

METODY HODNOCENÍ SUCHA V POROSTECH SMRKU ZTEPILÉHO



Mgr. KATEŘINA NEUDERTO VÁ HELLEBRANDOVÁ, Ph.D.

RNDr. MARTIN HAIS, Ph.D.

doc. Ing. VÍT ŠRÁMEK, Ph.D.



18/2018

Metody hodnocení sucha v porostech smrku ztepilého

Certifikovaná metodika

Mgr. Kateřina Neudertová Hellebrandová, Ph.D.

RNDr. Martin Hais, Ph.D.

doc. Ing. Vít Šrámek, Ph.D.

Strnady 2018

Lesnický průvodce 18/2018

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.

Strnady 136, 252 02 Jíloviště

www.vulhm.cz

Publikace vydané v řadě Lesnický průvodce jsou dostupné v elektronické verzi na:

http://www.vulhm.cz/lesnicky_pruvodce

Vedoucí redaktor: Ing. Jan Řezáč; e-mail: rezac@vulhm.cz

Výkonná redaktorka: Miroslava Valentová; e-mail: valentova@vulhmop.cz

Grafická úprava a zlom: Klára Šimerová; e-mail: simerova@vulhm.cz

ISBN 978-80-7417-183-3

ISSN 0862-7657

METHODS OF DROUGHT ASSESSMENT IN NORWAY SPRUCE STANDS

Abstract

Broad-scale monitoring and detection of drought in forests brings about a number of complications because of drought is not only a direct stressor of forests but also a driver of secondary disturbance agents like bark beetle or honey fungus. The Norway spruce decline in the northern part of Moravia and Silesia has increased in last years. After the drought year 2015 there has been a strong need to define areas where calamitous damages on forests are primarily caused by drought.

The main aim of the methodology is to describe suitable methods for assessing impacts of drought in forest stands on a large spatial scale (the territory of the Czech Republic) using commonly available and measured data and parameters.

Remote sensing methods allow to monitor the stress response of forest stands and other vegetation on a wide spatial scale but cannot disentangle drought effects from those caused by various other disturbance agents. On the other hand, assessment based on modelling of meteorological characteristics leads to the identification of areas with drought episodes of varying intensity and different lengths, but does not indicate the actual response of spruce stands to drought. By combining both approaches, it is possible to obtain information on forest stands where drought caused significant changes in their vitality.

Key words: drought; remote sensing; Norway spruce; spectral trajectories; forest disturbances; meteorological modelling; AVISO model; LANDSAT

Adresy autorů:

Mgr. Kateřina Neudertová Hellebrandová, Ph.D.

doc. Ing. Vít Šrámek, Ph.D.

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.

Strnady 136

252 02 Jíloviště

e-mail: hellebrandova@vulhm.cz

sramek@vulhm.cz

RNDr. Martin Hais, Ph.D.

Katedra biologie ekosystémů, Přírodovědecká fakulta

Jihočeská univerzita

Branišovská 1760, 370 05 České Budějovice

e-mail: martin.hais@seznam.cz

Podíl autorů:

Mgr. Kateřina Neudertová Hellebrandová, Ph.D. 50%

RNDr. Martin Hais, Ph.D. 35%

doc. Ing. Vít Šrámek, Ph.D. 15%

Obsah

1	ÚVOD	7
2	CÍL METODIKY	9
3	VLASTNÍ POPIS METODIKY	10
3.1	Metody a data DPZ využitelné při hodnocení dopadů sucha na lesní porosty	10
3.1.1	Popis dat družicového systému Landsat	10
3.1.2	Výběr satelitních dat	11
3.1.3	Úprava satelitních dat	12
3.1.4	Výpočet spektrálních vegetačních indexů	13
3.1.5	Identifikace poškozených porostů	15
3.2	Vymezení oblastí ohrožených suchem na základě modelování meteorologických dat	18
3.2.1	Meteorologický model AVISO	18
3.2.2	Mapy aktuální vláhové bilance	19
3.2.3	Mapa dlouhodobého stresu suchem	20
3.2.4	Mapa akutního stresu suchem ve vegetačním období	22
3.2.5	Mapa ohrožení smrkových porostů	23
3.3	Identifikace smrkových porostů ohrožených suchem na základě propojení popsanych metod	25
4	SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ	26
5	POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY	26
6	EKONOMICKÉ ASPEKTY	27
7	LITERATURA	28
7.1	Seznam použité související literatury	28
7.2	Seznam publikací, které předcházely metodice	30
8	OPONENTI	30
9	DEDIKACE	30
	SUMMARY	31

1 ÚVOD

Prakticky od počátku milénia dochází k rozsáhlému chřadnutí smrkových porostů v nižších a částečně i ve středních polohách některých regionů České republiky. Situace se v posledním desetiletí zhoršuje a zejména v oblasti severní Moravy a Slezska dochází k rozsáhlému odumírání celých lesních komplexů (Šrámek et al. 2008; Slodičák 2014). Chřadnutím a odumíráním jsou postiženy smrkové porosty všech věkových stupňů, založené uměle i z přirozené obnovy. Mechanismus poškození není do detailu popsán, ale za jeho základní příčinu jsou považovány výkyvy meteorologických podmínek, které můžeme dát do souvislosti s probíhající globální změnou klimatu. Spouštěcím mechanismem kalamitního poškození jsou opakující se periody sucha (Holuša, Liška 2002). V poškozených porostech je pak výrazný sekundární výskyt biotických škůdců, zejména podkorního hmyzu (*Ips typographus*, *Ips duplicatus*, *Pityogenes chalcographus*) a václavky (*Armillaria* sp.) (Lubojacký 2013).

Lesní dřeviny včetně smrku jsou specifické tím, že mají značnou ekologickou plasticitu (Woodward 1995). Na období sucha reagují uzavřením průduchů, v extrémních případech opadem asimilačních orgánů, a pokud nedojde k poškození kořenů (např. vysokými teplotami či v opačných případech dlouhodobým zaplavením), jsou v následujícím vegetačním období schopny postupně obnovit své fyziologické funkce. K letálnímu poškození tak dochází prakticky výhradně v případech, kdy suchým periodám předchází několikaleté oslabení vlivem chronického sucha – a prakticky bez výhrad je spojeno s výrazným výskytem biotických škůdců, kteří zde působí jako sekundární stresový faktor.

Hodnocení dopadů sucha na lesní ekosystémy v širokém prostorovém měřítku s sebou přináší řadu komplikací právě vzhledem k tomu, že sucho působí nejen jako přímý stresor lesních ekosystémů, ale i nepřímo jako spouštěč působení sekundárních škodlivých činitelů v suchem oslabených porostech. Neexistuje žádná všeobecně uznávaná definice sucha a sucho je velmi obtížné kvantifikovat. V některých případech je obtížné rozhodnout, zda se vůbec sucho vyskytuje či nikoliv a do jaké míry je příčinou poškození různých druhů rostlin.

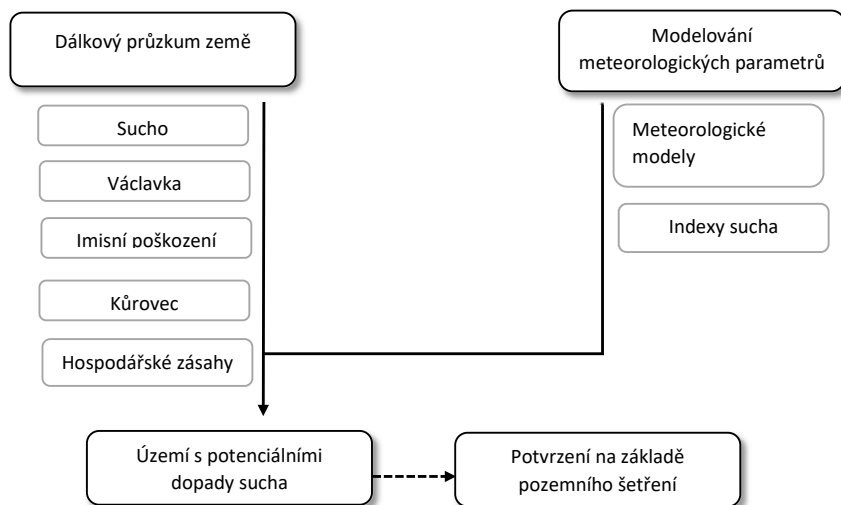
Existují v zásadě dva přístupy využitelné k hodnocení dopadů sucha na lesní vegetaci ve velkém prostorovém měřítku. Jedná se o hodnocení na základě modelování meteorologických charakteristik a hodnocení na základě dat dálkového průzkumu Země (DPZ) (Steven et al. 2016).

Hodnocení na základě modelování meteorologických charakteristik je výsledkem kombinace měření srážek, vlhkosti, evapotranspirace, půdní vláhý a dalších para-

metrů. Většina těchto metod byla vyvinuta pro odhad deficitu vlhkosti v zemědělské krajině (a jeho dopadu na zemědělské plodiny), nemusí však odpovídajícím způsobem vypovídat o účincích těchto deficitů na jiné typy vegetace, které vykazují rozdílnou reakci na sucho (Mishra, Singh 2010; Vicente-Serrano et al. 2012; Peters et al., 2015). Lesní ekosystémy a jednotlivé druhy dřevin reagují na sucho rozdílným způsobem, proto není reálné dopady sucha na lesní porosty hodnotit pouze pomocí jediného přístupu (Svoboda et al 2004).

Metody dálkového průzkumu Země umožňují sledovat stresové reakce lesních porostů a další vegetace v širokém prostorovém měřítku. Zároveň však neumožňují určit skutečné příčiny pozorovaných změn a rozpoznat, zda se jedná skutečně o účinky sucha, nebo zda má narušení lesního porostu jinou příčinu.

Hodnocení na základě meteorologických charakteristik vede k určení oblastí s výskytem epizod sucha o různé intenzitě a různé délce. Na základě metod dálkového průzkumu Země je možné určit oblasti, ve kterých dochází k nevratnému poškození lesních porostů. Kombinací obou přístupů je možné získat informaci o lesních porostech, ve kterých došlo ke škodám na základě působení sucha jako stresového faktoru ve velkém prostorovém měřítku (Obr. 1)



Obr. 1: Propojení dvou přístupů k hodnocení dopadů sucha na lesní porosty ve velkém prostorovém měřítku.

2 CÍL METODIKY

Metodika hodnocení dopadů sucha ve smrkových porostech v ČR byla vytvořena v rámci projektu NAZV QJ1630441 s názvem: „Metody hodnocení sucha v lesních porostech“, řešeného v letech 2016–2018.

Hlavním cílem metodiky je popsat vhodné metody pro hodnocení dopadů sucha v lesních porostech ve velkém prostorovém měřítku (území ČR), a to za pomoci v dané chvíli běžně dostupných a měřených dat a parametrů. Tyto postupy mají sloužit k vymezení oblastí ohrožených suchem jako primárním stresorem lesních porostů.

Metodika je určena především odborné veřejnosti v lesnictví a pracovníkům státní správy. Použité postupy vyžadují rozsáhlé odborné znalosti, použití specifického softwarového vybavení a jsou náročné na objem zpracovávaných dat. Zároveň však umožňují získávat informace o reálném stavu jehličnatých porostů i o oblastech, které jsou ohroženy suchem jako primárním stresorem lesních porostů s následným možným rozvojem dalších nežádoucích jevů. Uvedené postupy jsou uplatnitelné v širokém prostorovém měřítku v rámci území celé ČR. Zároveň je zřejmé, že se metodika odvíjí od v danou chvíli dostupných podkladů a informací. V této oblasti však probíhá rychlý vývoj (kvalita a dostupnost družicových snímků, metody jejich zpracování i zpřesňování meteorologických modelů), který bude nutné zohlednit i v postupných aktualizacích metodiky.

3 VLASTNÍ POPIS METODIKY

3.1 Metody a data DPZ využitelné při hodnocení dopadů sucha na lesní porosty

Změny ve vitalitě a fyziologickém stavu vegetace způsobují posun v odrazivosti dopadajícího slunečního záření. Takové projevy je možné detekovat v různém měřítku, od spektrálních vlastností jehlic, přes hodnocení jednotlivých stromů až po snímání celých porostů, včetně pořizování dat na globální úrovni. Právě od úrovně jednotlivých stromů po globální měřítko se využívají prostředky Dálkového průzkumu Země.

Hlavním spektrálním projevem vodním stresem postižené vegetace jsou změny v odrazivosti v blízkém a středním infračerveném (IČ) spektru. V blízkém IČ spektru se při poškození vegetace snižuje její schopnost odrážet záření v tomto spektru, zároveň však s poklesem vody v listech rostliny se odrazivost ve všech spektrech zvyšuje. Tím dochází k tomu, že v blízkém IČ spektru jsou spektrální změny hůře identifikovatelné, protože se oba antagonistické jevy mohou ve svých důsledcích vyrušit. Naopak ve středním IČ spektru probíhají při vodním stresu změny odrazivosti stejným směrem, tedy k vyšším hodnotám. Toto dokládá mnoho studií, které popisují vyšší účinnost středního IČ spektra pro identifikaci poškozených lesních porostů (Rullan-Silva et al. 2013).

3.1.1 Popis dat družicového systému Landsat

Pro hodnocení vlivu sucha na lesní porosty na základě dat dálkového průzkumu Země jsou využity scény systému Landsat, jehož parametry jej řadí mezi nejvyužívanější systémy pro hodnocení změn vlastností zemského povrchu v delším časovém měřítku. Data jsou dostupná na stránkách projektu Landsat <http://landsat.usgs.gov>.

Družicový systém Landsat pořizuje data již od roku 1972 (Landsat 1) a pokrývá tedy svými daty časové období 44 let. Další důležitou vlastností je systematický záznam – data jsou pravidelně pořizována a archivována pro celou zemskou pevninu. To umožňuje využití dlouhých časových řad (s ohledem na míru oblačnosti) pro jakákoliv zvolená území. Výhodou systému je také jeho relativně dobré prostoro-

vé rozlišení (od roku 1984 v multispektrálním módu 30 m), které dobře reflektuje vlastnosti lesních porostů. V neposlední řadě je důležitý fakt, že data družice Landsat jsou od roku 2008 dostupná zdarma, což vedlo v posledních letech k výraznému zvýšení jejich využití pro širokou škálu aplikací (Wulder et al. 2012; Kennedy et al. 2014).

3.1.2 Výběr satelitních dat

Součástí archivu projektu Landsat jsou data nejen v původní „surové“ podobě DN hodnot, ale také ve formě vyšších úrovní produktů, jako jsou míra dopadajícího záření (radiance) a procentuální odrazivosti povrchu (surface reflectance). Pro hodnocení dopadů sucha na lesní porosty je třeba zvolit produkt procentuální odrazivosti povrchu, dále pro zjednodušení uváděný jako „reflektance“. Pro úplnost je potřeba také zmínit, že ne všechny vyhledávače mají přístup k produktům reflektance (např. vyhledávač <http://glovis.usgs.gov/> neumožňuje stažení dat reflektance ani radiance). Pro zmíněné účely je naopak vhodný vyhledávač dat: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Scény je třeba vybírat tak, aby pokryly hodnocenou oblast (Tab.1 , Obr. 2).

Tab. 1: Lokalizace scén družice Landsat pro ČR.

letový pás	193	192	191	190	189
pozice scény	25	25	25	25	25
pozice scény	26	26	26	26	26

Pro výběr scén jsou stanovena následující kritéria.

Kvůli jednotnému prostorovému rozlišení (30 m v optickém módu) jsou zvoleny systémy Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ a Landsat 8 OLI. Kvůli potřebě zachytit vrchol vegetační sezóny a eliminovat vliv fenofází je třeba vybírat scény z období červenec – srpen, případně doplnit o scény pořízené v červnu a září.

Dalším kritériem je stupeň oblačnosti. Scény zcela pokryté hustou i částečně prostupnou oblačností a mlhami je nutné eliminovat, stejně jako scény s kupovitou oblačností pokrývající více než 30 % scény. Pokud je scéna v daném roce zčásti

pokryta oblačností, je nutné výběr doplnit ještě o další scény, jejichž kombinací vznikne grid s co nejvyšším datovým pokrytím pro daný rok. Zde je výhodné využít překryvů jednotlivých letových pásů, které přinášení zvýšení množství dat pořízených v jiných termínech, což opět vhodně eliminuje chybějící datové záznamy v případě oblačnosti a jejich stínů.



Obr. 2: Scény družice Landsat pokrývající ČR. Barevně jsou odlišeny jednotlivé scény. Tento systém je platný pro všechny družice systému Landsat.

3.1.3 Úprava satelitních dat

Předzpracování družicových dat zahrnuje extrahování dat ovlivněných oblačností a jejichmi stíny a následnou standardizaci dat.

Pro extrahování dat ovlivněných oblačností a jejichmi stíny byly použity vrstvy označené jako (FCmask), které jsou součástí dat družice Landsat nabízených USGS. Tyto masky obsahují třídy pro oblačnost, stíny oblačnosti, sníh a vodní plochy. V datovém souboru jsou nabízeny též masky označené příponou QA (Quality Assurance). Při srovnání masek se ukazuje jako jistější použít pro extrakci oblačností ovlivněných dat „přísnější“ masky s označením FC, které sice někdy zahrnují i oblačnosti

neovlivněná data, zároveň je ale nižší riziko toho, že data s oblačností budou součástí následujících analýz. FC masky se následně reklasifikují tím, že se převedou do bitmapových vrstev s hodnotami 0,1 a jejich násobením s družicovými daty se provede extrakce všech čtyř významových tříd včetně vodních ploch, které by mohly svým různým podílem (buď z důvodu zmíněné oblačnosti, nebo jen podílem vody na jednotlivých scénách) zásadně ovlivnit výsledky následnou standardizaci dat.

Standardizace dat se provádí pro jejich vzájemnou porovnatelnost, kdy i přes atmosférické korekce snímků může dojít k tomu, že mezi jednotlivými snímky z různých let může být značná variabilita. Pro standardizaci časových řad družicových dat se často používána metoda, která je dána vztahem:

$$X' = \frac{X - \bar{X}}{S_x}$$

kde $\bar{X}$ je průměrná hodnota a S_x je směrodatná odchylka. Někdy se průměr nahrazuje mediánem a směrodatná odchylka interkvantilovým rozpětím (Hendl 2004). Touto standardizací se dosáhne toho, že maxima histogramů se vystředí na ose y (neboli průměr je 0 na ose x) a rovněž se sjednotí i rozpětí histogramů pomocí směrodatné odchylky. Tento typ standardizace pro družicová data byl využit ve studiích např. (Healey et al. 2005; Hais et al. 2009). Pro úpravy a zpracování družicových dat byly použity programy ArcGIS, ArcGIS Pro, Q-gis, R.

3.1.4 Výpočet spektrálních vegetačních indexů

Spektrální vegetační indexy NDMI a Wetness jsou považovány za nejdůležitější pro hodnocení zdravotního stavu lesa pomocí družicových snímků a jejich význam byl popsán v mnoha vědeckých studiích (např. Skakun et al. 2003; Jin & Sader 2005; Healey et al. 2006).

Index NDMI

Jedná se o normalizovanou podobu indexu, který je založen na dvou spektrálních pásmech blízkého IČ (NIR) a středního IČ spektra (SWIR, někdy též MIR):

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

Tento index vychází ze stejného principu jako dříve navržený index NDVI, který však využívá pro výpočet červené a blízké IČ spektrum (Tucker 1979). NDVI je hojně používaný index pro hodnocení mnoha aspektů vegetace, pro rozlišení stupně poškození lesních porostů je však v literatuře popsán jako nevhodný (Lambert et

al. 1995). Důvodem pro použití indexu NDMI je skutečnost, že tento index vykazuje (oproti NDVI) menší citlivost k fenofázím vegetace, a je tak vhodnější pro srovnání dat z různých období v průběhu roku a rovněž je citlivý na vlhkost (Jin & Sader 2005) a zdravotní stav porostu (Hais et al. 2009). V hodnocení změn lesních porostů je index NDMI používán také pro detekci holých sečí (Jin & Sader 2005; Heale et al. 2006).

Index Wetness

Index Wetness je třetí komponentou lineární transformace Tasseled Cap, která je velmi často používanou metodou pro hodnocení vlastností lesních porostů (Kuzera et al. 2005; Jin & Sader 2005). Tato transformace je založena na principu analýzy hlavních komponent, přičemž neslouží jen k redukci objemu dat, ale jednotlivé komponenty mohou vyjadřovat vybrané fyzikální parametry krajinného krytu (Kauth & Thomas 1976; Crist & Cicone 1984). Obecný zápis tohoto indexu je:

$$\text{Wetness} = x_1 \cdot \text{TM1} + x_2 \cdot \text{TM2} + x_3 \cdot \text{TM3} + x_4 \cdot \text{TM4} + x_5 \cdot \text{TM5} + x_7 \cdot \text{TM7}$$

Kde x_1 až x_7 jsou jednotlivé koeficienty (váhy), kterými se násobí hodnoty příslušných kanálů (TM1 až TM7), v tomto případě jednotlivých pásem družice Landsat TM nebo ETM+. Jednotlivé koeficienty se liší podle typu družice (Tab. 2).

V případě družice Landsat 8 OLI jsou publikovány dvě varianty výpočtu. Při testování obou variant se ukázal přesnější výpočet dle Baig et al. (2014), zatímco výpočet dle Li et al. (2016) vykazoval tendenci nadhodnocovat data.

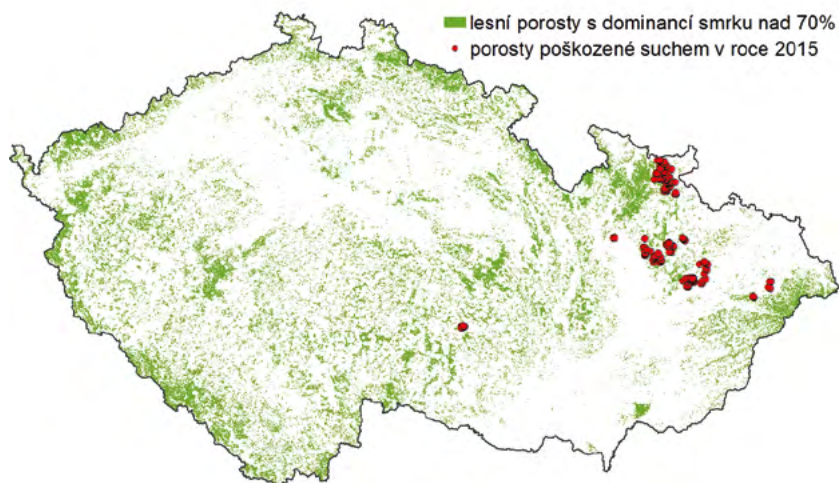
Tab.2: Přehled koeficientů indexu Wetness pro jednotlivé typy družice Landsat.

	Coastal Aerosol	Kanál 1 blue	Kanál 2 green	Kanál 3 red	Kanál 4 NIR	Kanál 5 SWIR 1	Kanál 7 SWIR 2	zdroj
Landsat 5 TM	-	0,1509	0,1973	0,3279	0,3406	-0,7112	0,4572	Crist & Cicone 1984
Landsat 7 ETM+	-	0,2626	0,2141	0,0926	0,0656	0,7629	0,5388	Huang et al. 2002
Landsat 8 OLI	-	0,1511	0,1973	0,3283	0,3407	-0,7117	-0,4559	Baig et al. 2014
Landsat 8 OLI	0,1877	0,2097	0,2038	0,1017	0,0685	-0,746	-0,5548	Li et al. 2016

3.1.5 Identifikace poškozených porostů

Při porovnání citlivosti obou spektrálních indexů na verifikačním souboru dat (jedná se o porosty z oblasti Moravy, u nichž bylo zjištěno poškození suchem na základě terénního šetření) se pro identifikaci suchem poškozených porostů jako citlivější jeví index NDMI oproti indexu Wetness. Nicméně, oba indexy jsou spolu vysoce korelovány ($R = 0,85$) a lze je použít jako zástupné prediktory. Z obou výše zmíněných důvodů je v této metodice identifikace poškozených smrkových porostů ukázána na příkladu indexu NDMI pro rok 2015. Tento rok je vhodný pro testovací účely, neboť zahrnuje vysoce podprůměrný srážkový deficit během vegetační sezóny, který měl podle terénního šetření významný dopad pro změnu zdravotního stavu lesních porostů. Přestože jsme testovali citlivost spektrálních vegetačních indexů pro jeden rok, metodický přístup má obecnou platnost a je přenositelný i pro jiné časové období.

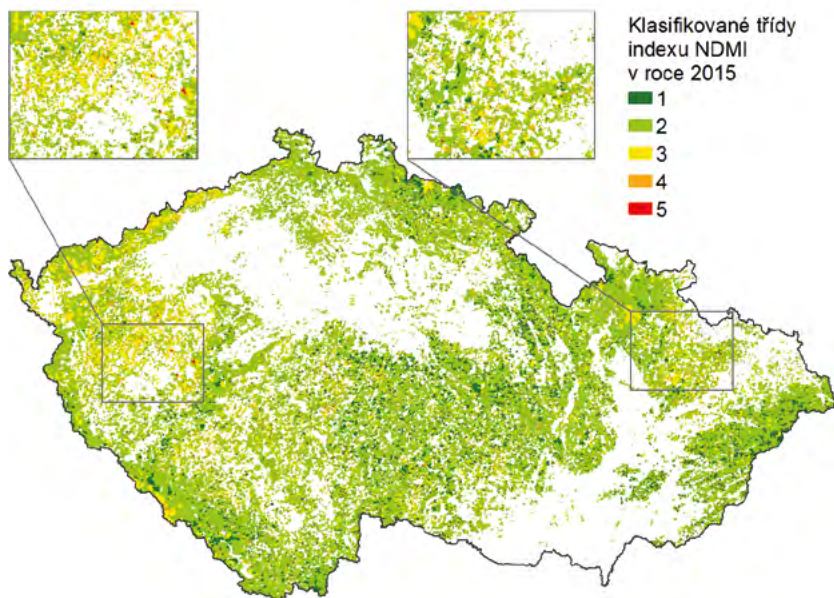
V této studii byly hodnoty spektrálních indexů vypočteny pro všechny lesní porosty, které mají podíl smrku vyšší než 70 % (porosty C1 a D1) a zároveň je jejich plocha vyšší než 0,5 ha (Obr. 3). Byla použita data smíšenosti lesních porostů, poskytnutá Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL). Důvod výběru porostů nad 0,5 ha je, že u plošně menších porostů je při prostorovém rozlišení spektrálních



Obr. 3: Lesní porosty použité pro tuto studii. Vyznačené lokality s poškozením v roce 2015 sloužily jako verifikační data.

dat 30 m vysoké riziko mixelových hodnot (smíšená hodnota pixelu s nelesními plochami). Počet porostů dle výše stanovených kritérií zahrnuje více než milion lesních celků. Ty byly spojeny v případe, že na sebe navazují, do společných polygonů, jejichž výsledný počet je 382 878 lesních celků. Pro extrakci dat z jednotlivých polygonů byly použity centroidy, které reflektují hodnoty jádrové (vnitřní) části porostu, ale hlavně eliminují vliv tzv. okrajového efektu, zahrnujícího data z porostních stěn apod. V následné analýze jsou hodnoty NDMI z roku 2015 porovnávány s NDMI průměrem ze všech předchozích let (2003–2014).

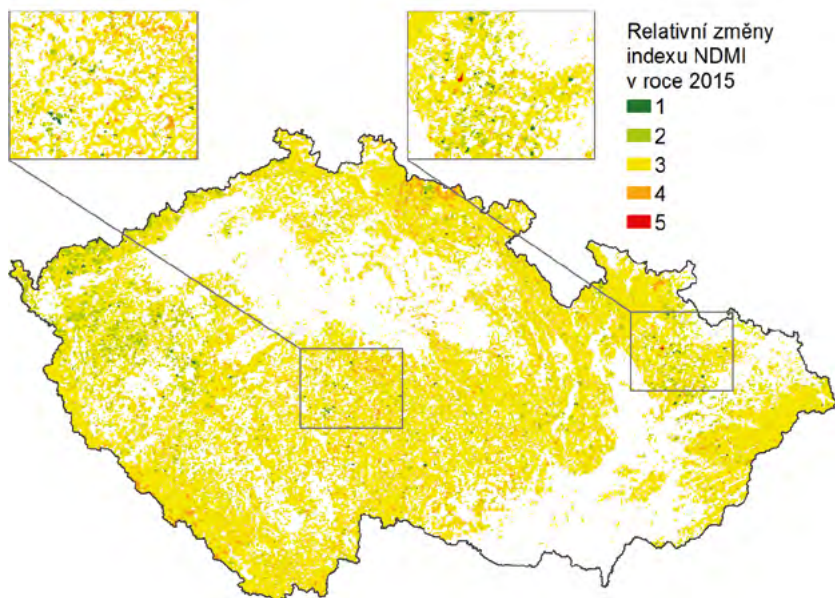
Protože využitá standardizace upravuje hodnoty spektrálních indexů tak, že průměr hodnot se rovná nule a rozptyl je roven jedné, data s nižší hodnotou než průměr mají zápornou hodnotu. Zároveň testováním na verifikačních datech pomocí analýzy variance (ANOVA) bylo zjištěno, že tato záporná data korespondují s poškozenými porosty. S ohledem na variabilitu dat byla prahová hodnota pro poškození porostů stanovena na -0,5, přičemž byla následně vylišena hodnota pro silně poškozené porosty jako -1,5. Tato vyšší hodnota však v sobě zahrnuje i další



Obr. 4: Distribuce klasifikovaných tříd spektrálního indexu NDMI s vyznačenými detaily významně nižších hodnot.

disturbance lesa (větrné polomy, porosty napadené lýkožroutem smrkovým). Opačné hodnoty byly klasifikovány symetricky k míře poškození (tj. stejnou vzdáleností od nuly do kladných hodnot). Takto vytvořené třídy byly využity pro klasifikaci míry poškození lesních porostů. Obrázek 4 ukazuje klasifikované třídy indexu NDMI pro rok 2015 v rámci celé ČR, přičemž zde můžeme pozorovat jak regionální, tak lokální rozdíly. Velká míra poškození zahrnuje zejména oblast Vysočiny, severní Moravy a Krkonoš. Lokálně pak např. oblast na jihozápad a jih od Plzně. Toto dobře koresponduje s meteorologickým indexem aktuální vláhové bilance.

Pro hodnocení zdravotního stavu je však důležitější relativní změna spektrálních indexů, která se vztahuje k dlouhodobému průměru předchozího stavu lesních porostů. Obrázek 5 ukazuje relativní změnu hodnot roku 2015 k průměru z let 2003–2014. Zde se ukazuje podobný efekt jako v případě klasifikace tříd indexu NDMI pro rok 2015, je zde však zvýrazněn rozdíl u tří hlavních regionů Vysočina, Krkonoše a severní Morava.



Obr. 5: Míra poškození lesních porostů hodnocená z relativních změn hodnot spektrálního indexu NDMI.

3.2 Vymezení oblastí ohrožených suchem na základě modelování meteorologických dat

3.2.1 Meteorologický model AVISO

Agrometeorologický model AVISO („Agrometeorologická výpočetní a informační soustava“) byl naprogramován na bázi anglického výpočetního modelu MORECS (“The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation-System“), verze I. a II. (Thompson et al. 1981; Gardner 1981; Gardner, Field 1983; Hough et al. 1997; Hough, Jones 1997). V obou modelech je jedním ze základních aplikačních výstupů evapotranspirace (potenciální a aktuální) a na ní založená vláhová bilance.

Potenciální evapotranspirace ET představuje celkové množství vody v mm, které se může vypařit z půdy (evaporace z půdy) a vegetačního krytu (transpirace rostlin) při současném optimálním nasycení půdního horizontu vodou a za konkrétních klimatických podmínek. Fytometrické charakteristiky vypařujícího se povrchu (u plodin např. plocha listů, výška a efektivní výška plodiny, aerodynamická rezistence, rezistence plodiny apod.) jsou při výpočtu potenciální evapotranspirace po celý kalendářní rok nastaveny na maximální, resp. optimální hodnoty. Stejně je to u dalších charakteristik, majících vliv na výpar (albedo apod.).

Model AVISO se běžně používá pro odhad deficitu vlhkosti v zemědělské krajině (a jeho dopadu na zemědělské plodiny). V rámci řešení výzkumného projektu NAZV QJ1630441 „Metody hodnocení sucha v lesních porostech“ byly parametry tohoto modelu upraveny pro smrkové porosty.

Aplikace metody výpočtu aktuální evapotranspirace pro lesní porosty je provedena podle původního modelu MORECS (Hough et al. 1995) s modifikací některých parametrů na podmínky v ČR.

Na základě parametrů porostu, kterými jsou hlavně efektivní výška porostu, index plochy listů, hloubka kořenů a základní stomatální odpor, se provádí výpočet evapotranspirace. Změna intenzity evapotranspirace z potenciálních hodnot na aktuální je v modelu realizována pomocí všech proměnných, nejvíce však změnou stomatálního odporu, který se z nastavené základní (potenciální) hodnoty pro každý typ porostu mění v závislosti na okolním prostředí a dostupné vláhě. Zde hraje u porostu významnou roli stres suchem.

Modifikace některých vstupních parametrů modelu pro podmínky ČR je uvedena v tabulce 3 níže:

Tab. 3: Vstupní parametry modelu AVISO pro podmínky ČR.

Parametr	Hodnota v britském modelu MORECS	Upravená hodnota pro ČR pro model AVISO (80letý smrkový porost)
Max. index plochy listové LAI [-]	6	8
Efektivní výška porostu [m]	10	20
Poměr intercepce k LAI [mm/LAI]	0,2	0,3

Výpočet modelu AVISO probíhá standardně v denním kroku pro soubor 198 automatických klimatologických stanic staniční sítě ČHMÚ a následně jsou modelovaná data agrometeorologických charakteristik z bodové sítě interpolována do plochy ČR a prezentována formou kategorizovaných map.

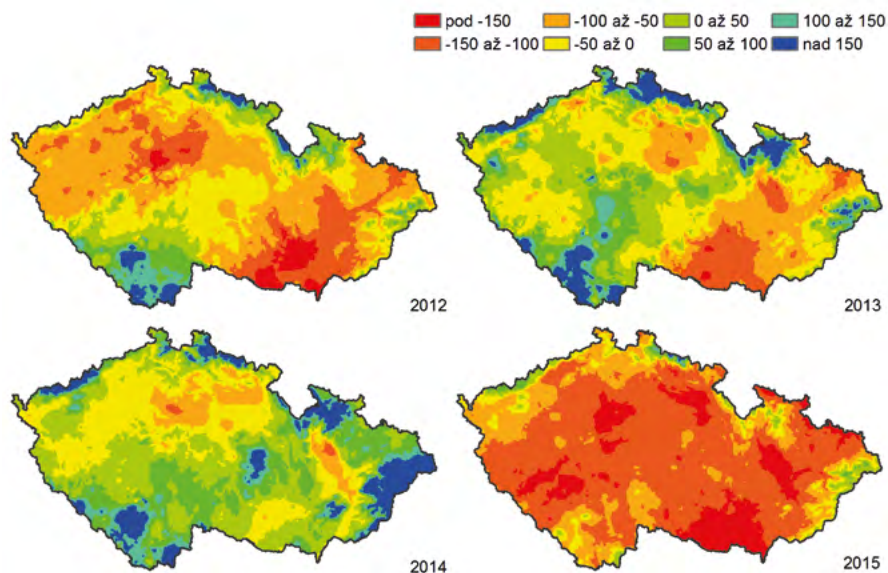
3.2.2 Mapy aktuální vláhové bilance

Mapy aktuální vláhové bilance jsou jedním ze standardních produktů modelu AVISO. Aktuální vláhová bilance jako vzájemný rozdíl mezi úhrny srážek a aktuální (skutečnou) evapotranspirací.

Základem map je tedy bilance srážek a hodnot aktuální evapotranspirace smrkového porostu. Pro hodnocení aktuální evapotranspirace jsou použity vybrané algoritmy modelu AVISO (modifikovaná metodika Penman-Monteith). Pro každý den vegetačního období (1. 4.–30. 9.) je pro soubor automatizovaných klimatických stanic vypočítána denní vláhová bilance (v mm.den⁻¹) na základě měřených úhrnů srážek a evapotranspirace modelované na základě průměrné denní teploty vzduchu [°C], průměrného denního tlaku vodní páry [hPa] vypočítaného podle teploty a relativní vlhkosti vzduchu, trvání slunečního svitu za den [hod], průměrné denní rychlosti větru [m.s⁻¹] a denního úhrnu srážek [mm]. Pro výpočet jsou brány v úvahu středně těžké půdy s využitelnou vodní kapacitou VVK = 170 mm pro hloubku 1 m půdního profilu. Denní hodnoty vláhové bilance jsou sečteny za vegetační období a následně interpolovány s využitím interpolační metody ClidataDEM

(lineární regrese se závislostí na nadmořské výšce s korekcí podle měřených dat na jednotlivých stanicích).

Mapy jsou u dispozic v podobě gridu s rozlišením 500 m (obr. 6).



Obr. 6: Mapy aktuální vláhové bilance smrkového porostu ve vegetačních obdobích 2012–2015

3.2.3 Mapa dlouhodobého stresu suchem

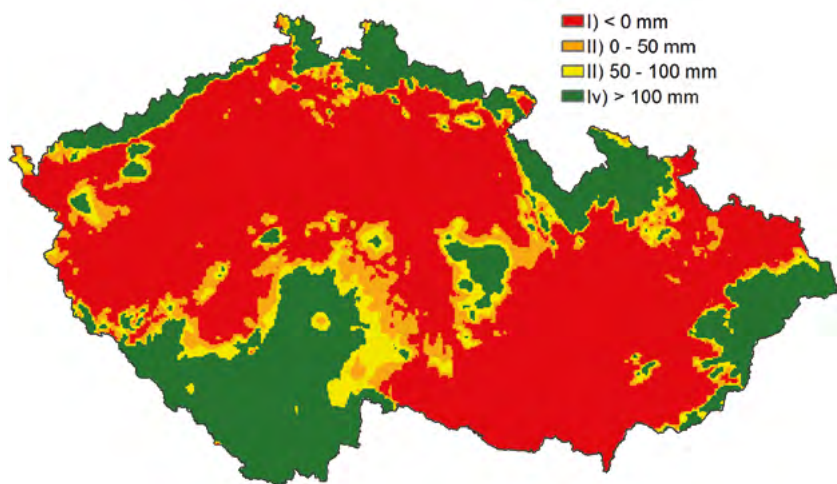
Při hodnocení dlouhodobého stresu suchem jsme vycházeli z poslední práce Braun a kol. (2015), ve které autoři hodnotili mortalitu buku a smrku v závislosti na faktorech prostředí. **Pro smrk zjistili Braun a kol. signifikantní závislost mortality na poměru skutečné a potenciální evapotranspirace (ET_a/ET_p) v uplynulých třech letech. Tuto charakteristiku naplňují mapy aktuální vláhové bilance.**

Při tvorbě map dlouhodobého stresu suchem je pro jednotlivé gridové body pomocí vhodného softwaru, který umožňuje operace mapové algebry (ArcGis, Q-Gis),

sečtena výsledná vodní bilance za tři roky. Pro vyhodnocení dlouhodobého stresu suchem v aktuálním roce jsou tak použity mapy aktuální vláhové bilance pro tři roky předcházející.

Výsledné hodnoty je následně třeba rozdělit do čtyř kategorií (obr. 7).

- i) bilance < 0 mm – oblasti s celkovou bilancí pod 0 mm, kde byly smrkové porosty výrazně stresovány suchem.
- ii) bilance 0–50 mm – oblasti, kde byly smrkové porosty za tři vegetační období silně stresované suchem.
- iii) bilance 50–100 mm – oblasti, kde byly smrkové porosty za tři vegetační období mírně stresované suchem.
- iv) bilance > 100 mm – oblasti, kde smrkové porosty nebyly za tři vegetační období vůbec stresované suchem. U jinak zdravých porostů by na takových lokalitách nemělo docházet k akutním kalamitním poškozením lesa, a to ani při výrazném přísušku během jedné vegetační sezóny.



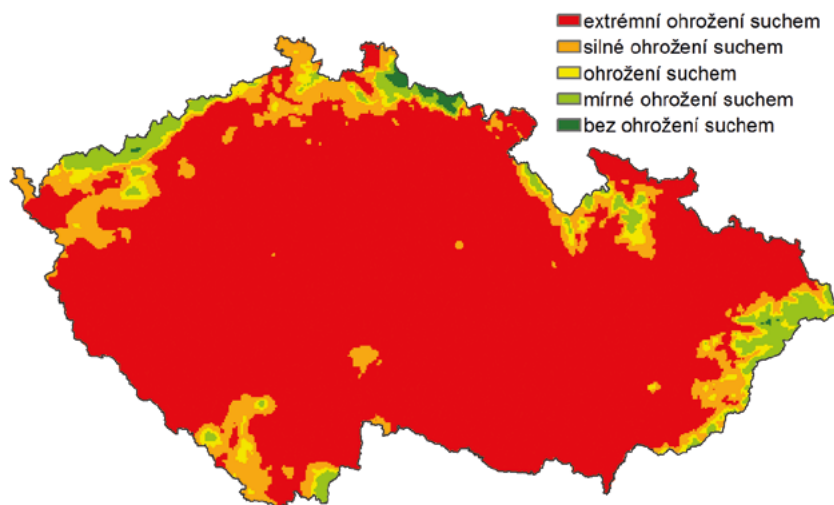
Obr. 7: Mapa dlouhodobého stresu suchem pro období 2012–2014.

3.2.4 Mapa akutního stresu suchem ve vegetačním období

Tato mapa vychází z mapy aktuální vláhové bilance zpracovávaného roku. Vrstva reprezentuje součet denních hodnot vláhové bilance za vegetační období daného roku.

Hodnoty rastru je třeba rozdělit do následujících kategorií (obr. 8):

- 0 – vodní bilance > 50 mm – oblast bez akutního ohrožení suchem
- 1 – vodní bilance -50 – 50 mm – oblast mírného ohrožení suchem
- 2 – vodní bilance -80 – 50 mm – oblast ohrožení suchem
- 3 – vodní bilance -120 – -80 mm – oblast výrazného ohrožení
- 4 – vodní bilance < -120 mm – oblast extrémního ohrožení suchem



Obr. 8: Mapa akutního stresu suchem ve vegetačním období 2015.

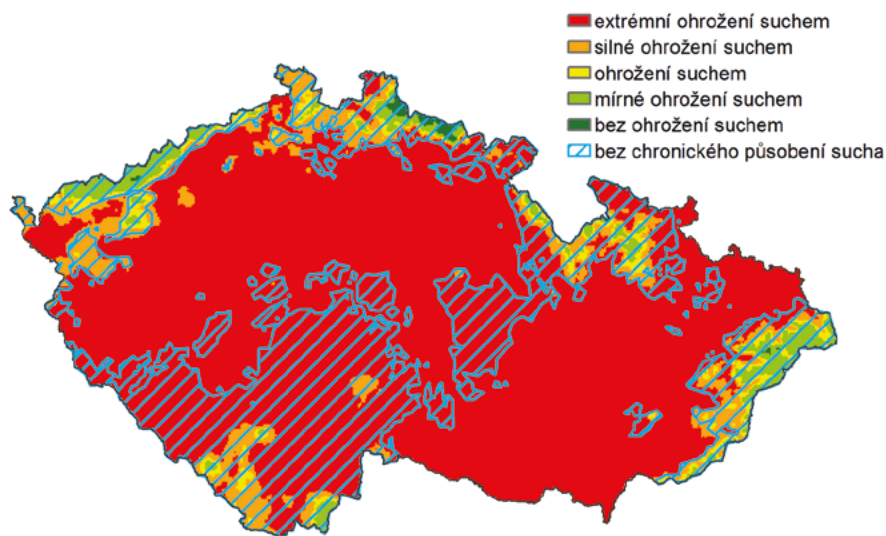
3.2.5 Mapa ohrožení smrkových porostů

Jako základ slouží mapa stresu suchem ve vegetačním období daného roku. Pro vznik kalamitního poškození smrkových porostů suchem jsou uvažovány tři kategorie: ohrožení suchem, silné ohrožení suchem a extrémní ohrožení suchem.

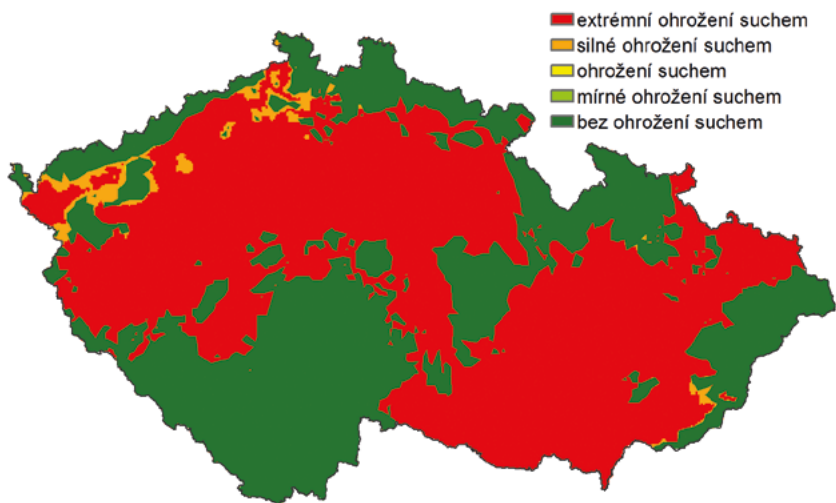
K akutnímu kalamitnímu poškození však může dojít pouze v případě víceletého chronického působení sucha. Do mapy jsou proto promítnuty ještě oblasti, kde dlouhodobé sucho nebylo zaznamenáno, tedy lokality s vláhovou bilancí nad 100 mm za předcházející tři roky (obr. 9).

Výsledný rastr byl reklasifikován následujícím způsobem (obr. 10):

- 0 – vodní bilance > 50 mm, nebo bez dlouhodobého stresu suchem – bez ohrožení suchem
- 1 – vodní bilance -50 – 50 mm – oblast mírného ohrožení suchem
- 2 – vodní bilance -80 – -50 mm – oblast ohrožení suchem
- 3 – vodní bilance -120 – -80 mm – oblast výrazného ohrožení
- 4 – vodní bilance < -120 mm – oblast extrémního ohrožení suchem



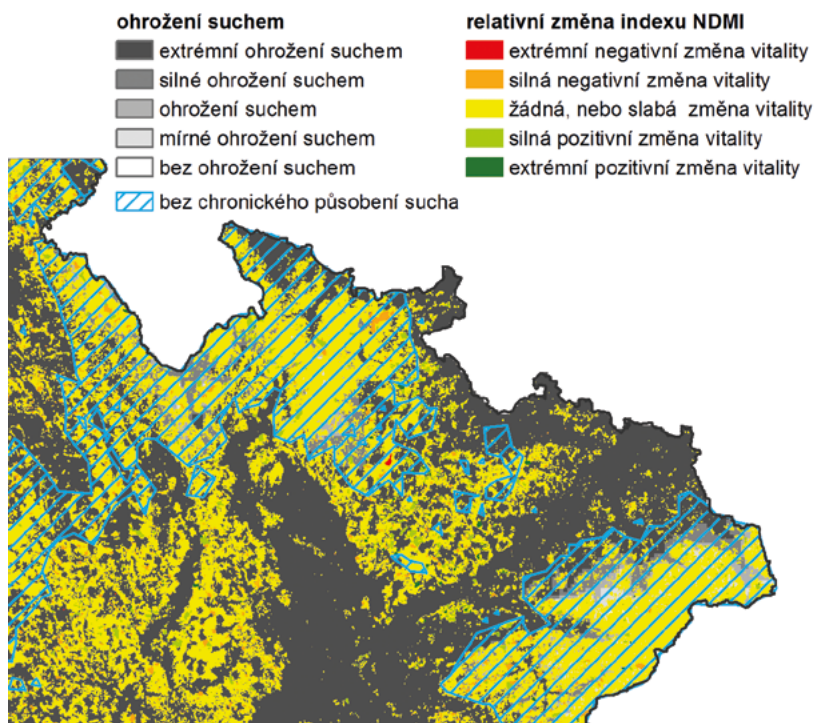
Obr.9: Mapa akutního stresu suchem ve vegetačním období 2015 s oblastmi bez chronického působení sucha.



Obr. 10: Mapa ohrožení smrkových porostů suchem v roce 2015.

3.3 Identifikace smrkových porostů ohrožených suchem na základě propojení popsanych metod

Jak již bylo zmíněno v úvodu této metodiky, propojením výsledků obou popsanych metod dojde k zpřesnění informace o porostech potenciálně poškozených suchem ve sledovaném vegetačním období. Obrázek 11 ukazuje příklad takové syntézy dat, kdy jsou v jednom mapovém podkladu pro smrkové porosty znázorněny informace o dlouhodobém (chronickém) a akutním (v průběhu jedné vegetační sezóny) působení sucha, a aktuální změně ve vitalitě vegetace v porovnání s předcházejícími roky v podobě relativní změny vegetačního indexu.



Obr. 11: Míra poškození lesních porostů hodnocená z relativních změn hodnot spektrálního indexu NDMI v kombinaci ohrožení smrkových porostů suchem na základě modelování meteorologických charakteristik.

4 SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

V České republice doposud nebyly v takovémto rozsahu hodnoceny potenciální dopady sucha na zdravotní stav lesních porostů.

Metodika zcela nově využívá propojení dvou přístupů pro hodnocení sucha, a to využití dat DPZ a vegetačních indexů společně s modelováním meteorologických dat. V rámci přípravy metodiky byl agrometeorologický model AVISO nově parametrizován pro smrkové porosty.

5 POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Identifikace porostů ohrožených dlouhodobým působením sucha představuje v souvislosti s probíhající globální změnou klimatu důležitou informaci pro správné zacílení politik a nástrojů pro účelnou ochranu lesa. Prezentované metody jsou uplatnitelné v širokém prostorovém měřítku a umožňují podrobné sledování změn zdravotního stavu jehličnatých porostů v rizikových (suchem ohrožených) oblastech. Informace o míře stresování porostů suchem mohou být rovněž jedním z hlavních prediktorů pro lokalizaci a dynamiku současné kůrovcové kalamity. Představují tak jeden z důležitých nástrojů pro stanovení postupů obrany a ochrany lesních porostů.

Metodika nalezne uplatnění u odborné veřejnosti v oblasti lesnictví, u pracovníků státní správy, ale i v oblasti výzkumu a akademické sféře.

6 EKONOMICKÉ ASPEKTY

Ekonomické aspekty uplatnění této metodiky jsou zejména nepřímé a lze je hodnotit především z pohledu užití pro rozhodování v oblasti státní správy a lesnického managementu.

V rámci uplatnění nástrojů popsaných v metodice lze snáze identifikovat nejen oblasti, ve kterých jsou smrkové porosty ohrožené suchem na základě nepříznivé vláhové bilance, ale i konkrétní porosty, ve kterých již došlo ke snížení jejich vitality. Tyto postupy sníží náklady na podrobný terénní průzkum s cílem hodnocení zdravotního stavu lesních porostů jako odpovědi na působení sucha.

Zásadním ekonomickým přínosem jsou podklady, které metodika přináší pro efektivní rozhodování při zvládání kůrovcové kalamity a obecněji při plošných případech poškození lesních porostů, kde sucho hraje roli spouštěcího či přispívajícího rizikového faktoru. Využití těchto informací může znamenat úspory vzniklé z vyšší efektivity obranných opatření i podstatné snížení ztrát na dřevní hmotě a její snížené obchodovatelnosti. V závislosti na rozsahu kalamity může jít o efekty v řádech statisíců až milionů Kč.

Ekonomická náročnost těchto postupů vychází z ceny využitých dat, které se pohybují od dat distribuovaných zdarma až po data pořízená v hodnotě cca 40 000 Kč za jednu vrstvu aktuální vláhové bilance. Uvedené odborné postupy také vyžadují dostatečně proškolené odborné pracovníky a odpovídající softwarové vybavení.

7 LITERATURA

7.1 Seznam použité související literatury

- HAIS M., JONÁŠOVÁ M., LANGHAMMER J., KUČERA T. (2009): Comparison of two types of forest disturbance using multitemporal Landsat TM/ETM+ imagery and field vegetation data. *Remote Sensing of Environment*, 113: 835–845.
- HEALEY S. P., COHEN W. B., YANG Z., & KRANKINA O. N. (2005): Comparison of tasseled capbased Landsat datastructures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*, 97: 301–310.
- HEALEY S.P., YANG Z., COHEN W. B., PIERCE D. J. (2006): Application of two regression-based methods to estimate the effects of partial harvest on forest structure using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 101, 115–126.
- HOLUŠA J., LIŠKA J. (2002): Hypotéza chřadnutí a odumírání smrkových porostů ve Slezsku (Česká republika). *Zprávy lesnického výzkumu*, 47: 9–15.
- JIN S., SADER S. A. (2005): Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*, 94: 364–372.
- KENNEDY R.E., ANDRÉFOUËT S., COHEN W.B., GÓMEZ C., GRIFFITHS P., HAIS M., HEALEY S.P., HELMER E.H., HOSTERT P., LYONS M.B., MEIGS G.W., PFLUGMACHER D., PHINN S.R., POWELL S.L., SCARTH P., SEN S., SCHROEDER T.A., SCHNEIDER A., SONNENSCHNEIN R., VOGELMANN J.E., WULDER M.A., ZHU Z. (2014): Bringing an ecological view of change to Landsat-based remote sensing. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12: 339–346.
- LUBOJACKÝ J. (2013): Škodliví činitelé v lesích Moravskoslezského kraje v letech 2002–2012. *Lesnická práce*, 92: 366–367.
- MISHRA A.K., SINGH V.P. (2010): A review of drought concepts. *J. Hydrol.* 391: 202–216.
- NORMAN S.P., KOCH F.H., HARGROVE W.W. (2016): Review of broad-scale drought monitoring of forests: Toward an integrated data mining approach, *Forest Ecology and Management*, 380: 346–358.

- PETERS M.P., IVERSON L.R., MATTHEWS S.N. (2015): Long-term droughtiness and drought tolerance of eastern US forests over five decades. *For. Ecol. Manage.*, 345: 56–64.
- RULLAN-SILVA C. D., OLTHOFF A. E., DELGADO DE LA MATA J. A., PAJARES-ALONSO J. A. (2013): Remote monitoring of forest insect defoliation: a review. *For. Syst.*, 22: 377–391.
- SKAKUN R.S., WULDER M.A., FRANKLIN S.E (2003): Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage. *Remote Sensing of the Environment*, 86: 433–443.
- ŠLODIČÁK M. (2014): Příčiny chřadnutí smrku na Opavsku. In: Novák J., Dušek, D. (eds.): Chřadnutí smrku v oblasti severní a střední Moravy. Sborník přednášek odborného semináře. Budišov nad Budišovkou 14. 10. 2014. Opočno, Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti – Výzkumná stanice: 5–8.
- SVOBODA M.D., HAYES M.J., WILHITE D.A., TADESSE T., (2004): Recent advances in drought monitoring. Paper J2.4. In: 14th Conference on Applied Climatology, 10–16 January 2004. American Meteorological Society, Seattle, Washington.
- ŠRÁMEK V., VEJPUSTKOVÁ M., NOVOTNÝ R., HELLEBRANDOVÁ K. (2008): Yellowing of Norway spruce stands in the Silesian Beskids – damage extent and dynamics. *Journal of Forest Science*, 54: 55–63.
- VICENTE-SERRANO S.M., GOUVEIA C., CAMARERO J.J., BEGUERÍA S., TRIGO R., LÓPEZ-MORENO J.I., AZORÍN-MOLINA C., PASHO E., LORENZO-LACRUZ J., REVUELTO J., MORÁN-TEJEDA E., SANCHEZ-LORENZO A., (2013). Response of vegetation to drought timescales across global land biomes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110: 52–57.
- WOODWARD F.I. (1995). Ecophysiological controls of conifer distributions. In: Smith W.K., Hinckley T.M.: *Ecophysiology of coniferous forests*. San Diego, Academic Press: 79–94.
- WULDER M.A., MASEK J.G., COHEN W.B., LOVELAND T.R., WOODCOCK C.E. (2012): Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122: 2–10.

7.2 Seznam publikací, které předcházely metodice

- V. Šrámek, K. Neudertová Hellebrandová: Mapy ohrožení smrkových porostů suchem jako nástroj identifikace rizikových oblastí: odborné sdělení. Zprávy lesnického výzkumu, 61, 2016 (4): 305-309
- K. Neudertová Hellebrandová, V. Šrámek: Ohrožení smrkových porostů suchem, soubor map 2016 – specializovaná mapa s odborným obsahem
- K. Neudertová Hellebrandová, V. Šrámek: Ohrožení smrkových porostů suchem, soubor map 2017 – specializovaná mapa s odborným obsahem
- K. Neudertová Hellebrandová, V. Šrámek: Ohrožení smrkových porostů suchem, soubor map 2018 – specializovaná mapa s odborným obsahem

8 OPONENTI

Ing. Lucie Homolová, Ph.D.

Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i, Bělidla 986/4a, 603 00 Brno

Ing. Petr Uzel

Ministerstvo zemědělství, oddělení ekonomických nástrojů lesního hospodářství, Těšnov 65/17, 110 00 Praha 1

9 DEDIKACE

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu NAZV QJ1630441 s názvem: Metody hodnocení sucha v lesních porostech řešeného v letech 2016–2018.

METHODS OF DROUGHT ASSESSMENT IN NORWAY SPRUCE STANDS

Summary

The methodology is concerned with the identification of Norway spruce stands damaged by forest drought.

The gradual decline of Norway spruce stands has been observed in North Moravia and Silesia since the late 1990s. This trend has increased recently also in altitudes where Norway spruce is not native species but is artificially planted for its high wood production (ŠRÁMEK et al. 2008; SLODIČÁK 2014). The damage is caused by complex of factors but drought periods seem to be a trigger mechanism (HOLUŠA, LIŠKA 2002).

The first part of methodology is devoted to the use of Earth Remote Sensing methods for the identification of damaged stands. To identify the drought-damaged vegetation, the Landsat satellite system was used, which represents one of the most used remote sensing satellite system for forest monitoring (Wulder et al., 2012). The spectral vegetation indices NDMI and Wetness were calculated, combining the influence of different spectral bands to highlight various vegetation states, in this case the influence of drought on the vitality of the forest stands.

When comparing the sensitivity of the two spectral indices to the data verification set, the NDMI index appears to be more sensitive for the identification of drought-damaged stands. However, both indices are highly correlated ($R = 0.85$) and can be used as an alternate predictor.

The identification of forest stands stressed by water deficiency was made by comparing the average NDMI value before the year of drought event (in this case between 2003 and 2014) with values for 2015 (Fig. 5). This year was selected for testing purposes because it includes a high under-rainfall during the growing season, which, according to the field survey, had a significant impact on the change of forest health status. In this study, spectral index values were calculated for all forest stands that have a spruce representation above 70% and their area is higher than 0.5 ha.

The second part of the methodology is devoted to the derivation of drought maps in forest stands.

Agrometeorological model AVISO („Agrometeorological computing and information system“) is commonly used to estimate the moisture deficiency in the

agricultural landscape (and its impact on agricultural crops). Within the framework of the research project NAZV QJ1630441 „Methods of drought assessment in forest stands“ the parameters of this model were modified for spruce stands.

Maps of actual water balance are one of AVISO's standard products. Actual water balance is a difference between total precipitation and actual evapotranspiration.

On the basis of this maps, the maps of long-term drought stress was derived. Maps of long-term drought stress are based on the latest work by Braun et al. (2015), in which the authors evaluated the mortality of beech and spruce depending on environmental factors. Braun et al. found a significant dependence of spruce mortality on the ratio of actual and potential evapotranspiration (ET_a / ET_p) over the past three years. For the assessment of long-term drought stress in the current year, maps of the actual water balance for the three previous years are used (Fig. 7). The resulting map of spruce stands threatened by drought is combination of the drought map for current growing season with the map of chronic drought.

The synthesis of the results of the two described methods will lead to a more precise information about spruce stands potentially damaged by drought during the growing season. Figure 11 illustrates an example of such a data synthesis where the information on long-term (chronic) and acute (one vegetation season) drought and the current change in forest vitality in the form of vegetation index relative changes are linked in one map.



Výzkumný ústav
lesního hospodářství
a myslivosti, v. v. i.

www.vulhm.cz

LESNICKÝ PRŮVODCE 18/2018