rumunska, kde dosahovaly hodnoty až k 80 %. S příchodem prosince se situace zlepšila, východní část kontinentu zapadala sněhem a pouze lokální stres se vyskytoval v Česku a střední části Polska, hodnoty však byly nad 60 %, tudíž šlo nadále o středně silné sucho.



Obr. 12. Prostorové rozlišení VCI v průběhu vegetačního období suchého roku 2014 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

Opačná situace byla v celém období roku 2011, kterou lze popsat jako nejlepší období dle tohoto indexu. V druhé polovině zimy tohoto roku byl kontinent kompletně pokrytý sněhem, což definovalo již ze začátku roku pozitivní vývoj. Tento vývoj šel sledovat nadále i s příchodem jara, kdy byl celý střed Evropy ve vynikajícím stavu. Východ kontinentu se nacházel v nadprůměrném stavu, vegetační stres se však nevyskytoval ani lokálně a hodnoty byly

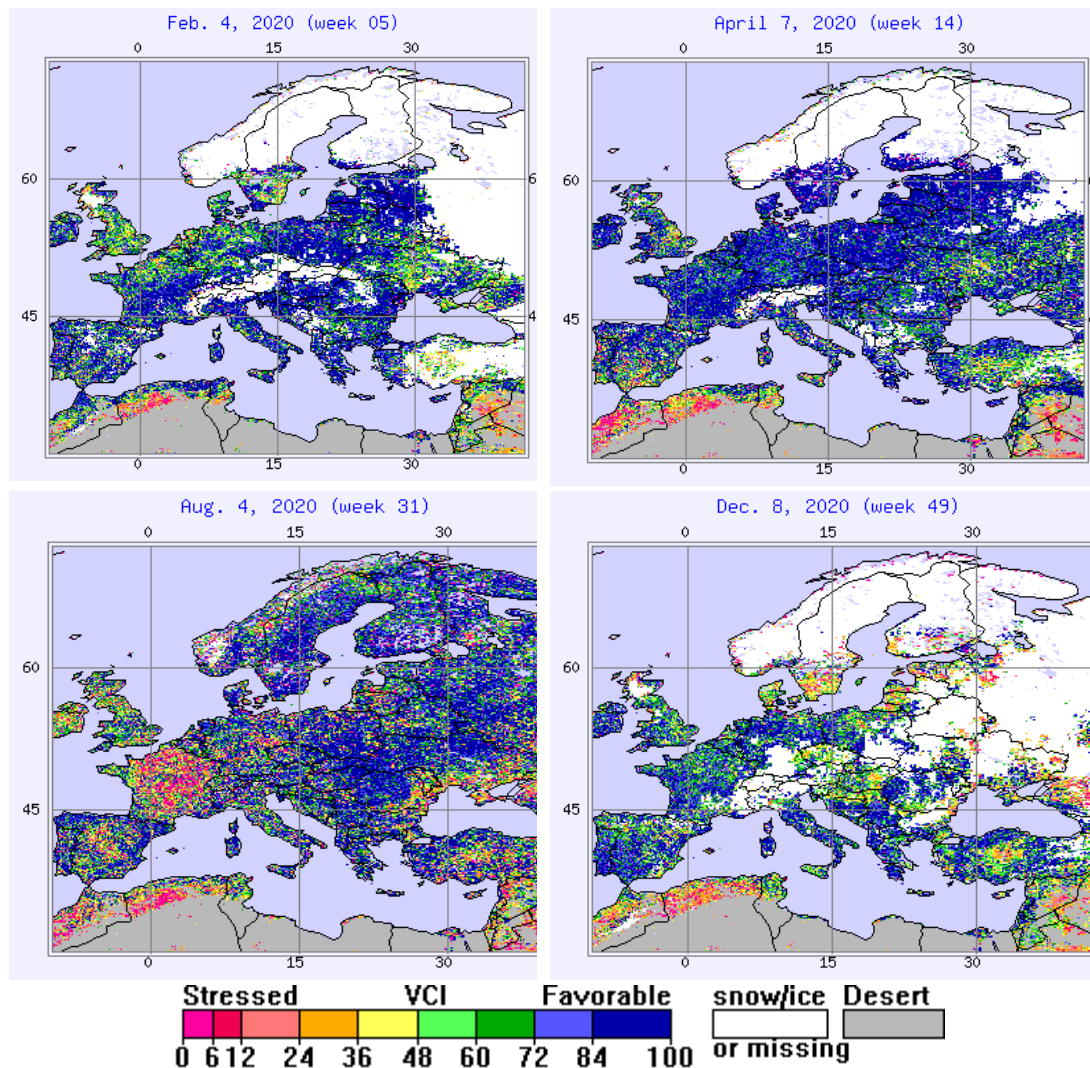
globálně nad 84 %, tudíž sucho bylo jen velmi mírné. Příchod léta situaci změnil a vynikající stav byl na východě v hodnotách nad 80 %, zatímco ve středu kontinentu převládal zhoršující se stav, avšak v Polsku a Lotyšsku bylo možno vidět lokální problémy, hodnoty byly lokálně 30 % značící závažné sucho, většinové hodnoty však byly mezi 60 - 70 % značící lehké až střední sucho. S příchodem zimy se nedostavila sněhová pokrývka, což Evropu výrazněji nezasáhlo. Výjimkou byla situace v Ruské federaci, kde se začal projevovat intenzivní stres.



Obr. 13. Prostorové rozlišení VCI v průběhu vegetačního období vlhkého roku 2011 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

Závěrem jde o rok 2020, kdy byla v únoru vegetace zdravotně podle indexu VCI naprosto v pořádku s hodnotami nad 80 %, tedy nízkou intenzitou sucha. Na celé ploše není jediné místo, které by na tom nebylo dobře. Sníh se vyskytoval pouze v rámci střední Evropy. Ve východní části šlo pozorovat zhoršující se trend, ale stav v zimě byl stále nadmíru uspokojující s hodnotami mezi 50 a 60 %. S příchodem jara se situace zlepšila, zejména ve východní části kontinentu a vegetace se touto dobou nacházela v bezkonkurenčně nejlepším stavu za poslední léta, hodnoty indexu se dostaly nad 70 % a více, lokální minima byla 60 %. V

srpnu lze pozorovat horšící se stav v Moldavsku, na jihu Ukrajiny a také na hranicích Ruské federace, problémy byly však pouze lokální s hodnotami pod 30 %, neboli kritické sucho, zbytek východu kontinentu byl na hodnotě 85 %. Střed Evropy lze hodnotit velmi nadprůměrně, hodnoty zde dosahovaly 70 - 80 % značící počínající sucho. S příchodem zimy se viditelně zhoršil stav ve všech třech pobaltských státech, situace však nebyla nikterak kritická a hodnoty korelují po celém kontinentu v hodnotách nad 60 %, kromě lokálních oblastí středního Maďarska a dále lze vidět příchod sněhové pokrývky v oblasti východu Evropy, kde šlo o hodnoty 25 %, které značí kritické sucho.

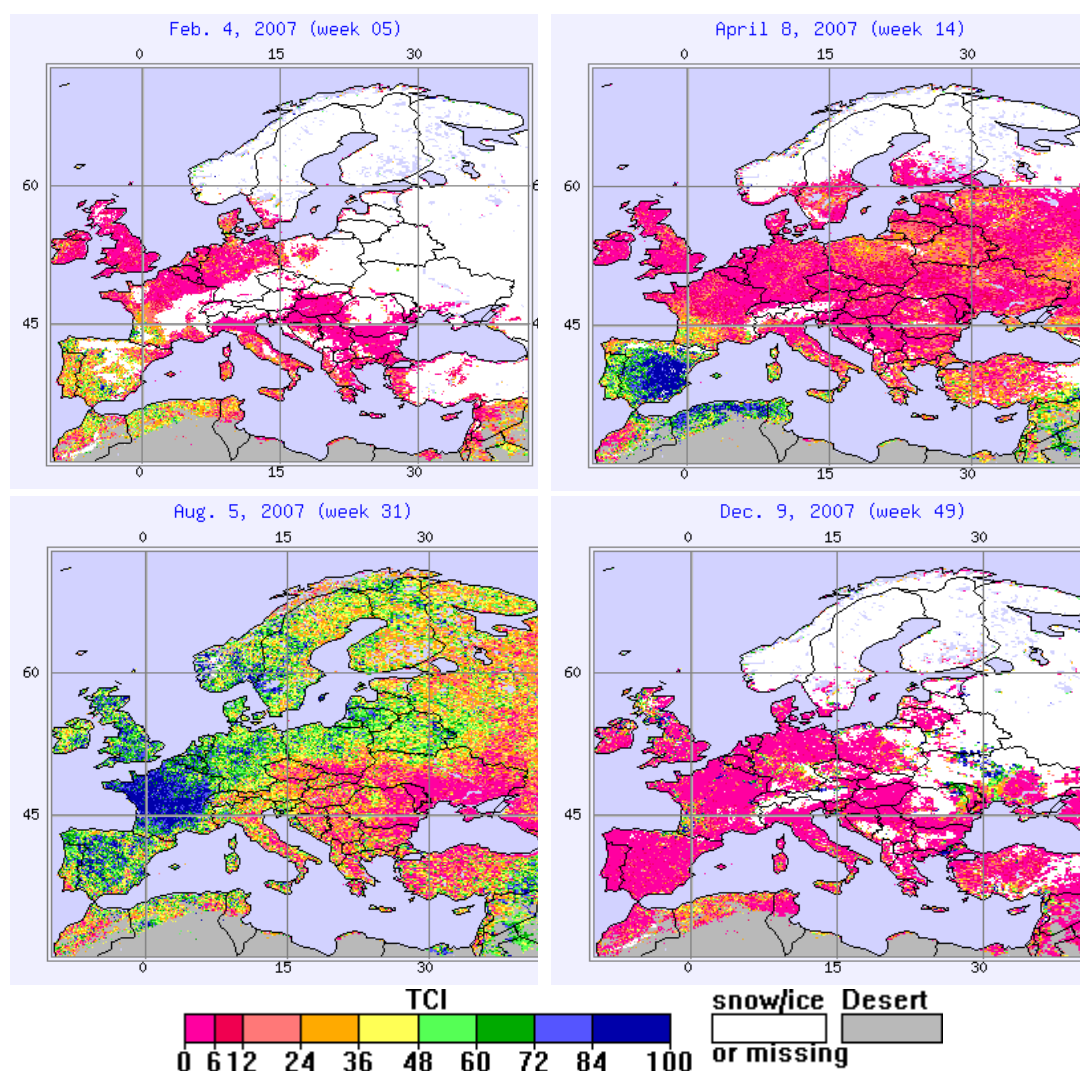


Obr. 14. Prostorové rozlišení VCI v průběhu vegetačního období vlhkého a teplého roku 2020 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

4.3. Monitoring sucha dle TCI

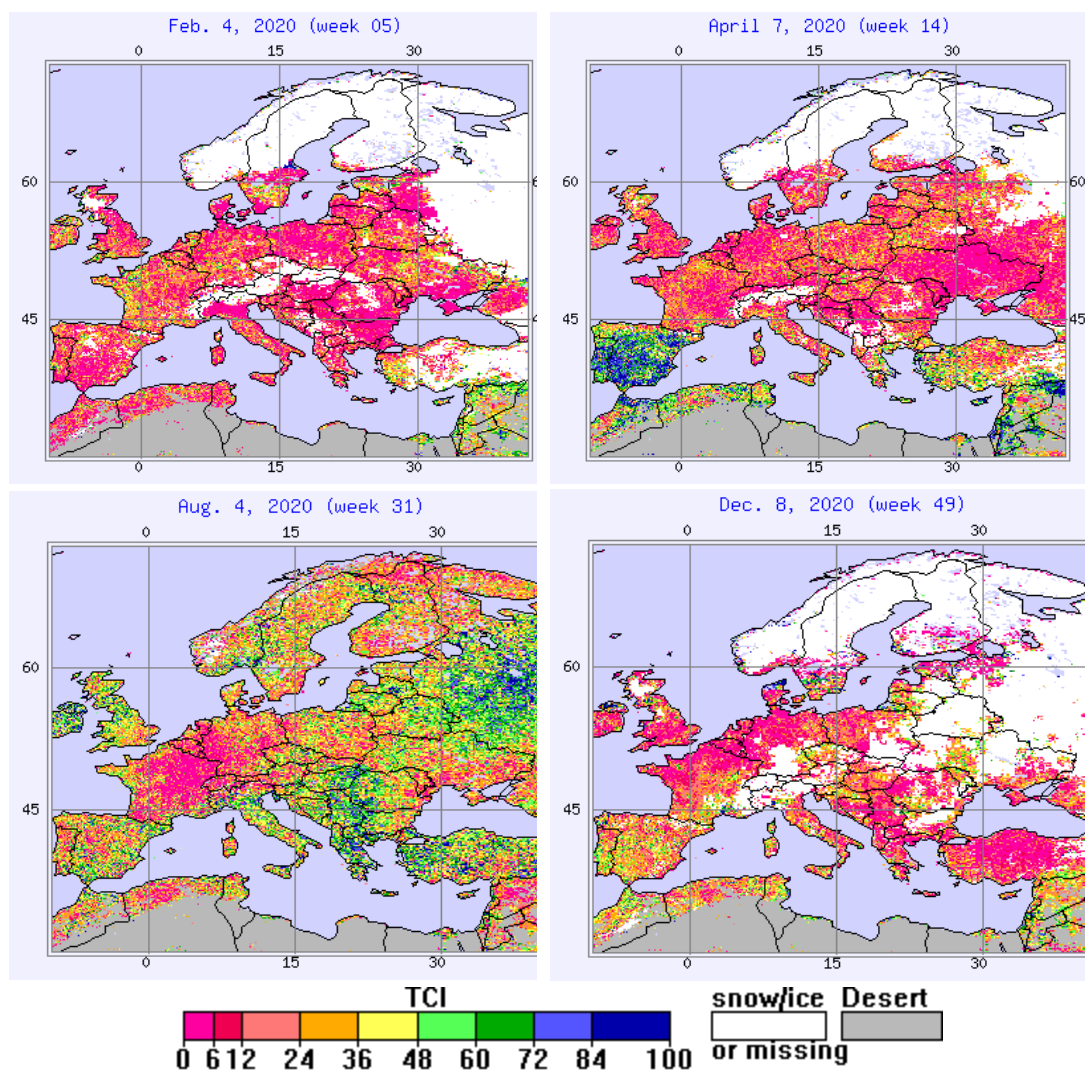
Třetím indexem, monitorujícím sucho, je TCI, který byl kritický v letech 2007 a 2020. V prvním případě byla sněhová pokrývky na velké části území kontinentu. V některých oblastech, zejména v Maďarsku a středním Polsku však lze definovat naprosto kritickou situaci,

kteřá se do této doby objevovala maximálně v letních měsících, jejíž hodnoty byly pod 10 %. Ani nástup jara nezměnil situaci, spíše naopak. Pouze v lokálních oblastech Polska, Běloruska a Ukrajiny nastaly případy, ve kterých nebyla situace zcela katastrofální. Při pohledu na mapu je však vidět, že detekující teplotní stres decimoval celý kontinent od východu na západ s nebývalou silou, jelikož teplota byla od ledna až do začátku léta o 2-5 °C vyšší než je průměr, hodnoty indexu TCI byly pod 10 %, což značí enormní stres. Menší úleva přišla s příchodem léta, v němž se situace zlepšila zejména v Pobaltí a severním Polsku, zde se nacházely oblasti s hodnotami nad 50 % značící akceptovatelný stav. Tam se místy dokonce situace dostala do obvyklých hodnot. Zbytek středu Evropy a zejména jihovýchodní část kontinentu, se stále nacházela ve zcela tragických podmínkách, oblasti s hodnotami pod 10 % detekovali nadále kritický stav. Ani začátkem prosince nespadlo tolik sněhové pokrývky, jako je obvyklé, tím pádem se situace opět zhoršila a zůstala kriticky špatná na většině území.



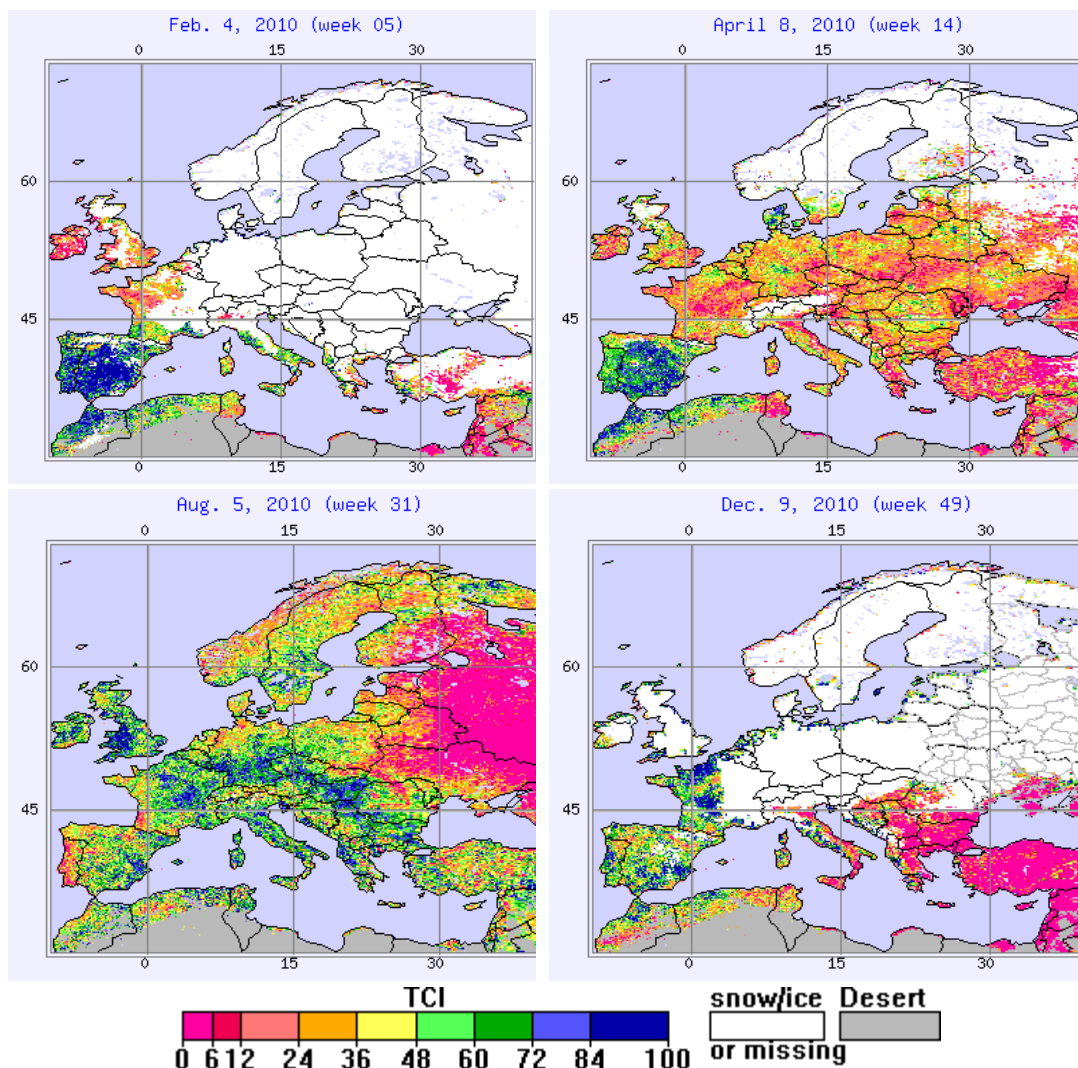
Obr. 15. Prostorové rozlišení TCI v průběhu vegetačního období teplého roku 2007 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

Ze začátku roku bylo možné v zimě detekovat teplotní stres na většině území kontinentu vyjma Čech, Rakouska a Slovenska. Další méně zasažené oblasti byly na střední Ukrajině, Moldavsku a v Bělorusku. Hodnoty byly lokálně mezi 40 - 50 %, což značí podprůměrný stav, převážně šlo však o hodnoty pod 10 %, což je již kritický stav. S nástupem jara se situace stabilizovala v oblasti Polska, Běloruska a Pobaltí. Zhoršující se trend naopak projevilo v Rakousku, Ukrajině a Česku, kde se z příznivého stavu stal stav kritický. Chladnější léto zajistilo zlepšení na celém kontinentu, hodnoty indexu však zůstaly 20 %, místy 40 % a v Pobaltí mezi 40 - 60 %. Jediná horšící-se místa byla Rakousko a Moldavsko. Teplý prosinec způsobil vznik intenzivního teplotního stresu v Polsku. Zbytek kontinentu se s příchodem zimy dramaticky neměnil, tudíž se stres vyskytoval ve velké části kontinentu a ani sníh nebyl v takové míře, zůstaly hodnoty pod 10 %. Nicméně byly nadále lokální oblasti s hodnotami mezi 50 a 70 %.



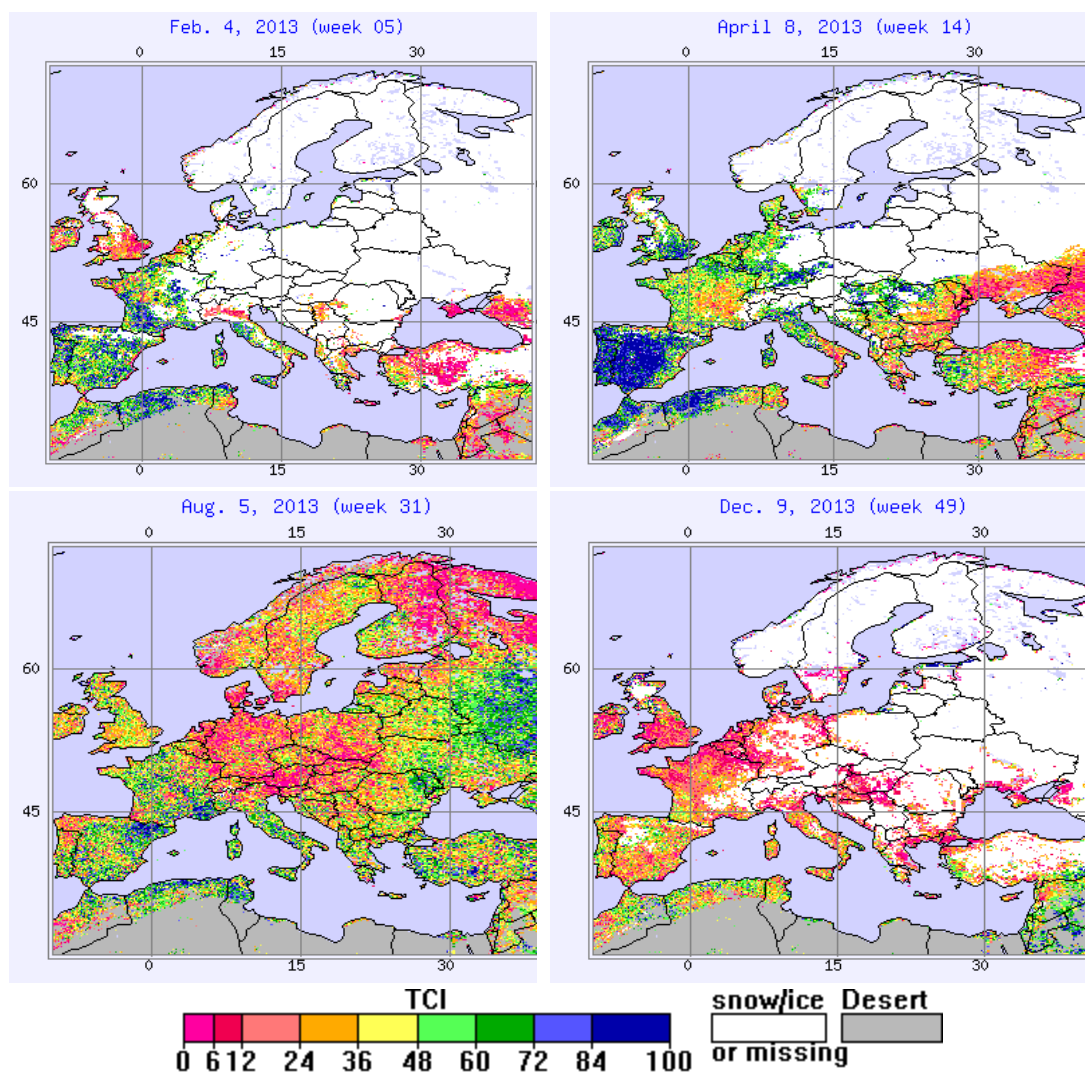
Obr. 16. Prostorové rozlišení TCI v průběhu vegetačního období teplého a vlhkého roku 2020 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

Opačné výsledky indexu byly zjištěny v roce 2010. Zde se teplotní stres v průběhu února vůbec nevyskytoval, naopak lze definovat velké množství sněhové pokrývky na kontinentu. S příchodem jara se začal teplotní stres vyskytovat, jelikož teplota byla vyšší o 0,7°C než obvykle. Nejpostiženější oblastí bylo bezpochyby Moldavsko, které bylo postiženo zcela kompletně s hodnotami pod 20 značící kritický stav. Nejméně zasaženy naopak byly oblasti ve středu Rumunska a Maďarska, kde byly hodnoty kolem 40 %, ale teplotní stres byl nadále pouze lokální. Všechny země byly na určité části území zasaženy teplotním stresem, každá z nich však měla oblasti, kde se stres nenacházel. Ani zmíněnou intenzitu nelze nazvat jako kritickou. V průběhu léta se střed Evropy dostal do stavu normálu a hodnoty vystoupaly nad 70 % značící velmi dobrý stav. Východ Evropy měl zcela opačné problémy, jelikož Ukrajina, Bělorusko i Ruskou federaci zasáhla intenzivní vedra a hodnoty byly opět kritické pod 10 %. Lehký teplotní stres lze vidět i na Slovensku. V průběhu prosince bylo již také viditelné množství sněhu. Teplotní stres převážně ustoupil vyjma jihu Maďarska i Rumunska, kde byla situace i nadále kritická s hodnotou pod 10 %.



Obr. 17. Prostorové rozlišení TCI v průběhu vegetačního období chladného a vlhkého roku 2010 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

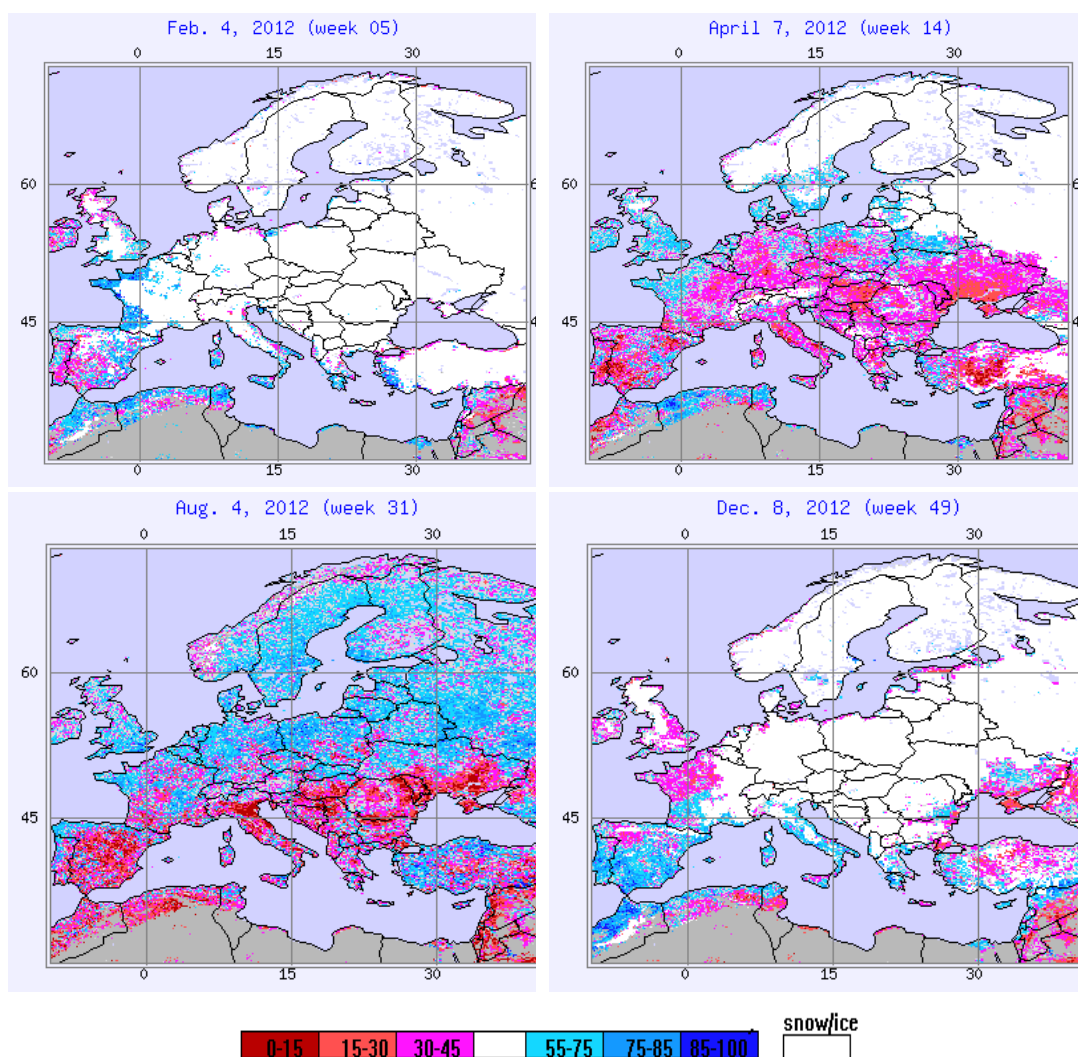
Závěrem je dle TCI druhým nejlepším rok 2013. S teplotním stresem ze začátku února nebyl žádný výraznější problém a kontinent byl pokryt sněhovou pokrývkou. Toto platí vyjma oblasti Krymu, kde byla situace výrazně pod normálem. Také v jeho okolí bylo tepleji, než jsou průměrné hodnoty. S nástupem jara se ve středu Evropy situace nezměnila a zůstala ideální a v mnoha místech stále přetrvával sníh, jinak šlo o hodnoty nad 70 %. Východní část Evropy byla zasažena více, zejména Moldavsko, kde lze pozorovat kritický teplotní stres na přibližně polovině území s hodnotami pod 10 % s lokálními výkyvy nad 60 %, kde byla situace uspokojivá. S příchodem léta se situace na východě stabilizovala a výraznější problémy byly pouze lokálně, zatímco střed Evropy byl zasažen intenzivně vyjma Čech s hodnotami nad 40 %, tedy hraniční stav. V zimě se situace uklidnila na naprosté většině kontinentu. Vyjma poloostrova Krym a také celého Maďarska, které bylo touto dobou velmi zasaženo stresem s hodnotou pod 10 %, která neutuchala. Také je viditelný příchod první sněhové pokrývky.



Obr. 18. Prostorové rozlišení TCI v průběhu vegetačního období chladného roku 2013 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

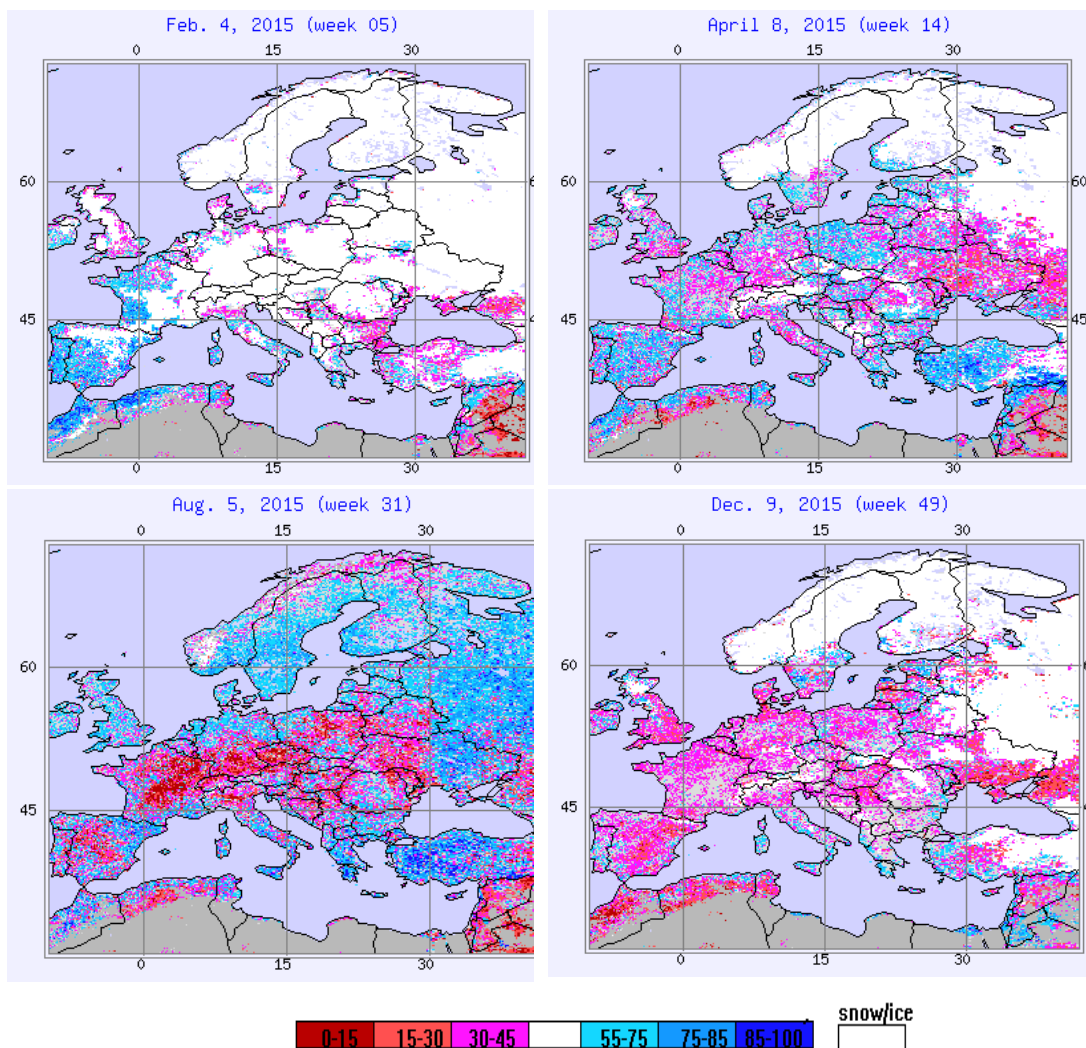
4.4. Monitoring sucha dle ESI

Předposledním zkoumaným indexem je ESI. V případě monitoringu ESI, byl nejhorším obdobím rok 2012. I zde lze vidět sníh po celém kontinentu v průběhu měsíce února. Po jeho tání a s nástupem jara se situace rychle měnila. Pozitivní stav se nacházel v Pobaltí, Bělorusku a v severní části Polska s hodnotami nad 55 %. Střed Evropy byl výrazně zasažen, nejvíce Česko a Maďarsko. Obdobná situace se nacházela na Ukrajině a Moldavsku. Hodnoty na jaře byly mezi 15 - 30 % na východě a 30 - 45 % ve středu kontinentu. Změna nastala s příchodem léta. Evropa se touto dobou rozdělila na dvě části. Česká republika, Slovensko a severní státy měly pozitivní stav vegetace s hodnotami nad 55 %. Naopak Maďarsko, Moldavsko i jih Ukrajiny byl dále zasažen trvalým působením vegetačního stresu s hodnotami pod 15 %, značící kritický stav. S nástupem zimních měsíců dorazil na kontinent sníh, vegetace se tudíž dostala do dobrého stavu. Vegetační stres se vyskytoval pouze lokálně v Pobaltí, na Ukrajině a kritický stav zůstal na Krymu.



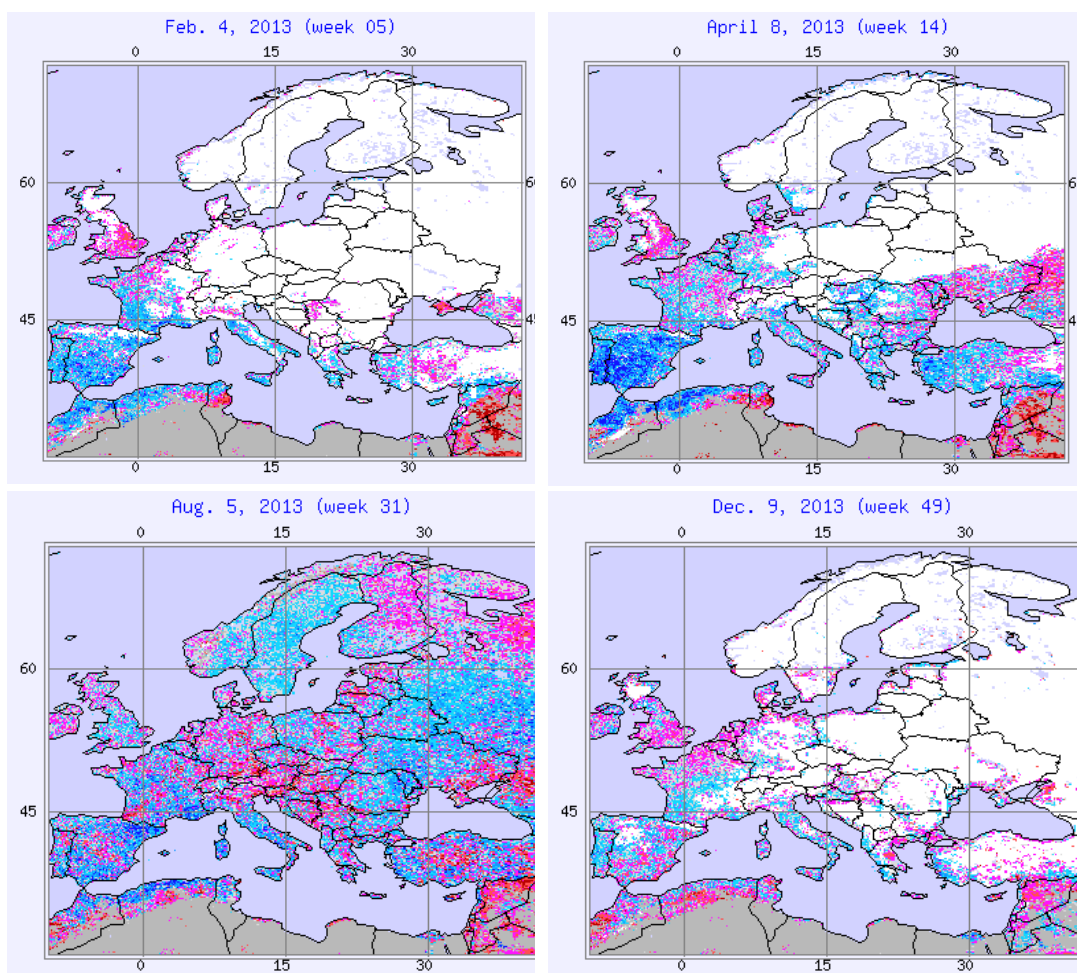
Obr. 19. Prostorové rozlišení ESI v průběhu vegetačního období roku 2012 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

Druhým nejpostiženějším rokem byl rok 2015. V jeho případě se nacházel po celém kontinentu sníh v druhé polovině zimy. Již nyní však bylo možné definovat přítomný vegetační stres v oblastech Krymu a lokálně po celém území kontinentu. Příchod jara znamenal pozitivní vývoj ve středu kontinentu, zatímco východ začínal být silně poškozen. Hodnoty byly však identické v obou částech kontinentu mezi 30 a 45 % definující lehce nadprůměrný stav. Kritický stav se vyskytoval zejména na střední Ukrajině, změnou však byla situace poloostrova Krym, který se dostal do lepšího stavu, přesto měl hodnoty indexu pod 30 %. Velký rozdíl nastal v létě, kdy celý střed Evropy lze nazvat katastrofálním s hodnotami pod 30 %, například celé Maďarsko i pod 15 %. Východ kontinentu byl rozdělen na dvě poloviny přibližně v půlce Ukrajiny. Východní část byla v nadprůměrném stavu s hodnotami nad 50 %, zatímco západ Ukrajiny i Běloruska zasáhl lehčí stres než střed Evropy s hodnotami mezi 30 a 45 %. Také Pobaltí bylo v nadprůměrné kondici. Příchod zimy bez sněhu však znamenal výskyt stresu po celém kontinentu, na jižní Ukrajině šlo až o kritický stav. Sníh se dále téměř nevyskytoval a hodnoty nadále zůstávaly pod 30 %.



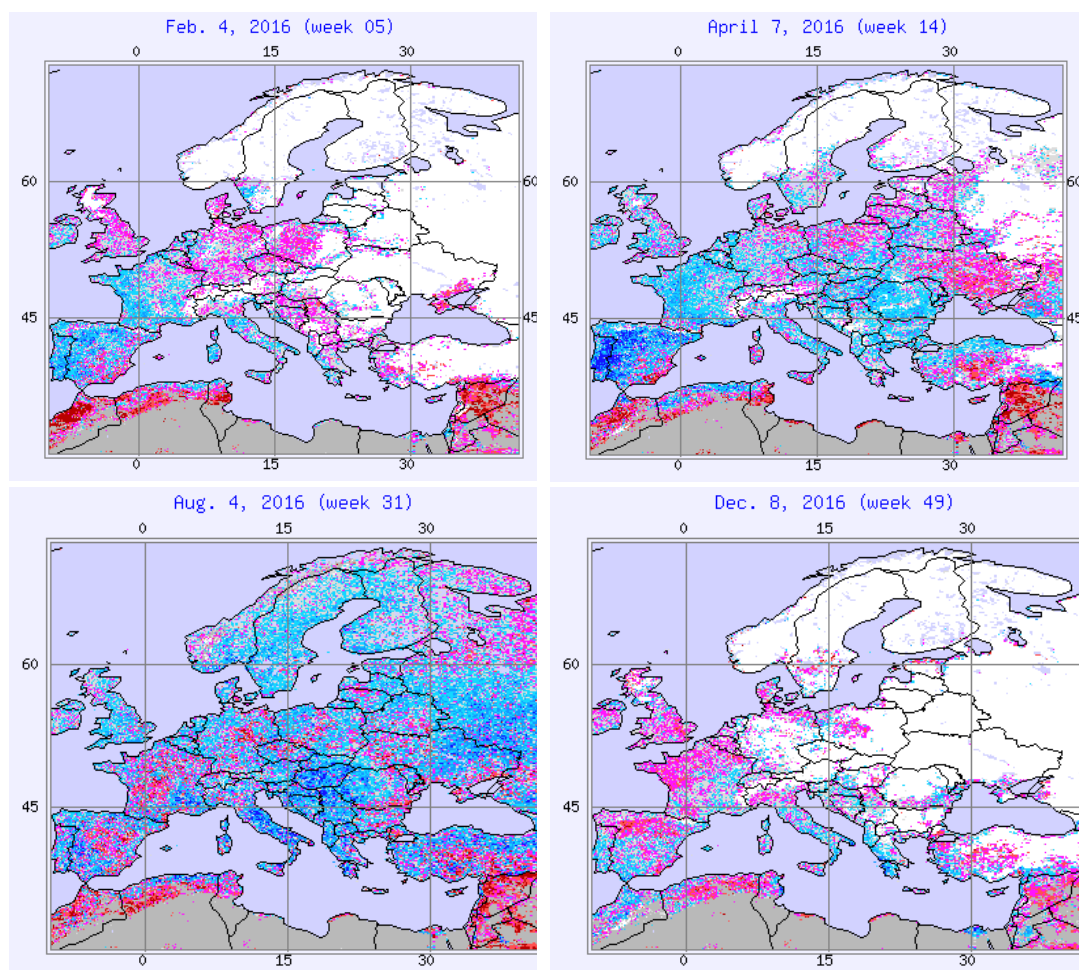
Obr. 20. Prostorové rozlišení ESI v průběhu vegetačního období suchého a teplého roku 2015 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

Dva nejlepší roky z pohledu indexu ESI byly 2013 a 2016. Prvním je rok 2013, v němž byl i prakticky nepozorovatelný vegetační stres, vyjma kritického stavu na Krymu. Jinak šlo vidět po celém kontinentu dostatek sněhu. S příchodem jara byl výrazněji zasažen východ kontinentu, kde šlo o hodnoty mezi 30 - 45 %, zejména jižní Ukrajina nebyla v nejlepšímu stavu. Střed kontinentu měl stále dostatek sněhu, v místech kde již neležel, šlo o výtečný stav vegetace, jelikož hodnoty dle indexu byly bujné mezi 55 a 75 %. I v tomto případě šlo pozorovat, že s příchodem léta nastaly změny a stres přešel z východu spíše do středu Evropy, kde bylo postiženo zejména Rakousko s hodnotami nad 30 %. Pozitivní změna byla viditelná například v Moldavsku, kde se touto dobou situace zlepšila na hodnoty přes 55 %. S příchodem zimy postupně docházelo k výraznému ústupu stresových faktorů a příchodu sněhu. Výjimkou je Maďarsko, kde lze sledovat výrazně lepší vegetaci než byla v letním období



Obr. 21. Prostorové rozlišení ESI v průběhu vegetačního období chladného roku 2013 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

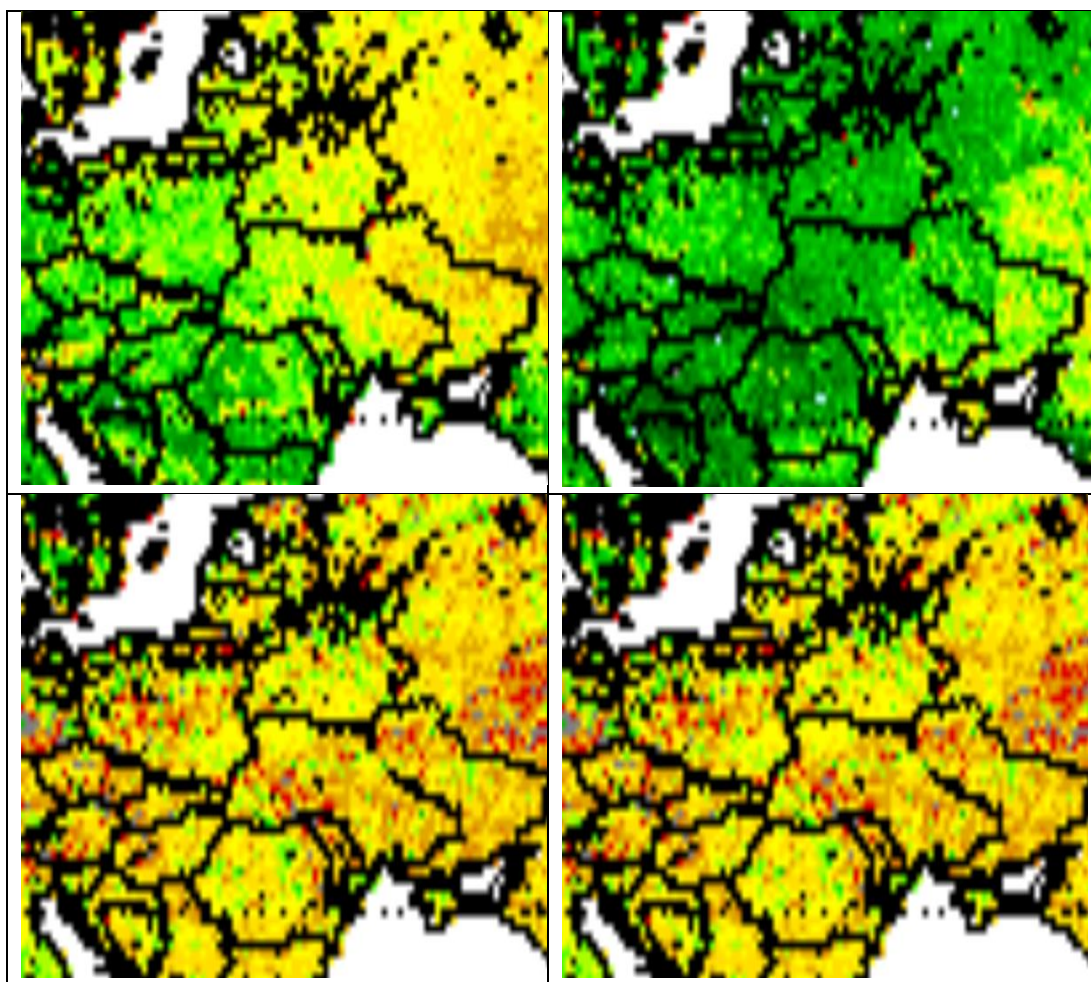
Druhým nejlepším obdobím byl rok 2016. V tomto případě šlo vidět již na konci zimy nedostatek sněhu v celém středu Evropy kromě Rakouska. Také touto dobou začal působit vegetační stres v oblastech Polska a jižní Ukrajiny, hodnoty však zůstaly mezi 30 - 45 %, což stále značí lepší průměr. S příchodem jarních měsíců se také situace mění, střed Evropy se dostával do bujného stavu s hodnotami mezi 55 - 75 %, což je téměř nejlepší možná hodnota. Naopak Pobaltí a Ukrajina do stresu upadali a hodnoty klesly na 30 - 45 %, což je stále uspokojující hodnota. S příchodem léta se situace stabilizovala a celoevropsky ji šlo hodnotit jako nadprůměrnou s hodnotami nad 75 %. I nyní se nacházely lokální oblasti, ve kterých se nacházely horší podmínky s hodnotami nad 30 %. Šlo zejména o část Čech a Polska, západní Ukrajiny, či Běloruska. S příchodem prosince již byla většina kontinentu zapadána sněhem. Lze však dohledat i místní stres jako například ve středním Polsku, případně stejně jako ve východním Maďarsku. Kritická situace se však stále vyskytovala lokálně na severu Estonska mezi hodnotami 30 a 45 %.



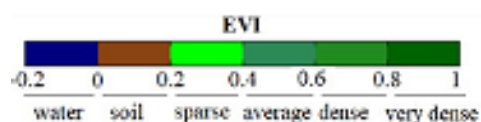
Obr. 22. Prostorové rozlišení ESI v průběhu vegetačního období teplého roku 2016 v Evropě (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

4.5. Monitoring sucha dle EVI

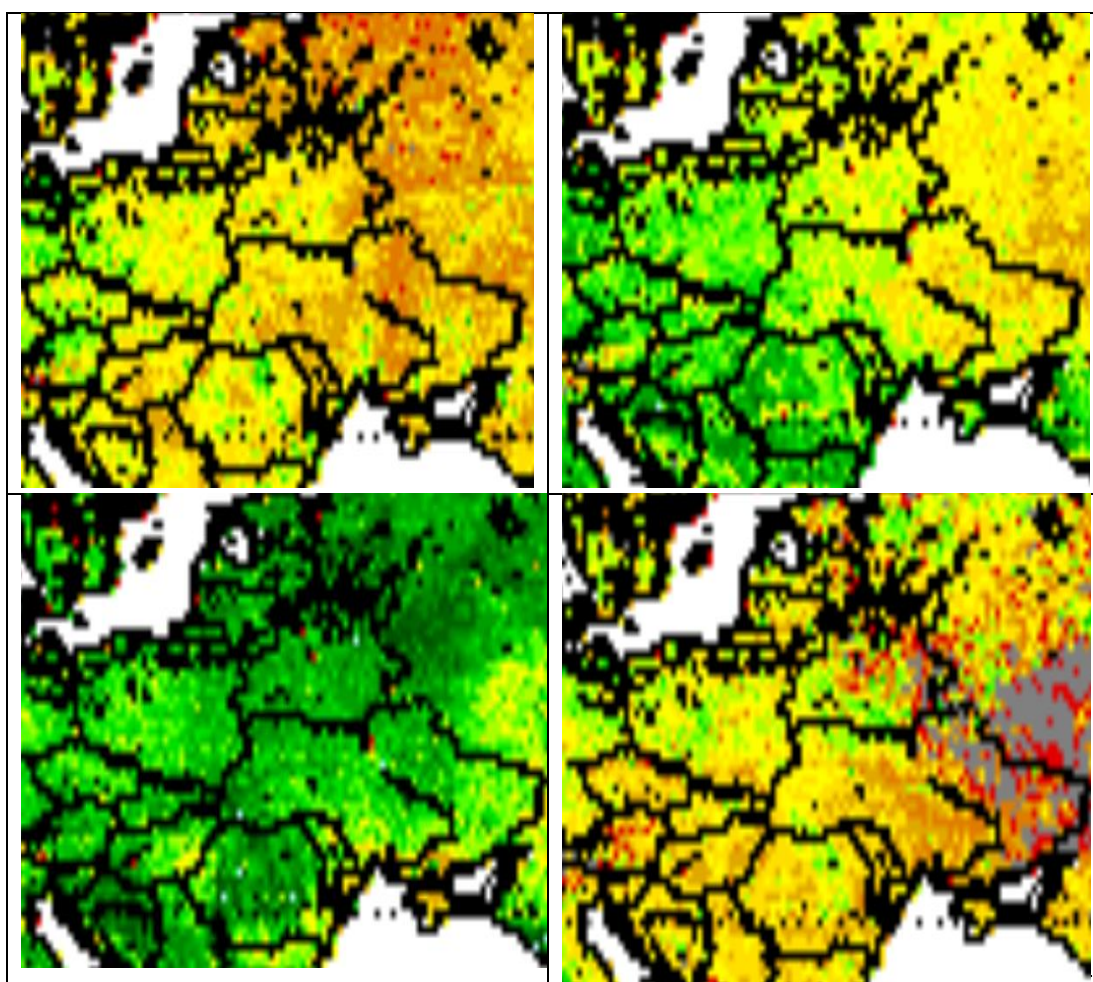
Dle indexu EVI byl nejhorším obdobím rok 2010. Tentokrát však nebudu hodnotit přesné týdny, jelikož použitá data jsou dvoutýdenní. V zimním období je velké množství sněhového úhrnu na takřka celém pozorovaném území. S příchodem jara se hodnoty indexu dostaly na 0,4, což značí průměrný stav vegetace ve středu kontinentu, východní část kontinentu, zejména Ukrajiny dosahovala pouze hodnot 0,2, což značí přítomnost řídké vegetace, avšak místy byla situace lepší. Léto mění situaci k lepšímu, nejhorší situace byla opět v oblastech jižní Ukrajiny, Moldavska a poloostrovu Krym, kde se jednalo o hodnoty mezi 0,3 a 0,4. Střed kontinentu byl v bujné vegetaci, což detekovala hodnota indexu 0,6. Na začátku zimy lze vidět částečně střed Evropy pokrytý sněhovou pokrývkou, jsou však oblasti s vegetací v hodnotě 0,4. Východ kontinentu má vegetaci v hodnotě indexu 0,2 bez přítomnosti sněhové pokrývky.



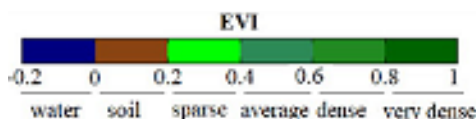
Obr. 23. Prostorové rozlišení EVI v průběhu vegetačního období chladného roku 2010 v Evropě, (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)



Druhým nejpostiženějším obdobím byl rok 2009. Ke konci zimních měsíců byla sněhová pokrývka v oblastech východu, pouze v Pobaltí se nacházela velmi řídká vegetace o hodnotách 0,2 a ta se v identickém stavu nacházela i v oblastech středu kontinentu. Jarní měsíce znamenaly hodnoty 0,4, tudíž byla situace v průměrném stavu. Východní část detekovala hodnoty indexu 0,3. Příchod letních měsíců definoval hodnoty nad 0,6, tudíž byla situace lepší a byla přítomna bujná vegetace po celém území, vyjma Ukrajiny, kde byly hodnoty pod 0,4. Ústup vegetace byl patrný s příchodem konce roku, kdy se po celém území nacházely hodnoty mezi 0,2 a 0,4 a vegetaci šlo označit jako velmi řídkou. V oblastech Pobaltí se objevila také první sněhová pokrývka.

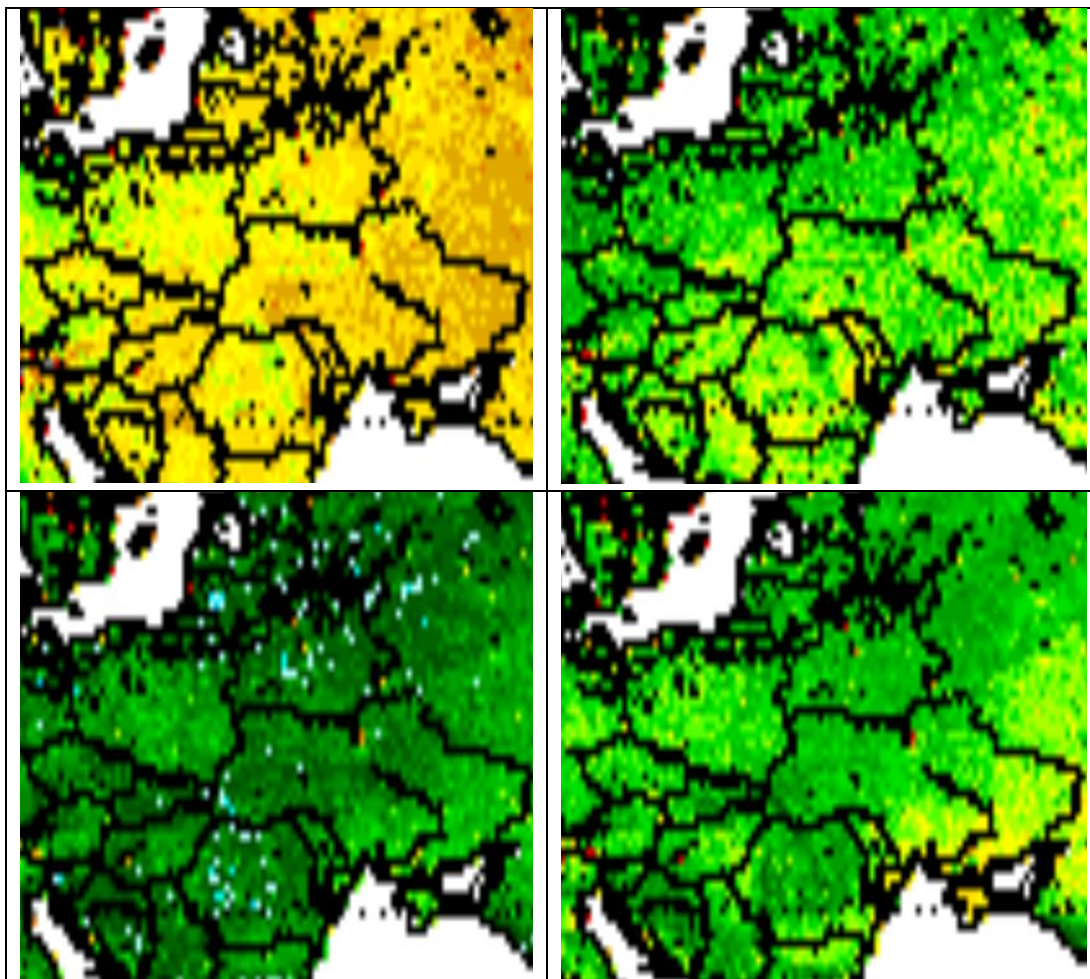


Obr. 24. Prostorové rozlišení EVI v průběhu vegetačního období roku 2009 v Evropě, (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

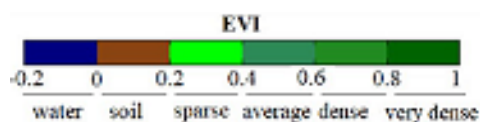


V posledním případě se podívám na dva nejpozitivnější roky z pohledu indexu EVI, byly to roky 2020 a 2018. V prvním roce nebyl pozorovaný sněhový úhrn nikde vyjma oblastí v Ruské federaci. Ostatní místa měla vegetaci o identických hodnotách mezi 0,3 až 0,4. Jarní měsíce znamenaly vynikající situaci a stav vegetace šlo označit za bujný, její hodnoty byly 0,6.

Jedinou odlišností byla jižní Ukrajina o hodnotách 0,4 i proto byl na východě viditelný pomalejší rozvoj vegetace. Oblast Maďarska a Pobaltí v létě zaznamenala vynikající stav, který se blížil k maximu indexu. Zbylá část kontinentu byla stále ve výborných hodnotách nad 0,7. Začátek zimy znamenal postupné řídnutí vegetace, zejména v oblasti východu, kde se jednalo o hodnoty 0,2 až 0,3. Střední část kontinentu zůstala na průměrném stavu 0,4.

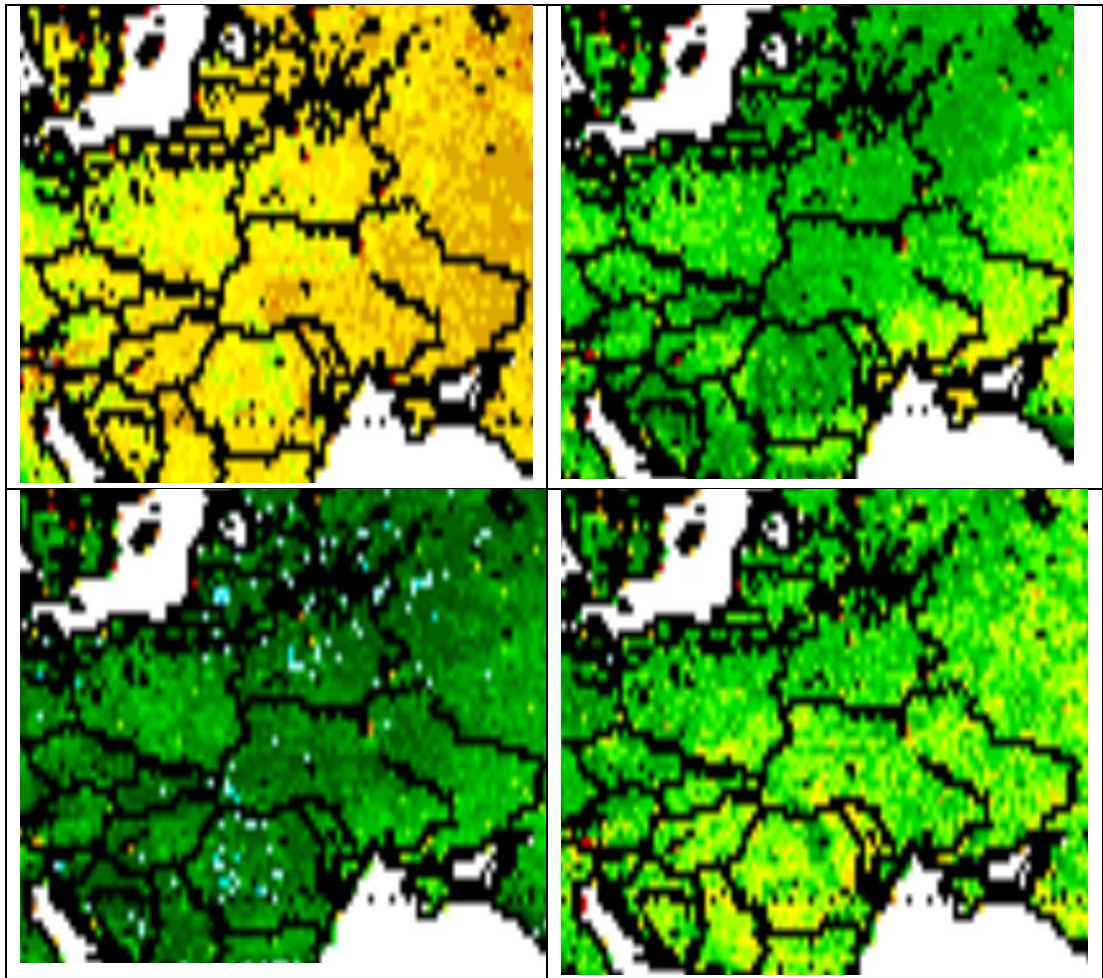


Obr. 25. Prostorové rozlišení EVI v průběhu vegetačního období teplého vlhkého roku 2020 v Evropě, (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)

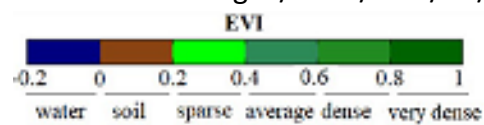


Druhým nejpozitivnějším rokem dle indexu byl rok 2018. U něj byla ze začátku roku viditelná sněhová pokrývka pouze v oblasti Ukrajiny, Běloruska či Pobaltí, kde šlo však o lokální oblasti. Střed kontinentu obsahoval řídkou vegetaci o hodnotě 0,3. Tatáž hodnota se nacházela také v Moldavsku, či v Ruské federaci. Příchod jara znamenal zlepšení situace po celém území, východ byl již v průměrném stavu vegetace o hodnotách 0,4 a vyšší, střed kontinentu byl v bujném stavu 0,6. Letní měsíce znamenaly v Ruské federaci hodnoty nad 0,8

značící enormně hustou vegetaci. Jih Ukrajiny dosahoval 0,4 až 0,5 a střed kontinentu byl v hodnotách nad 0,5. V průběhu prosince se východ kontinentu dostal do stavu řídké vegetace (0,2) a střed kontinentu zůstal na hodnotách 0,4.



Obr. 26. Prostorové rozlišení EVI v průběhu vegetačního období suchého roku 2018 v Evropě, (zdroj: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php)



5. Dopady sucha

Sucho je způsobeno náhlým a výrazným nedostatkem srážek, což má za následek akutní nedostatek vody, pozoruhodný nedostatek půdní vlhkosti a snížený výnos plodiny (Bhuiyan et al. 2017). Dopady sucha doléhají na všechny oblasti života, jednak ekonomické, dále environmentální nebo zemědělské. Roční ekonomické ztráty spojené se suchem rostou a v posledních desetiletích dosahují v průměru 6,2 miliardy eur ročně (Potopova 2015). Jedno z nejintenzivnějších such v posledních letech bylo sucho v roce 2010 v Rusku nebo v Evropě v letech 2012, 2015 a 2018, kdy byly dopady sucha citelné (Potopova et al. 2019). Podívám se na dopady sucha na vegetaci, zemědělství a také na stav půdních vod ve střední a východní Evropě.

5.1. Dopady sucha na vegetaci

Sucho lze obecně zařadit mezi agrometeorologické extrémy a jeho dopady jsou nejzávažnější ze všech ostatních (Brázdil et al. 2015). Reakce plodin na stav sucha je vždy individuální, jedná se vždy o celkové množství půdní vláhy, dobu působení, i roční období. Rozdíl je razantní nedostatek vláhy v dobu vcházení rostliny, při jejímž nedostatku rostlina uhynie a pozdější srážky jí již nepomůžou a produkce je kompletně zničena. Vadnutí rostliny lze prvně sledovat na redukcii růstu (Žalud et al. 2017).

Jedním z nejdůležitějšího přísunu vody pro rostliny, stromy a veškerou vegetaci jsou povrchové a podzemní vody. Pokud se následkem sucha stane, že poklesne hladina vod a tok se stane slabým, stává se také zranitelnějším ke znečištění, což vede ke zhoršení podmínek pro ekosystémy, případně dojde k úplnému vyschnutí toků, rašelinišť, či malých rybníků. Již na jaře pak můžeme sledovat dopady sucha. Rostliny mají různé poškození a trpí onemocněními zapříčiněnými suchem. Na jaře se projevují tak, že nerostou jičiny nebo na první pohled neroste tráva. Nejen vysychání vod však vede ke zhoršení ekosystému, který v horším případě může vést k vymírání určitých druhů rostlin nebo živočichů.

Suchem jsou obzvláště zasaženy lesy, které pokrývají přibližně jednu třetinu zemského povrchu světa a ukrývají více než polovinu známé suchozemské biologické rozmanitosti. Evropské lesnictví se bude muset vyrovnat s významnými nepříznivými dopady změny klimatu, protože stromy, které mají dlouhou životnost, se nemůžou rychle přizpůsobit změnám životního prostředí (Lindner et al. 2010).

Při suchém stavu vegetace může jednoduše vzniknout popraskání půdy nebo požár. Lotyšsko trpělo během sucha v roce 2018 silnými požáry, které způsobily velké škody na zalesněných a zatravněných oblastech. Požáry, které byly i u nás v letech 2003 a 2007 ukázaly, že jsou ničivější v období sucha a významně poškozují vegetaci (Lindner et al. 2010). Samotný požár následně vede k tvorbě oxidu uhličitého a skleníkových plynů. Ničí ekosystémy, pokud je část vegetace porušena vede to k snazšímu poškození škůdci.

Degradace lesní vegetace je způsobena kůrovcem, který je v suchých měsících více aktivní než přes zimu. Jestliže je totiž na jaře vyšší teplota, než je obvyklé, je s tím spojena začínající aktivita do té doby zimujících jedinců. Jednoduše řečeno pokud je teplo, začne se první generace vyvíjet dříve a rychleji a následně se pak stihne vyvinout více generací. Čím více generací se stihne vyvinout, tím jsou následky kůrovcem rozhodně citelnější a ničivější. Napadení kůrovcem vede ke kácení stromů a stromy, které v lese zůstanou, jsou následně více náchylné k poškození námrazou i větrem (Brázdil et al. 2015). V případě, že je les napaden kůrovcem, změní se i jeho vodní režim. Napadené lesy čelí změně vodního cyklu, neboť se snižuje zachycování srážek (do větví stromů), což vede k zvýšenému riziku povodní a také intenzivnější erozi půdy.

Od začátku 90. let minulého století se letní srážky na Moravě snížily o polovinu, což mělo pozitivní dopad na vývoj kůrovce. Rekordní léto roku 2018 vytvořilo perfektní podmínky pro čtyři generace kůrovců. V dalších zemích, které bojují s kůrovcem, je například Rakousko, pro něž v letech 2015 až 2019 činil objem poškozeného dřeva v celém Rakousku 41 milionů m³ (Holzkurier 2020).

Dalším následkem sucha spojeným s malými organismy je úbytek druhů. Pokud jsou nějaké druhy náchylnější na teplejší podmínky, vede to k jejich úbytku, to však mění celkové fungování lesa. Problém nastává hlavně u vymírání druhů, které byly zvyklé na chladnější podmínky a nedokáží se přizpůsobit.

5.2. Dopady sucha na zemědělství

Zemědělství je na rozdíl od lesů a luk částečně ovlivňováno působením člověka, který se stará, aby úroda byla co největší. Na plodiny působí srážky a podzemní voda, která prosakuje skrze kořeny. Mimo přirozené zavlažování zde působí průběžné zavlažování od zemědělců. Je jasné, že pokud jsou roky, kdy napadne menší množství srážek, musí se vynaložit větší náklady na zavlažování, které je čerpáno z podzemních vod. Aby bylo dosaženo ideálních výnosů z plodin, jsou důležitější spíše průběžné srážky v roce, než velikost srážkového úhrnu. Pokud tedy celý měsíc nenapadne velké množství srážek a pak během jednoho dne napadne nadprůměrné množství srážek, vegetaci ani úrodě to neprospěje. V Moldavské republice se očekává, že sucho bude mít obzvláště silné nepříznivé účinky na zemědělské plodiny s nižší účinností využívání vody (Potopová et al. 2019).

Scénáře a modely, které monitorují klima, předpovídají, že délka vegetačního období se prodlouží. To bude mít za následek, že nástup vegetačního období bude dříve, ale zůstanou jarní mrazíky, které mohou mít negativní vliv na vegetaci. Prodloužení vegetační sezony vystaví riziku jarních mrazů zejména vinice, ovocné stromy či polní zeleniny (Potopová 2018).

Pro úspěšný přechod rostliny je nutný nástup procesu jarovizace. Jedná se o vytváření květních orgánů a zintenzivnění jejich růstu. U ozimých plodin jde o teplotu mezi 0 až 4 °C po dobu 40 – 60 dnů, v případě jarních kultivarů jde o teploty mezi 8 až 12 °C. (Urban et al. 2014).

5.3. Hodnocení výnosů plodin spojených se suchem

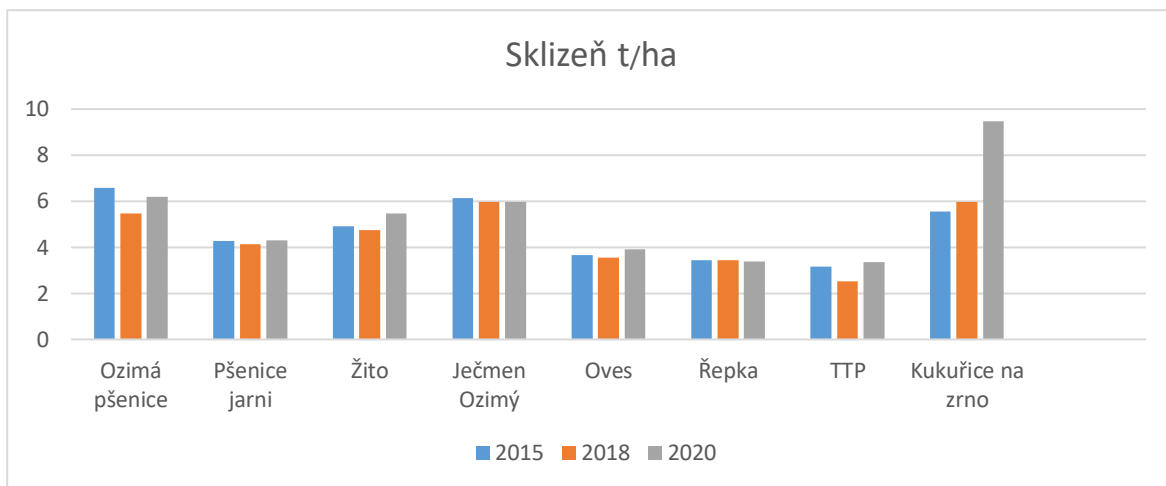
Množstevními dopady stresu na výnosy zemědělské produkce se v minulosti věnovalo mnohé zkoumání, například (Potopová et al. 2015), která uvedla, že za nejkritičtější období obilnin lze určit jarní období od dubna do června. Dále uvedla, že k menším ztrátám dochází při pěstování ozimých odrůd než u jarních ekvivalentů. Podstatným je však každoroční vývoj jarního počasí, suma teplot a zejména časové rozložení množství srážek. O pěstování jarních odrůd informoval také Trnka (Trnka et al. 2005) a i zde si lze přečíst, že negativnější vliv sucha je právě při jarním výsevu.

Moderní zemědělský systém se na základě studie (Zscheischler et al. 2017) snaží minimalizovat rizika na základě zjištění, že události veder a such mají značný význam a dopad na meziroční variabilitu produkce. Zemědělci se snaží adaptovat na změny tím, že více používají opatření, jako jsou přirozená ochrana plodin 9 %, přecházejí na nové plodiny 8 % či zavádí kultivary odolnější vůči suchu (Potopová 2019).

V Evropě vzrostl výnos plodin nejdříve o 24-39 %, ale v poslední dekádě je patrný pokles a stagnace vegetace z důvodu stresu. Přestože se zemědělci snaží vyvíjet nové způsoby šlechtění (Potopová, 2018). Jak již bylo řečeno, nejvyšší ztráty vznikají po nástupu jara a prvních zárodků, kdy se vyskytne sucho.

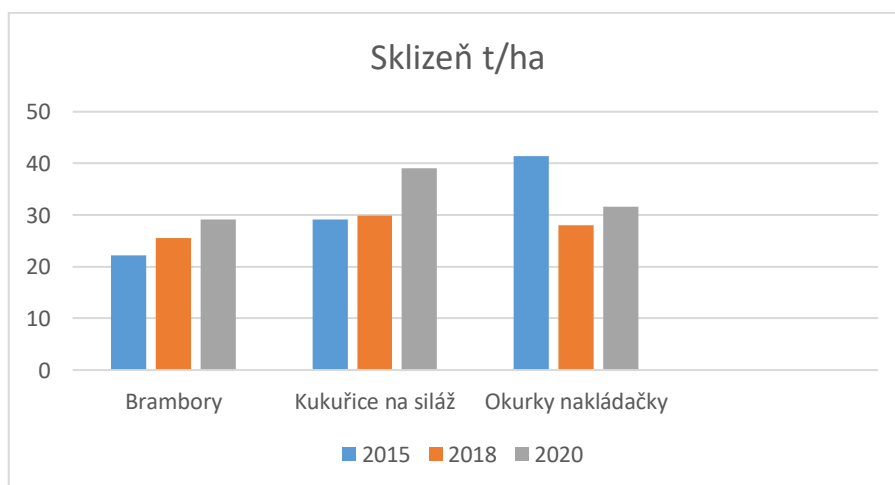
Závislost výnosů na kumulaci vláhového deficitu detailně uvedla ve své práci (Potopová 2018), jenž uvádí, že období s největším podílem sucha, které se pak odráží ve ztrátě výnosů plodin, jako jsou například jarní i zimní obiloviny, které mají největší obtíže v dubnu, květnu, červnu. Zajímavostí je, že jarní obiloviny jsou suchem více náchylné než ozimé. U pšenice je důležitý měsíc květen, kdy nesmí být příliš nízká teplota, ale i naopak vysoké teploty nemají příznivý účinek (Kern et al. 2018). Kukuřice, vinná réva, brambor a cukrová řepa strádají hlavně v červenci či červnu. V měsících srpen-září a duben-květen, pak strádá převážně řepka olejka. Pokud není v těchto měsících dostatek vody, má to negativní vliv na výnos.

U ozimé pšenice lze vidět pokles průměrného výnosu o 14 % v suchých letech v porovnání s průměrnými roky, lze však dohledat také mnohé oblasti ve střední Evropě, které měly ztráty nad 40 %, ve východní Evropě k tak dramatickým ztrátám nedocházelo. U pšenice jarní byl pokles menší, jednalo se přibližně o 5 – 10 %, produkce žita se snížila o 16 %. U ječmene ozimého je rozdíl enormní, sucho si na něm vyžádalo ztráty přes 22 %, zatímco jarní odrůda klesla pouze o 5 %. Výrazná změna přišla u kukuřice na zrno, kdy šlo o snížení výnosu o 58 % v době nedostatku vláhy. Řepka byla jedinou plodinou, kterou jsem zkoumal, kde v dobách sucha produkce stoupla, v porovnání s rokem vlhkým, konkrétně o 2 %.



Graf č.1 porovnání sklizně v průběhu let vyjádřeno v tunách na hektar

Lepší situace je v případě brambor, kdy sucho snížilo výnos o 14 %. U raných brambor je situace opačná a v průměrném roce je nižší o přibližně 10-15 % než v suchém roce. V případě kukuřice na siláž, nejsou ztráty takové jako u kukuřice na zrno. Propad byl o 24 %. Posledním příkladem jsou okurky nakládačky, u kterých se poklesl v posledním suchém období výnos o 11 %. Znepokojujícím zjištěním je fakt, že riziko sucha se stává čím dál větším problémem zejména v rané fázi růstu brambor a cukrové řepy.



Graf č.2 porovnání sklizně v průběhu let vyjádřeno v tunách na hektar

Za pomoci portálu Intersucho lze zjistit očekávané výnosy plodin bohužel zatím pouze jen v České republice. Letošní odhady na výnosy plodin se zatím musí brát s ohledem na fakt, že vývoj rostlin je mírně opožděn. Avšak u řepky ozimé se zatím neočekává pokles výnosů až na menší výjimky. U pšenice ozimé je situace podobná jako minulý rok, ale lepší výnosy se očekávají severozápadně a naopak horší situace lze očekávat v jihozápadních Čechách a na Moravě. Nejsou však očekávány větší propady plodin kvůli suchu. Nejhorší propad výnosů se očekává u ječmene jarního, z důvodu sucha max. 10% oproti 3 letému průměru.

5.4. Dopady sucha na stav podzemních vod

Podzemní voda je nejdůležitějším zdrojem získávání vody pro veřejné a průmyslové dodávky. Bez podzemní vody by byl nedostatek pitné vody (Scheidleder et al. 1999). Proto je velice důležité snažit se monitorovat aktuální stav vody a dobře o ni pečovat. Přibližně 75 % obyvatel Evropské unie (EU) je při zásobování vodou závislé na podzemních vodách (EC, 2008). A platí, že poptávka po průmyslové vodě v Evropě představuje více než polovinu abstrakce vody, kde se ale jedná převážně o povrchové vody a v menší míře pak o vodu podzemní (Scheidleder et al. 1999). Při vhodném řízení jsou podzemní vody obecně spolehlivým zdrojem, který dokáže udržet poptávku po vodě po celý rok, a který je relativně nezávislý na krátkodobé klimatologii. Doplnění tohoto cenného zdroje však závisí na přirozených ročních výkyvech srážek (zejména meteorologických podmínkách během období dešťů) a signálech sucha. Z velkých meteorologických such se mohou šířit do podpovrchních částí, což způsobuje, že hladiny podzemních vod klesnou pod normál (Van Lanen & Peters 2000; Brauns 2020). Převážně lesy a mokřady, které jsou náchylné, představují nejdůležitější ekosystémy pro kvalitu vody (Nistor 2020).

Změna klimatu, jak je globální oteplování sebou přináší různé faktory jako degradace půdy či změna ve struktuře vegetace, povodně, stoupající hladiny moří nebo vyprahlosti půdy (Scheidleder et al. 1999).

Podzemní vody jsou v nepříznivých obdobích, kdy je nedostatek srážek, používány k dotování povrchových vod a zavlažování v zemědělství. Zaleží na zemi a její zemědělské produkci, ale až 90 % zavlažované vody pro zemědělce pochází z podzemní vody (Tissen et al. 2019). Tento aspekt dále vede k snižování množství podzemních vod, což dále působí problém, jelikož se jedná o hlavní zdroj pitné vody pro obyvatelstvo. Pokud nastane sucho, tak se dále snižuje biodiverzita a krajinný ráz. Umírají druhy rostlin, případně úplně zanikají, pokud se nedokáží přizpůsobit (Brázdil et al. 2015). Letní sucho v horních oblastech může ovlivnit tok. V zimě se tok odvíjí od množství sněhové pokrývky. Poznatky z povodí ukázaly, že souběžné a složité klimatické jevy mají dopad na poruchy rostlin a plodin (Potopova et al. 2019).

Pokud se díváme na nedostatek vody v podzemních vodách, je důležité si také uvědomit, jestli se jedná o aktuální stav, či o dlouhodobý problém určitého regionu, okresu či krajiny. V České republice je zaveden Institut vodohospodářské bilance, který dle vyhlášky 431/2001 Sb., „porovnává požadavky na odběry povrchové a podzemní vody a vypouštění odpadních vod s využitelnou kapacitou vodních zdrojů z hledisek množství a jakosti vody a jejich ekologického stavu“. Užívání vod je tedy limitováno požadavky na zachování minimálních průtoků a hladin podzemních vod. Bohužel skutečné množství vody, která je odebíráno se mění v závislosti na mnoha faktorech. A tím pádem je složitější tuto bilanci sledovat a také se často liší povolené množství odběrů se skutečným množstvím odebírání (Vyskočil et al. 2017). Problém s vodou se snaží řešit i EU, která vytváří mnoho směrnic na

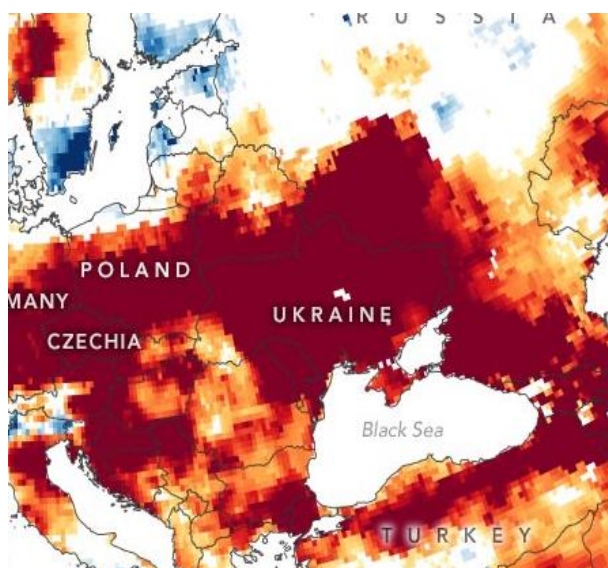
jejich záchranu. Bohužel, toto úsilí se spíše zaměřuje na povrchové vody než na podzemní (Boulton 2005).

5.4.1. Hodnocení situace vod ve střední a východní Evropě

Vyšší dostupnost vody, což znamená přes 2000 mm srážek, je spíše severněji, ale naopak nižší hodnoty dostupnosti vody a tedy pod 2000 mm srážek nalezneme na většině území střední a východní Evropy či jihovýchodě kontinentu. Oblasti s vysokým rizikem zranitelnosti podzemních vod se nacházejí například na rumunských a panonských pláních a ve střední Evropě. Nejlépe jsou na tom naopak severské země (Nistor 2020). Bohužel výskyt sucha a jeho monitoring má značné nedostatky. Evropské středisko pro sucho EDO sice sleduje sucho, ale nezahrnuje sucho v podzemních vodách v detailnějším provedení. Hostí databázi EDR European Drought Reference, která data o suchu sbírá nebo EDII, ta ale nerozlišuje stav podzemní vody a aktuální stav se nepokouší nějak více zaměřit na stav podzemní vody (Brauns 2020). Nejen stav podzemních vod není ideálně monitorovaný, dalším nedostatkem v měření a získávání dat má i obsah půdní vlhkosti. Na tyto nedostatky ukazuje (Wagner e

t al. 2011) ve své studii, která je zaměřena na stav půdní vlhkosti na Ukrajině a na měření této vlhkosti scatterometrem.

Zaměříme-li se na střední a východní Evropu, všimneme si značných problémů spojených se stavem podzemních vod v důsledku such třeba na Ukrajině, Moldavsku (viz. Obr. č. 27), kde jsou následky zjevné na rozdíl od severu Evropy. Na Ukrajině dosáhla hladina vody v řece Desně nejnižšího bodu za 140 let jejího pozorování, kdy byla oproti normálu pro jaro o 5 metrů nižší. Také nádrže v okolí Kyjeva byly na nejnižší úrovni za téměř sto let. V Polsku bylo jedno z nejhorších such za sto let, se zemědělským suchem, v 11 ze 16 vojvodství. U více než 40 řek a potoků klesly hladiny do května 2020 výrazně pod běžnou úroveň, což způsobilo nízké průtoky, které přišly jen několik měsíců poté, co Visla v roce 2019 klesla na nejnižší úroveň v historii (SciTechdaily 2020).



*Obr. č. 27: Mapa zobrazující mělké skladování
podzemních vod. (zdroj: <https://earthobservatory.nasa.gov/>)*

Česká republika na jaře roku 2020 po šesti letech malých úhrnů srážek oznámila, že téměř 80 % jejích vrtů zaznamenalo mírné až extrémní suchu. Půdní vlhkost v zemi byla v květnu nejméně o 30 % nižší než obvykle. Někteří odborníci mluvili o nejhorším suchu v zemi za posledních 500 let. Rok 2020 začala Evropa obecně s velkým deficitem srážek kvůli suchu z let 2018, 2019 a zimy 2019-2020. Vědec Wolfgang Wagner uvedl, že sucha v posledních letech mohla být spojena se změnou klimatu a to způsobilo škody v lesním hospodářství a také poklesu podzemních vod (SciTechdaily 2020).

Závěr

Senzorové měření dokáže poměrně spolehlivě detekovat porostní rozdíly (nedostatečná výživa, vodní stres, napadení rostlin), obvykle ale není schopno určit přesnou příčinu identifikovaného stresu. Princip porovnávání odrazivosti v jednotlivých spektrech je určujícím rysem většiny přístrojů používaných k hodnocení stavu porostů. Rozdílné odrazivosti vegetace ve viditelné červené (0,6 – 0,7 μm) a blízké infračervené části spektra (kolem 0,8 μm) se využívá k výpočtu tzv. vegetačních indexů. Po kapitole vegetačních indexů je popsáno spektrální chování vegetace, kvůli lepšímu pochopení, jak celý proces snímání za pomoci elektromagnetického spektra funguje. Družice jsou umělá kosmická tělesa, vypuštěná ze zemského povrchu, která získávají informace o stavu atmosféry a zemského povrchu. Mezi nejvýznamnější přínosy družic patří: (i) vytvoření robustních, homogenních a konsistentních databází; (ii) zachycení prostorových efektů (na rozdíl od pozemních stanic); (iii) sledování míst, kde neexistuje nebo je velmi řídká síť pozemních stanic; (iv) data ze satelitů vylučují subjektivní chyby časté při pozemních pozorováních; (v) data jsou dodávána v digitální podobě, což umožňuje jejich okamžité využití pro studie meteorologické, ekologické, desertifikační.

V další části práce se věnuji popisu map, na základě zvolených indexů. Mezi suché období patří roky 2015 a 2018. Hodnota NDVI byla nad 0,55 značí velmi hustou vegetaci. Dle indexu TCI i VCI šlo naopak o teplé a suché roky, v nichž se hodnoty indexů dostaly i pod 10 % v centrální části kontinentu, značí extrémní sucho. Index EVI z jara detekoval řídkou vegetaci, avšak s příchodem letních měsíců vzešla bujná vegetace v hodnotách nad 0,8 značí enormně hustou vegetaci. Jako chladný rok lze určit 2010. V něm byl index NDVI nejkritičtější vůbec, v letním období ukazoval hodnoty obvyklé spíše pro jaro, a to pouze v hodnotách průměrné vegetace. Z pohledu indexů TCI a VCI šlo vyčíst přítomný stres v průběhu jara, v létě se však sucho i teplota dostala do nadprůměrného stavu. Indexem EVI se situace mění, s jeho pomocí bylo možné sledovat průměrný stav vegetace. Pomocí ESI byla také pozorovatelná změna na přechodu jara a léta, kdy se z průměrných hodnot na jaře situace vegetace s příchodem léta zlepšila.

Poslední částí práce bylo nastínit možné dopady sucha na vegetaci, zemědělství a stav podzemních vod. Roky, kdy bylo extrémní sucho, se projevovaly hlavně v zániku malých ekosystémů, kupříkladu z důvodu vysychání toků nebo změny teplot v lese.

Pokud bych v této práci dále pokračoval, více bych se zaměřil na konkrétnější rok a oblasti, které jsou spojeny se zemědělskou produkcí a zjistil, jak se výnosy liší u zemědělců, kteří se díky moderním technologiím mohou na sucho lépe připravit. Porovnal bych je se zemědělci, kteří nemají takové zdroje, ať jde o finanční nebo časové a lidské možnosti. Případně farmaři v oblastech, kde obecně bojují s výraznějším nedostatkem povrchové i podzemní vody.

Literatura

- Anderson CM, Hain C, Wardlow B, Pimstein A, Macikalski Jr, Kustas W. Evaluation of Drought Indices Based on Thermal Remote Sensing of Evapotranspiration over the Continental United States. 2011. *Journal of Climate* **24**: 2025 – 2044.
- Baumann PR. 2014. History of remote sensing, aerial photography. College at Oneonta, New York. Available from <http://employees.oneonta.edu/baumanpr/geosat2/RS%20History%20I/RS-History-Part-1.htm> (accessed April 2021).
- Bessière H, Thunholm B, Schubert G. 2020. The Groundwater Drought Initiative (GDI): Analysing and understanding groundwater drought across Europe. Pages 297-305. *Proceeding of the International Association of Hydrological Sciences. IAHS & Agrocampus Ouest, France.*
- Bhuiyan C, Saha AK, Bandyopadhyay N, Kogan FN. 2017. Analyzing impact of thermal stress on vegetation health and agricultural drought – a case study from Gujarat, India. *GIScience & Remote Sensing* **54**: 678 – 699.
- Böhm J. 2002. Fotogrammetrie. Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava, Ostrava.
- Bohovic R. 2016. Časopriestorová dynamika fenológie v Strednej Ázii s využitím metód diaľkového preiskumu Země [Disertační práce]. Masarykova univerzita, Brno.
- Boulton AJ. 2005. Chances and challenges in the conservation of groundwaters and their dependent ecosystems. *Aquatic conservation* **29**: 319-426
- Brauns B, Cuba D, Bloomfield JP, Hannah DV, Jackson C, Marchant BP, Van Loon A,
- Brázdil R, Trnka M, et al. 2015. Sucho v Českých zemích: minulost, současnost, budoucnost. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, Brno.
- Campbell JB, Wynne RH. 2011. *Introduction to Remote Sensing Fifth Edition*. The Guilford Press, New York.
- ČHMÚ. 2019. MSG – Meteosat druhé generace. ČHMÚ. Available from <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/sat/info/MSG.html> (accessed April 2021)
- Dálkový průzkum Země. Online. Dálkový průzkum Země. Mendělova univerzita, Brno. Available from http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/vgdp/vdgp_dpz2.pdf (accessed April 2021)
- Dobrovolný P, Herber V, Hynek A. 2021. Výuka krajinné ekologie a DPZ. Masarykova univerzita, Brno. Available from https://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky_povrch_vegetace.html (accessed April 2021)
- Dobrovolný P. 2015. Dálkový průzkum Země (úvod, základní pojmy, historický přehled). Dálkový průzkum Země. Masarykova univerzita, Brno. Available from https://is.muni.cz/el/1431/jaro2015/Z8108/um/54602380/DPZ_01_uvod_historie_pojmy.pdf (accessed January 2021)

- EUMETSAT. 2020. Meteosat second generation. EUMETSAT. Available from <https://www.eumetsat.int/meteosat-second-generation> (accessed April 2021)
- European Commission. 2008. Ochrana podzemních vod v Evropě. Brusel.
- European space agency. 2012. Potvrzený nový termín startu družice Metop-B. Available from https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/Potvrzeny_novy_termín_startu_družice_Metop-B (accessed April 2021)
- Gaja P. 2013. Analýza půdní vlhkosti a charakteristik sucha prostředí DPZ [Diplomová práce]. Masarykova univerzita, Brno.
- Globaland30. 2020. Available from: www.globallandcover.com (accessed April 2021).
- Hlavinka P, Lukas V, Meitner J, Semerádová D, Trnka M. 2018. Předpověď krajských výnosů cukrové řepy v České republice na základě dat družicového snímání. Listy cukrovarnické a řepářské **134**: 234 – 239.
- Holzkurier. 2020. The dimensions of damage in Europe's forest. Timber-online.net. Available from <https://www.timber-online.net/blog/the-dimensions-of-damage-in-europe-s-forests.html> (accessed January 2021).
- Honetschlager P. 2016. Porovnání leteckých snímků dostupných na internetu vyhotovených mezi rokem 2002 a současností [Bakalářská práce]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice.
- Honková M. 2008. Mapování vegetace s využitím spektrálních indexů [Diplomová práce]. Masarykova univerzita, Brno.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Pages 195-213 in Justice CO, Townshend JRG. Remote Sensing of Environment. Elsevier
- Jiang Z, Huete AR, Didan K, Miura T. 2008. Development of two-band enhanced vegetation index without a blue band. Remote Sensing of Environment **112**:3833-3845.21.
- Kern A, Barcza Z, Majrovic H, Arendás T, Fodrór N, Bonis P, Bognár P, Lichtenberger. 2018. Statistical modelling of crop yield in Central Europe using climate data and remote sensing vegetation indices. Pages 300 -320. Agricultural and Forest Meteorology. Elsevier.
- Kiage LM, Liu KB, Walker ND, Lam N. 2007. Recent land-cover/use change associated with land degradation in the Lake Baringo catchment, Kenya, East Africa: Evidence from Landsat TM and ETM+. International Journal of Remote Sensing **28**:4285-4309. DOI: 10.1080/01431160701241753
- Kogan FN. 1995. COSPAR Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in Space Research **15**:91–100.
- Lauren Dauphin. 2020. Shallow groundwater storage. Available from <https://earthobservatory.nasa.gov/>.
- Lillesand T, Cifre WR, Chipman J. 2015. Remote sensing and image interpretation. John Wiley&Sons, Inc., Hoboken.

- Lindner M, Maroschek M, Netherer S, Kremer A, Barbati A, Garcia-Gonzalo J, Seidl R, Delzon S, Carona P, Kolstrom, Lexer MJ, Marchetti M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems, *Forest Ecology and Management* **259**: 698-709.
- Liu HQ, Huete A. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **33**:457-465. DOI: 10.1109/TGRS.1995.8746027
- Majer D. 2018. Evropský Metop-C na kosmodromu. Available from <https://kosmonautix.cz/2018/07/evropsky-metop-c-na-kosmodromu/> (accessed April 2021)
- Ministerstvo zemědělství. 2004. Vyhláška č.431 ze dne 13.12. 2001o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a údajích pro vodní bilanci. Sbírka zákonů České republiky, 2001. Česká republika.
- NASA Official. MODIS Moderate resolution imaging spectroradiometer. NASA, Available from <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/> . (accessed February 2021)
- Nistor MM. 2020. Groundwater vulnerability in Europe under climate change. *Quaternary International* **547**:184-196. DOI: 10.3390/atmos11080779
- NOAA STAR. 2020. Global Vegetation Health Products : Browse Archived Images. Available from https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php. (accessed February 2021)
- Oprchal J, Bartoň J, Hladík J, Solano CM. 2017. Participativní tvorba inovativního plánu managementu přírodních zdrojů (rozpracovaná verze za rok 2016). Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Optal L. 2011. Určování druhů oblačnosti z družicových radiometrických měření [Diplomová práce]. Karlova univerzita, Praha.
- Páscoa P, Gouveia CM, Russo AC, Bojariu R, Vicente-Serrano SM, Trigo RM. 2018. Vegetation vulnerability to drought on southeastern Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci* doi.org/10.5194/hess-2018-264.
- Pešková Z. 2019. Poprvé v ČR: satelitní snímky po 5 minutách. Meteopress. Available from: <https://www.meteopress.cz/vysvetleni/poprvve-v-cr-satelitni-snimky-po-5-minutach/> (accessed April 2021)
- Plánka L. 2021. Dálkový průzkum Země. Hornicko-geologická fakulta VŠB -TU, Ostrava Hornicko-geologická fakulta VŠB-TU, Ostrava. Available from https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galleriesouboru/planka/dpz/DPZ_01_UVOD_STUDENTI.pdf (accessed April 2021)
- Plánka, L. 2021. Spektrální vlastnosti krajinných objektů (spektrometrie), vegetační indexy. Hornicko-geologická fakulta VŠB -TU, Ostrava. Available from https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galleriesouboru/planka/dpz/DPZ_03_POVRCH_STUDENTI.pdf (accessed April 2021)

- Potopova V, Boroneant C, Boincean B, Soukup J. 2015. Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova. *International Journal of Climatology* **36**:2063-2082.
- Potopová V, Cazac V, Boincean B, Soukup J, Trnka M. 2019. Application of hydroclimatic drought indicators in the transboundary Prut River basin. *Theoretical and Applied Climatology* DOI:10.1007/s00704-019-02789-w.
- Potopová V. 2018. Nové poznatky, které jsou odrazem změny klimatu – vliv sucha na rostlinnou produkci. *Agromanual* **8**:102-105.
- Richards JA, Xiuping J. 2006. Remote sensing digital image analysis. Springer, Berlin.
- SciTechDaily. 2020. Satellite Maps Shows Signs of Drought in European Groundwater. Available from <https://scitechdaily.com/satellite-maps-shows-signs-of-drought-in-european-groundwater/> (accessed April 2021).
- Setvák M. 2004. MSG – Meteosat druhé generace. *Meteorologické zprávy ČHMÚ. Meteorologické zprávy* **57**:15-20.
- Setvák M. 2011. Meteorologické družice. UVHK FS, Brno. Available z http://uvhk.fce.vutbr.cz/sites/default/files/Vyuka/Meteorologicke_druzice-setvak.pdf (accessed April 2021)
- Scheidleder A, Grath J, Winkler G, Stärk U, Koreimann C, Gmeiner C. 1999. Groundwater quality and quantity in Europe. European Environment Agency, Copenhagen.
- Svatoňová H, Lauermann L. 2010. Dálkový průzkum Země - aktuální zdroj geografických informací. Masarykova univerzita, Brno.
- Tissen C, Menberg K, Blum P, Benz, Susanne A, Bayer P. 2019. Groundwater temperature anomalies in central Europe. *Environmental Research Letters*. DOI: 101088/1748-9326/ab4240.
- Trnka M, Žalud Z, Eitzinger J, Dubrovský M. 2005. Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formulae. *Agricultural and Forest Meteorology* **131**:54-76. DOI: 10.1016/j.agrformet.2005.05.002
- Tucker CJ. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for 102 monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* **8**:127–150. asi smazáno
- Urban J, Vašák J et al. 2014. Zemědělské systémy II. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Van Lanen, HAJ, Peters E. 2000 Definition, effects and assessment of groundwater droughts, Pages 46 – 61 in Vogt JV, Somna F, editors. *Drought and Drought Mitigation in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Kluwer Academic Publisher.
- Vyskočil P, Prchalová H, Dlabal J. 2017. Vyhodnocení vlivu sucha a nedostatku vody na užívání vod. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* **59**:18-20.
- Wagner W, Lemoine G, Rott HA. 2011. Method for Estimating Soil Moisture from ERS Scatterometer and Soil Data. *Remote Sensing of Environment* **70**:191-207. et al?

Xiaoxiong X. 2005. Terra MODIS on-orbit spatial charecterization and performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **43**:355-365.

Zscheischler J, Orth R, Seneviratne SI. 2017. Bivariate return period of temperature and precipitation explozi a large fraction of European crop yields. Biogeosciences, **14**:3309–3320. DOI: 10.5194/bg -14-3309-2017, 2017.

Žalud Z, Trnka M, Hlavinka P et al. 2017 Zemědělské sucho v České republice – vývoj, dopady a adaptace. Agrární komora České republiky, Praha.

Seznam použitých zkratk a symbolů

DPZ Dalkový průzkum země
EDO European Drought Observatory
EDR European Drought Reference
ESI Environmental Stress Index
EVI Enhanced vegetation index
MODIS Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer
NDVI Normalized Difference Vegetation Index
NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration
TCI Temperature Condition Index
VCI Vegetation Condition Index

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Systém pořizování dat

Obrázek č.2: Dva typy družic

Obrázek č. 3: Družicové snímání stavu vegetace na provni povodí v Moldávii

Obrázek č. 4: Spektrální křivka odrazivosti

Obrázek č. 5: Křivka odrazivosti listu

Obrázek č. 6: Mapa pozorovaných zemí

Obrázek č. 7: . Prostorové rozlišení NDVI v průběhu vegetačního období chladného roku 2010 v Evropě.

Obrázek č. 8: Prostorové rozlišení NDVI v průběhu vegetačního období 2015 v Evropě

Obrázek č. 9: Prostorové rozlišení NDVI v průběhu vegetačního období 2018 v Evropě.

Obrázek č. 10: Prostorové rozlišení NDVI v průběhu vegetačního období 2017 v Evropě.

Obrázek č. 11: Prostorové rozlišení VCI v průběhu vegetačního období suchého roku 2018 v Evropě

Obrázek č. 12: Prostorové rozlišení VCI v průběhu vegetačního období suchého roku 2014 v Evropě.

Obrázek č. 13: Prostorové rozlišení VCI v průběhu vegetačního období vlhkého roku 2011 v Evropě.

Obrázek č. 14: Prostorové rozlišení VCI v průběhu vegetačního období vlhkého a teplého roku 2020 v Evropě.

Obrázek č. 15: Prostorové rozlišení TCI v průběhu vegetačního období teplého roku 2007 v Evropě.

Obrázek č. 16: Prostorové rozlišení TCI v průběhu vegetačního období teplého a vlhkého roku 2020 v Evropě.

Obrázek č. 17: Prostorové rozlišení TCI v průběhu vegetačního období chladného a vlhkého roku 2010 v Evropě.

Obrázek č. 18: Prostorové rozlišení TCI v průběhu vegetačního období chladného roku 2013 v Evropě.

Obrázek č. 19: Prostorové rozlišení ESI v průběhu vegetačního období roku 2012 v Evropě.

Obrázek č. 20: Prostorové rozlišení ESI v průběhu vegetačního období suchého a teplého roku 2015 v Evropě.

Obrázek č. 21: Prostorové rozlišení ESI v průběhu vegetačního období chladného roku 2013 v Evropě.

Obrázek č. 22: Prostorové rozlišení ESI v průběhu vegetačního období teplého roku 2016 v Evropě.

Obrázek č. 23: Prostorové rozlišení EVI v průběhu vegetačního období chladného roku 2010 v Evropě

Obrázek č. 24: Prostorové rozlišení EVI v průběhu vegetačního období roku 2009 v Evropě.

Obrázek č. 25: Prostorové rozlišení EVI v průběhu vegetačního období teplého roku 2020 v Evropě.

Obrázek č. 26: Prostorové rozlišení EVI v průběhu vegetačního období suchého roku 2018 v Evropě

Obrázek č. 27: Mapa zobrazující mělké skladování podzemních vod

Graf č.1, 2 porovnání sklizně v průběhu let vyjádřeno v tunách na hektar