OHODNOCENÍ EKOSYSTÉMOVÝCH FUNKCÍ LESNÍCH POROSTŮ POMOCÍ METOD DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU ZEMĚ



LUCIE HOMOLOVÁ ANTONÍN KUSBACH jun. MILAN FISCHER a kol.





Ohodnocení ekosystémových funkcí lesních porostů pomocí metod dálkového průzkumu Země

Certifikovaná metodika

Lucie Homolová Antonín Kusbach jun. Milan Fischer Jan Krejza Jan Novotný Tomáš Ghisi Jan Světlík Pavel Bednář Miroslav Trnka Petr Horáček

Strnady 2024

Lesnický průvodce 3/2024

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 978-80-7417-276-2 ISSN 0862-7657

ASSESSMENT OF FOREST ECOSYSTEM FUNCTIONS USING REMOTE SENSING

Abstract

The main objective of this methodology is to evaluate the ecosystem functions of forest ecosytems through remote sensing, specifically its production and regulation functions. For this purpose, indicators such as net primary production (NPP) and evapotranspiration are used. These indicators elucidate the patterns of forest productivity in relation to the water balance in the Czech Republic. Results of this methodology are demonstrated in a case study – a trend analysis of time series obtained from satellite remote sensing data.

The presented results are based on global and open MODIS satellite data products, which provide users (e.g. forest managers, owners and state forest administration authorities) a tool to better understand the long-term response of forests to changing environmental conditions induced by climate change. The results show areas where long-term trends (since 2001) in productivity and evapotranspiration are declining, stagnating or increasing. Analyses can also be focused on individual forest tree species, as demonstrated for Norway spruce, whose productivity declines significantly at lower elevations. These data-driven findings should be used to support decision making in the forestry sector. Limitations stemming from temporal and spatial resolutions of used data should be considered when interpreting the results of the case study.

The selected MODIS satellite data at a spatial resolution of 500 m is suitable mainly for national level analyses, and therefore may not fully assess the spatial heterogeneity of forests and landscape features typical for Czech conditions. The development of custom, national products with higher spatial resolution that reflect the diversity of the local landscape will be crucial for effective and accurate data evaluation for forest management purposes.

Airborne laser scanning methods were incorporated for a detailed local assessment of current forest production. In contrast to long-term productivity trends derived from satellite data time series, these methods provide very detailed information on current above-ground biomass or timber stocks at the spatial resolution of tens of meters at the level of individual stands. Unfortunately, the Czech Republic is one of the few EU countries where up-to-date airborne laser scanning data are not available, which makes it impossible to apply the method for nationwide mapping.

Key words: forest; production function; regulation function; net primary productivity; evapotranspiration; aboveground biomass; remote sensing, MODIS; laser scanning

Autorský kolektiv:

Ing. Lucie Homolová, Ph.D.¹ Antonín Kusbach jun., MSc.^{1,2} Ing. Milan Fischer, Ph.D.^{1,3} Ing. Jan Krejza, Ph.D.^{1,2} Ing. Jan Novotný, Ph.D.¹ Ing. Tomáš Ghisi^{1,3} Ing. Jan Světlík, Ph.D.² Ing. et Ing. Mgr. Pavel Bednář, Ph.D.⁴ prof. Ing. Mgr. Miroslav Trnka, Ph.D.^{1,3} prof. Dr. Ing. Petr Horáček¹

- ¹ Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Bělidla 986/4a, 603 00 Brno
- ² Ústav ekologie lesa, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova Univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno
- ³ Ústav agrosystémů a bioklimatologie, Agronomická fakulta, Mendelova Univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno
- ⁴ Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Výzkumná stanice Opočno, Na Olivě 550, 517 73 Opočno

Oponenti:

Ing. Radim Strejček, Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, pobočka Frýdek-Místek

Ing. Pavel Starý, Diecézní lesy Hradec Králové s.r.o., jednatel

Obsah:

1	ÚVOD DO PROBLEMATIKY	7						
	1.1 Současný stav lesů v České republice							
	1.2 Funkce a význam lesních porostů	7						
	1.3 Potenciál využití metod dálkového průzkumu Země							
	v lesnictvi	10						
2	CÎLE METODIKY	13						
3	VLASTNÍ POPIS METODIKY	14						
	3.1 Produkční funkce lesních porostů	14						
	3.1.1 Produktivita z časových řad satelitních dat	14						
	3.1.2 Nadzemní biomasa z dat laserového skenování	20						
	3.2 Regulační funkce lesních porostů	28						
	3.2.1 Evapotranspirace z časových řad satelitních dat	30						
	3.2.2 Aktuální evapotranspirace z leteckých dat	36						
4	VÝSLEDKY	37						
	4.1 Trendy čisté primární produkce (produkční funkce) ze satelitních dat	37						
	4.2 Trendy aktuální evapotranspirace (regulační funkce) ze satelitních dat	43						
	4.3 Nadzemní biomasa z leteckých dat	46						
5	SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ	49						
6	POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY	51						
7	EKONOMICKÉ ASPEKTY	53						
8	DEDIKACE	56						
9	LITERATURA	57						
	9.1 Seznam použité literatury	57						
	9.2 Seznam publikaci, které předcházely metodice	68						
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	70						
11	EXTENDED ENGLISH SUMMARY	73						

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

1.1 Současný stav lesů v České republice

V globálním měřítku terestrické ekosystémy uloží ročně 2,1 až 2,6 × 10⁹ tun uhlíku a více jak z poloviny se na tomto podílejí lesní ekosystémy (Hendriks et al., 2020; Luyssaert et al., 2007). Lesní ekosystémy jsou zodpovědné za více než 90 % celkových toků uhlíku mezi souší a atmosférou (Dixon et al., 1994). Tím, že lesy vážou velké množství atmosférického CO₂, hrají důležitou roli v globálním uhlíkovém cyklu a nabízejí nástroj ke zmírňování dopadů klimatické změny (Bonan, 2008; Kauppi et al., 2022). Současně však rychlá změna klimatu ohrožuje jejich stabilitu a resilienci, což snižuje jejich dlouhodobou schopnost vázat CO₂ (Bonan, 2008; Forzieri et al., 2022).

Rozloha lesů v České republice činní zhruba 33 % území, což je obdobný podíl plochy jako v celé Evropě, a v posledních letech jejich plocha setrvale roste. Z hlediska funkcí se rozložení kategorií lesů, tj. lesy hospodářské (cca 74 %), ochranné (2 %) a zvláštního určení (24 %), za posledních 20 let výrazně nezměnilo (MZe, 2023). Nejvýznamnější změnou v lesních porostech poslední dekády je však masivní úbytek produkčních jehličnatých, zejména smrkových porostů, které byly značně stresovány epizodami sucha, následovanou kalamitní invazí lýkožrouta smrkového (Brázdil et al., 2022; Hlásny et al., 2021). Tato situace vedla k masivní těžbě v zasažených oblastech, které v důsledku kůrovcové kalamity dosahovaly za celou Českou republiku maxima téměř 35 mil. m³ v roce v 2020 (MZe, 2023).

1.2 Funkce a význam lesních porostů

Funkce lesních porostů v ČR je primárně hospodářská. Produkce dřevní suroviny, primárně smrkové, má důležitý význam pro místní ekonomiku. Kromě svojí ekonomické hodnoty poskytují lesy celou řadu mimoprodukčních, tzn. společensky a ekologicky významných funkcí a služeb (Navrátil, 2015), které však nejsou dostatečně ekonomicky oceněny.

Z pohledu hospodářské úpravy lesů jsou lesy v České republice kategorizovány na hospodářské, ochranné a zvláštního určení a kromě produkčních funkcí jsou zohledněny další mimoprodukční funkce: vodohospodářská, půdoochranná, rekreační, klimatická, krajinotvorná či reprodukční. Rámec mimoprodukčních funkcí se s lidskými potřebami a poznáním průběžně mění, a proto se dnes setkáváme také například s termíny ekologicko-stabilizační či regulační funkce, protierozní, zdravotně-rekreační funkce a podobně (Navrátil, 2015). Je tedy nutné si uvědomit, že lesy poskytují pro přírodu i společnost celou řadu existenčně důležitých služeb. Prioritním zájmem státu, vlastníků lesů i jejich uživatelů by proto mělo být udržitelné hospodaření a podpora jejich prosperity a schopnosti poskytovat široké spektrum produkčních i mimoprodukčních funkcí prostřednictvím vhodných zásahů. Tento cíl je také významně akcentován v nové Lesní strategii EU do roku 2030 (EU, 2021).

Funkce lesa, jejich definice a klasifikace nejsou v českém lesnictví jednoznačně zakotveny. V současnosti existují dva zásadní metodické přístupy k hodnocení funkcí lesa, které definují vlastní terminologii, metodologii a uplatnění. Jedná se o metodiku sociálně-ekonomického hodnocení funkcí lesa dle Šišáka et al. (2006). Metodika z pohledu vyjádření společenské hodnoty funkce lesa rozlišuje funkce i) tržní, produkční, a ii) netržní, environmentální (či mimoprodukční), kde jsou zahrnuty funkce nedřevoprodukční, půdoochranné, hydrické, vzduchoochranné, zdravotně--hygienické a kulturně-naučné. Tento přístup hodnotí funkce lesa z pohledu benefitů pro společnost a v kontextu mezinárodních studií bychom zde hovořili spíše o ekosystémových službách lesa než funkcích (MAE, 2005). Druhým metodickým přístupem k hodnocení funkce lesa je metodika Vyskota et al. (2003), který rozlišuje funkci bioprodukční, ekologicko-stabilizační, hydricko-vodohospodářskou, edafickou-půdoochrannou, sociálně-rekreační a zdravotně-hygienickou. Hruban et al. (2020) zavádí podrobné klasifikační schéma funkcí lesa pro oblastní plány rozvoje lesů dělené do tří hlavních kategorií: produkční, ekologická a sociální.

V kontextu naší metodiky jsme se zaměřili na plošné hodnocení produkční funkce lesa a z mimoprodukčních funkcí jsme vybrali funkci regulační, tzn. schopnost lesních ekosystémů regulovat hydrologické a klimatické podmínky prostřednictvím jejich vlivu na energetickou a vodní bilanci.

Produkční funkce

Produkční funkce lesa představuje schopnost lesního ekosystému generovat organickou hmotu, tj. vázat a ukládat vzdušný uhlík prostřednictvím fotosyntetické aktivity stromů. Tato funkce je úzce spjata s dynamikou růstu a schopností lesa akumulovat biomasu, což má přímý dopad na ekologickou a ekonomickou hodnotu lesa. Produkční funkci či produktivitu lze charakterizovat různými veličinami, jako je hrubá primární produkce, čistá primární produkce, celková nadzemní biomasa, zásoba či objem dřeva (hroubí/nehroubí), jejichž podrobné definice jsou rozvedeny v kap. 3.1. Tyto ukazatele produktivity jsou důležité, protože umožňují charakterizovat dynamiku uhlíkového cyklu v různých typech lesa a v různých ekologických podmínkách. Pro dlouhodobé a udržitelné řízení produkční funkce je klíčové zajištění rovnováhy mezi ekonomickými potřebami a environmentálními přínosy lesa. Např. intenzivní těžba smrkových porostů v důsledku poškození kůrovcem by měla být balancována výsadbou patřičných dřevin (listnatých druhů, resilientnějších proti suchu), reflektujících současný vývoj klimatické změny (Krejza et al., 2019), ale také vhodné stanovištní podmínky (Kusbach et al., 2024). Udržitelné hospodaření v lese by mělo zaručit existenci vitálních lesních ekosystémů v současnosti, ale i pro budoucí generace.

Regulační funkce

Regulační funkce lesů spočívá zejména v jejich schopnosti ochlazovat své okolí. Stromy přijímají atmosférický CO₂ primárně prostřednictvím průduchů (stomat). Skrze průduchy zároveň dochází k výdeji vodní páry. Díky společné regulaci pomocí průduchů jsou procesy asimilace CO₂ a transpirace velmi úzce spjaty. Transpirace stromů však není jediný proces, při kterém z lesního ekosystému odchází voda do atmosféry. Dostává se tam také díky výparu z půdy, transpirací podrostu a výparu z tzv. intercepce, tedy vody zadržené porostem při vertikálních či horizontálních srážkách. Souhrnně tyto procesy označujeme jako evapotranspirace. Z fyzikálního hlediska se jedná o fázovou přeměnu, na kterou je zapotřebí energie, a proto lze považovat evapotranspiraci jako přírodní proces vedoucí k přirozenému lokálnímu ochlazování (Breil et al., 2024; McGloin et al., 2019). Při kondenzaci neboli zkapalnění se energie spotřebovaná na změnu skupenství uvolňuje, což vede k lokálnímu oteplení. Zde je nutné zdůraznit, že chladicí efekt lesů je pouze lokální a současně závisí i na konkrétním místě (a výšce nad povrchem). Regulační funkce lesa je výrazně ovlivněna teplotou, sumou globální radiace, rychlostí větru, vlhkostí vzduchu a úhrnem srážek, které určují průběh a míru evapotranspirace – klíčového procesu, který moderuje lokální klima a ochlazuje okolní prostředí.

Zmiňovaný proces přispívá nejen k regulaci teploty v lesních ekosystémech, ale také mírní dopady změny klimatu (Bonan, 2008), které se následně odráží v dopadech na přírodní zdroje a socioekonomické aspekty. S rostoucí teplotou, zvláště při nedostatku srážek, se schopnost lesa vykonávat regulační funkci snižuje, což má za důsledek vyšší riziko přehřívání lesních ekosystémů a dochází k limitaci produktivity a postupnému poklesu vitality.

V praxi vnímáme důležitost regulační funkce lesů například ve zmírňování extrémních teplot v lesích samotných i v jejich okolí, což příznivě ovlivňuje nejen lidská sídla, ale také řadu organismů žijících v těchto ekosystémech. Chladicí efekt lesů může mít tedy přímý dopad na kvalitu života a hospodářskou stabilitu v daných oblastech. V konkrétním případě se jedná např. o opatření jako přítomnost městských lesů a parků nebo implementace zelených pásů (green belts) do územního plánování.

1.3 Potenciál využití metod dálkového průzkumu Země v lesnictví

Dálkovým průzkumem se rozumí získávání informací o objektu, povrchu nebo jevu bez fyzického kontaktu, obvykle pomocí satelitních, leteckých a v poslední době stále častějších bezpilotních platforem (obr. 1). Data dálkového průzkumu můžeme rozdělit dle fyzikální podstaty snímačů. Jedná se o senzory pasivní, optické, které zaznamenávají odražené sluneční záření od povrchu, a senzory aktivní, které zaznamenávají odraz vlastního vyslaného signálu (např. laserové skenery a radary). Data se dále mohou dělit dle prostorového, spektrálního a časového rozlišení. Tyto charakteristiky obvykle souvisí s typem nosiče, zda se jedná o data satelitní, letecká či bezpilotní (obr. 1). Metody a data dálkového průzkumu Země (DPZ) se stávají stále dostupnější a běžnější praxí v environmetálních studiích. Jejich potenciál pro využití v lesnictví je poměrně značný – data DPZ se používají pro sledování biomasy, zásob uhlíku a inventarizačních parametrů lesa (Gallaun et al., 2010; Novotny et al., 2021; Spawn et al., 2020), biologické rozmanitosti (Deng et al., 2023), disturbancí jako jsou požáry a odlesňování (Feng et al., 2024; Hansen et al., 2013) či výskytu chorob (Duarte et al., 2022). Dalším příkladem aplikace DPZ v lesním prostředí může být plošná detekce evapotranspirace na základě metody satelitního měření povrchové teploty a využití specializovaných modelů (Allen et al., 2007; Norman et al., 1995). Výsledky studií zaměřených na kvantifikaci evapotranspirace v oblasti lužních lesů jižní Moravy (Ghisi et al., 2024, 2023) naznačují potenciál těchto modelů pro využití i v jiných typech lesních ekosystémů ČR. V kombinaci s pozemními měřeními hydrologických procesů tyto metody pomáhají přesněji kvantifikovat vodní bilanci v lesních porostech, což může přispívat k efektivnímu hospodaření s vodou, zejména v době stresu způsobeného suchem. V tabulce 1 uvádíme přehled různých typů dat DPZ a jejich potenciál pro využití v lesnické praxi. Avšak jak poukazuje Fassnacht et al. (2024) v nedávné studii, reálné využití DPZ metod a postupů v lesnické praxi na národních úrovních značně kolísá. Autor zmiňuje rozmanitost přístupů a aplikací DPZ metod v různých částech světa a zdůrazňuje skandinávské státy, které dokázaly poměrně dobře začlenit podklady z DPZ do akademické i lesní manažerské praxe. Jedná se hlavně o využití dat leteckého laserového skenování pro monitoring zásob a struktury lesa, např. Nilsson et al. (2017).

V oblasti využití dat DPZ v lesnické praxi v České republice byla pro hodnocení zdravotního stavu lesů dříve využívaná metodika vyvinutá společností Stoklasa Tech, která však nebyla detailně prezentována v odborné literatuře. Metoda byla založena na vegetačním indexu z časových řad dat Landsat a klasifikovala porosty do 10 tříd defoliace porostů. Monitoring zdravotního stavu lesa z DPZ momentálně používá ÚHÚL na základě metody založené na volně dostupných satelitních datech Sentinel-2 (Lukeš et al., 2018). Metoda hodnotí změny indexu listové plochy (potažmo míry defoliace) mezi jednotlivými roky. Jelikož hodnocení zdravotního stavu pomocí DPZ není dle MZe (2023) natolik spolehlivé, i nadále se používá opakovaných pozemních šetření v rámci monitoringu ICP Forests (Vejpustková, 2019) a národní inventarizace lesů NIL (<u>https://nil.uhul.cz/</u>). Data pozemního šetření jsou pak důležitým zdrojem pro vývoj a validaci metod založených na DPZ. ÚHÚL dále vyhodnocuje pomocí komerčních satelitních snímků Planet (Planet Labs Inc.) rozsah a průběh kůrovcové kalamity, tj. plochy těžeb a souší v převážně jehličnatých porostech (<u>https://www.kurovcovamapa.cz/</u>). V současné době nám není znám metodický postup, který by hodnotil produkční či mimoprodukční funkce lesa pomocí nástrojů a dat DPZ.



В.



UAV/letadlo < 1 m Sentinel 2 - 10 m Landsat 8 - 30 m PROBA-V - 100 m MODIS - 500 m

Obr. 1:

Ukázka různých typů platforem pro dálkový průzkum lesních ekosystémů (A). Každá platforma umožňuje pořizování dat v různém prostorovém (B) a časovém rozlišení. UAV (drony) a letecká data jsou vhodná pro menší zájmové oblasti, zatímco satelity (např. Sentinel-2, MODIS) pokrývají velká území s různým prostorovým rozlišením (desítky až stovky metrů) a umožňují dlouhodobé sledování v čase. Ukázka vlivu prostorového rozlišení na detailnost zobrazení (B) – Špindlerův Mlýn, Krkonoše.

Tabulka 1:

Přehled typů dat dálkového průzkum Země dle jejich fyzikální podstaty, spektrálního a prostorového rozlišení a jejich potenciál pro monitoring různých charakteristik lesních porostů. Zelená barva indikuje vhodné typy dat DPZ, oranžová barva indikuje potenciálně možné, a červená barva poukazuje na nevhodné či problematické zdroje DPZ pro zisk daných charakteristik lesa. Upraveno dle Masek et al. (2015).

	Oblast využití		Struktura lesa				Produktivita			Zdravotní stav					
	Parametry / Typy dat dálkového průzkumu	Druhové složení	Korunový zápoj	Výškové rozložení	Index listové plochy	Výčetní tloušťka	Biomasa, zásoby	GPP, NPP	Fenologie	Defoliace, změny v LAI	Žloutnutí, změna pigmentů	Fotosyntéza, fluorescence	Evapotranspirace	Biodiverzita Třžha odlesnění, disturbance	Těžba, odlesnění, disturbance
	px. < 1 m (bezpilotní)														
	px. ~ 1 – 10 m (letecká)														
Pasivní, optické	px. < 10 m (Planet, Ikons, Word-View)														
multispektrální	px. 10 – 100 m (Landsat / Sentinel-2)														
	px. > 100 m (MODIS, Sentinel-3)														
	px. > 1 km (AVHRR, OCO-2, GOSAT)														
Pasivní, optické	px. < 10 m letecké (CASI/SASI, HySpex, AISA)														
hyperspek.	px. < 100 m satelitní (EnMap, Prisma)														
Pasivní,	px. > 100 m satelitní (Landsat, Aster, MODIS)														
termální,	px. < 10 m letecký (TASI, FLIR)														
	bezpilotní (Leica, Riegl)														
Aktivní optické	letecký (Leica, Riegl)														
	satelitní (GEDI, ICESat)														
Aktivní mikrovlnné	SAR (Sentinel-1, Biomass)														

2 CÍLE METODIKY

Cílem metodiky je představit aktuálně dostupné postupy, jak sledovat a kvantifikovat vybrané ekosystémové funkce lesních porostů pomocí metod založených na datech DPZ, které mohou sloužit jako proxy pro sledování dlouhodobých trendů a aktuálního stavu produkční a regulační funkce lesa v ČR. A dále na konkrétních případových studiích vybrané metodické postupy podrobněji popsat a otestovat.

V případě produkční funkce lesa v metodice pracujeme s produktivitou, hrubou či čistou primární produkcí, popřípadě s nadzemní biomasou či porostní zásobou. V případě regulační funkce sledujeme aktuální evapotranspiraci jako schopnost ekosystému hospodařit s vodou, či poměr aktuální a potenciální evapotranspirace indikující vitalitu porostu, respektive míru jeho stresu.

Z pohledu dálkového průzkumu představujeme metody založené na volně dostupných satelitních datech, které umožňují sledovat aktuální stav ekosystémů i dlouhodobé trendy (řádově roky až několik desítek let), a metody založené na datech leteckých, které umožňují kvantifikovat aktuální stav v podrobnějším prostorovém rozlišení než data satelitní. V případě dlouhodobých trendů se zde zaměřujeme na poslední dvě dekády od r. 2001, což je dáno dostupností analyzovaných satelitních dat.

3 VLASTNÍ POPIS METODIKY

3.1 Produkční funkce lesních porostů

Produkční funkci či produktivitu lze charakterizovat různými veličinami:

- Hrubá primární produkce (dále jako GPP z angl. gross primary production) představuje celkový objem asimilované energie fotosyntézou v lesním ekosystému za určité časové období. GPP zahrnuje veškerou asimilovanou energii, včetně složky, která je následně spotřebována při dýchání rostlin. Vyjadřuje se obvykle v kg C/m² za sledované období.
- Čistá primární produkce (dále jako NPP z angl. net primary production) představuje množství organické hmoty, která zůstane po odečtení respirace rostlin od hrubé primární produkce. Tato hodnota představuje množství uhlíku dostupného pro růst, reprodukci a akumulaci zásob organické hmoty v ekosystému za určité časové období. Vyjadřuje se obvykle v kg C/m² za sledované období.
- Celková nadzemní biomasa zahrnuje veškerou organickou hmotu nahromaděnou v nadzemních částech stromů. Vyjadřuje se obvykle v t/ha.
- Zásoba či objem dříví představuje objem dřevní hmoty všech stromů v lese s výčetní tloušťkou větší než 7 cm. Tento parametr je klíčový pro hodnocení aktuálních zásob dříví, udržitelného hospodaření a možností ekonomického zhodnocení těchto zásob. Vyjadřuje se obvykle v m³/ha.

3.1.1 Produktivita z časových řad satelitních dat

V současné době je dostupných několik globálních produktů z dat DPZ, které sledují produktivitu vegetačního pokryvu ve formě GPP a NPP. Zřejmě nejčastěji používaným zdrojem jsou produkty GPP a NPP odvozené z dat MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) na satelitech Terra a Aqua (Running et al., 2004; Zhao et al., 2005). Rozdíl mezi daty ze satelitů Terra a Aqua je v čase jejich pořízení. Terra snímkuje od roku 2000 v pozdně dopoledních hodinách, zatímco Aqua snímkuje od r. 2002 v brzkých odpoledních hodinách. MODIS je spektroradiometr snímající odražené sluneční záření od zemského povrchu ve 36 spektrálních pásmech mezi 400 až 14 400 nm s různým prostorovým rozlišením (250 až 1 000 m) s téměř globálním pokrytím každý jeden až dva dny. MODIS data jsou základem pro širší kolekci produktů (např. parametry atmosféry, oceánů či povrchová teplota).

MODIS algoritmus (MOD17) odhadu produktivity vegetace vychází z teorie efektivity využití slunečního záření vegetací dle Monteith (1972), která předpokládá lineární závislost mezi množstvím absorbované sluneční energie (konkrétně na množství absorbovaného fotosynteticky aktivního záření (APAR – z angl. absorbed photosynthetic active radiation) a produktivitou u dobře zavlažovaných jednoletých plodin. Převod APAR na odhad skutečné produktivity je proveden prostřednictvím parametru konverzní účinnosti (ε) který se liší podle typu vegetace a klimatických podmínek. Algoritmus MOD17 proto zohledňuje rozdíly v maximálním ε mezi různými typy vegetace a také snižuje ε při nedostatku vody (*Water*_{Scalar}) a/nebo za podmínek nízkých teplot (*Temp*_{Scalar}). Pro výpočet NPP jsou taktéž odhadnuty denní respirační náklady na údržbu listů a jemných kořenů (R_{LR}), roční respirační náklady na růst (R_G) a roční udržovací respiraci živých buněk v rostlinných pletivech (R_M). Ve zkratce je MODIS algoritmus založen na těchto základních rovnicích:

Hrubá primární produkce
$$GPP = \varepsilon_{max} * Temp_{Scalar} * Water_{Scalar} * APAR$$
 (1)

Čistá fotosyntetická aktivita
$$PS_{Net} = GPP - R_{LR}$$
 (2)

Roční čistá primární produkce $NPP = \Sigma PS_{Net} - R_G - R_M$ (3)

MODIS GPP produkty jsou dostupné v prostorovém rozlišení 500 m a 8denním časovém kroku, MODIS NPP v ročním kroku od r. 2001 pro data ze satelitu Terra a od r. 2002 pro data ze satelitu Aqua. Velkou výhodou pro další zpracování MODIS GPP a NPP produktů je fakt, že tyto kolekce jsou dostupné i v cloudové platformě Google Earth Engine, čehož bylo využito při zpracování případové studie v této metodice (popsáno podrobněji níže). Je důležité zmínit, že satelit Terra i Aqua jsou již ke konci své životnosti a momentálně dochází ke změně orbit a v dohledné době se očekává ukončení sběru dat MODIS. Kontinuitu MODIS produktů by měla nahradit data spektroradiometru VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), který má podobnou konfiguraci spektrálních pásem jako MODIS a nachází se na novějších satelitech Suomi NPP a NOAA-20 a -21 (Endsley et al., 2023).

Dalším globálním produktem, který poskytuje i odhad GPP, je soubor produktů GLASS (Global Land Surface Satellite) (Liang et al., 2021). Jednotlivé datové vrstvy (LAI, fAPAR, GPP, albedo, povrchová teplota, evapotranspirace a další) jsou založeny na harmonizaci různých zdrojů satelitních dat, jako je AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), VIIRS a MODIS. GPP vrstvy jsou dostupné v prostorovém rozlišení 0,05° (což odpovídá zhruba 5 km pixelu) v 8denním kroku pro období 1981–2018.

Relativně novým zdrojem jsou produkty dostupné v rámci programu Evropské komise – Copernicus Land Monitoring Service (<u>https://land.copernicus.eu/</u>), které k odhadu produktivity vegetace používají primárně data ze spektroradiometru OLCI satelitu Sentinel-3. Tyto produkty jsou založeny na stejné teorii efektivity využití slunečního záření vegetací dle Monteith (1972) jako MOD17 algoritmy a jsou podrobně popsány v technické dokumentaci produktu (Swinnen et al., 2023). Momentálně jsou k dispozici následující produkty s globálním geografickým pokrytím:

- Gross dry matter a dry matter produktivita v prostorovém rozlišení 1 000 m, v 10denním kroku za období 1999–2020, který využívá data ze satelitu PRO-BA-V.
- Gross dry matter a dry matter produktivita v prostorovém rozlišení 300 m, v 10denním kroku od r. 2014, který už využívá nová data ze Sentinelu-3/OLCI.
- GPP a NPP produkty v prostorovém rozlišení 300 m, v 10denním kroku, které jsou dostupné teprve od r. 2023 a tudíž neumožňují analyzovat delší časové období jako je tomu u MODIS GPP/NPP produktu. Jelikož výpočet GPP a NPP je založen na gross dry matter a dry matter produktivitě, lze předpokládat, že stávající GPP a NPP kolekce bude zpětně dopočítána až k r. 2014, od kdy jsou dostupná data Sentinelu-3/OLCI.

V rámci Land Monitoring Service služby jsou dostupné i produkty velmi vysokého prostorového rozlišení s geografickým pokrytím jen v rámci EU, které jsou odvozeny z dat Sentinel-2/MSI. Jedná se o tzv.:

- celkovou produktivitu vegetace (<u>https://doi.org/10.2909/977e4bb8-407f-48ec-b4c4-403bca5a6a3b</u>) a
- sezónní produktivitu vegetace (<u>https://doi.org/10.2909/5ae0f2a2-7ad8-4f7c-</u> <u>-878d-f1b09d78d7a1</u>),

které jsou odvozeny z výpočtu Plant Phenology Indexu PPI (Jin, Eklundh, 2014), který sleduje fenologický vývoj vegetace. Produktivita je vypočítána jako suma denních hodnot PPI za období vegetační sezóny, jejíž začátek a konec je opět odvozen z průběhu trajektorie indexu PPI (Cai et al., 2023). Oba výše zmíněné produkty jsou dostupné v prostorovém rozlišení 10 m, avšak pouze pro zájmové území EU. Produkty jsou dostupné v ročním intervalu v prostorovem rozlisení 10, a jedná se o roční hodnoty dostupné od r. 2017, což aktuálně neumožňuje analyzovat delší časové období než 7 let. Nicméně s ohledem na zamýšlenou dlouhodobost provozu konstelace Sentinel se bude význam těchto produktů rychle zvyšovat. Dalším produktem monitorující hrubou primární produkci globálního vegetačního pokryvu je produkt FLUXCOM (Jung et al., 2020; Nelson et al., 2024; Tramontana et al., 2016). Ten je založen na fundamentálně jiném postupu než výše zmíněné produkty. Pomocí několika metod strojového učení syntetizuje totiž různá vstupní data: (i) parametry odvozené z DPZ (odhady LAI, fAPAR, NDVI a EVI indexy, a povrchovou teplotu z MODIS dat), (ii) meteorologické veličiny (teplotu vzduchu, globální radiaci, sytostní doplněk a srážky z reanalýz ERA-Interim, v poslední verzi již ERA5) a (iii) kontinuální pozemní měření toků CO₂ v rámci sítě FLUXNET.Globální výstupy jsou pak vrstvy v 8denním časovém kroku za období 2001–2015 a prostorovém rozlišení 0,083° (což odpovídá zhruba velikosti pixelu 10 km) a nedávno zveřejněná poslední verze FLUXCOM-X již analyzuje celé období 2001–2020 (Nelson et al., 2024).

Jako příklad pro analýzu dlouhodobých trendů produktivity lesních porostů v této metodice byly zpracovány produkty z časových řad dat MODIS Terra. NPP – konkrétně dataset MOD17A3HGF ver. 6.0 (Running, Zhao, 2021). Ten je odvozena ze součtu všech 8denních produktů čisté fotosyntetické aktivity (MOD17A2H PSNet) z daného roku a představuje kumulativní komposit, reprezentující množství asimilovaného uhlíku za rok, které zohledňuje ztráty způsobené respirací. GPP – konkrétně dataset MOD17A2H ver. 6.0 (Running et al., 2021) je 8denní komposit a je klíčovým indikátorem celkové fotosyntetické aktivity, neboli množství fixovaného uhlíku (CO₂) vegetací při fotosyntéze. Oba produkty MODIS GPP i NPP jsou dostupné v prostorovém rozlišení 500 m.

Celé zpracování více jak dvacetiletých dlouhodobých trendů produktivity lesních porostů pomocí stávajících MODIS produktů je znázorněno pracovním diagramem na obr. 2. Velký objem dat pro celou ČR byl zpracován v cloudové platformě Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

Využití platformy Google Earth Engine

Data a výpočty dlouhodobých trendů pro časový rámec studie (2001 až 2022) byly získány prostřednictvím výpočetní geoprostorové platformy Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017) (obr. 3). GEE je cloudová platforma, která umožňuje rozsáhlé zpracování satelitních snímků k detekci změn, mapování trendů a analýzu časových řad na zemském povrchu. Kromě možnosti využití a akvizice interních dat (např. vegetační indexy, teplota, koncentrace CO₂ a jiné) lze importovat vlastní data a implementovat vlastní projekty využívající data DPZ. Díky využití služby GEE je možná geoprostorová, simultánní analýza dat v globálním měřítku, která nemá vliv na výpočetní rychlost techniky uživatelů. Limitujícím aspektem zůstává jen stabilní připojení k internetu.

Primárním účelem GEE je:

- Poskytnutí interaktivní platformy pro vývoj geoprostorových algoritmů ve velkém i malém měřítku
- Tvorba nových dat a syntéza existujících datasetů pro vědecké účely
- Export dat do běžných úložišť (např. Google drive)
- Umožnit uživatelům řešit globální analýzy a výpočty, které zaujímají velké soubory geoprostorových dat

V rámci naší případové studie byly použity oba satelitní produkty MODIS NPP a GPP, které na rozdíl od běžných vegetačních indexů vycházejí z kombinace více



Obr. 2:

Schéma znázorňující jednotlivé kroky zpracování časových řad produktivity odvozených ze satelitních dat MODIS. Centrální prvek koncipuje geo-platforma Google Earth Engine, která slouží jako zdroj dat a ve kterém proběhla exekuce algoritmu. Fáze Příprava dat a Export map byly provedeny v software QGIS (QGIS Development Team, 2023).

vstupních proměnných. Mezi tyto proměnné patří: reprezentace vegetačního pokryvu, sluneční radiace, teplota a další meteorologická data. S extrahovanými hodnotami produktivity lze dále pracovat ve formě: i) absolutních hodnot, které mohou sloužit k analýze meziročních amplitud produktivity, ii) validace s daty pozemního šetření anebo iii) trendů v daném časovém intervalu. Sledování dlouhodobého trendu v čase je vhodným indikátorem stavu a vývoje daného stanoviště nebo ekosystému. Pro analýzu trendu byla použita metoda neparametrické analýzy trendů *Theil-Sen*, známá také jako Sen's slope (česky Senův sklon či směrnice) (Sen, 1968). Analýzu lze provést pro všechny lesní porosty, nebo ji lze směřovat na dílčí zájmové uzemí či cílovou dřevinu. Proto jsme v tomto metodickém postupu jako příklad vybrali hlavní hospodářskou dřevinu pro ČR – smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.). Při volbě modelové dřeviny jsme si vědomi skutečnosti, že středoevropské lesy, potažmo ČR, jsou charakterizovány vysokou biodiverzitou



Obr. 3:

Grafické rozhraní nástroje Google Earth Engine. (A) Mapový interaktivní prostor pro vyobrazení geodat, (B) vlastní uložené skripty a (C) aktivní skript v programovacím jazyce JavaScript, (D) identifikační nástroj pro zobrazení hodnot jednotlivých vrstev a další nástroje pro export dat do externích úložišť. (Palmero-Iniesta et al., 2020; Wohlgemuth, 2015), což se odráží v heterogennosti a pestrosti druhového složení a lesních společenstev. Charakterizuje je také relativně značná fragmentace, zvláště v centrálních oblastech Vysočiny a Beskyd, která znesnadňuje výběr souvislého porostu a může výrazně ovlivnit přesnost analýzy. Tento fenomén musí být zohledněn při výběru vhodných pixelů pro analýzu produktivity ideálně homogenního smrkového porostu. Pro odvození reprezentativní druhové masky byla vytvořena pravidelná vektorová síť, která je identická s rastrem MODIS NPP a GPP produktů s rozlišením 500 m a pokrývá zájmové území (ČR). Pro každou buňku této sítě bylo vypočteno procentické zastoupení smrku, které vyjadřuje plošný podíl smrku k ostatním lesním druhům. K vypracování této "smrkové sítě" byla použita celostátní klasifikace lesních dřevin v rozlišení 5 m (ÚHÚL, 2019) a prázdná georeferenční síť MODIS.

Jak dokumentuje Krejza et al. (2021), produktivita smrkových porostů úzce souvisí i s nadmořskou výškou daného stanoviště. Pro vyhodnocení produktivity v rámci výškového gradientu byl použit ortometrický 30 m digitální výškový model (NASA JPL, 2013). Zmíněný model byl v naší případové studii použit k rozdělení krajiny do výškových segmentů a pro extrakci absolutních hodnot nadmořské výšky. Pomocí výškových segmentů lze plošně a systematicky kvantifikovat produktivitu např. pro vybrané lesní vegetační stupně a extrahované absolutní hodnoty umožňují porovnání hodnot u konkrétních lokalit (analýza per-pixel).

3.1.2 Nadzemní biomasa z dat laserového skenování

Pro hodnocení nadzemní biomasy či zásob lesních porostů se jeví jako nejvhodnější data laserového skenování, jelikož na rozdíl od multi- či hyperspektrálních optických dat dokážou velmi dobře postihnout 3D strukturu lesních porostů a modely založené na datech laserového skenování obvykle dosahují nejvyšších přesností (Zolkos et al., 2013). Stále nejběžnějším zdrojem dat laserového skenování, umožňující plošný monitoring lesních porostů, jsou data leteckého laserového skenování, i když k dispozici jsou i data satelitní, např. GLAS (z angl. Geoscience Laser Altimeter System), ICESat (z angl. Ice Cloud and land Elevation Satellite) nebo GEDI (z angl. Global Ecosystem Dynamics Investigation). Avšak hustota vzorkování je v případě satelitních laserových systémů diametrálně odlišná od dat leteckého laserového skenování, jak je naznačeno na obr. 4.

Letecké laserové skenování (ALS z angl. Airborne Laser Scanning) umožňuje monitoring poměrně rozsáhlých území s bodovou hustotou v řádu jednotek až desítek bodů na m². Data leteckého laserového skenování pak slouží k odhadu různých parametrů lesa v závislosti na zvoleném přístupu. Ty lze rozdělit do dvou kategorií: i) přístup založený na individuální detekci stromů, kde se odhadují parametry jednotlivých stromů (Dalponte and Coomes, 2016) a ii) plošný přístup získání strukturálních charakteristik lesa (Bouvier et al., 2015; Næsset, 2002). Postupy založené na individuální detekci vyžadují hustotu bodového mračna v řádu vyšších jednotek či desítek bodů / m² na rozdíl od plošného přístupu, který je schopen relativně spolehlivě odhadovat strukturální charakteristiky lesa z dat s nižší bodovou hustotou (např. < 5 bodů / m²) (Brovkina et al., 2022a; Yu et al., 2010). Z tohoto důvodu se pro větší území obvykle používá plošný přístup.

V podmínkách České republiky vznikla v r. 2022 ověřená technologie, která testovala plošný přístup odhadu nadzemní biomasy lesních porostů z dat leteckého laserového skenování (Brovkina et al., 2022b). Přístup, který je popsán v ověřené technologii, je v této metodice stručně shrnut a důraz je kladen na nové aspekty týkající se hlavně validace metodického postupu oproti novým pozemním měřením a datům leteckého laserového skenování.

Plošný přístup vychází z předpokladu, že data ALS v podobě bodového mračna nesou informaci o 3D struktuře terénu a všech vegetačních vrstev nad ním. Z bodového mračna se vypočítají různé popisné statistiky (průměr, kvantily, směrodatná odchylka apod.), které charakterizují prostorovou distribuci odražených laserových pulsů daných hustotou a propustností korunového zápoje. Krom dat leteckého laserového skenování jsou nezbytná vstupní data z terénních šetření, která slouží k trénovaní regresního modelu. Zde je nezbytné zmínit, že v závislosti na typu terénních měření, lze natrénovat model pro odhad např. zásoby dříví, indexu listové plochy, výčetní základny porostu (Zhang et al., 2024). Celý metodický postup je znázorněn pracovním diagramem na obr. 5 a jeho jednotlivé kroky jsou shrnuty v následujících odstavcích (detailně pak v ověřené technologii Brovkina et al. 2022b).

Vstupní data laserového skenování pro plošný přístup

Data ALS se obvykle pořizují pro zájmové území. Z běžně dostupných laserových skenerů rozlišujme principálně dva typy: skenery, které snímají jednotlivé odrazy (tzv. discrete return skenery) a skenery, které umožnují zachytit průběh celé křivky odraženého signálu v daných časových intervalech (tzv. full-waveform skenery). Discrete return skenery jsou běžnější a pro potřeby odhadů biomasy lesních porostů naprosto dostačující. Zásadním parametrem je bodová hustota, která se v případě plošného přístupu pohybuje mezi 1 až 10 body/m² (Brovkina et al., 2022a; Yu et al., 2010). V závislosti na druhovém složení v rámci zájmového území může být vhodnější pořídit data ALS v období s olistěním nebo bez olistění dřevin. Data pořízená v období bez listí jsou vhodnější pro odhad parametrů jako výčetní základna porostu nebo zásoba dříví. Naopak data pořízená ve vegetačním období,



Obr. 4:

Rozdíly v prostorovém vzorkování dat laserového skenování v závislosti na typu nosiče. GEDI (z angl. Global Ecosystem Dynamics Investigation) je laserový skener umístěný na Mezinárodní vesmírné stanici, jehož footprint je 25 m v průměru a vzorkuje každých 60 m. LVIS (z angl. Land Vegetation and Ice Sensor) je prototyp leteckého laserového skeneru pod gescí NASA, který obvykle operuje v letových hladinách kolem 10 km nad terénem a velikost footprintu (tj. snímané oblasti) a frekvence vzorkování se mění v závislosti na letové hladině. Běžné letecké laserové skenery (ALS z angl. Airborne Laser Scannig) operují obvykle v letových hladinách od 1 do 3 km a poskytují data v řádu jednotek až desítek bodů na m². Pozemní laserové skenování (TLS z angl. Terrestrial Laser Scanning) produkuje velmi lokální data s omezeným prostorovým rozsahem, avšak velmi vysokou bodovou hustotou. Obrázek převzat z https://gedi.umd.edu/science/calibration-validation/.



Obr. 5:

Metodický postup odhadu nadzemní biomasy lesních porostů z dat leteckého laserového skenování pomocí plošného přístupu (převzato z Brovkina et al., 2022b). kdy jsou dřeviny plně olistěny, jsou vhodnější pro odhad celkové nadzemní biomasy, indexu listové plochy apod.

Z hlediska dostupnosti dat ALS pro celorepublikové plošné mapování je nutné zmínit, že jediným zdrojem pro celou ČR jsou momentálně dostupná data z leteckého laserového skenování, které bylo provedeno v letech 2009 až 2012 Českým ústavem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK) s bodovou hustotou 1 bod/m² a méně. Jedná se tedy o data více jak 10 let stará a v kontextu nedávného masivního úbytku jehličnatých porostů v důsledku kůrovcové kalamity též značně neaktuální. Potenciálně alternativním zdrojem pro celorepublikové mapování 3D struktury lesních porostů může být normalizovaný digitální model povrchu (nDSM – z angl. normalized Digial Surface Model), který zpracovává specializované pracoviště ÚHÚL z leteckých měřických snímků pořízených v rámci národního leteckého snímkování ČR, které koordinuje ČÚZK. Produkt nDSM s prostorovým rozlišením 1 m je aktualizovaný co dva roky a zachycuje výškové rozložení porostů v celorepublikovém měřítku (Hájek, 2016). Vhodnost těchto dat pro odhad nadzemní biomasy či zásob lesních porostů je v současné době předmětem podrobnějšího zkoumání a testování.

Pro účely této metodiky byla použita ALS data z různých lokalit a kampaní. Data byla vždy pořízena leteckým laserovým skenerem RIEGL LMS-Q780. Laserový skener je součást letecké laboratoře FLIS (Flying Laboratory of Imaging Systems) (Hanuš et al., 2023), kterou provozuje Ústav výzkumu globální změny AV ČR. Bodová hustota ALS dat se pohybovala v rozmezí 3–30 bodů/m² (viz tabulka 3).

Příprava a předzpracování dat laserového skenování

Základní kroky předzpracování dat ALS jsou dekompozice vln odraženého signálu a geometrické korekce na základě trajektorie letadla. Tato fáze je specifická dle typu skeneru a provádí se v software od výrobce laserového skeneru. Pro další kroky lze využít řadu algoritmů a softwarových řešení, například balík skriptů lastools (http:// lastools.org/). Další kroky jsou odstranění šumu, klasifikace bodového mračna na terén, vegetaci, budovy (a ostatní objekty) a pomocí klasifikace přepočítat z-souřadnice bodů z výšky nadmořské na výšku nad terénem. V případě ALS pro větší zájmové území dochází k překryvu jednotlivých letových linií a zdvojení bodové hustoty. Nechceme-li, aby tento jev vnášel nehomogenitu do výsledných odhadů, doporučuje se sjednocení hustoty bodů pro celé zájmové území. V našem případě, protože jsme kombinovali data z různých lokalit, které byly pořízeny s různou bodovou hustotu, došlo ke snížení bodové hustoty na 5 bodů/m² (týká se lokalit Těšínských Beskyd a sítě DendroNetwork, viz tabulka 3).

Předpřipravené bodové mračno se pak navzorkuje a pro jednotlivé vzorky se vypočítají statistické veličiny – prediktory, které charakterizují distribuci bodů v daném vzorku. Prediktory jsou např. charakteristiky výškové distribuce (průměr, medián, kvantily), charakteristiky hustoty (procento pokrytí korunou, koeficienty propustnosti počítané jako poměr počtu bodů s hodnotou Z souřadnice pod určitou výškou vůči počtu všech bodů), charakteristiky variability (směrodatná odchylka, koeficienty šikmosti a špičatosti).

Velikost a tvar vzorku pro výpočet prediktorů koresponduje s inventarizační plochou pozemních měření, obvykle se jedná o kruhovou plochu dané velikosti (obr. 6). Vzorkování se provede na souřadnicích odpovídajících pozemním měřením, čímž se vytvoří trénovací množina dat měřené veličiny a náležitých prediktorů. Celé bodové mračno se navzorkuje v pravidelné síti pro aplikaci výsledného modelu. Krok v pravidelné síti si určuje uživatel. V našem případě je krok v pravidelné síti vzorkování 20 m.

Data pozemního šetření

Data pozemního šetření nadzemní biomasy (popřípadě jiné zájmové veličiny) slouží jednak k tvorbě (kalibraci) regresního modelu a následně k jeho validaci. Pro kvantifikaci nadzemní biomasy jsou využívány standardní postupy inventarizace lesních porostů s následnou aplikací vhodných alometrických rovnic. Inventarizační plochy mohou mít různý tvar a uspořádání, nejčastější jsou kruhové koncentrické, které se využívají v národní inventarizaci lesa (obr. 6). Pro výpočet nadzemní biomasy je nutné znát pro všechny zahrnuté stromy v kruhové inventarizační ploše jejich výčetní tloušťku a výšku. Následně je biomasa pro jednotlivé stromy dopočítána pomocí publikovaných alometrických vztahů (tabulka 2). Součtem hodnot biomasy všech dřevin na inventarizační ploše je tak možné získat souhrnnou nadzemní biomasu pro celou kruhovou plochu (např. o velikosti 500 m²).

Data pozemního šetření nejsou vždy pořízena ve stejném období jako data laserového skenování. Proto je potřeba dbát na co největší časový soulad, ideální je souběžná akvizice, avšak rozdíl několika málo let mezi pozemním a leteckým šetřením není významným zdrojem odchylek mezi metodami, avšak je nutné zohlednit případné těžební zásahy v mezidobí.

Přehled dat pozemního šetření a k nim odpovídající ALS data jsou shrnuta v Tabulce 3. Lokality pokrývají hlavně plochy smrku ztepilého a buku lesního jak ve středních, tak vyšších nadmořských výškách a zahrnují lesní porosty s širokým rozptylem celkové nadzemní biomasy mezi 10 až 750 t/ha. K trénování modelu byla použita data ze všech lokalit, kromě sítě DendroNetwork. Trénovací množina obsahovala 86 ploch jehličnatých, 92 ploch listnatých a 16 ploch smíšených. Data ze sítě DendroNetwork, která se postupně zakládala od roku 2021, byla použita k nezávislé validaci.

Tabulka 2:

Příklady zdrojů alometrických rovnic pro výpočet biomasy dle druhu dřevin běžně zastoupených v ČR.

stá,



Obr. 6:

Situace inventarizační plochy základního šetření národní inventarizace lesů (převzato z Adolt et al., 2013). Pro odhad nadzemní biomasy se primárně používají měření z velké kruhové plochy o poloměru 12.62 m.

Tabulka 3:

Přehled lokalit a dat použitých pro trénování a validaci modelů odhadu nadzemní biomasy z dat leteckého laserového skenování.

Lokalita	ozemní šetření rok))ominantní ľřevina	očet ploch ehl. / list. / mix	łozptyl iiomasy (t/ha)	vLS data rok pořízení)	odová hustota oočet bodů/m²)	
Lanžhot, lužní les, soutok Moravy a Dyje	2020	Jasan úzkolistý, borovice lesní	4 / 31 / 0	20–750	2020	5	
Bílý Kříž, horský smrkový les CHKO Beskydy	2020	Smrk ztepilý	5/0/0	150–270	2020	5	
Štítná, bukový les, Bílé Karpaty	2020	Buk lesní	6 / 20 / 1	70–640	2020	5	
Vodní nádrž Švihov, smrkový a bukový les středních poloh	2020	Smrk ztepilý	20 / 7 / 3	30–580	2020	3	
Těšínské Beskydy, smrkový a bukový les vyšších poloh	2019	Smrk ztepilý, buk lesní	34 / 34 / 12	10–580	2019	15	
DendroNetwork, síť ploch po celé ČR	2021 až 2023	Smrk ztepilý, buk lesní, boro- vice lesní, dub	42 / 26 / 0	100–550	2021 & 2023	30	

Tvorba regresního modelu

Do tvorby regresního modelu vstupují prostorově spárovaná data o nadzemní biomase a prediktory získané z dat ALS. Před samotným trénováním modelu je vhodné datovou sadu nejprve rozdělit na trénovací a testovací podmnožinu (v tomto případě byl zvolen poměr 75 % na trénování modelu a 25 % na jeho validaci) a následně stratifikovat trénovací množinu tak, bychom dosáhli co nejreprezentativnějšího a nejhomogennějšího zastoupení hodnot biomasy. Stratifikací lze zohlednit druhové, věkové či výškové rozložení porostů. Dle poměrného zastoupení jehličnanů a listnáčů v rámci inventarizačních ploch byla stratifikace vedena vzhledem k typu porostu (jehličnatý, listnatý a smíšený) a vzhledem k distribuci hodnot nadzemní biomasy.

Dále je vhodné redukovat počet prediktorů, abychom posílili predikční schopnosti modelu odstraněním nadbytečných, vzájemně korelujících či méně přínosných informací vzhledem k vysvětlované proměnné. Redukce prediktorů může být nezávislý krok před vlastním modelováním, nebo jeho součástí. Jako vhodné prediktory byly v našem případě identifikovány tyto veličiny: průměrná výška, kvantily Q30 a Q70 výšky bodů nad terénem, a pak směrodatná odchylka výšky, šikmost, propustnost P40 (tj. procento bodů, které prostřelily pod výškovou hladinu danou kvantilem Q40) a procento pokrytí korunou pro body s prahem nad 2 m nad terénem.

Pro samotné modelování lze použít přístupu parametrického či využít neparametrických metod, např. různé metody strojového učení. V tomto případě jsme použili metodu Random Forest a neuronovou síť Multi-layer Perceptron z Python knihovny Scikit-learn.

Validace

Pro validaci výsledného modelu se primárně používají data pozemního šetření např. pomocí klasické lesní inventarizace (viz část "Data pozemního šetření", s. 25), nejlépe pak nezávislá měření, která nevstupovala do trénování modelu. Nejčastější statistickou veličinou popisující spolehlivost modelu je koeficient determinace R², střední kvadratická chyba RMSE (z angl. root mean square error) či odchylka.

Právě v této metodice klademe důraz na nezávislé ověření stávajícího přístupu odhadu nadzemní biomasy z dat ALS dle Brovkina et al. (2022b) pomocí dat pozemní inventarizace na plochách lesní monitorovací sítě DendroNetwork (http://dendronet.cz).

3.2 Regulační funkce lesních porostů

Lesy zajišťují řadu regulačních funkcí zahrnujících např. regulaci klimatických poměrů, vodního cyklu, čistoty ovzduší, kvality půdy či druhové rozmanitosti. Jednou z podstatných hydroklimatických veličin integrujících řadu faktorů souvisejících s energetickou a vodní bilancí ekosystému je aktuální evapotranspirace (ET), kterou v této metodice považujeme za klíčovou regulační funkci. V kontextu dlouhodobé (v řádu měsíců až let) vodní bilance ET přímo určuje zbytkové množství srážkové vody připadající na odtok či doplňování podzemních zásob a je tedy klíčovým předpokladem pro kvalitu a vydatnost povrchových a podzemních vodních zdrojů. Protože ET představuje fázovou změnu kapalného skupenství na plynné, při které dochází ke spotřebě energie, lze ET přímo vyjádřit v jednotkách energie jako tok latentního tepla. Tok latentního tepla pak následně spolu s tokem zjeveného tepla představují dominantní složky energetické bilance a přímo sou-

visí s chladicí schopností povrchu (Novick, Katul, 2020). Vodou dobře zásobený vitální porost s vysokou ET má vysoký tok latentního tepla a nízký tok zjevného tepla (může nabývat až záporných hodnot), což poukazuje na jeho dobrou chladicí schopnost. Naopak, za stejných meteorologických podmínek, porost s nízkou ET bude mít vysoký tok zjeveného tepla a bude tedy přispívat k lokálnímu ohřívání atmosféry. Poměr mezi zjevným a latentním tokem tepla se nazývává Bowenům poměr a představuje podstatnou charakteristiku aktuálního stavu porostu (Fischer et al., 2013; McGloin et al., 2019). Mimo samotný vliv na lokální mikroklima, Bowenům poměr hraje roli např. při tvorbě konvektivní oblačnosti (Manoli et al., 2016). Nutno zmínit, že vlastnosti porostu nepředurčují pouze konverzi dostupné energie na toky latentního a zjevného tepla, ale mají výrazný vliv i na množství dostupné energie samotné prostřednictvím odrazivosti v krátkovlnné radiaci neboli albedu. Například, listnaté lesy mají albedo okolo 0,15, kdežto jehličnaté lesy méně než 0,10 (McGloin et al., 2019). To znamená, že jehličnaté lesy mohou absorbovat o více než 5 % z celkového slunečního záření, které se následně rozdělí mezi tok zjevného a latentního tepla. Jinými slovy, kdybychom měli vedle sebe jehličnatý a listnatý les se stejnou hodnotou ET, tak listnatý les by díky vyššímu albedu vykazoval nižší tok zjevného tepla a sloužil by tedy více jako chladicí prvek v krajině. Z toho plyne, že nelze nahlížet na jednotlivé veličiny izolovaně, ale je zapotřebí interpretovat procesy v širším kontextu. Z hlediska popisu vitality lesů a jejich schopnosti plnit regulační funkce je velmi užitečné normalizovat ET pomocí potenciální evapotranspirace (PET). Nízký poměr značí neschopnost porostu zajišťovat regulační funkci a indikuje stres či jiné poškození. Současně, ET je podmíněna nejen dostupností vody, ale i energie. Z tohoto důvodu je ET ve vyšších polohách s vysokým množstvím srážek, a zároveň s chladným podnebím, nízká. Proto normalizování ET poskytuje mnohdy užitečnější informaci v případě, že je cílem porovnávat porosty napříč různými oblastmi.

Pro shrnutí, mezi klíčové veličiny spojené s regulací klimatických poměrů a vodního cyklu patří:

- Aktuální evapotranspirace (ET)
- Poměr ET a potenciální evapotranspirace (ET/PET)
- Bowenův poměr
- Povrchové albedo

3.2.1 Evapotranspirace z časových řad satelitních dat

V současné době existuje řada metod, jak stanovit ET pomocí metod DPZ. Většina metod DPZ k určení ET vyžaduje navíc meteorologické vstupy jako teplota vzduchu, sluneční radiace, popřípadě rychlost větru, vlhkost vzduchu nebo i srážky. Ne všechny zmíněné meteorologické proměnné lze zajistit pomocí DPZ, a proto jsou využívány buď lokální pozemní měření, nebo tzv. klimatické reanalýzy (založené na numerickém predikčním modelu s vyšší mírou asimilace pozorovaných dat oproti běžné předpovědi počasí). Metody DPZ pak mohou ET odvozovat na základě několika principů:

- Metody založené na empirických vztazích mezi vegetačními indexy (např. NDVI, LAI) a ET či spíše ET/PET.
- Metody založené na empirických vztazích mezi vegetačními indexy a stomatální vodivostí, která přestavuje jeden z dynamických parametrů fyzikálně založeného Penman-Monteithova modelu (Monteith, 1965).
- Metody založené na řešení energetické bilance povrchu. Tyto metody využívají jako vstup sluneční radiaci, albedo, povrchovou teplotu a případně pokryvnost povrchu, které lze odvodit z DPZ. Při znalosti okolní teploty a rychlosti větru lze přímo určit tok zjevného tepla, a tok latentního tepla (respektive ET) se řeší jako reziduum.
- Hybridní metody kombinují různé přístupy, například fyzikální modely s empirickými vztahy.

Metody DPZ pro stanovení ET můžeme obecně označit jako diagnostické modely. U klasických prognostických modelů zásoba vody v půdě limituje ET, která 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 ET je zapotřebí správně simulovat zásobu vody v půdě, která je výsledkem řady vzájemně propojených procesů. Metody DPZ nevyžadují znalost zásoby vody v půdě, ale namísto toho využívají znalost aktuálního stavu povrchu k určení ET. To je výhodou, protože nedochází k postupné propagaci chyb (chyba dnešního odhadu není závislá na chybě odhadu z předešlého dne). Nevýhodu však je, že diagnostické DPZ modely nemohou být logicky použity v předpovědním režimu. V současné době je k dispozici několik DPZ ET produktů s globálním pokrytím (obr. 7).

AVHRR

Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) je širokopásmový skenovací radiometr, který snímá ve viditelném, blízkém infračerveném a tepelném infračerveném spektru. Snímač umožňuje globální od pólu k pólu sběr dat NDVI a povrchové teploty pro odhad ET v prostorovém rozlišení 0,05°. Produkt AVHRR má vysoké časové rozlišení (globální pokrytí dvakrát denně) a dlouhý záznam dat od konce 70. let 20. století. Data AVHRR jsou využívána pro řadu algoritmů na výpočet ET. Jedním z nich je např. GLASS ET algoritmus, který je založen na metodě multi-modelového přístupu, konkrétně na metodě Bayesovského průměrování modelů kombinující pět procesně založených algoritmů pro výpočet ET (Yao et al., 2014). Těchto pět algoritmů zahrnuje MODIS ET algoritmus (MOD16) (Mu et al., 2011), revidovaný Penman-Monteithův DPZ algoritmus pro ET (RRS-PM) (Yuan et al., 2010), algoritmus pro ET založený na metodě Priestley-Taylor (PT-JPL) (Fisher et al., 2008), upravený satelitní algoritmus pro evapotranspiraci podle Priestley-Taylora (MS-PT) (Yao et al., 2013) a semiempirický Penmanův algoritmus pro ET z Univerzity v Marylandu (UMD-SEMI) (Wang et al., 2010).

ALEXI

Regionální model ALEXI (Atmosphere Land Exchange Inverse) kombinuje pozorování teploty zemského povrchu z geostacionárních satelitů s rovnicí energetické bilance v rámci systému povrch-mezní vrstva atmosféry. ALEXI je minimálně závislý na absolutních hodnotách vstupních údajů o teplotě vzduchu nebo povrchu, protože jeho hlavním vstupem je změna teploty během ranního nárůstu, a proto poskytuje poměrně robustní určení toku v hrubém měřítku snímků geostacionárních satelitů (Anderson et al., 1997). ALEXI používá k rozdělení povrchových toků mezi porost a půdu dvou-zdrojový model TSEB. V současné době dostupná verze ALEXI aproximuje ranní nárůst teploty ze získávání denních a nočních teplot, a je tedy použitelná i pro satelity s polární oběžnou dráhou, jako jsou Aqua a Terra, VIIRS a Sentinel-3.

HOLAPS

High-resolution Land Atmosphere Parameters from Space (HOLAPS) je modelovací rámec, který odhaduje všechny povrchové toky energie a vody na základě produktů DPZ a meteorologických gridových dat. HOLAPS je založen na Priestley– Taylorově rovnici, která řeší rovnice energetické a vodní bilance v každém pixelu a zajišťuje zachování energie a vody v lokálním měřítku (Loew et al., 2016). Nejnovější verze modelu HOLAPS je k dispozici pro celou Evropu s běžným rozlišením 0,05° v denním a hodinovém časovém rozlišení od roku 2001.

GLEAM

Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM) je soubor algoritmů, které odhadují evapotranspiraci na základě produktů DPZ (Martens et al., 2017). GLEAM je založen na Priestleyho-Taylorově rovnici, která klasifikuje půdní pokryv na frakce holé půdy, vysokého porostu a krátkého porostu. Algoritmus zahrnuje asimilaci dat půdní vlhkosti z produktů DPZ, modul vodní bilance a evaporační stresové funkce, které kombinují optickou hustotu vegetace s odhady vlhkosti půdy v kořenové zóně, aby bylo možné lépe odhadnout evapotranspiraci a vlhkostní podmínky v krajině.

MODIS

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MODIS na satelitech Terra aAqua poskytuje dva produkty evapotranspirace: MOD16A2 (Terra) a MYD16A2 (Aqua) verze 6.1. Tyto produkty obsahují odhady aktuální evapotranspirace založené na 8denních kompozitních datech s rozlišením 500 metrů. Odhady jsou vypočítány na základě Penman-Monteithovy rovnice, která využívá denní meteorologická data z meteorologických reanalýz v kombinaci s dalšími MODIS produkty, jako je dynamika vegetačních vlastností, albedo a pokryv půdy.

Navzdory relativně dobré spolehlivosti globálních produktů je vzhledem k jejich poměrně hrubému prostorovému rozlišení (nejvyšší rozlišení 500 m) pro posouzení regulační funkce lesů na lokální úrovni zapotřebí detailnějších nástrojů. Mezi lokální diagnostické modely patří:

METRIC

Model METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) využívá satelitní multispektrální a termální snímky řady Landsat ve vysokém prostorovém rozlišení 30 m, při časovém rozlišení 8 až 16 dní, pro výpočet povrchové ET (Allen et al., 2007). Model METRIC je založen na výpočtu energetické bilance povrchu s využitím vstupů z dat DPZ, jako je povrchová teplota, albedo, index listové plochy, NDVI a známých meteorologických podmínek. Hlavním principem modelu METRIC je výpočet energetické bilance mezních bodů tzv. "hot" a "cold" pixelů. Hot pixel reprezentuje oblast s ideálně "holým" povrchem bez vegetace, kde tok zjevného tepla dosahuje v dané oblasti maximální hodnoty a ET je nejnižší. Cold pixel naopak reprezentuje oblast s vysokou mírou vegetačního pokryvu, kde tok zjevného tepla dosahuje minimálních hodnot v oblasti, a kde je ET nejvyšší. Mezi těmito body je následně ET kalibrována s využitím referenční evapotranspirace. Nedávné analýzy modelu potvrdily jeho potenciál v heterogenní krajině České republiky (Ghisi et al., 2024), kde je dobře využitelný jako nástroj prostorové detekce ET ve vysokém rozlišení a může tak sloužit k analýzám vodní bilance v krajině na různých prostorových úrovních.



Obr. 7:

Ukázka základní statistiky (koeficientu determinace) z porovnání vybraných globálních produktů dálkového průzkumu Země (DPZ) pro aktuální evapotranspiraci. Porovnání bylo provedeno pro celkem 38 lokalit s měřením metodou "eddy covariance" v rámci sítě FLUXNET pro období 2001–2020. Vzhledem k prostorovému rozlišení DPZ produktů a prostorové reprezentaci pozemních měření je porovnání pouze indikativní.

TSEB

Model TSEB ET (Two-Source Energy Balance for Evapotranspiration) je diagnostický model, rovněž založen na výpočtu energetické bilance povrchu za účelem odhadu aktuální ET (Norman et al., 1995). Model TSEB využívá multispektrální a termální satelitní snímky Landsat, ale oproti předchozímu modelu vyžaduje podrobnější biofyzikální vegetační data o zájmovém povrchu. Zatímco METRIC používá koncept mezních bodů (tzv. "hot" a "cold" pixelů) k výpočtu prostorové detekce evapotranspirace, model TSEB využívá poněkud odlišný přístup založený na rozdělení povrchové energetické bilance na dvě hlavní složky: půdu a vegetaci. To znamená, že TSEB pracuje s konceptem dvousložkové bilance, kde rozděluje dostupnou energii mezi vegetaci a půdu. Výhoda tohoto přístupu spočívá v rozdělení celkové ET povrchu mezi transpiraci rostlin a evaporaci půdy. Tento přístup je výhodný pro pochopení složek ET v oblastech, kde je vegetační pokryv nesouvislý.

DisALEXI

Model DisALEXI je založen na prostorové disagregaci toků energie v regionálním měřítku z modelu ALEXI (Anderson et al., 2012). DisALEXI se používá pro odhady ET v jemnějším měřítku s využitím informací o povrchové teplotě s vyšším prostorovým rozlišením z polárních orbitálních systemů (MODIS, VIIRS, Landsat), Mezinárodní vesmírné stanice (ECOSTRESS) či letadel. DisALEXI používá k výpočtu povrchových toků z korun stromů a z půdy reprezentaci energetických bilancí na povrchu země pomocí dvou zdrojů, tj. TSEB. DisALEXI umožňuje pomocí fúze originálního produktu ALEXI s dodatečnými daty s vyšším rozlišením výsledky až s 30m prostorovým rozlišením v denním kroku. V rámci disagregace poskytuje model ALEXI povrchovou teplotu směšovací vrstvy atmosféry formou okrajové podmínky dvou-zdrojovému modelu energetické bilance, kde je povrchová teplota určena satelitními daty s vyšším prostorovým rozlišením (obr. 8). Výhodu oproti samotnému TSEB i METRIC je nezávislost metody na pozemním (či jiném) měření teploty vzduchu, protože ta se v (DisALEXI) interně určí ze změn teploty povrchu. Možnosti disagregace ALEXI obvykle zahrnují:

- Disagregace pomocí MODIS (DisALEXI_{MODIS}) denní krok (za předpokladu bezoblačných dnů), 500 m (např. Fischer et al., 2023). Mezery v datech jsou vyplněny s využitím poměru ET/PET, který je pomocí Savitzky-Golay filtru vypočten pro každý den. Tato časová řada denních hodnot je následně použita v součinu s denní PET a výsledkem je kontinuální časová řada ET.
- Disagregace pomocí Landsat (DisALEXI_{Landsat}) dvoutýdenní krok, 30 m (za předpokladu bezoblačných dnů). Pro získání kontinuální časové řady v denním

kroku je použita fúze s vyplněnými hodnotami ET DisALEXI_{MODIS} modelem STARFM (Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model). Model STARFM je používaný k fúzi satelitních dat s různým prostorovým a časovým rozlišením. Model byl vyvinut s cílem vytvořit časové řady dat s vysokým prostorovým rozlišením pomocí kombinace dat z více zdrojů, zejména s využitím dat z různých satelitních senzorů.

Obdobně jako METRIC a TSEB je model DisALEXI vzhledem k prostorovému rozlišení vhodný pro validaci pozemními měřeními metodou "eddy covariance", jejíž snímaná oblast je většinou v řádech jednotek hektarů. Ve svém principu lze validaci DisALEXI považovat i jako validaci samotného ALEXI.



Obr. 8:

Schéma modelu ALEXI (vlevo) a jeho disagregace s využitím nástroje DisALEXI (vpravo). Model ALEXI umožňuje určit teplotu vzduchu v tzv. směšovací výšce pomocí změn povrchové teploty a současného řešení rovnice energetické bilance. Tato teplota vzduchu je předaná formou okrajové podmínky modelu DisALEXI, který pracuje s daty ve vyšším prostorovým rozlišení.

3.2.2 Aktuální evapotranspirace z leteckých dat

Výše popsané diagnostické modely METRIC a TSEB detekující aktuální evapotranspiraci v krajině jsou kromě satelitních snímků aplikovatelné i na termální snímky z letadel (Xia et al., 2015) či dronů (Chandel et al., 2020; Nieto et al., 2017). Výhodou využití těchto prostředků je velmi vysoké rozlišení pohybující se často v jednotkách m či desítkách cm, což umožňuje zachycení detailů, které satelitní senzory nejsou schopny rozlišit (viz obr. 9), a které mohou být klíčové pro odhad ET různých typů porostů a její validace pomocí bodových měření (např. metoda sap flow na úrovni stromu). Zejména v případě modelu METRIC je snadnější nalézt spolehlivé mezní body ("hot" a "cold" pixely), které jsou kritické pro interní kalibraci modelu. Letecké a dronové snímky jsou využívány především v lokálních typech studií zaměřujících se na konkrétní oblasti, protože pokrytí větších územních celků těmito prostředky je oproti satelitním senzorům podstatně náročnější, a to vlivem záběru a rychlosti snímané plochy. Oproti satelitům však poskytují vyšší, avšak nepravidelné časové rozlišení, které však může být určeno uživatelem nezávisle na dráze či přesném čase snímkování, což při satelitním snímání není možné.



Obr. 9:

Srovnání termálních satelitních snímků družice Landsat 8 v rozlišení 30 metrů (vlevo) a leteckého snímku v rozlišení 2,5 metru (vpravo). Snímky znázorňují identickou oblast lužních ekosystémů na jižní Moravě (Soutok). Snímky barevně naznačují regulační funkci lesa, která spočívá ve snížení teploty o více než 10 °C ve srovnání se zemědělskou půdou, která je viditelná v levé části obou obrázků.
4 VÝSLEDKY

Ukázky výsledků z časových řad satelitních snímků prezentovaných pro celou ČR jsou součástí výzkumných aktivit, které využívají globální produkty satelitních měření. Tyto výsledky slouží jako indikativní přehled možných trendů a hodnot, ale nelze je považovat za definitivní. Při jejich interpretaci je třeba zohlednit možná omezení a nejistoty, zejména pokud jde o jejich prostorové a časové rozlišení, které nemusí odpovídat specifickým potřebám na lokální úrovni. Satelitní produkty používané v této metodice (data z globálních produktů NPP a ET) poskytují cenné informace na národní úrovni, avšak pro detailnější analýzy regionální nebo ekosystémové úrovně by bylo zapotřebí vytvořit produkty s vyšším prostorovým rozlišením a lokálně specifickými parametry.

4.1 Trendy čisté primární produkce (produkční funkce) ze satelitních dat

Pro zpracování ročních časových řad NPP produktu MODIS v rozmezí let 2001 až 2022 byla použita metoda neparametrické analýzy trendů Sen's slope (česky Senův sklon či směrnice) (Sen, 1968). Na rozdíl od tradičních lineárních regresních metod je metoda Senova sklonu méně citlivá na odlehlé hodnoty (outliers). Akvizice DPZ dat, včetně MODIS, které umožňují filtrování kvality vybraných produktů, mohou obsahovat šum, chybné pixely a jiné spektrální anomálie způsobené například oblačností v atmosféře, což může značně ovlivnit výsledky analýz při použití standardní lineární regrese. Nevýhodou použití Senova sklonu je: i) neschopnost detekovat trend u dat s nelineárním charakterem, což je občasným jevem v časových řadách a ii) nízká míra přesnosti u krátkých časových řad (pět až deset let), kde může dojít k větším výkyvům, ke kterým je Senův sklon náchylnější (Hirsch and Slack, 1984). Proto je tato metoda méně vhodná pro analýzu krátkodobých trendů nebo pro data s vysokou variabilitou, což je důležité brát v úvahu při interpretaci výsledků. Dobrou praxí pro dosáhnutí statisticky signifikantních trendů je také použití Mann-Kendallova testu v kombinaci se Senovým sklonem, který dokáže vyhodnotit statistickou průkaznost výsledků časových řad (v našem případě p < 0,05) a eventuálně tento "šum" odfiltrovat. Při analýze časových řad produktivity mohou být výsledky dále ovlivněny krátkodobými výkyvy a sezonní variabilitou. Této limitaci lze předejít výběrem dostatečné délky časové řady o minimální délce 20-30 let.

Metoda Senova sklonu byla aplikovaná pouze na pixelech s převládajícím smrkovým pokryvem, tj. na oblastech, které byly identifikované "smrkovou sítí" (obr. 2). Smrková síť je pravidelná vektorová geometrie v prostoru ČR, jejíž primární funkcí je výběr zájmové dřeviny (smrku ztepilého), ale také slouží jako vrstva pro geoprostorové operace a výpočty. Regresní analýza a inferenční statistiky, včetně koeficientu determinace (R²), hladiny významnosti (p-score) a y-interceptu byly vypočteny v R ver. 4.2.1 (R Core Team, 2021). Analýza "hot spots" byla implementována s cílem identifikovat oblasti, kde hodnoty produktivity tvoří statisticky významné prostorové shromáždění, nazývané hot spot clusters. Tato analýza byla provedena pomocí nástroje *Optimized Hot Spot Analysis* (Spatial Statistics) v softwaru ArcGIS Pro vs. 3.2.2 (ESRI, 2023). Shluková metoda K-means byla použita ke klasifikaci extrahovaných hodnot Senova sklonu NPP. Tento krok vymezil oblasti vykazující výrazně vysokou nebo nízkou produktivitu vzhledem k jejich okolí.

Průměrné hodnoty čisté primární produkce lesních porostů ČR za sledované období jsou ukázány na obr. 10. Analýza trendu produktivity lesních porostů v letech 2001 až 2022 ukazuje, že u většiny porostů došlo k poklesu nebo stagnaci s výjimkou severozápadní, severní a severovýchodní části ČR (obr. 11). Tyto oblasti tvoří významné horské regiony, zejména Krušné hory, Krkonoše, Jizerské hory a Jeseníky. To jsou také regiony s nejvyššími pozorovanými hodnotami evapotranspirace během sledovaného období (obr. 14). Na ukázkové studii produktivity smrkových porostů lze identifikovat zmíněné oblasti, kde mírnější a deštivější klima vyšších poloh prospívá místním lesům. Dle obr. 12 vykazovalo 51 % smrkových porostů (pixelů) klesající trend (~ 2 800 km²), naopak 49 % vykazovalo rostoucí trend (~ 2 600 km²). Průměrná míra změny produktivity činí -0,058 g C/m²/rok, což odpovídá celkovému poklesu -1,3 g C/m² za celé sledované období 22 let.







Obr. 11:

Ukázka dlouhodobého trendu produktivity (čisté primární produkce NPP) lesních porostů v ČR za sledované období 2001-2022 ze satelitních dat MODIS. V červených barvách jsou oblasti, kde dlouhodobě dochází ke snížení produktivity, v zelených barvách jsou oblasti se vzrůstajícím trendem produktivity lesních porostů.





Analýza trendů produktivity smrkových porostů v gradientu nadmořské výšky ukazuje, že produktivita se zvyšuje ve výšce okolo 700 m n. m (obr. 13). Výsledek je v souladu jednak se zjištěním z monitoringu NIL (Máslo et al., 2023), jednak v porovnání s modelem založeným na kontinuálním měření přírůstů v rámci monitorovací sítě DendroNetwork (Kusbach et al., 2024).



Obr. 13:

Diagram zachycuje distribuci hodnot trendu produktivity smrku ztepilého v jednotlivých kategoriích nadmořských výšek během sledovaného období 2001–2022. Box zahrnuje 50 % dat, tj. rozpětí mezi Q1 (spodní hranice) až Q3 (horní hrnaice). Medián produktivity každé výškové kategorie je značen tlustou čárou uvnitř boxu a whiskers (vousy) indikují rozsah hodnot mimo odlehlé hodnoty, označené tečkami.

4.2 Trendy aktuální evapotranspirace (regulační funkce) ze satelitních dat

Pro stanovení časových trendů aktuální ET byl použit identický metodický postup jako v případě NPP, tedy neparametrická metoda Senova sklonu v kombinaci s Mann-Kendall testem. Obr. 14 zachycuje průměrnou ET lesních porostů ve sledovaném období, která se pohybuje v rozmezí 300–800 mm/rok.

Vzhledem k tomu, že meziroční hodnoty ET kolísají v závislosti na dostupných srážkách, ale také na radiaci, teplotě a sytostním doplňku, které navíc často vykazují značné rostoucí trendy (Fischer et al., 2023), je velmi užitečné ET normalizovat pomocí PET. Tím lze při následné trendové analýze zacílit přímo na vitalitu lesů a jejich regulační funkci. Je patrné, že dle trendové analýzy ET/PET dochází na většině území, s výjimkou nejvyšších horských oblastí, k postupnému poklesu regulační funkce (obr. 15). Za pozornost stojí i fakt, že nejvíce negativních změn zaznamenáváme ve středních a vyšších polohách, zatímco v nejteplejších oblastech je změna zdánlivě méně intenzivní. To je však do značné míry způsobeno relativním nedostatkem srážek v těchto oblastech, který ET prakticky v každé sezóně limituje. A protože v případě ročních srážkových úhrnů nepozorujeme dlouhodobě žádné statisticky významné rozdíly (např. Fischer et al., 2023), nemůže aktuální evapotranspirace ve vodou limitovaných polohách vykazovat výraznější změny.



Obr. 14:

Průměrné hodnoty roční aktuální evapotranspirace všech lesních porostů v ČR za období 2001–2020 určené pomocí diagnostického modelu dálkového průzkumu Země DisALEXI_{NoDIs}.



Obr. 15:

Ukázka dlouhodobého trendu normalizované roční aktuální evapotranspirace všech lesních porostů v ČR za období 2001-2020 určené pomocí diagnostického modelu dálkového průzkumu Země DisALEXI_{MoDis}. V červených barvách jsou oblasti, kde dlouhodobě dochází ke snížení evapotranspirace, v zelených barvách jsou oblasti se vzrůstajícím trendem aktuální evapotranspirace lesních porostů.

4.3 Nadzemní biomasa z leteckých dat

Jako ukázku výstupů modelu pro odhad nadzemní biomasy z leteckých dat laserového skenování jsme zvolili dva případy: smrkový a bukový les z monitorovacích ploch v rámci sítě DendroNetwork (obr. 16). Výsledné odhady biomasy



Obr. 16:

Ukázky odhadu celkové nadzemní biomasy z dat leteckého laserového skenování (ALS) pro dvě plochy ze sítě DendroNetwork, (A) smrk ztepilý v Jeseníkách a (B) buk lesní na Šumavě. V pravé části je vždy zobrazen digitální model výšek stromů (ve stupních šedi) a samotný odhad biomasy pro širší okolí plochy. pro širší okolí výzkumné plochy jsou zpracovány v prostorovém rozlišení 10 m (jak bylo vysvětleno v kapitole 3.1.2, prostorové rozlišení může být zvoleno koncovým uživatelem). Na uvedených příkladech jsou průměrné hodnoty nadzemní biomasy z pozemního šetření a z ALS odhadu.

Nezávislá validace modelu odhadu nadzemní biomasy na datech pozemní inventarizace v rámci monitorovací sítě DendroNetwork, tedy na datech, která nebyla použita pro vytvoření modelu, poukázala na robustnost stávajícího plošného přístupu (obr. 17). Data ze sítě DendroNetwork zahrnují lesní porosty s dominantním zastoupením hlavních hospodářských dřevin, smrk (n = 26), borovice (n = 15), buk (n = 16) a dub (n = 10). Jedná se o porosty převážně stejnověké a jednodruhové, rostoucí v různých nadmořských výškách a stanovištních podmínkách, i když se jedná o porosty převážně stejnověkké a jednodruhové. Pro všechny dřeviny bylo dosaženo hodnot $R^2 = 0.73$ a RMSE = 54 t/ha, což v relativním vyjádření vůči průměrné celkové nadzemní biomase činí chybu cca 15 %. Obr. 18 znázornňuje detailní rozbor pro jednotlivé dřeviny, kde se přesnost modelů pohybuje v rozmezí RMSE od 40 t/ha pro borovici lesní až po 64 t/ha pro smrk ztepilý.



Obr. 17:

(A) Srovnání odhadů nadzemní biomasy (AGB) s referenčními hodnotami získaných pomocí pozemních inventarizačních měření na plochách sítě DendroNetwork a výpočtem dle alometrických rovnic. Znázorněna je referenční přímka 1:1. (B) Histogram relativních rozdílů mezi predikovanou a referenční hodnotou biomasy Delta [%] = (odhad - ref)/ref * 100.



Obr. 18:

Srovnání odhadů nadzemní biomasy (AGB) pro hlavní hospodářské dřeviny smrk ztepilý (A), borovici lesní (B), buk lesní (C) a dub (D) s referenčními hodnotami získanými pomocí lesních inventarizačních měření na plochách sítě DendroNetwork. Znázorněny jsou referenční přímky 1:1.

5 SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Dlouhodobé sledování stavu a produktivity lesních porostů je tradičně založeno na metodách přímého pozemního šetření, které jsou však místně omezené a statické v čase. V České republice se jedná hlavně o monitoring v rámci ICP Forests a NIL. ICP Forests plochy (momentálně 306 ploch na území ČR) hodnotí primárně stanovištní podmínky a zdravotní stav stromů (defoliace, diskolorace korun, poškození stromů). Hodnocení NIL se více zaměřuje na monitoring produkční kapacity (zásoby, přírůsty, těžby atd.) Celorepublikové NIL již proběhlo ve třech cyklech: NIL1 2001-2004, NIL2 2011-2015 a ihned navazující třetí cyklus NIL3 2016-2020, přičemž výsledky NIL3 jsou publikovány se značným zpožděním až od roku 2023. To poukazuje na extrémní časovou náročnost NIL mapování a následného zpracování dat, které umožňuje zhodnotit stav lesů ČR přibližně v desetiletých cyklech. Postupné propojení NIL a DPZ postupů, obzvláště co se týče monitoringu zásoby a těžeb dříví, by mělo být logickým a smysluplným krokem v blízkém časovém horizontu. Aby bylo možné propojit data s metodami DPZ, zejména pokud mají data pozemního monitoringu ICP Forests nebo NIL sloužit pro kalibraci specifických modelů zaměřených na české lesy, je klíčové, aby tato data byla dostupná a přesně geolokalizovaná.

Vlastní postup založený na analýze dlouhodobého trendu produktivity a evapotranspirace ze satelitních dat nebyl doposud v České republice aplikován. Existuje metodika ÚHÚL pro hodnocení zdravotního stavu, která sleduje změny indexu listové plochy pomocí dat Sentinel-2 ve stále relativně krátkodobém horizontu od r. 2015 (Lukeš et al., 2018). Podobný koncept analýzy trendů satelitních dat využívá aplikace "trendy zdravotního stavu lesů" (<u>https://trendy.uhul.cz/</u>), která hodnotí krátkodobé (v horizontu 2022–2024 a 2019–2024) a dlouhodobé trendy (1984– 2022) pomocí wetness komponenty tzv. tasseled cap transformace vypočtených ze satelitních dat Sentinel-2 pro krátkodobé a Landsat pro dlouhodobé trendy. Wetness index koresponduje s vitalitou, zeleností a množstvím vody v listoví, tudíž spíše poukazuje na zdravotní stav, a jedná se o jiný typ indikátoru než je primární produkce a evapotranspirace, které jsme analyzovali v této metodice. Proto by propojení obou postupů bylo v budoucnu vhodné tak, aby se vzájemně doplňovaly. Metody DPZ nabízejí oproti tradičním pozemním šetřením významné časové a finanční úspory. Lesní pracovníci mohou využívat výstupy DPZ, například mapy produktivity, evapotranspirace nebo zdravotního stavu lesa, jako koncepční podklady pro plánování terénních šetření, výchovy i ochrany porostů nebo jejich těžeb. Dále tyto podklady umožní efektivnější selekci problémových lokalit nebo identifikaci klíčových oblastí, kde les prosperuje. Výhodou implementace DPZ metod je také flexibilita a možnost kontinuálního monitorování, což je u pozemních šetření omezeno faktory, jako je jejich periodicita nebo vliv počasí. Například, v reakci na změnu klimatu již dochází k přizpůsobení pěstebních postupů v závislosti na druhu dřeviny a lokálních podmínkách. Nástroje DPZ mohou za použití geoprostorových analýz definovat území, která jsou na hranicích ekologické valence (případně i mimo ni) konkrétních hospodářských dřevin, tedy lokality, kde nelze zabezpečit zdárné a dlouhodobé odrůstání lesních porostů a plnění všech funkcí lesa.

Další výhodou DPZ přístupu je porovnání map produktivity k identifikaci odchylek od dlouhodobého normálu, které mohou poukázat na akutní problémy lesních porostů. Výsledky DPZ mohou být následně validovány pozemními šetřeními. S pokračujícím rozvojem metod a dostupnosti DPZ dat bude výhledově dosaženo větší přesnosti, a dá se očekávat, že DPZ nabude ještě větší opodstatnění v lesnické praxi. Nebude tak sloužit pouze jako suplement a validační nástroj, ale jako základní pilíř moderního monitoringu lesních ekosystémů.

6 POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Metodika kvantifikace ekosystémových funkcí lesa pomocí metod DPZ představuje inovativní přístup k hodnocení produkčních a regulačních funkcí lesních ekosystémů v České republice. Díky možnosti propojení s klimatickými modely nabízí nástroj pro strategické plánování, adaptaci lesního hospodářství na změny klimatu a efektivnější využívání dotačních prostředků. Její aplikace má potenciál zásadně ovlivnit ekonomiku lesního hospodářství i tvorbu politiky v oblasti podpory udržitelného hospodaření.

Dle metodiky lze stanovit oblasti, kde lesní porosty v dlouhodobém horizontu plní svoji produkční funkci, tzn. jejich produktivita vyjádřená čistou primární produkcí se zvyšuje nebo zůstává nezměněna, popřípadě oblasti, kde lesní porosty produkční kapacitu postupně v důsledku změny klimatu ztrácejí. Obdobně interpretovat lze i regulační funkci, tedy schopnost lesa ochlazovat okolí, kterou jsme aproximovali pomocí aktuální evapotranspirace. Metodiku lze tak použít k vyhodnocení vhodnosti lokalit pro budoucí výsadby např. smrkových porostů s ohledem na měnící se klimatické podmínky.

Metodika založená na datech satelitního DPZ na rozdíl od metod pozemní inventarizace či měření (diskrétní či bodový přístup) umožnuje celoplošné zhodnocení jak aktuálního stavu (v dané vegetační sezóně) produktivity a evapotranspirace lesních porostů, tak i zhodnocení v delším časovém horizontu. Díky zvoleným volně dostupným družicovým datům MODIS jsme schopni na úrovní celé ČR zhodnotit období od r. 2001 do současnosti. I s prostorovým rozlišením 500 m lze analyzovat lesní porosty s dominantním zastoupením vybraných dřevin, jak jsme ukázali na hlavní produkční dřevině ČR – smrku ztepilém.

Za použití klasifikace dřevin lze takto vyhodnotit i další běžné dřeviny, jako porosty borovice lesní nebo buku lesního. I když prostorové rozlišení 500 m může být limitující pro detailní zhodnocení na úrovni jednotlivých porostů, očekáváme, že v horizontu několika let dojde k aktualizaci metodického postupu pomocí dat vyššího prostorového rozlišení (např. data Sentinel-2 v prostorovém rozlišení 20 m), i když v prozatím kratším časovém horizontu (cca posledních 10 let). Toto však bude klást výrazně vyšší nároky na výpočetní kapacitu a právě možnost cloudového zpracování dat kvůli podrobnějšímu prostorovému rozlišení bude nespornou výhodou.

V plošném přístupu pomocí leteckého laserového skenování jsme naopak schopni velmi podrobně a poměrně přesně zhodnotit aktuální stav nadzemní biomasy či

potažmo zásob dříví. Tímto způsobem ale není možné zhodnotit celou ČR, jelikož celorepublikové letecké laserové skenování je neaktuální (více jak 10 let staré) a metodiku lze v toto chvíli použít pouze na dílčí území, pro které existují data leteckého laserového skenování.

Metodika nabízí široké uplatnění, a to nejen pro lesní hospodáře, ale také pro vlastníky lesů a orgány státní správy. Díky představeným metodám je možné hodnotit jak aktuální stav, tak i dlouhodobé trendy, což umožňuje využití získaných poznatků jak při operativním řízení, tak při tvorbě strategických koncepcí v lesním hospodářství.

V dnešní době, kdy změny klimatu výrazně ovlivňují fungování lesů, jsou informace o změnách v plnění jednotlivých funkcí lesa naprosto klíčové. Metody představené v této metodice – zahrnující dlouhodobé časové řady a sledování funkcí lesa v detailním časovém i prostorovém měřítku – představují inovativní zdroj informací. Výsledky získané z DPZ monitoringu mohou být využity pro detailní parametrizaci procesních modelů, které mohou být následně použity v kombinaci s klimatickými scénáři pro odhad produktivity a dalších funkcí lesních porostů. Tyto poznatky mohou významně přispět k udržení lesů, které plní očekávané funkce jak pro vlastníky, tak pro celou společnost.

Metodika s názvem "Ohodnocení ekosystémových funkcí lesních porostů pomocí metod dálkového průzkumu Země" je publikována v edici Lesnický průvodce (VÚLHM, v. v. i., Strnady) a byla smluvně uplatněna ve spolupráci se společností Lesní družstvo v Polné. Všechny výstupy metodiky jsou veřejně dostupné přes webové stránky projektu <u>http://www.vulhm.cz/lesnicky pruvodce</u>. Metodika je rovněž přístupná v digitální podobě na webových stránkách www.vulhm.cz, v sekci Lesnický průvodce.

7 EKONOMICKÉ ASPEKTY

Na ekonomický dopad metodických postupů monitoringu produkčních a regulačních funkcí lesa pomocí metod DPZ lze nahlížet z několika úhlů pohledu. Jeden aspekt je ekonomická náročnost vlastního zpracování a náklady spojené se vstupními daty. Druhý aspekt je přímý ekonomický přínos pro sektor lesního hospodářství. Primárním účelem je celoplošné zhodnocení stavu produkčních a regulačních funkcí lesů a tyto informace dále předávat do rozhodovacích procesů. Tudíž ekonomický dopad metodických postupů lze promítnout do dotačních programů spojených s ochranou a obnovou lesních porostů, do zonace ohrožených lesů, tj. identifikace lesů, u kterých potenciál produkční funkce vytrvale klesá, avšak mohou svoji ubývající produkční hodnotu kompenzovat zachováním funkce regulační.

Náklady spojené se vstupními daty a zpracováním metodických postupů budeme popisovat zvlášť pro analýzy dlouhodobých trendů produkční a regulační funkce určené z volně dostupných satelitních snímků a zvlášť pro získání aktuálního stavu pomocí leteckého laserového skenování. Z pohledu metod hodnocení trendů produkční a regulační (evapotranspirace) funkce lesních ekosystémů pracujeme s nekomerčními, otevřenými satelitními daty MODIS, které jsou volně distribuovány přes platformy Earth Data Národního úřadu pro letectví a vesmír (NASA), LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Centre) provozován Americkou geologickou službou a NASA, či jsou dostupné přes cloudové platformy jako GEE. Díky stále dostupnějším formám cloudového zpracování jsou i náklady s tímto spojené minimální a v podstatě vyžadují jen osobní počítač s připojením k internetu. Modelování evapotranspirace pomocí modelů METRIC, TSEB a DisALEXI opět nevyžaduje žádné další náklady spojené s nákupem software, jelikož se jedná o otevřené modely a algoritmy. Náklady jsou spojené jen s personálním zajištěním, zpracováním a následnou interpretací výsledků. V ČR potřebné kompetence a lidské zdroje existují a nic nasazení metodiky nebrání.

Náklady na dlouhodobé sledování produkční a regulační funkce z DPZ jsou řádově nižší než u metody přímých pozemních měření jako je např. národní inventarizace lesů, monitorační sítě jako je např. DendroNetwork, program ICP Forest, evropská síť stanic pro měření toků uhlíku a skleníkových plynů ICOS a její národní komponenta CzeCOS. Data z těchto zdrojů jsou však absolutně nezbytná pro vytvoření plošných přístupů sledování stavu lesních porostů z DPZ, jejich validaci a další zlepšování přesnosti. Bez udržení základní sítě pozemního sledování by přesnost metod DPZ dramaticky klesla. Nicméně náklady na udržování pozemních měření jsou ve vztahu k finálně posuzované ploše relativně nízké a využití metod DPZ dramaticky zvyšuje přínos výše zmíněných pozemních měření pro širokou praxi. V případě využití dat leteckého laserového skenování pro odhad aktuální zásoby či nadzemní biomasy lesních porostů musíme počítat s pořizovacími náklady na data pro dané zájmové území a jejich následné předzpracování. Cena leteckého laserového skenování se odvíjí i od výsledné bodové hustoty mračna, kde se odhad nákladů pro data o bodové hustotě cca 5 bodů/m² pohybuje v řádu tisíců Kč na km² (pro plošné skenování více jak 100 km² lze počítat s cenou 1 500-2 000 Kč/km²). Jelikož kalibrace plošného modelu odhadu nadzemní biomasy či zásoby dříví z dat leteckého laserového skenování vyžaduje pozemní měření, je třeba zohlednit i náklady, hlavně personální, na pořízení dat lesní inventarizace pro vhodné zastoupení druhové i věkové rozmanitosti lesních porostů. Výhodou plošného přístupu je jejich jednorázové pořízení, jakmile je model nakalibrován, lze ho použít opakovaně na různá zájmová území. Jak již bylo zmíněno, metodický postup nelze dobře uplatnit pro celorepublikové mapování, protože jediným celorepublikový zdrojem dat leteckého laserového skenování jsou více jak 10 let stará data pořízená ČÚZK. V případě velmi přesného stanovení nadzemní biomasy a zásob dříví by pravidelně opakované celorepublikové laserové skenování (např. v desetiletém intervalu, jak je tomu poměrně běžnou praxí v ostatních evropských zemích) bylo velkým přínosem. Navíc, taková data by byla velmi přesným zdrojem a podkladem napříč různými sektory (např. uzemní plánování, přesné vymezení záplavových zón, stavebnictví).

Jedním z hlavních přínosů metodiky je možnost přesně identifikovat oblasti, kde jsou ekosystémové funkce nejvíce ohrožené, například vlivem sucha, degradace půdy nebo klesající ochlazovací kapacity. To umožňuje efektivní cílení omezených dotačních prostředků na obnovu lesních porostů v těchto lokalitách, zlepšení druhové skladby a přizpůsobení hospodaření aktuálním podmínkám. Vezmeme-li v potaz, že průměrné náklady na zalesnění a následnou péči činní cca 187,5 tis. Kč/ ha (Švéda et al., 2020) a plochu zalesnění 35 222 ha z roku 2023 (ČSÚ, 2023), pak odhad celkových nákladů na úrovni celé ČR a napříč všem vlastníky činí přes 6 mld Kč/rok. Kvalitní podklady, které je možné i pomocí prezentované metodiky efektivně a rychle získat, představují způsob, jak omezené finanční prostředky (v řádech stovek miliónů ročně (Rinn, Jarský, 2022) optimálně využít, popřípadě uspořit.

Finanční podpora může být navíc podmíněna doložením dat o plnění ekosystémových funkcí, například prostřednictvím kvantifikovatelných indikátorů, které jsou metodikou stanovovány. Tyto indikátory by mohly být začleněny do stávajících dotačních programů, jako je Program rozvoje venkova, což by zajistilo, že podpora bude směřovat tam, kde má nejvyšší přínos.

Metodika zároveň poskytuje možnost analyzovat dopady různých modelů hospodaření na plnění ekosystémových funkcí. Na základě dat lze například porovnat přístupy intenzivní těžby, přírodě blízkého hospodaření nebo nezasahování a vyhodnotit, který z nich nejlépe kombinuje ekonomickou efektivitu a ekologickou stabilitu. To má zásadní dopad na strategické plánování v lesnictví. Predikce produkčních kapacit lesů v budoucích klimatických podmínkách navíc umožňují přizpůsobit těžbu a zalesňování tak, aby byly zajištěny dlouhodobé ekonomické přínosy.

Praktické využití metodiky lze ilustrovat na několika konkrétních příkladech. Data metodiky například umožní směřovat dotace na obnovu lesů v oblastech postižených kůrovcem, a to s důrazem na druhově pestré výsadby, které zlepší ekologickou stabilitu i ochlazovací funkci lesa. Podobně lze cílit financování na zalesňování v regionech postižených suchem s cílem zvýšit schopnost lesa zadržovat vodu. Dalším příkladem je zavedení bonusů pro vlastníky lesů, kteří dlouhodobě dosahují nadprůměrného plnění ekosystémových funkcí, což by motivovalo k udržitelnějšímu hospodaření. Kombinace dat metodiky a klimatických modelů rovněž umožňuje predikovat rizika ztráty produkčních funkcí a plánovat preventivní opatření, čímž se minimalizují ekonomické ztráty v budoucnosti.

Významný potenciál nabízí propojení moderních postupů pozemního monitoringu, které využívají kontinuální měření v kombinaci s pokročilými technologiemi pro přenos dat v reálném čase (např. sítě DendroNetwork v České republice a TreeNet ve Švýcarsku). Tato integrace umožňuje přesnější sledování toků uhlíku v lesních ekosystémech, a to jak z hlediska prostoru, tak času, čímž zdůrazňuje klíčovou roli lesů v ukládání a poutání uhlíku. Toto propojení má také významný ekonomický potenciál, protože vytváří základ pro precizní systém kvantifikace uhlíkových kompenzací. Ty jsou založeny na schopnosti lesů poutat oxid uhličitý a tím vyrovnávat emise vytvořené na jiných místech. Tento přístup nejen podporuje boj proti změně klimatu, ale zároveň vytváří ekonomické příležitosti v oblasti uhlíkového hospodářství. Pro celý sektor lesního hospodářství se tak otevírá obrovská příležitost, jak zhodnotit své úsilí prostřednictvím významných peněžních toků spojených s uhlíkovými kompenzacemi.

Metodika přináší zásadní inovaci pro řízení lesního hospodářství v České republice. Díky možnosti cíleného rozdělování finanční podpory, hodnocení efektivity hospodaření a plánování adaptací na změny klimatu představuje nástroj, který zajišťuje dlouhodobou stabilitu lesních ekosystémů a jejich přínos pro ekonomiku. Tento komplexní přístup kombinuje udržitelnost, ekologické funkce a ekonomickou efektivitu, což z něj činí klíčový prvek budoucí strategie lesního hospodářství.

8 DEDIKACE

Certifikovaná metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu TAČR Kappa TO01000345 "Plnění produkční a regulačních funkcí lesa v minulosti, současnosti a budoucnosti – co lze očekávat od lesních ekosystémů ovlivněných klimatickou změnou?"

9 LITERATURA

9.1 Seznam použité literatury

- Adolt, R., Kučera, M., Zapadlo, J., Andrlík, M., Čech, Z., Coufal, J., 2013. Pracovní postupy pozemního šetření NIL2 Část I.: Základní pojmy, Pracovní postup navigace, Struktury projektů a pracovní postupy na inventarizační ploše. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. J. Irrig. Drain Eng. 133, 380–394. <u>https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)</u>
- Anderson, M.C., Kustas, W.P., Alfieri, J.G., Gao, F., Hain, C., Prueger, J.H., Evett, S., Colaizzi, P., Howell, T., Chávez, J.L., 2012. Mapping daily evapotranspiration at Landsat spatial scales during the BEAREX'08 field campaign. Advances in Water Resources 50, 162–177. <u>https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.06.005</u>
- Bonan, G.B., 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science 320, 1444–1449.
- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R.A., Renaud, J.-P., 2015. Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. Remote Sensing of Environment 156, 322–334. <u>https:// doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.004</u>
- Brázdil, R., Zahradník, P., Szabó, P., Chromá, K., Dobrovolný, P., Dolák, L., Trnka, M., Řehoř, J., Suchánková, S., 2022. Meteorological and climatological triggers of notable past and present bark beetle outbreaks in the Czech Republic. Climate of the Past 18, 2155–2180. <u>https://doi.org/10.5194/cp-18-2155-2022</u>
- Breil, M., Schneider, V.K.M., Pinto, J.G., 2024. The effect of forest cover changes on the regional climate conditions in Europe during the period 1986–2015. Biogeosciences 21, 811–824. <u>https://doi.org/10.5194/bg-21-811-2024</u>
- Brovkina, O., Navrátilová, B., Novotný, J., Albert, J., Slezák, L., Cienciala, E., 2022a. Influences of vegetation, model, and data parameters on forest aboveground biomass assessment using an area-based approach. Ecological Informatics 70, 101754. <u>https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101754</u>
- Brovkina, O., Novotný, J., Navrátilová, B., Hanuš, J., Cienciala, E., Albert, J., 2022b. Hodnocení nadzemní biomasy dřevinného patra lesních ekosystémů plošným přístupem. Ověřená technologie. Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.

- Cai, Z., Eklundh, L., Van Hoolst, R., Bonte, K., De Roo, B., Jönsson, P., 2023. Copernicus Land Monitoring Service - High Resolution Vegetation Phenology and Productivity (HRVPP), Seasonal trajectories, Vegetation phenology and productivity parameters. Algorithm Theoretical Base Document. v.1.1. (Algorithm Theoretical Base Document.). Copernicus Land Monitoring Service. European Environmental Agency.
- Chandel, A.K., Molaei, B., Khot, L.R., Peters, R.T., Stöckle, C.O., 2020. High Resolution Geospatial Evapotranspiration Mapping of Irrigated Field Crops Using Multispectral and Thermal Infrared Imagery with METRIC Energy Balance Model. Drones 4, 52. <u>https://doi.org/10.3390/drones4030052</u>
- Cienciala, E., Apltauer, J., Exnerová, Z., Tatarinov, F., 2008. Biomass functions applicable to oak trees grown in Central-European forestry. Journal of Forest Science 54, 109–120. <u>https://doi.org/10.17221/2906-JFS</u>
- Cienciala, E., Černý, M., Apltauer, J., Exnerová, Z., 2005. Biomass functions applicable to European beech. Journal of Forest Science 51, 147–154. https://doi.org/10.17221/4553-JFS
- Cienciala, E., Černý, M., Tatarinov, F., Apltauer, J., Exnerová, Z., 2006. Biomass functions applicable to Scots pine. Trees 20, 483–495. <u>https://doi.org/10.1007/s00468-006-0064-4</u>
- Čihák, T., Hlásny, T., Stolariková, R., Vejpustková, M., Marušák, R., 2014. Functions for the aboveground woody biomass in Small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.). Lesnícky časopis - Forestry Journal 60, 150–158.
- ČSÚ, 2023. Český statistický úřad. Lesnictví. Statistika. URL <u>https://csu.gov.cz/</u> lesnictvi (accessed 11.25.24).
- Dalponte, M., Coomes, D.A., 2016. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. Methods in Ecology and Evolution 7, 1236–1245. <u>https://doi.org/10.1111/2041-210X.12575</u>
- Deng, M., Hu, S., Guo, L., Jiang, L., Huang, Y., Schmid, B., Liu, C., Chang, P., Li, S., Liu, X., Ma, K., Liu, L., 2023. Tree mycorrhizal association types control biodiversity-productivity relationship in a subtropical forest. Sci. Adv. 9, eadd4468. <u>https://doi.org/10.1126/sciadv.add4468</u>
- Dixon, R.K., Solomon, A.M., Brown, S., Houghton, R.A., Trexier, M.C., Wisniewski, J., 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. Science 263, 185–190. <u>https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185</u>

- Duarte, A., Borralho, N., Cabral, P., Caetano, M., 2022. Recent Advances in Forest Insect Pests and Diseases Monitoring Using UAV-Based Data: A Systematic Review. Forests 13, 911. <u>https://doi.org/10.3390/f13060911</u>
- Dutcă, I., Zianis, D., Petriţan, I.C., Bragă, C.I., Ştefan, G., Yuste, J.C., Petriţan, A.M., 2020. Allometric Biomass Models for European Beech and Silver Fir: Testing Approaches to Minimize the Demand for Site-Specific Biomass Observations. Forests 11, 1136. <u>https://doi.org/10.3390/f11111136</u>
- Endsley, K.A., Zhao, M., Kimball, J.S., Devadiga, S., 2023. Continuity of Global MODIS Terrestrial Primary Productivity Estimates in the VIIRS Era Using Model-Data Fusion. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 128, e2023JG007457. <u>https://doi.org/10.1029/2023JG007457</u>
- ESRI, 2023. ArcGIS Pro [3.2.2]. https://www.esri.com/
- EU, 2021. Communication: New EU Forest Strategy for 2030. European Commission. <u>https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/</u> <u>TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0572</u>
- Fassnacht, F.E., White, J.C., Wulder, M.A., Næsset, E., 2024. Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions. Forestry: An International Journal of Forest Research 97, 11–37. <u>https://doi.org/10.1093/ forestry/cpad024</u>
- Feng, T., Duncanson, L., Hancock, S., Montesano, P., Skakun, S., Wulder, M.A., White, J.C., Minor, D., Loboda, T., 2024. Characterizing Fire-Induced Forest Structure and Aboveground Biomass Changes in Boreal Forests Using Multitemporal Lidar and Landsat. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing 17, 10108–10125. <u>https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3400218</u>
- Fisher, J.B., Tu, K.P., Baldocchi, D.D., 2008. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. Remote Sensing of Environment 112, 901–919. <u>https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.025</u>
- Fischer, M., Pavlík, P., Vizina, A., Bernsteinová, J., Parajka, J., Anderson, M., Řehoř, J., Ivančicová, J., Štěpánek, P., Balek, J., Hain, C., Tachecí, P., Hanel, M., Lukeš, P., Bláhová, M., Dlabal, J., Zahradníček, P., Máca, P., Komma, J., Rapantová, N., Feng, S., Janál, P., Zeman, E., Žalud, Z., Blöschl, G., Trnka, M., 2023. Attributing the drivers of runoff decline in the Thaya river basin. Journal of Hydrology: Regional Studies 48, 101436. <u>https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101436</u>
- Fischer, M., Trnka, M., Kučera, J., Deckmyn, G., Orság, M., Sedlák, P., Žalud, Z., Ceulemans, R., 2013. Evapotranspiration of a high-density poplar stand in

comparison with a reference grass cover in the Czech–Moravian Highlands. Agricultural and Forest Meteorology 181, 43–60. <u>https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.07.004</u>

- Forzieri, G., Dakos, V., McDowell, N.G., Ramdane, A., Cescatti, A., 2022. Emerging signals of declining forest resilience under climate change. Nature 608, 534–539. <u>https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9</u>
- Gallaun, H., Zanchi, G., Nabuurs, G.-J., Hengeveld, G., Schardt, M., Verkerk, P.J., 2010. EU-wide maps of growing stock and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements. Forest Ecology and Management 260, 252–261. <u>https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.011</u>
- Ghisi, T., Fischer, M., Kowalska, N., Jocher, G., Orság, M., Bláhová, M., Nieto, H., Homolová, L., Žalud, Z., Trnka, M., 2023. Faster evapotranspiration recovery compared to canopy development post clearcutting in a floodplain forest. Forest Ecology and Management 532, 120828. <u>https://doi.org/10.1016/j. foreco.2023.120828</u>
- Ghisi, T., Fischer, M., Nieto, H., Kowalska, N., Jocher, G., Homolová, L., Burchard--Levine, V., Žalud, Z., Trnka, M., 2024. Evaluation of the METRIC and TSEB remote sensing evapotranspiration models in the floodplain area of the Thaya and Morava Rivers. Journal of Hydrology: Regional Studies 53, 101785. <u>https:// doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101785</u>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences 202, 18–27. <u>https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031</u>
- Hájek, F., 2016. Tvorba povrchového modelu (nDSM) v časové řadě 2000–2015 a jeho využití k detekci lesní těžby. Brno, MENDELU [prezentace]
- Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science 342, 850–853. <u>https://doi. org/10.1126/science.1244693</u>
- Hanuš, J., Slezák, L., Fabiánek, T., Fajmon, L., Hanousek, T., Janoutová, R., Kopkáně, D., Novotný, J., Pavelka, K., Pikl, M., Zemek, F., Homolová, L., 2023. Flying Laboratory of Imaging Systems: Fusion of Airborne Hyperspectral and Laser Scanning for Ecosystem Research. Remote Sensing 15, 3130. <u>https://doi. org/10.3390/rs15123130</u>

- Hendriks, C.M.A., Gubbay, S., Arets, E.J.M.M., Janssen, J.A.M., 2020. Carbon storage in European ecosystems; A quick scan for terrestrial and marine EUNIS habitat types. (No. ISSN 1566-7197). Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Hirsch, R.M., Slack, J.R., 1984. A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. Water Resources Research 20, 727–732. <u>https://doi. org/10.1029/WR020i006p00727</u>
- Hlásny, T., Zimová, S., Merganičová, K., Štěpánek, P., Modlinger, R., Turčáni, M., 2021. Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. Forest Ecology and Management 490, 119075. <u>https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119075</u>
- Hruban, R., Mansfeld, V., Krystýn, V., Taubr, K., Friedrichová, H., Nemejcová, N., Jiráková, J., Navrátil, P., 2020. Hodnocení funkcí lesů. Metodika a pracovní postupy. Oblatní plán rozvoje lesů. (Metodika). Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem. <u>https://www.uhul.cz/wp-content/uploads/Metodika FL v OPRL.pdf</u>
- Jin, H., Eklundh, L., 2014. A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. Remote Sensing of Environment 152, 512–525. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.010
- Jung, M., Schwalm, C., Migliavacca, M., Walther, S., Camps-Valls, G., Koirala, S., Anthoni, P., Besnard, S., Bodesheim, P., Carvalhais, N., Chevallier, F., Gans, F., Goll, D.S., Haverd, V., Köhler, P., Ichii, K., Jain, A.K., Liu, J., Lombardozzi, D., Nabel, J.E.M.S., Nelson, J.A., O'Sullivan, M., Pallandt, M., Papale, D., Peters, W., Pongratz, J., Rödenbeck, C., Sitch, S., Tramontana, G., Walker, A., Weber, U., Reichstein, M., 2020. Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach. Biogeosciences 17, 1343–1365. <u>https://doi.org/10.5194/bg-17-1343-2020</u>
- Kauppi, P.E., Stål, G., Arnesson-Ceder, L., Hallberg Sramek, I., Hoen, H.F., Svensson, A., Wernick, I.K., Högberg, P., Lundmark, T., Nordin, A., 2022. Managing existing forests can mitigate climate change. Forest Ecology and Management 513, 120186. <u>https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120186</u>
- Krejza, J., Cienciala, E., Světlík, J., Bellan, M., Noyer, E., Horáček, P., Štěpánek, P., Marek, M.V., 2021. Evidence of climate-induced stress of Norway spruce along elevation gradient preceding the current dieback in Central Europe. Trees 35, 103–119. <u>https://doi.org/10.1007/s00468-020-02022-6</u>

- Krejza, J., Horáček, P., Světlík, J., Bellan, M., 2019. Stanovení stresu smrku ztepilého přímými metodami. Lesnická práce.
- Kusbach, A., Krejza, J., Homolová, L., Fischer, M., Janoutová, R., Horáček, P., 2024. Productivity of Coniferous Forests Evaluated by Remote Sensing and Field-Based Models. <u>https://doi.org/10.5281/ZENODO.13132421</u>
- Liang, S., Cheng, J., Jia, K., Jiang, B., Liu, Q., Xiao, Z., Yao, Y., Yuan, W., Zhang, X., Zhao, X., Zhou, J., 2021. The Global Land Surface Satellite (GLASS) Product Suite. Bulletin of the American Meteorological Society 102, E323–E337. <u>https:// doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0341.1</u>
- Loew, A., Peng, J., Borsche, M., 2016. High-resolution land surface fluxes from satellite and reanalysis data (HOLAPS v1.0): evaluation and uncertainty assessment. Geosci. Model Dev. 9, 2499–2532. <u>https://doi.org/10.5194/gmd-9-2499-2016</u>
- Lukeš, P., Strejček, R., Křístek, Š., Mlčoušek, M., 2018. Hodnocení zdravotního stavu lesních porostů v České republice pomocí satelitních dat Sentinel-2 (Metodika). Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, specializované pracoviště DPZ, Frýdek-Místek.
- Luyssaert, S., Inglima, I., Jung, M., Richardson, A.D., Reichstein, M., Papale, D., Piao, S.L., Schulze, E.D., Wingate, L., Matteucci, G., et al., 2007. CO2 balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. Global Change Biology 13, 2509–2537. <u>https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x</u>
- MAE, 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. (No. ISBN 1-59726-040-1). Millenium Ecosystem Assessment, Island Press. Washington, DC. https://mze.gov.cz/public/portal/mze/publikace/Zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-CR/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-2022-strucna-verze
- Manoli, G., Domec, J., Novick, K., Oishi, A.C., Noormets, A., Marani, M., Katul, G., 2016. Soil-plant-atmosphere conditions regulating convective cloud formation above southeastern US pine plantations. Global Change Biology 22, 2238–2254. <u>https://doi.org/10.1111/gcb.13221</u>
- Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, R.A.M., Fernández-Prieto, D., Beck, H.E., Dorigo, W.A., Verhoest, N.E.C., 2017. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. Geoscientific Model Development 10, 1903–1925. <u>https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017</u>
- Masek, J.G., Hayes, D.J., Joseph Hughes, M., Healey, S.P., Turner, D.P., 2015. The role of remote sensing in process-scaling studies of managed forest ecosystems.

Forest Ecology and Management 355, 109-123. <u>https://doi.org/10.1016/j.</u> foreco.2015.05.032

- Máslo, J., Adolt, R., Kohn, I., Kučera, M., 2023. Změna zásoby dříví v ČR. Výsledky třetího cyklu národní inventarizace lesů 2016 2020. Lesnická práce 10, 34–40.
- McGloin, R., Šigut, L., Fischer, M., Foltýnová, L., Chawla, S., Trnka, M., Pavelka, M., Marek, M.V., 2019. Available Energy Partitioning During Drought at Two Norway Spruce Forests and a European Beech Forest in Central Europe. JGR Atmospheres 124, 3726–3742. <u>https://doi.org/10.1029/2018JD029490</u>
- Monteith, J.L., 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. Journal of Applied Ecology 9, 747–766. <u>https://doi.org/10.2307/2401901</u>
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. Symp Soc Exp Biol 19, 205-234.
- Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W., 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. Remote Sensing of Environment 115, 1781–1800. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019
- MZe, 2023. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2022. Ministerstvo zemědělství, Praha. <u>https://mze.gov.cz/public/portal/mze/publikace/Zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-CR/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-2022-strucna-verze</u>
- Næsset, E., 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. Remote Sensing of Environment 80, 88–99. <u>https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00290-5</u>
- NASA JPL, 2013. SRTMGL1N v003 NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second number. <u>https://doi.org/10.5067/MEASURES/SRTM/</u> <u>SRTMGL1N.003</u>
- Navrátil, P., 2015. Včlenění mimodřevních funkcí lesa do hospodaření na lesním majetku (Pracovní metodika pro privátní poradce v lesnictví). Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem. <u>https://adoc.pub/pracovni-metodi-ka-pro-privatni-poradce-v-lesnictvi-vlenni-mi.html</u>
- Nelson, J.A., Walther, S., Gans, F., Kraft, B., Weber, U., Novick, K., Buchmann, N., Migliavacca, M., Wohlfahrt, G., Šigut, L., et al., 2024. X-BASE: the first terrestrial carbon and water flux products from an extended data-driven scaling framework, FLUXCOM-X. Biogeosciences 21, 5079–5115. <u>https://doi. org/10.5194/bg-21-5079-2024</u>
- Nieto, H., Bellvert, J., Kustas, W.P., Alfieri, J.G., Gao, F., Prueger, J., Torres-Rua, A.F., Hipps, L.E., Elarab, M., Song, L., 2017. Unmanned airborne thermal and

mutilspectral imagery for estimating evapotranspiration in irrigated vineyards. In: 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Presented at the 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE, Fort Worth, TX, pp. 5510–5513. <u>https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8128252</u>

- Nilsson, M., Nordkvist, K., Jonzén, J., Lindgren, N., Axensten, P., Wallerman, J., Egberth, M., Larsson, S., Nilsson, L., Eriksson, J., Olsson, H., 2017. A nationwide forest attribute map of Sweden predicted using airborne laser scanning data and field data from the National Forest Inventory. Remote Sensing of Environment 194, 447–454. <u>https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.022</u>
- Norman, J.M., Kustas, W.P., Humes, K.S., 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. Agricultural and Forest Meteorology 77, 263–293. <u>https://doi. org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y</u>
- Novick, K.A., Katul, G.G., 2020. The Duality of Reforestation Impacts on Surface and Air Temperature. JGR Biogeosciences 125, e2019JG005543. <u>https://doi. org/10.1029/2019JG005543</u>
- Novotný, J., Navrátilová, B., Albert, J., Cienciala, E., Fajmon, L., Brovkina, O., 2021. Comparison of spruce and beech tree attributes from field data, airborne and terrestrial laser scanning using manual and automatic methods. Remote Sensing Applications: Society and Environment 23, 100574. <u>https://doi.org/10.1016/j. rsase.2021.100574</u>
- Palmero-Iniesta, M., Espelta, J.M., Gordillo, J., Pino, J., 2020. Changes in forest landscape patterns resulting from recent afforestation in Europe (1990–2012): defragmentation of pre-existing forest versus new patch proliferation. Annals of Forest Science 77, 1–15. <u>https://doi.org/10.1007/s13595-020-00946-0</u>
- QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Version 3.22.5. <u>https://www.qgis.org/</u>
- R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. <u>https://www.R-project.org/</u>
- Rinn, R., Jarský, V., 2022. Analysis of Financial Support for Forestry in the Czech Republic from the Perspective of Forest Bioeconomy. Sustainability 14, 15575. <u>https://doi.org/10.3390/su142315575</u>
- Running, S., Mu, Q., Zhao, M., 2021. MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. <u>https://doi.org/10.5067/MODIS/ MOD17A2H.061</u>

- Running, S., Zhao, M., 2021. MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500 m SIN Grid V061. <u>https://doi.org/10.5067/MODIS/ MOD17A3HGF.061</u>
- Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H., 2004. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. BioScience 54, 547–560. <u>https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2</u>
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau: Journal of the American Statistical Association: Vol 63, No 324 URL <u>https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1968.10480934</u> (accessed 5.15.24).
- Spawn, S.A., Sullivan, C.C., Lark, T.J., Gibbs, H.K., 2020. Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010. Sci Data 7, 112. <u>https://doi.org/10.1038/s41597-020-0444-4</u>
- Swinnen, E., Toté, C., Van Hoolst, R., 2023. Copernicus Global Land Operations -Vegetation and Energy (CGLOPS-1). Algorithm Theoretical Basis Document. (Algorithm Theoretical Basis Document No. CGLOPS1_ATBD_DMP-NPP300m-V1.1). Copernicus.
- Šišák, L., Šlach, F., Švihla, V., Černohous, V., 2006. Metodika sociálněekonomického hodnocení funkcí lesa. Lesnický průvodce 1/2006. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, Jíloviště. <u>https://www.vulhm.cz/files/</u> <u>uploads/2019/03/lp_2006_01.pdf</u>
- Švéda, K., Pulkrab, K., Bukáček, J., 2020. Vyhodnocení dřevinné skladby a komparace nákladů na obnovu lesa mezi skutečně užitou a modelovou druhovou skladbou v oblastech postižených chřadnutím smrku. Zprávy lesnického výzkumu 65, 1–10.
- Tramontana, G., Jung, M., Schwalm, C.R., Ichii, K., Camps-Valls, G., Ráduly, B., Reichstein, M., Arain, M.A., Cescatti, A., Kiely, G., Merbold, L., Serrano-Ortiz, P., Sickert, S., Wolf, S., Papale, D., 2016. Predicting carbon dioxide and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms. Biogeosciences 13, 4291–4313. <u>https://doi.org/10.5194/bg-13-4291-2016</u>
- ÚHÚL, 2019. Mapa lesních dřevin (2019). <u>https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/</u> BA2E86A55FF6D6FFC12570F200552EEB/\$file/CZ_blok.pdf
- Vejpustková, M., 2019. Monitoring zdravotního stavu lesa v České republice v rámci programu ICP Forests a navazujících projektů. Data do roku 2018. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti (VÚLHM), Strnady.

- Vonderach, C., Kändler, G., Dormann, C.F., 2018. Consistent set of additive biomass functions for eight tree species in Germany fit by nonlinear seemingly unrelated regression. Annals of Forest Science 75, 1–27. <u>https://doi.org/10.1007/s13595-018-0728-4</u>
- Vyskot, I., Kapounek, L., Krešl, J., Kupec, P., Macků, J., Rožnovský, J., Schneider, J., Smítka, D., Špaček, F., Volný, S., 2003. Kvantifikace a hodnocení funkcí lesů České republiky. Ministerstvo životního prostředí, Praha. <u>https://www.mzp.cz/ web/edice.nsf/BA2E86A55FF6D6FFC12570F200552EEB/\$file/CZ_blok.pdf</u>
- Wang, K., Dickinson, R.E., Wild, M., Liang, S., 2010. Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 1. Model development. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 115. <u>https://doi. org/10.1029/2009JD013671</u>
- Wirth, C., Schumacher, J., Schulze, E.-D., 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. Tree Physiology 24, 121–139. <u>https:// doi.org/10.1093/treephys/24.2.121</u>
- Wohlgemuth, T., 2015. Climate change and tree responses in Central European forests. Annals of Forest Science 72, 285–287. <u>https://doi.org/10.1007/s13595-015-0474-9</u>
- Wutzler, T., Wirth, C., Schumacher, J., 2008. Generic biomass functions for common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. Can. J. For. Res. 38, 1661–1675. <u>https://doi.org/10.1139/X07-194</u>
- Xia, T., Kustas, W.P., Anderson, M.C., Alfieri, J.G., Gao, F., McKee, L., Prueger, J.H., Geli, H.M.E., Neale, C.M.U., Sanchez, L., Mar Alsina, M., Wang, Z., 2015. Mapping evapotranspiration with high resolution aircraft imagery over vineyards using one and two source modeling schemes. <u>https://doi.org/10.5194/ hessd-12-11905-2015</u>
- Yao, Y., Liang, S., Cheng, J., Liu, S., Fisher, J.B., Zhang, X., Jia, K., Zhao, X., Qin, Q., Zhao, B., Han, S., Zhou, Guangsheng, Zhou, Guoyi, Li, Y., Zhao, S., 2013. MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley–Taylor algorithm. Agricultural and Forest Meteorology 171–172, 187–202. <u>https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.016</u>
- Yu, X., Hyyppä, J., Holopainen, M., Vastaranta, M., 2010. Comparison of Area-Based and Individual Tree-Based Methods for Predicting Plot-Level Forest Attributes. Remote Sensing 2, 1481–1495. <u>https://doi.org/10.3390/rs2061481</u>

- Yuan, W., Liu, S., Yu, G., Bonnefond, J.-M., Chen, J., Davis, K., Desai, A.R., Goldstein, A.H., Gianelle, D., Rossi, F., Suyker, A.E., Verma, S.B., 2010. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. Remote Sensing of Environment 114, 1416–1431. <u>https://doi. org/10.1016/j.rse.2010.01.022</u>
- Zhang, S., Korhonen, L., Lang, M., Pisek, J., Díaz, G.M., Korpela, I., Xia, Z., Haapala, H., Maltamo, M., 2024. Comparison of Semi-Physical and Empirical Models in the Estimation of Boreal Forest Leaf Area Index and Clumping With Airborne Laser Scanning Data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 62, 1–12. https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3353410
- Zhao, M., Heinsch, F.A., Nemani, R.R., Running, S.W., 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment 95, 164–176. <u>https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.011</u>
- Zolkos, S.G., Goetz, S.J., Dubayah, R., 2013. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. Remote Sensing of Environment 128, 289–298. <u>https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.017</u>

9.2 Seznam publikaci, které předcházely metodice

Tato metodika je založena na následujících publikacích:

- Články v zahraničních časopisech

- Brovkina, O., Navrátilová, B., Novotný, J., Albert, J., Slezák, L., Cienciala, E., 2022. Influences of vegetation, model, and data parameters on forest aboveground biomass assessment using an area-based approach. Ecological Informatics 70, 101754. <u>https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101754</u>
- Fischer, M., Pavlík, P., Vizina, A., Bernsteinová, J., Parajka, J., Anderson, M., Řehoř, J., Ivančicová, J., Štěpánek, P., Balek, J., Hain, C., Tachecí, P., Hanel, M., Lukeš, P., Bláhová, M., Dlabal, J., Zahradníček, P., Máca, P., Komma, J., Rapantová, N., Feng, S., Janál, P., Zeman, E., Žalud, Z., Blöschl, G., Trnka, M., 2023. Attributing the drivers of runoff decline in the Thaya river basin. Journal of Hydrology: Regional Studies 48, 101436. <u>https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101436</u>
- Ghisi, T., Fischer, M., Nieto, H., Kowalska, N., Jocher, G., Homolová, L., Burchard-Levine, V., Žalud, Z., Trnka, M., 2024. Evaluation of the METRIC and TSEB remote sensing evapotranspiration models in the floodplain area of the Thaya and Morava Rivers. Journal of Hydrology: Regional Studies 53, 101785. <u>https:// doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101785</u>
- Krejza, J., Cienciala, E., Světlík, J., Bellan, M., Noyer, E., Horáček, P., Štěpánek, P., Marek, M.V., 2021. Evidence of climate-induced stress of Norway spruce along elevation gradient preceding the current dieback in Central Europe. Trees 35, 103–119. https://doi.org/10.1007/s00468-020-02022-6

Kusbach, A., Krejza, J., Homolová, L., Fischer, M., Janoutová, R., Horáček, P., 2024. Productivity of Coniferous Forests Evaluated by Remote Sensing and Field-Based Models. <u>https://doi.org/10.5281/ZENODO.13132421</u>

– Konferenční příspěvky, prezentované na mezinárodních konferencích

- Novotný, J., Krejza, J., Navrátilová, B., Janoutová, R. 2023 DendroNetwork forest sties where real-time monitoring meets with remote sensing. Poster at SilviLaser 2023, 6 8 September 2023, UCL, London, UK.
- Kusbach, A. 2023 An assessment of forest vitality along an elevation gradient in the Czech Republic based on satellite products. Presentation at 9th Data Pool Initiative for the Bohemina Forest Ecosystem, 27 – 28 June 2023, Horská Kvilda, Czech Republic.

Novotný, J. 2023 Forest above-ground biomass estimation from airborne laser scanning data. Presentation at 9th Data Pool Initiative for the Bohemina Forest Ecosystem, 27 – 28 June 2023, Horská Kvilda, Czech Republic.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ALEXI	Atmosphere-Land Exchange Inverse (model pro výpočet evapotranspirace na regionální úrovni)
ALS	Airborne Laser Scanning (letecké laserové skenování)
APAR	Absorbed Photosynthetic Active Radiation (absorbované fo- tosynteticky aktivní záření)
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (multispektrální spektroradiometr na družicích NOAA a MetOp)
CASI, SASI, TASI	Letecké obrazové spektroradimetry ve viditelné a blízké infra- červené (CASI), krátkovlnné infračervené (SASI) a termální (TASI) části spektra; více na <u>https://olc.czechglobe.cz/flis/</u>
CO ₂	Oxid uhličitý
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální; <u>https://cuzk.gov.cz/</u>
disALEXI	Disaggregated ALEXI (vylepšená verze modelu ALEXI, která pracuje s vyšším prostorovým rozlišením)
DPZ	Dálkový průzkum Země
ERA	ECMWF Re-Analysis (dlouhodobý soubor dat o počasí a kli- matu vytvořený Evropským centrem pro střednědobé předpo- vědi počasí ECMWF)
ET	Evapotranspirace
EVI	Enhanced Vegetation Index
fAPAR	Fraction of Absorbed Photosynthetic Radiation (podíl absorbovaného vůči celkovému dopadajícímu fotosynteticky aktivnímu záření)
FLIR	Výrobce termálních kamer a spektrometrů
FLIS	Flying Laboratory of Imaging Systems (letecká laboratoř zobrazujících systémů); <u>https://olc.czechglobe.cz/flis/</u>
GEDI	Global Ecosystem Dynamics Investigation (satelit)
GEE	Google Earth Engine výpočetní cloudová platforma; <u>https://earthengine.google.com/</u>

GIS	Geografický informační systém
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System (satelit)
GLASS	Global Land Surface Satellite (platforma pro zpracování a har- monizaci různých satelitních dat); <u>http://www.glass.umd.edu/</u>
GLEAM	Global Land Evaporation Amsterdam Model (model sloužící k odhadu evapotranspirace)
GOSAT	Greenhouse gases Observing SATellite (satelit na sledování skleníkových plynů); <u>https://earth.esa.int/eogateway/missions/gosat</u>
GPP	Gross Primary Productivity (hrubá primární produkce)
HOLAPS	High resOlution Land Atmosphere Parameters from Space (systém pro modelování toků energie a vody na základě DPZ a meteorologických dat)
ICESat	Ice Cloud and land Elevation Satellite (satelit)
ICP Forests	International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests; <u>http://icp-forests.net/</u>
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change; <u>https://www.ipcc.ch/</u>
LAI	Leaf Area Index (index listové plochy)
MAE	Millennium Ecosystem Assesment; <u>https://www.millenniumassessment.org/</u>
METRIC	Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Interna- lized Calibration - model evapotranspirace (Allen et al., 2007)
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometr (multispek- trální spektroradiometr na družicích Aqua a Terra)
MSI	Multi-Spectral Instrument (multispektrální spektroradiometr na družici Sentinel-2)
MZe	Ministerstvo zemědělství; <u>https://mze.gov.cz/</u>
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro letectví a vesmír); <u>https://www.nasa.gov/</u>

nDSM	Normalized Digital Surface Model (normalizovaný digitální model povrchu)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIL	Národní inventarizace lesů
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Národní úřad pro oceán a atmosféru, taktéž označení družic); <u>https://www.noaa.gov/</u>
NPP	Net Primary Productivity (čistá primární produkce)
OCO-2	Orbiting Carbon Observatory (družice monitorující množství CO ₂ v atmosféře); <u>https://ocov2.jpl.nasa.gov/</u>
OLCI	Ocean and Land Colour Instrument (multispektrální spektro- radiometr na družici Sentinel-3)
PET	Potencionální evapotranspirace
PPI	Plant Phenology Index
QGIS	Otevřený software na zpracování geografických dat; <u>https://www.qgis.org/</u>
SAR	Synthetic-Aperture Radar
SAR Sentinel-1, 2, 3	Synthetic-Aperture Radar Družice poskytující otevřená radarová a optická data v rámci služeb Copernicus; <u>https://dataspace.copernicus.eu/explore-</u> -data/data-collections/sentinel-data
SAR Sentinel-1, 2, 3 STARFM	Synthetic-Aperture Radar Družice poskytující otevřená radarová a optická data v rámci služeb Copernicus; <u>https://dataspace.copernicus.eu/explore- -data/data-collections/sentinel-data</u> Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model
SAR Sentinel-1, 2, 3 STARFM TLS	Synthetic-Aperture Radar Družice poskytující otevřená radarová a optická data v rámci služeb Copernicus; <u>https://dataspace.copernicus.eu/explore- -data/data-collections/sentinel-data</u> Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model Terrestrial Laser Scanning (pozemní laserové skenování)
SAR Sentinel-1, 2, 3 STARFM TLS TSEB	Synthetic-Aperture Radar Družice poskytující otevřená radarová a optická data v rámci služeb Copernicus; <u>https://dataspace.copernicus.eu/explore- -data/data-collections/sentinel-data</u> Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model Terrestrial Laser Scanning (pozemní laserové skenování) Two-Source Energy Balance for Evapotranspiration (model evapotranspirace)
SAR Sentinel-1, 2, 3 STARFM TLS TSEB UAV	Synthetic-Aperture Radar Družice poskytující otevřená radarová a optická data v rámci služeb Copernicus; <u>https://dataspace.copernicus.eu/explore- -data/data-collections/sentinel-data</u> Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model Terrestrial Laser Scanning (pozemní laserové skenování) Two-Source Energy Balance for Evapotranspiration (model evapotranspirace) Unmaned Aerial Vehicle (bezpilotní letoun, dron)
SAR Sentinel-1, 2, 3 STARFM TLS TSEB UAV ÚHÚL	Synthetic-Aperture Radar Družice poskytující otevřená radarová a optická data v rámci služeb Copernicus; <u>https://dataspace.copernicus.eu/explore- -data/data-collections/sentinel-data</u> Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model Terrestrial Laser Scanning (pozemní laserové skenování) Two-Source Energy Balance for Evapotranspiration (model evapotranspirace) Unmaned Aerial Vehicle (bezpilotní letoun, dron) Ústav pro hospodářskou úpravu lesů; <u>https://www.uhul.cz/</u>
11 EXTENDED ENGLISH SUMMARY

By sequestering substantial amounts of atmospheric CO_2 , forest ecosystems play an important role in the global carbon cycle and provide a tool for mitigating the impacts of climate change. At the same time, rapid climate change threatens their stability and resilience, reducing their long-term capacity to sequester CO_2 . In the Czech Republic, forests cover about 33% of the territory, comparably to the European level. Although their area has been steadily increasing, the most significant change in Czech forest stands in the last decades was the massive loss of productive coniferous stands (particularly Norway spruce stands). These have been severely stressed by episodes of drought followed by bark beetle infestation. This recent event indicates the vulnerability of the Czech forestry sector.

The main objective of this methodology is to use remote sensing (RS) to assess the ecosystem functions of forest ecosystems, in particular their production and regulation functions. The production function of a forest refers to the ability of forest ecosystem to generate organic matter, i.e. to fix and store atmospheric carbon through the photosynthetic activity of trees. This function is closely linked to the growth dynamics and the ability of the forest to accumulate biomass. The production function can be characterized and quantified by several indicators obtained from the RS data, such as gross primary production, net primary production, total aboveground biomass, stock, or volume of wood. The regulation function is the ability of forest ecosystems to regulate hydrological and climatic conditions through their influence on the energy and water balance, i.e. their ability to cool the ambient temperature. The regulation function of forests is strongly influenced by temperature, the sum of global radiation, wind speed, humidity, and precipitation, which determine the course and rate of evapotranspiration – a key process that moderates local climate and cools the surrounding environment. The key parameters associated with the regulation of climate and the hydrological cycle are actual evapotranspiration, the ratio of ET to potential evapotranspiration, the Bowen ratio, and albedo.

In this methodology, net primary production (NPP, kg C/m²/year) was selected to map trends in the production function from satellite RS data and actual evapotranspiration (ET, mm/yr) was selected for the regulation functions. Different methods and models using RS data were first reviewed. In the presented case study, non-commercial and openly available products derived from the MODIS spectroradiometer were used. These included (i) MOD17A3HGF ver. 6.0 for the NPP trend analysis that were performed entirely in a cloud computing platform Google Earth Engine (obr. 2), and (ii) MODIS-based inputs MCD43A3 for albedo, MCD15A3H and MOD15A2H for leaf area index, MCD12Q1 for landcover and MOD11_L2 for land surface temperature that were used in the DisALEXI model to estimate ET at 500 m spatial resolution (obr. 8). The non-parametric trend analysis method by Theil-Sen, also known as the Sen's slope, was used for the long-term trend analysis (from 2001 to 2022 for NPP and to 2020 for ET). The trend analysis can be carried out for all forest stands, focused on an area or forest stand of interest, or a selected tree species. The case study was focused on the most important economic tree species for the Czech Republic – Norway spruce (*Picea abies*). The results show the main areas where trends in the forest productivity (obr. 11) and forest ET (obr. 15) have increased, remained stable, or decreased.

The trend analysis of forest productivity shows that most stands are either declining or stagnating. The average rate of change in productivity is -0.058 g C/m²/year. Specifically, 51% of the spruce stands (pixels) showed a declining trend (obr. 12), and the overall decline in productivity occurred in areas below 700 m a. s. l. The trend analysis of normalised ET showed a gradual decline of the forest regulating function in most of the area, except in the highest mountain areas (obr. 15). Declining trends were observed in the middle and higher altitudes, while the change is less pronounced in the warmest areas of the country. This is largely due to the relative lack of precipitation in these regions, which limits ET.

In contrast to long-term productivity trends derived from satellite data time series, this methodology also describes a method based on airborne laser scanning data to estimate above-ground biomass (AGB) or timber stocks. This area-based method provides up-to-date estimates at a very high spatial resolution of units down to tens of meters at the level of individual stands. This method has been used to map forest above-ground biomass (in t/ha) with a spatial resolution of 20 m. The independent validation using data from the DendroNetworks plots (plots with dominant spruce, pine, beech, and oak cover) showed good results with a root mean square error of 54 t/ha (obr. 17), which gives a relative error of about 15% with respect to the average forest AGB.

The results of this methodology should provide data-driven maps and insights to support decision-making in the forest sector. These should help to identify areas where forest functions and related ecosystem services are most threatened, for example by drought, soil degradation, or declining cooling capacity. This will enable the effective targeting of limited subsidies for forest restoration in these areas and for the adaptation of forest management to current or future environmental conditions. Considering the average costs of reforestation and aftercare are about 187,500 CZK/

ha and the reforested area of 35,222 ha in 2023, the estimated total costs are more than 6 billion CZK/year. High quality documents and maps, which can be produced efficiently and quickly using this methodology, can help decision-makers to better use of and allocate the limited financial resources in the forestry sector.



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

www.vulhm.cz

LESNICKÝ PRŮVODCE 3/2024