

## Ocenjevanje razlik v fenološkem razvoju dreves v nižinskem poplavnem gozdu na podlagi satelitskih posnetkov

*Estimation of the leaf-out phenology of trees in a floodplain forest using satellite-based data*

David HLADNIK<sup>1</sup>

### Izvleček:

Hladnik, D.: Ocenjevanje razlik v fenološkem razvoju dreves v nižinskem poplavnem gozdu na podlagi satelitskih posnetkov; Gozdarski vestnik, 76/2018, št. 4. V slovenščini z izvlečkom in povzetkom v angleščini, cit. lit. 24. Prevod Breda Misja, jezikovni pregled slovenskega besedila Marjetka Šivic.

Na območju Krakovskega pragozdnega rezervata smo ocenjevali fenološke razlike prevladujočih drevesnih vrst na podlagi satelitskih posnetkov Sentinel-2. Ocenili smo vrednosti normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa NDVI v obdobju med 29. marcem in 5. oktobrom 2017. Razlike v fenološkem razvoju doba, belega gabra in črne jelše smo potrdili s štirimi zaporednimi satelitskimi posnetki v aprilu in maju. Ocene NDVI iz tretje dekade aprila, druge in tretje dekade v maju 2017 je bilo mogoče uporabiti za razlikovanje razvoja najzgodnejšega olistanja belega gabra, kasnejšega olistanja doba in in poznega končnega olistanja črne jelše. S primerjavo vzorčnih ploskev v dobovih sestojih je mogoče sklepati o mikrorastiščnih razlikah, ki vplivajo tudi na oceno vegetacijskih indeksov.

**Ključne besede:** Krakovski gozd, fenološki razvoj dreves, NDVI, Sentinel-2

### Abstract:

Hladnik, D.: Estimation of the Leaf-out Phenology of Trees in a Floodplain Forest Using Satellite-Based Data; Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry), 76/2018, vol 4. In Slovenian, abstract and summary in English, lit. quot. 24. Translated by Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

In Krakovo virgin forest reserve we assessed the phenological differences of the prevailing tree species on the basis of the Sentinel-2 satellite imagery. We assessed the values of the normalized difference vegetation index NDVI in the period from March 29 to October 5, 2017. The differences in the phenological development of pedunculate oak, common hornbeam and black alder were confirmed with four consecutive satellite images in April and May. NDVI assessment from the third decade in April, second and third decade in May 2017 could be used for differentiating the development of the earliest leaf-out of common hornbeam, subsequent leaf-out of pedunculate oak and late final leaf-out of black alder. Comparison of sampling plots in pedunculate oak stands enables us to conclude about the micro site differences that also affect the assessment of vegetation indices.

**Key words:** Krakovo forest, phenological development of trees, NDVI, Sentinel-2

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Tehnologije daljinskega zaznavanja so posebno primerne za ocenjevanje površinskih razsežnosti in razmestitve kmetijskih in gozdnih zemljišč ter drugih enot rabe prostora in pokrovnosti (Oštir, 2006; Jones in Vaughan, 2010). Pri določanju poljščin in tudi naravne vegetacije je mogoče učinkovito uporabiti značilne razlike njihovega

razvoja v vegetacijski dobi ali fenološkega razvoja rastlin. To dosežemo z monitoringom sezonskega vzorca sprememb listne površine (LAI), ki jih ocenjujemo z vegetacijskimi indeksi (Jones in Vaughan, 2010). Najpogosteje temeljijo na razlikah spektralnega odboja vegetacije v bližnjem infrardečem (NIR, 750 nm – 1 µm) in vidnem (380 do 750 nm) delu spektra, natančneje ostremu povečanju spektralnega odboja, ki nastane nad

<sup>1</sup> Izr. prof. dr. D. H., UL, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Večna pot 83, SI-1000 Ljubljana, Slovenija. david.hladnik@bf.uni-lj.si

700 nm valovne dolžine in je značilen prav za zeleno vegetacijo. V številnih raziskavah (Wang s sod., 2005; Schuster in sod., 2012; Tillack s sod., 2014) je bila predstavljena dobra povezanost med indeksom listne površine, ocenjenim s terenskimi neposrednimi ali posrednimi metodami in vegetacijskimi indeksi, ki jih pridobimo na podlagi daljinskega zaznavanja. Terensko ocenjevanje LAI kot celotne enostranske listne površine na površinski enoti zemljišča je drago in zamudno, bodisi pri vzorčnem ocenjevanju količine opada ali pri posrednem ocenjevanju dnevnega globalnega sončnega obsevanja nad krošnjami dreves in pod njimi. Na podlagi korelacije LAI z vegetacijskimi indeksi pa so bile odkrite značilnosti, ki jih lahko uporabimo tudi pri fenoloških opazovanjih dreves v gozdnih sestojih na podlagi satelitskih posnetkov. Na Slovenskem se podobno kot drugod v Evropi ponašajo z dolgo tradicijo fenoloških opazovanj, kajti nacionalna fenološka opazovalna mreža je bila zasnovana leta 1951 (Žust, 2015). Med 60 opazovanimi rastlinskimi vrstami je 28 drevesnih vrst in grmovnic, za katere opazujejo fenološke faze olistanja oziroma pojav prvih mladih poganjkov iglavcev, začetek in čas splošnega cvetenja, prve zrele plodove, jesensko rumenenje in odpadanje listov. Pri opazovanju razlik med drevesnimi vrstami z daljinskim pridobivanjem podatkov ponujajo boljša izhodišča podrobnejši opisi fenofaz drevesnih vrst, pri katerih razlikujejo več razvojnih stopenj olistanja (Vilhar, 2014) – do tretjine krošnje, dveh tretjin, večine krošnje in olistanja celotne krošnje. Za tako ocenjevanje olistanja potrebujemo podatke satelitskih sistemov z veliko časovno ločljivostjo oziroma veliko pogostostjo snemanja.

Pred leti so Japelj in sod. (2013) predstavili možnosti za ocenjevanje velikih poškodb v gozdovih na Slovenskem na podlagi satelitskih sistemov z različnimi prostorskimi, spektralnimi in časovnimi ločljivostmi. Opozoriti velja na novosti, ki so že ali še bodo izboljšale tudi kakovost vsakdanjega dela gozdarskih strokovnjakov na Slovenskem. V prispevku, ki bi lahko vplival na »kanček politične volje in podpore slovenskemu vesoljskemu programu« (Pavlovič, 2016), je bilo ocenjeno, da bo tudi Slovenija prav kmalu stopila v vesolje z lastnim satelitom. Najmanjše satelite v razredu

nanosatelitov (teža do 10 kg) razvija Univerza v Mariboru, malo večje (razred mikrosatelitov, teža do 100 kg) pa Center odličnosti Vesolje-SI v Ljubljani. Ker je bila izstrelitev mikrosatelita že večkrat najavljena, snovalci nanosatelita pa govorijo le o svojem prvencu, je negotovo sklepati o začetku pridobivanja podatkov s slovenskim satelitskim sistemom. Odločilnejši je razvoj nove generacije satelitov Sentinel Evropske vesoljske agencije (ESA) za opazovanje Zemlje v okviru evropskega programa Copernicus. Po prvih najavah na Slovenskem, ko so za satelite Sentinel uporabili slovensko ime Varuhi (Veljanovski s sod., 2014), smo konec leta 2015 pridobili prve posnetke misije Sentinel-2 z visokoločljivim multispektralnim optičnim senzorjem in jih začeli uporabljati tudi v gozdarstvu. Skupino satelitov Sentinel sicer sestavlja šest misij, ki v konstelaciji dveh satelitov zagotavljajo prostorsko in časovno pokritost opazovanja Zemlje z različnimi tehnologijami, kot so radarski instrumenti in multispektralni senzori za opazovanje in monitoring zemeljskega površja, oceanov in atmosfere (ESA 2017):

- **Sentinel-1** sestavljata dva radarska satelita v polarno orbitalni tirnici, razmaknjena za 180° ali pol oboda tirnice. Neodvisno od vremenskih in svetlobnih razmer z radarskim instrumentom C-SAR (synthetic aperture radar – umetnoodprtinski radar) zagotavljata podatke za monitoring zemeljskega površja (na primer premiki zemljišč, poplave, krčitve gozdov, gopodarjenje z vodo in prstjo) in oceanov (obseg arktičnega ledu, premiki ledenih plošč, spremljanje morskega okolja vključno z odkrivanjem razlitja oljnih madežev, določanjem ladij in nadzorom pomorskega prometa). Podatke zajemata v štirih polarizacijskih načinih s prostorsko ločljivostjo od 5 x 5 m do 20 x 40 m, v paru pa zagotavljata podatke o zemeljskem površju vsakih 6 dni. Sentinel-1A so izstrelili 3. aprila 2014, Sentinel-1B pa 25. aprila 2016 iz evropskega vesoljskega oporišča v Francoski Gvajani.
- **Sentinel-2** je polarno orbitalna misija za pridobivanje optičnih multispektralnih visoko ločljivih posnetkov in monitoring zemeljskega površja (posnetki o vegetaciji, pokrovnost s prstjo, celinske vode, obalna območja, nadzor naravnih nesreč, pomoč pri reševanju).

Sentinel-2A so izstrelili 23. junija 2015, 7. marca 2017 pa mu je sledil Sentinel-2B. Na območjih ozračja brez oblakov satelita zagotavljata podatke o zemeljskem površju vsakih pet dni na ekvatorju in celo pogosteje na višjih zemljepisnih širinah. Odlikujeta se s senzorji za zajem vidne, bližnje infrardeče in kratkovalovne infrardeče svetlobe v 13 spektralnih kanalih z ločljivostjo 10 x 10 m (4 kanali), 20 x 20 m (6 kanalov) in 60 x 60 m (3 kanali). Utirjena sta na višini 786 km in snemata pasove zemeljskega površja, široke 290 km.

- **Sentinel-3** je misija večnamenskih instrumentov – za zajem multispektralnih vrednosti morja in kopnega (OLCI z 21 spektralnimi kanali z ločljivostjo 300 m); radiometra za snemanje temperature na površju morja in kopnega (SLSTR z 9 spektralnimi kanali z ločljivostjo od 500 m do 1 km) z dvema kanaloma, posebej optimiranima za določanje požarov; dvofrekvenčnim umetnoodprtinskim radarskim višinomerom (SRAL) za merjenje površinske topografije oceanov, valovanja in hitrosti vetra nad oceani, topografskih podatkov o morskem ledu, ledenikih, rekah in jezerih. S še večjo časovno ločljivostjo (SLSTR ~1 dan, OLCI ~2 dni) in večjim prostorskim obsegom snemanja (1270 km v 21 spektralnih kanalih instrumenta OLCI) so tej misiji predvideli veliko komplementarnost z misijo Sentinel-2 tudi v monitoringu zemeljskega površja in vegetacije. Sentinel-3A so izstrelili 16. februarja 2016.
- **Sentinel 4 in 5** bosta meteorološka satelita, namenjena monitoringu atmosfere, ocenjevanju plinov in aerosolov, ki vplivajo na kakovost zraka in podnebne razmere.
- **Sentinel-6** z radarskim višinomerom bo namenjen merjenju globalne višine morske gladine, operativni oceanografiji in raziskovanju podnebja.

Dosedanje izkušnje pri uporabi satelitskih posnetkov misije Sentinel-2 kažejo na velike možnosti za operativno delo v slovenskem gozdarstvu. Z operativnim delom mislimo zlasti na reševanje težav pri ocenjevanju površinskih razsežnosti gozdov in monitoringu strukture gozdnih sestojev. Ob dobrih prostorskih, spek-

tralnih in časovnih ločljivostih je odločilna tudi možnost brezplačne uporabe podatkov (<https://scihub.copernicus.eu>). Doslej niti pri raziskovalnem delu ni bilo na voljo dovolj sredstev, da bi lahko začeli spremljati razvoj vegetacije z visokoločljivimi satelitskimi posnetki v času vegetacijske dobe ali celo v večletnih časovnih obdobjih. Cilj prispevka je pokazati možen pristop pri določanju vrstne sestave gozdnih sestojev na podlagi fenološkega razvoja drevesnih vrst in vegetacijskih indeksov, izpeljanih iz satelitskih posnetkov Sentinel-2. Zaradi velike sestojne pestrosti in mikrorastiščnih razlik v nižinskih poplavnih gozdovih (Hladnik in Pintar, 2017) smo prikazali le analizo spektralnega odboja v štirih kanalih z 10-metrsko ločljivostjo.

## 2 RAZISKOVALNI OBJEKT IN METODE DELA

### 2 RESEARCH OBJECT AND WORKING METHODS

Za raziskovalni objekt smo izbrali JV Slovenijo (Krakovski gozd), ker so bile tam v zadnjih dveh letih vremenske razmere za spremljanje fenološkega razvoja dreves v gozdnih sestojih s satelitskimi posnetki Sentinel-2 ugodnejše kot drugod v Sloveniji (Slika 1). V času spomladanskega olistanja so bili drugod le redko na voljo posnetki, ki jih ne bi zastirali oblaki, v JV Sloveniji pa smo zlasti po izstrelitvi drugega satelita v marcu 2017 lahko pridobili niz štirih posnetkov za oceno fenološkega razvoja dreves od konca marca do konca maja.

Metodologijo dela in pomen vegetacijskih indeksov je mogoče učinkoviteje predstaviti na podlagi predhodnih izsledkov o ocenjevanju sestojne zgradbe s podatki laserskega skeniranja Slovenije (Hladnik in Pintar, 2017). Na območju Krakovskega gozda smo s segmentacijo teh podatkov pokazali nove možnosti pri razmejevanju enomernih sestojev. Sestojna karta višinskih razredov je bila predstavljena kot izhodišče za podrobnejši opis sestojev s terenskim ocenjevanjem in za ocenjevanje vrstne sestave na podlagi novejših satelitskih posnetkov Sentinel-2. Podrobneje so bile predstavljene tudi rastiščne in sestojne razmere na ožjem raziskovalnem območju v Krakovskem gozdu (Hladnik in Pintar, 2017). V gozdovih rastiščnega tipa dobovja in dobovega

belogabrovja prevladujeta dob (*Quercus robur* L.) in beli gaber (*Carpinus betulus* L.). Dobre občasno poplavljenih nižinskih gozdov so delno nastale z naravnim razvojem gozdov, večinoma pa s sajenjem želoda in dobovih sadik. Po golo-sečnjah, ki so potekale še po drugi svetovni vojni, in opustitvi vzdrževanja odvodnih jarkov je znova zamočvirjene površine prerasla jelša (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), na sušnejših tleh pa so se razvili obsežni gabrovi sestoji s primesjo doba in drugih listavcev.

Za oceno fenološkega razvoja najpogostejših drevesnih vrst na območju Krakovskega gozda smo uporabili posnetke Sentinel-2, posnete 29. marca, 21. aprila, 18. in 28. maja 2017. Ocenjevanje razlik v spektralnem odboju smo nadaljevali do jesenske porumenelosti listov s posnetki, posnetimi 20. junija, 7. julija, 26. avgusta, 18. septembra

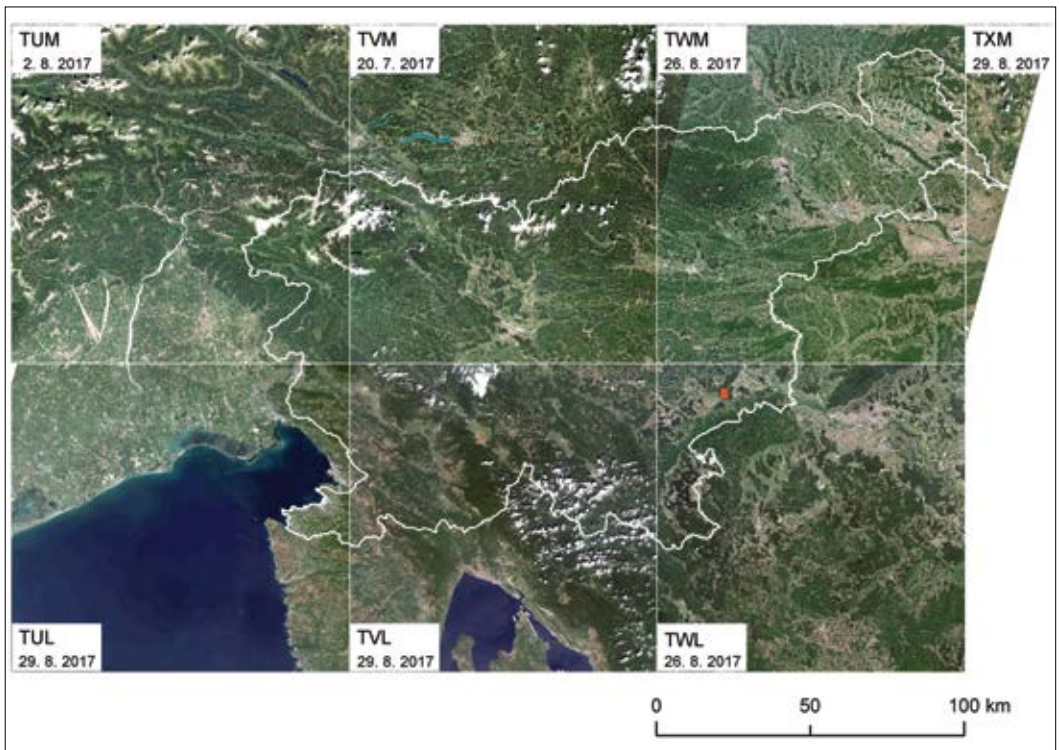
in 5. oktobra 2017. Analizirali smo vrednosti spektralnega odboja v vidnem in bližnjem infrardečem delu spektra, ki so izhodišče za številne vegetacijske indekse – od preprostih:

**DVI** =  $\text{NIR} - \text{R}$  (razlika med vrednostmi v bližnjem infrardečem in rdečem delu spektra),

**RVI** =  $\text{NIR} / \text{R}$  (količnik med vrednostmi v bližnjem infrardečem in rdečem delu spektra); do normiranih diferencialnih vegetacijskih indeksov:

**NDVI** =  $(\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$  (razmerje med razliko bližnjega IR in rdečega kanala ter njuno vsoto),

**GNDVI** =  $(\text{NIR} - \text{G}) / (\text{NIR} + \text{G})$  (razmerje med razliko bližnjega IR in zelenega kanala ter njuno vsoto).



Slika 1: Razdelitev Slovenije na posamezne 100-kilometrskse izseke satelitskih posnetkov Sentinel-2 (označeno z belo barvo) in ožjim raziskovalnim območjem v Krakovskem gozdu (oranžno). Posnetki so bili posneti ob 10:00:31, le posnetka z dne 26. 8. 2017 sta bila posneta ob 9:50:31 (Vir podatkov: ESA 2017).

Figure 1: Division of Slovenia into individual 100-km sections of the Sentinel-2 satellite images (marked with white color) and narrow research area in Krakovo virgin forest (orange). The images were recorded at 10:00:31, only the two images of the 26. 8. 2017 were made at 9:50:31 (Data source: ESA 2017).

Jones in Vaughan (2010) sta predstavila še več kot 20 različnih vegetacijskih indeksov, s katerimi skušajo odstraniti ali omejiti vpliv različnih motečih dejavnikov, kot so različna osvetljenost in naklon površja, vpliv spektralnega odboja prsti, absorpcija atmosfere in vpliv aerosolov v njej. Prirejani so tudi za ocenjevanje količine klorofila, fotosintetske aktivnosti rastlin, vsebnosti vode in suhe snovi v vegetaciji.

V tej študiji smo uporabili posnetke, ki so bili ortorektificirani s podpikselsko natančnostjo (kartografska projekcija UTM, elipsoid WGS 84) in radiometrično korigirani (raven L-2A, korekcije zaradi atmosferskih vplivov aerosolov in vodne pare, vrednosti pikselov so umerjene na spektralni odboj zemeljskega površja – *bottom of atmosphere reflectance* BOA). Za posnetek 21. aprila 2017 je bila na voljo radiometrična korekcija ravni L-1C (vrednosti pikselov umerjene na sevanje z vrha atmosfere – *top of atmosphere reflectance* TOA). Multispektralni instrument (MSI) satelita Sentinel-2 zajema podatke v 13 kanalih (Gascon in sod., 2016):

- štirih kanalih z 10 m pikslom: modri B2 (490 nm), zeleni B3 (560 nm), rdeči B4 (665 nm) in bližnji infrardeči B8 (842 nm);
- šestih kanalih z 20 m: štirimi za določanje značilnosti vegetacije B5 (705 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm) in B8A (865 nm) ter dvema kratkovalovnima infrardečima kanaloma B11 (610 nm) in B12 (2190 nm) za določanje snežnih površin, ledu in oblakov ali ocenjevanje sprememb vsebnosti vode v rastlinah;
- treh kanalih s 60 m za določanje oblakov in atmosferske korekcije: B1 za aerosole (443 nm), B9 za vodno paro (945 nm) in B10 za določanje cirusov (1375 nm).

Za ponazoritev vrednosti spektralnega odboja na satelitskih posnetkih (Slika 2) smo na ortofoto posnetkih označili vzorčne ploskve (velikosti 50 x 50 m oziroma 5 x 5 pikselov z ločljivostjo 10 m), izbrane v sestojih s prevladujočimi posameznimi drevesnimi vrstami (Slika 3). Na območju že predstavljenega raziskovalnega objekta (Hladnik in Pintar, 2017) smo iskali čiste sestoje posameznih drevesnih vrst, homogene vsaj v zgornjem sestojnem sloju, kajti določali smo prevladujoče drevesne vrste na podlagi spektralnega odboja

njihovih krošenj v sestojni strehi. Določanje homogenih vzorčnih ploskev na satelitskih posnetkih je manj učinkovito, če na terenu ne preverimo sestave drevesnih vrst. Pogosto je bilo treba meje vzorčnih ploskev premikati, da smo se na primer v sestoji doba izognili posamično primešanim drevesom belega gabra ali jelše. Višine sestojne strehe smo ocenili na podlagi podatkov laserskega skeniranja Slovenije (Hladnik in Pintar, 2017). Predstavili smo del ploskev iz obsežnejše zbirke, v katero so zajeta tudi kmetijska zemljišča, vodne površine in površine brez vegetacije.

Na sliki 2 so prikazane vrednosti pikselov na satelitskih posnetkih, kot so zapisane v formatu JPEG2000. Če bi jih želeli ponazoriti z vrednostmi spektralnega odboja zemeljskega površja, bi morali uporabiti faktor 1/10000 (Gascon in sod., 2016). Drevesne vrste smo primerjali z najnižjim spektralnim odbojem, ki je značilen za vodne površine – reke Krke pri Kostanjevici in najintenzivnejšim odbojem na kmetijskih zemljiščih, ki smo ga konec maja določili na njivi pri naselju Naklo, vzhodno od Krakovskega gozda. Jeseni smo na kmetiji povprašali o načinu obdelovanja kmetijskih zemljišč in preverili, da je bil takrat na njivi v bujnem razvoju zgodnji krompir (Turk, 2017). Podobno smo za ponazoritev spektralnega odboja iskali tudi homogene sestoje iglavcev. Ocene za smreko izvirajo iz mlajšega drogovnjaka posajenih smrek pri naselju Čučja Mlaka, zahodno od Krakovskega gozda.

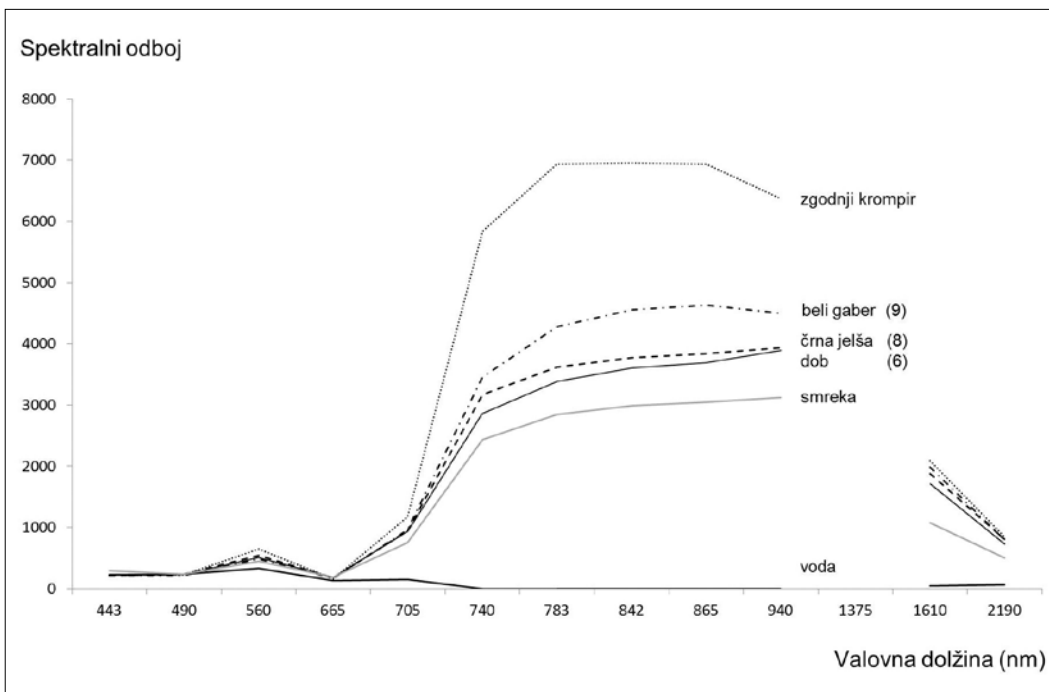
V vidnem delu spektra so bile razlike med drevesnimi vrstami majhne, zato je bilo pričakovati večje razlike v normiranih diferencialnih vegetacijskih indeksih (NDVI) in zlasti morebitne razlike v fenološkem razvoju doba, belega gabra in črne jelše na območju Krakovskega gozda.

V Krakovskem gozdu so po manj kot desetletnem obdobju opazovanja opozorili na veliko variabilnost fenofaze prvih listov doba; med letoma 2004 in 2011 je bilo ocenjenih za 16 dni razlike, povprečje fenofaze prvih listov pa je bilo v 117 dnevu julijanskega koledarja (Vilhar in sod., 2013). Za leto 2017 smo pridobili podatke o začetku olistanja doba iz Krakovskemu gozdu bližnje fenološke postaje Brod (Žust, 2017). Prvi listi doba so bili opaženi 4. 4. 2017, začetek cvetenja črne jelše pa 24. 3. 2017. O morebitnih

**Preglednica 1:** Sestojni kazalniki na vzorčnih ploskvah velikih 50 x 50 m, na katerih smo ocenjevali spektralni odboj in vegetacijske indekse satelitskih posnetkov Sentinel-2 v letu 2017.

*Table 1: Stand indices on the 50 x 50 m sampling plots, where we were assessing spectral reflection and vegetation indices of the Sentinel-2 satellite images in 2017.*

Številka ploskve	Drevesna vrsta	Prevladujoči premeri $d_{1,3}$ (cm)	Višina sestojne strehe (m)	Zastornost krošenj (%)
1	beli gaber	20 – 25	22,2	96
9	beli gaber	25 – 35	25,3	100
2	črna jelša	20 – 30	25,3	95
3	črna jelša	20 – 30	26,6	96
8	črna jelša	20 – 30	21,2	91
4	dob	> 40	25,6	97
6	dob	> 50	33,2	95
7	dob	> 50	32,4	99



**Slika 2:** Vrednosti pikselov satelitskega posnetka Sentinel-2 za spektralni odboj, ocenjen na vzorčnih ploskvah velikosti 50 x 50 m v treh gozdnih sestojih doba, belega gabra in črne jelše (v oklepajih označenih z zaporedno številko) ter dveh primerjanih objektih in sestoji smreke na območju Krakovskega gozda 28. maja 2017

*Figure 2: Pixel value of Sentinel-2 satellite image for spectral reflectance, assessed on 50 x 50 m sampling plots in three forest stands of pedunculate oak, common hornbeam, and black alder (marked with a serial number) and on two comparative objects and spruce stand in the area of Krakovo forest on May 28, 2017*

razlikah v fenološkem razvoju drevesnih vrst smo sklepali tudi na podlagi tujih opazovanj, ki sicer niso primerljiva z rastiščnimi razmerami v Krakovskem gozdu, ponujajo pa zanimive razlike med dobom in belim gabrom ter zlasti izredno velike razlike v času začetka olistanja evropskih listavcev – celo 40 do 70 dni v 150 letih od začetka Marshamovih opazovanj (Vitasse s sod., 2014).

### 3 REZULTATI

### 3 RESULTS

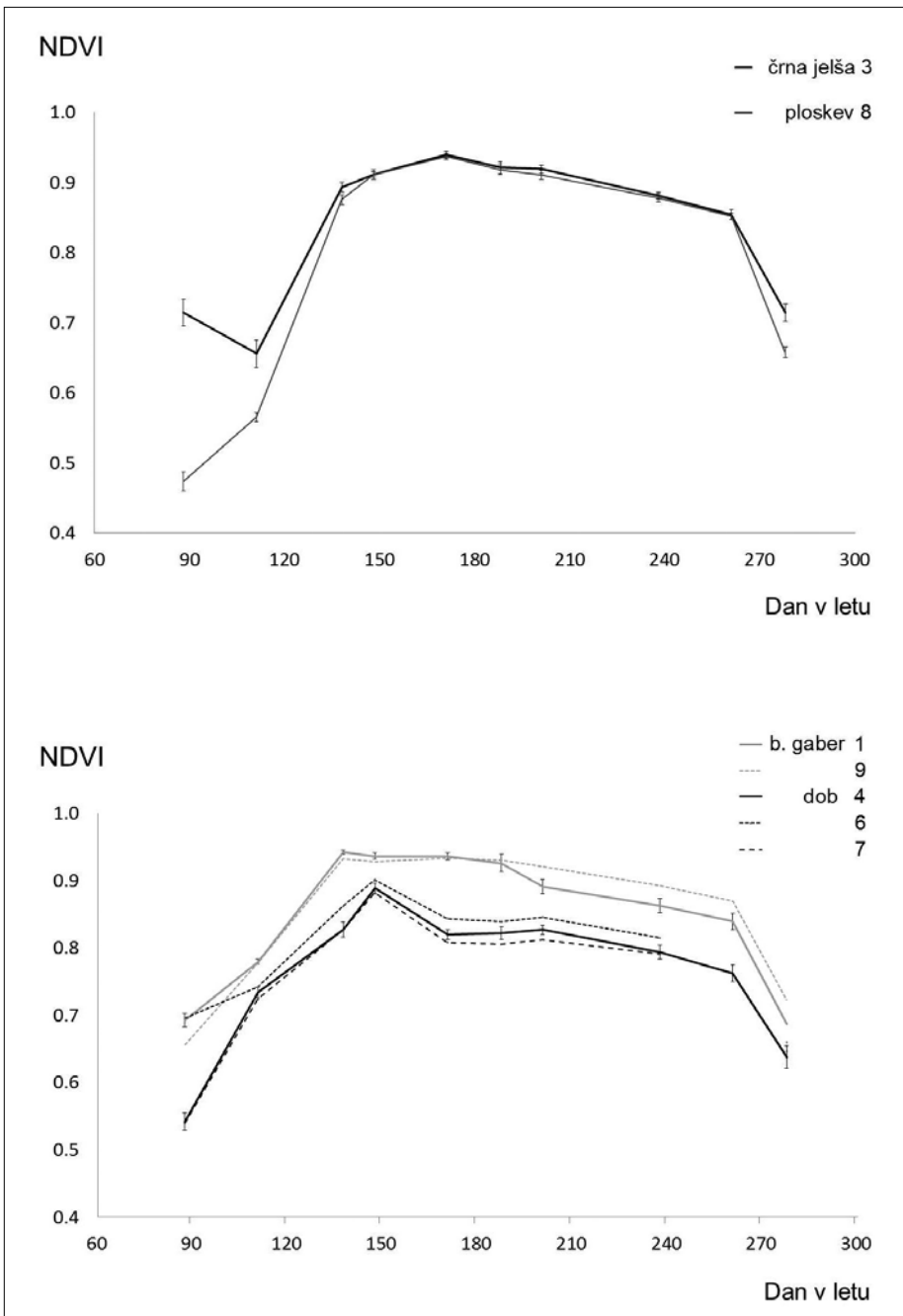
Na podlagi satelitskih posnetkov Sentinel-2 smo v letu 2017 ocenili razlike v fenološkem razvoju olistanja pri dobu, črni jelši in belem gabru. Na terenu sicer nismo ocenjevali začetka olistanja in njegovega razvoja ter ga primerjali s podatki o

spektralnem odboju drevesnih krošenj na izbranih vzorčnih ploskvah. Vegetacijske indekse smo ocenjevali sproti ob pridobivanju posameznih satelitskih posnetkov v letu 2017 in nejasnosti pri interpretaciji za nazaj pojasnjevali s terenskim preverjanjem zgradbe sestojev, grmovnega in zeliščnega sloja. Na posnetku iz konca marca (88. dan v letu) so bile najvišje vrednosti NDVI ocenjene v sestojih belega gabra, v dveh sestojih črne jelše pa je bil fenološki razvoj vegetacije povsem različen (Slika 4). Visoke vrednosti NDVI na ploskvi št. 3 je bilo konec marca in še v drugi dekadi aprila mogoče pripisati zgodnjemu olistanju čremse (*Prunus padus* L.) pod sestojno streho črne jelše zahodno od gozdnega rezervata (Slika 3 in 5). Na posnetkih sredi maja 2017 (138. dan



Slika 3: Vzorčne ploskve, prikazane na ortofoto posnetkih z označenimi mejami odsekov (Viri podatkov: Geodetska uprava RS, 2013; Zavod za gozdove Slovenije)

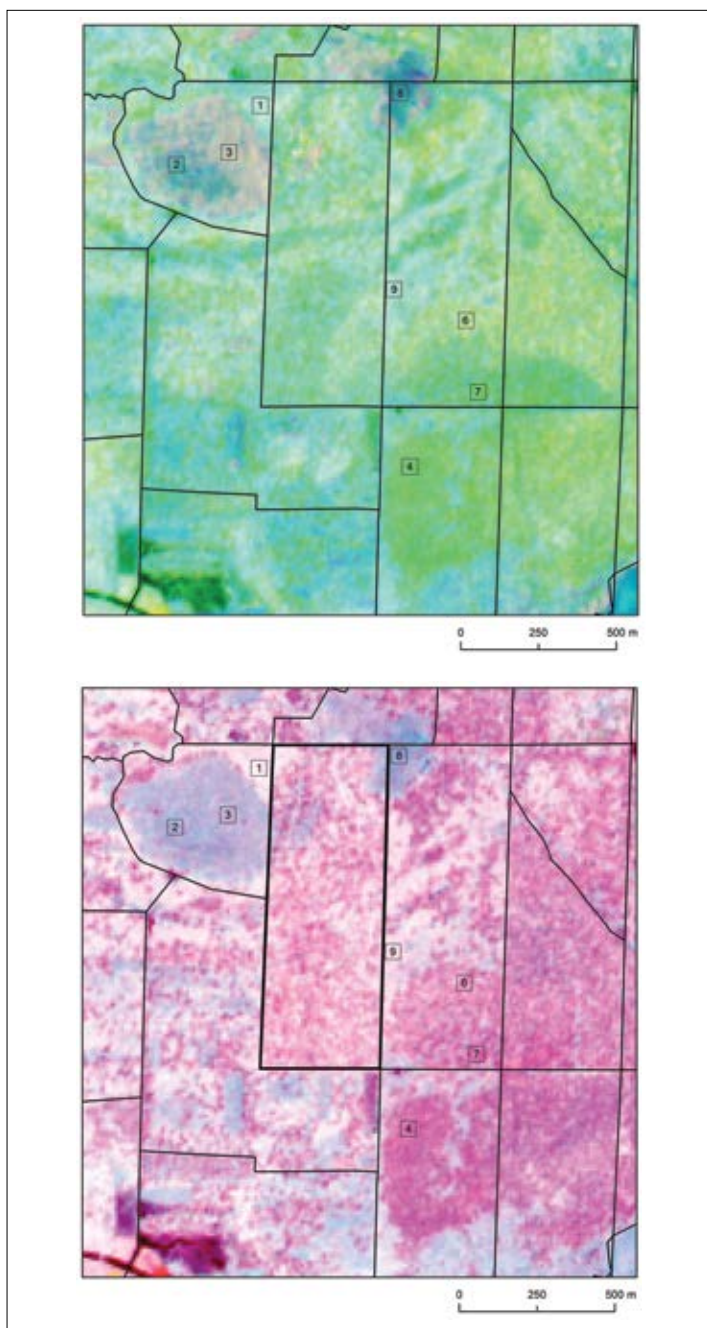
Figure 3: Sampling plots, shown on orthophoto images with marked section boundaries (Data sources: The Surveying and Mapping Authority of the RS, 2013; Slovenia Forest Service)



Slika 4: Vegetacijski indeksi NDVI za dob, beli gaber in črno jelšo na območju Krakovskega gozda v letu 2017, ocenjeni s podatki satelitskega sistema Sentinel-2. Ob posameznih opazovalnih dnevih so označeni standardni odkloni za ocenjene vegetacijske indekse na vzorčnih ploskvah velikosti 50 x 50 m. Z zaporednimi številkami ob drevesnih vrstah so označene vzorčne ploskve v gozdnih sestojih na raziskovalnem območju.

Figure 4: NDVI vegetation indices for pedunculate oak, common hornbeam, and black alder in the Krakovo forest area in 2017, assessed on the basis of Sentinel-2 satellite system data. On individual monitoring days, standard deviations for assessed vegetation indices on the 50 x 50 m sampling plots are marked. Serial numbers next to the tree species denote sampling plots in forest stands in the research area.





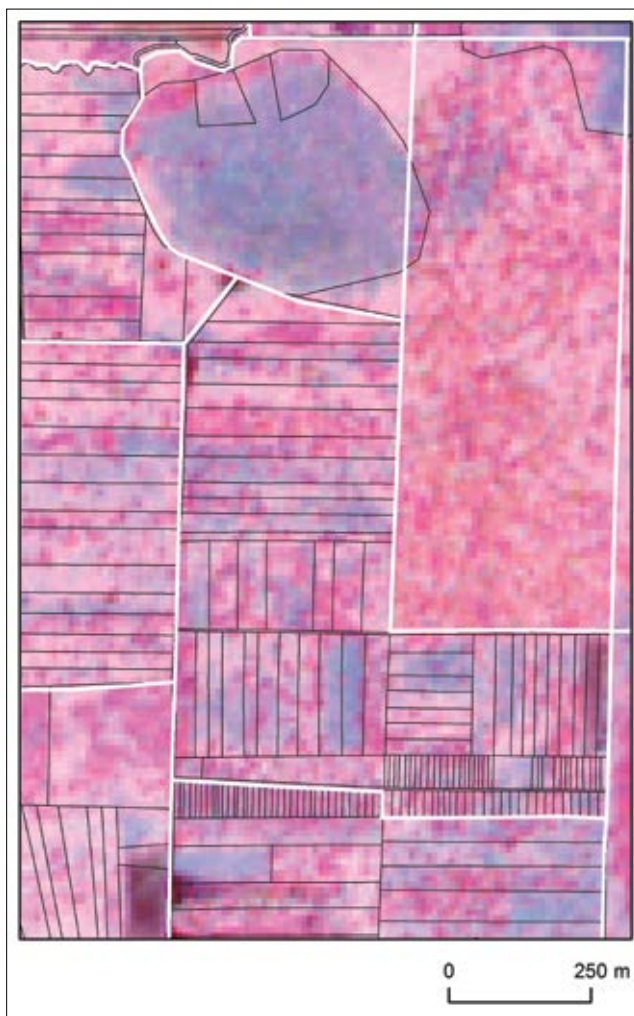
**Slika 5:** Kompozitni slike, sestavljeni iz vegetacijskih indeksov NDVI satelitskih posnetkov Sentinel-2 29. marca, 21. aprila in 18. maja 2017 (a) ter 21. aprila, 18. in 28. maja 2017 (b). Označene so vzorčne ploskve in meje odsekov, meje Krakovskega gozdnega rezervata z debelejšo črno barvo (b) (Viri podatkov: EŠA 2017, Zavod za gozdove Slovenije).

*Figure 5: Composite images, composed of NDVI vegetation indices based on Sentinel-2 satellite images of March 29, April 21, and May 18, 2017 (a) and April 21, May 18 and 28, 2017 (b). Sampling plots and section boundaries, boundaries of the Krakovo forest reserve are marked with a bold black line (b) (Data sources: ESA 2017, Slovenia Forest Service)*

v letu) je črna jelša zastrla čremso ter grmovni sloj krhlike (*Frangula alnus* Mill.) in do jeseni z vegetacijskimi indeksi ni bilo mogoče zaznati razlik med dvema sestojema črne jelše, v katerih sta bili postavljeni ploskvi št. 3 in 8. Na ploskvi št. 2 je bila čremsa pod zastorom črne jelše manj pogosta, zato so bile vrednosti NDVI v tem delu sestoja primerljive s ploskvijo št. 8 v celotnem obdobju razvoja olistanja črne jelše (Slika 5).

Pri belem gabru je mogoče sklepati o zgodnejšem začetku olistanja, kot je bilo ocenjeno v sestojih doba, večje vrednosti vegetacijskih indeksov belega gabra pa smo ocenjevali v celotnem vegetacijskem obdobju (Slika 4).

S primerjavo vzorčnih ploskev v dobovih sestojih je mogoče sklepati o mikrorastiščnih razlikah, ki vplivajo tudi na oceno vegetacijskih indeksov. Na sliki 4 smo ocenili zgodnejši razvoj olistanja



Slika 6: Parcelne meje (označene črno) na območju Krakovskega gozdnega rezervata, položene na izsek iz kompozitne podobe, sestavljene iz vegetacijskih indeksov, ocenjenih na satelitskih posnetkih Sentinel-2 iz aprila in druge ter tretje dekade maja 2017. Z belo barvo so označene meje gozdarskih odsekov (Viri podatkov: ESA 2017, Geodetska uprava RS, Zavod za gozdove Slovenije).

Figure 6: Parcel boundaries (marked black) in the area of the Krakovo forest reserve, laid upon the section of the composite image, composed of the vegetation indices, assessed on the Sentinel-2 satellite images from April and the second and third decade of May 2017. Forestry sector boundaries are marked with white color (Data sources: ESA 2017, The Surveying and Mapping Authority of the RS, Slovenia Forest Service).

na vzorčni ploskvi št. 6, ki leži severneje od nasipa gozdne ceste, za katerim se spomladi dalj časa zadržuje površinska voda, v nepoplavljenem delu pa je zgodaj spomladi bolj razvit tudi zeliščni sloj. Razlike med vzorčnimi ploskvami doba so ostale tudi poleti, na posnetkih v jesenskem času pa jih ni bilo mogoče preveriti, ker so na posnetkih v času jesenske porumenelosti listov ta del Krakovskega gozda zastirali oblaki.

Ocenjene vegetacijske indekse v štirih spomladanskih obdobjih smo združili v dve kompozitni sliki in jih prikazali z barvnim modelom RGB. Združili smo ocene NDVI iz konca marca, tretje dekade aprila in druge dekade maja 2017 in jih prikazali z uporabo treh osnovnih barv – rdeče, zelene in modre (Slika 5a). Na podlagi prevladujočih odtenkov zelene barve na sliki 5a je mogoče sklepati o razvoju olistanja belega gabra in doba v tretji dekadi aprila, modri odtenki pa ponazarjajo kasnejši začetek olistanja črne jelše.

Na kompozitnem posnetku, sestavljenem iz vegetacijskih indeksov zadnje dekade v aprilu, druge in tretje dekade v maju 2017 (Slika 5b), so sestoji treh prevladujočih drevesnih vrst prikazani na podlagi homogenejših vrednosti. Sestojem in skupinam dreves belega gabra na tej kompozitni podobi pripadajo najsvetlejši barvni odtenki, ker so bile njihove krošnje najprej olistane in so že v maju dosegle največje vrednosti vegetacijskih indeksov. Za sestoje črne jelše smo ocenili največje vrednosti šele v juniju 2017 (Slika 4a) in so na kompozitni sliki ponazorjeni z modrikasto barvo. Na območju Krakovskega gozdnega rezervata preplet rožnatih in najsvetlejših barvnih odtenkov ponazarja dvoslojne sestoje doba in belega gabra, z velikim deležem odmrlih dobov, ki so bili že podrobneje predstavljeni na podlagi terenskih podatkov in laserskega skeniranja Slovenije (Hladnik in Pintar, 2017). Meje gozdnih sestojev in skupine dreves so na tem kompozitnem posnetku kljub 10 m pikslom jasno prepoznavne in skladne s sestoji na ortofoto posnetkih iz leta 2013 (Slika 3).

Kompozitna slika z ocenjenim fenološkim razvojem drevesnih vrst je eno od izhodišč za kasnejše postopke segmentacije ali nadzorovane klasifikacije satelitskih posnetkov. Gozdne sestoje, ki so bili na območju Krakovskega gozda ponazorjeni

s podatki laserskega skeniranja Slovenije in razmejeni po sestojnih višinskih razredih (Hladnik in Pintar, 2017), bi dopolnili z ocenami o treh prevladujočih drevesnih vrstah. Razmejevanje sestojev, v katerih prevladujejo dob, črna jelša ali beli gaber bi bilo učinkovito v odsekih vzhodno in jugovzhodno od gozdnega rezervata v Krakovskem gozdu (Slika 5b). Tam so dobovi sestoji ocenjeni z večjimi površinami homogenih rožnatih odtenkov, meje z modrikasto označenimi večjimi sestoji črne jelše so ostre, manj ostri so prehodi v sestoje belega gabra z najsvetlejšimi barvnimi odtenki. Zahodno in jugozahodno od gozdnega rezervata je sestojna zgradba pestrejša (Slika 6). Sklepati je mogoče, da je razdelitev gozdov na majhne parcele lastnikov odločilnejša od naravnih dejavnikov in prizadevanja gozdarskih načrtovalcev. Pri vsakdanjem delu revirnih gozdarjev bi bilo učinkoviteje uporabiti kompozitno sliko vegetacijskih indeksov, prekrito z mejami posameznih parcel, namesto razmejevanja mešanih sestojev z različnimi deleži posameznih drevesnih vrst, ki bi jih razmejevali po posameznih odsekih.

#### 4 RAZPRAVA IN SKLEPI

#### 4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Z ocenjevanjem fenološkega razvoja drevesnih vrst smo začeli v letu 2017, ker je bilo z izstrelitvijo drugega satelita iz misije Sentinel-2 mogoče pridobiti podatke o zemeljskem površju vsakih pet dni. Kljub taki časovni ločljivosti oziroma zajemanju podatkov na zemeljskem površju z nekajdnevним razmakom so na Slovenskem omejene možnosti za intenzivno spremljanje razvoja vegetacije in ocenjevanje njenih sprememb. Oblaki na območju Alp in tudi dinarskega sveta pogosto zastirajo zemeljsko površje, tako da v spomladanskem obdobju leta 2017 ni bilo mogoče pridobiti primernih posnetkov za analizo razvoja olistanja drevesnih vrst na območju osrednje Slovenije do Karavank in Kamniško-Savinjskih Alp. Na ravni države smo želeli prikazati novejša satelitske posnetke iz konca poletja 2017, toda za alpski del je bilo mogoče pridobiti sprejemljive posnetke le v časovnem intervalu, večjem od enega meseca, pa še takrat so območja gorskih gozdov na Pokljuki, Jelovici in v Kamni-

ško-Savinjskih Alpah zastirali oblaki (Slika 1). Boljše razmere so v JV delu Slovenije, zato smo lahko ocenjevali vegetacijske indekse od olistanja v marcu do jesenske porumenelosti listov v oktobru (Slika 4).

Kljub dolgi tradiciji fenoloških opazovanj na Slovenskem ne zbiramo podatkov o vegetaciji, ki bi jih lahko neposredno uporabili pri ocenjevanju fenološkega razvoja drevesnih vrst, zlasti razvoja olistanosti. Ob podatkih o začetku cvetenja ali olistanja je pomembno zlasti, kako hitro in koliko časa poteka olistanje dreves. Po ocenah Larcherja (1994, cit. Schulze in sod., 2005) traja na primer razvoj listov pri belem gabru od začetka aprila do sredine maja, pri dobu pa od začetka do konca maja. Puchalka s sod. (2017) so v sestoji doba na Poljskem ocenili velike razlike v času do polne olistanosti – do 24 dni razlike med posameznimi drevesi v sestoji oziroma vzorcu. Leta 2014 so najzgodnejšo polno olistanost pri izbranih drevesih doba ocenili že 25. aprila, zadnja drevesa doba v vzorcu pa so bila polno olistana šele 19. maja. Na podlagi fenoloških opazovanj iz Nemčije je mogoče sklepati o kasnejšem olistanju črne jelše. Tillack in sod. (2014) so poročali, da so listi v krošnjah črne jelše šele v 115. dnevu leta začeli zastirati vegetacijo pod krošnjami. Ob kasnejšem začetku olistanja pa je za črno jelšo značilno tudi zelo dolgo obdobje do polne olistanosti. Escenbach in Kappen (1996) sta na severu Nemčije spremljala dolgo olistanje črne jelše, ki se je začelo v maju, polno razvite liste pa sta določila šele v juliju.

Opazovanja fenološkega razvoja dreves iz evropskih držav ni primerno privzeti za neposredno primerjavo s povsem drugačnimi rastiščnimi razmerami na območju Krakovskega gozda. Lahko pa potrdimo razlike v poteku olistanja, ki smo jih za beli gaber, dob in črno jelšo ocenili z vegetacijskimi indeksi NDVI satelitskih posnetkov Sentinel-2. Natančnosti klasifikacije treh prevladujočih drevesnih vrst na območju Krakovskega gozda nismo preizkušali na ravni posameznih pikslov. Prve ocene smo pridobili s terenskim preverjanjem sestojev ali vsaj skupin dreves doba, belega gabra ali jelše. V naslednjih letih bomo preverili, kakšna je stabilnost napovedovanja oziroma ocenjevanja posameznih

drevesnih vrst ob velikih razlikah v času olistanja, o katerih so poročali tudi na Slovenskem (Vilhar in sod., 2013) in zlasti v stoletju in pol Marshamovih opazovanj (Vitasse s sod., 2014) na območju Norfolka v Veliki Britaniji. V tem obdobju so na primer opazili začetek olistanja belega gabra že v 60. dnevu leta, najkasneje pa v 127. dnevu. Pri dobu so ekstremne vrednosti v začetku olistanja opazili najzgodneje v 85. dnevu, najkasneje pa v 140. dnevu (Sparks in Carey, 1995; cit. Vitasse s sod., 2014).

S satelitskimi posnetki in velikimi omejitvami, ki jih zlasti spomladi na Slovenskem povzroča zastiranje oblakov, ne pričakujemo velikih možnosti za pomoč dosedanji mreži fenoloških opazovanj na ravni celotne države. Z ocenjevanjem fenološkega razvoja drevesnih vrst smo zlasti potrdili, da satelitski posnetki in vegetacijski indeksi ponujajo izhodišča za kartiranje drevesnih vrst, ki prevladujejo v strehi gozdnih sestojev. Ob malopovršinskem načinu gospodarjenja v slovenskih gozdovih je težko pričakovati, da bomo vrstno sestavo gozdnih sestojev zanesljivo ocenjevali s standardiziranimi postopki, ki bi jih hitro posploševali iz posameznih raziskovalnih objektov, kot je bil predstavljen na območju Krakovskega gozda. Pri fenoloških opazovanjih so odločilni tudi gradienti ekoloških dejavnikov, ki na Slovenskem pri posameznih drevesnih vrstah pomikajo začetek olistanja za več dni po različnih pasovih nadmorskih višin (Vilhar in sod., 2013). Z ocenjevanjem fenološkega razvoja na velikih prostorskih razsežnostih so sicer pokazali na skladnost med terenskimi opazovanji in podatki iz satelitskih posnetkov (Polgar in Primack, 2011), opozarjajo pa na omejitve, ki jih povzročajo razlike v uporabljeni tehnologiji pridobivanja podatkov, podnebne in topografske značilnosti ter razlike v pokrovnosti in rabi prostora na zemeljskem površju.

Tudi pri hitrem ocenjevanju poškodovanosti gozdov smo le na podlagi spektralnega odboja vegetacije, ki jo zaznamo s pasivnimi senzori satelitskih sistemov, pogosto nemočni. Po žledu leta 2014 so z vegetacijskimi indeksi sicer zaznali velikopovršinske poškodbe gozdov (Ogris in sod., 2016), vendar s prostorsko ločljivost 250 m ali celo

1 km (multispektralni posnetki in produkti instrumenta MODIS) le na ravni gozdnogospodarskih enot. V letošnji zimi smo pozorno spremljali, ali bo po vetrolojih v slovenskih gozdovih mogoče oceniti večje površinske poškodbe gozdov, vendar do začetka zgodnje pomladi ni bilo na voljo posnetkov gozdov, ki jih ne bi zastirali oblaki.

Posnetki Sentinel-2 zaradi svoje velike časovne, prostorske in spektralne ločljivosti ponujajo možnosti za nadaljevanje Koblerjevega (2011) dela in dobrih rezultatov, ki jih je z daljinskim pridobivanjem podatkov dosegel pri ocenjevanju deležev treh dominantnih drevesnih vrst na območju jelovo bukovih gozdov. Ocenjevanje fenološkega razvoja drevesnih vrst bomo v letu 2018 nadaljevali na Pohorju, Krasu in tudi v Trnovskem gozdu, kjer je mogoče pričakovati ugodnejše vremenske razmere za pridobivanje satelitskih posnetkov.

## 5 SUMMARY

At the end of 2015, we acquired the first images of the Sentinel-2 mission with the high resolution multispectral optical sensor and began to use them also in the forestry in Slovenia. We selected the SE Slovenia as the research object, since in the last two years, the weather conditions there were more favorable for monitoring the phenological development of the trees in forest stands with the Sentinel-2 satellite imagery than elsewhere in Slovenia. In the period of the spring leaf-out, images, not veiled by the clouds, were only rarely available elsewhere, however we could, above all after the launching of the second satellite in March 2017, acquire a series of four images for the assessment of the phenological tree development from the end of March to the end of May in the SE Slovenia. We applied the Sentinel-2 images, recorded on March 29, April 21, May 18 and 28, 2018, for assessing the phenological development of the prevailing tree species in the Krakovo virgin forest area. The assessment of the differences in the spectral reflection was continued to the yellowing of the leaves in the fall with the images, recorded on June 20, July 7, August 26, September 18, and October 5, 2017.

With the satellite image processing, we continued the assessment of the forest stands' structure in the Krakovo forest area, where we had initially delineated the stands on the basis of the tree crowns height classes (Hladnik and Pintar, 2017) with the data of laser scanning of Slovenia. In this article we had determined the prevailing tree species on the basis of the spectral reflectance of their crowns in the stand canopy.

On the basis of the Sentinel-2 satellite data, in 2017, we assessed the differences in the phenological development of leaving out at pedunculate oak, black alder, and common hornbeam. On the image from the end of March, the highest NDVI values were assessed in the common hornbeam stands and in two black alder stands the phenological development of the vegetation was fully unlike (Figure 4). High NDVI values at the end of March and also in the second decade of April could be attributed to the early leaf-out of the bird cherry (*Prunus padus* L.) under the stand canopy of black alder west of the forest reserve (Figure 3 and 5a). On the images in the middle of May 2017 (138th day of the year) black alder covered the bird cherry and shrub layer of alder buckthorn (*Frangula alnus* Mill.) and it was not possible to detect the differences between two stands of black alder with the vegetation indices by the fall.

On the composite image, composed of vegetation indices of the last decade in April, the second and the third decade in May 2017 (Figure 5b), the stands of the three prevailing tree species are displayed on the basis of more homogenous values. Stands and tree groups of common hornbeam on this composite image are colored with the lightest shades of colors, since their crowns were leafed out first and achieved the highest values of vegetation indices already in May. With common hornbeam, it is possible to conclude about an earlier beginning of leaf-out than assessed in the pedunculate oak stands and we assessed higher values of common hornbeam vegetation indices throughout the whole vegetation period. The highest values for the black alder stands were assessed as late as in June 2017 (Figure 4) and they are depicted with bluish color on the composite image. In the

Krakovo virgin forest reserve, the intertwining of the rosy and the lightest shades of color depicts the two-layered stands of pedunculate oak and common hornbeam with a large share of dead pedunculate oaks, which were already presented in detail on the basis of field data and laser scanning of Slovenia (Hladnik and Pintar, 2017). Despite 10 m pixels, the forest stands' boundaries and tree groups are clearly identifiable on this composite image and are in accordance with the stands in the orthophoto images of 2013 (Figure 3). The stand structure is more varied in the west and south-west of the forest reserve (Figure 6). We can conclude that the division of forests into small owners' parcels is more decisive than the natural factors and striving of forestry planners.

Considering the small-area management manner in Slovenian forests, we can hardly expect to assess the species composition of forest stands accurately using the standardized procedures we would quickly generalize from individual research objects as the one presented in the area of Krakovo forest. Assessing the phenological development of the tree species we above all confirmed, that satellite images and vegetation indices offer good starting points for mapping tree species, prevailing in the forest stand canopy. The classification accuracy of the three prevailing tree species in the area of the Krakovo forest has not been tested on the level of individual pixels yet. The first assessments were acquired with the field check of stands or, at least, tree groups of pedunculate oak, common hornbeam, or alder. In the coming years, we will check the stability of the forecast or, respectively, assessment of individual tree species, bearing in mind the expected large differences in the leaf-out period.

## 6 LITERATURA

## 6 REFERENCES

- ESA 2017. European Space Agency. Copernicus Open Access Hub. (<https://scihub.copernicus.eu>)
- ESA 2018. European Space Agency. Copernicus observing the Earth. ([http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Overview4](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4))
- Eschenbach C., Kappen L. 1998. Leaf area index determination in an alder forest: a comparison of three methods. *Journal of Experimental Botany*, 47, 302: 1457–1462.
- Gascon F., Thépaut O., Jung M., Francesconi B., Louis J., Lonjou V., Lafrance B., Massera S., Gaudel-Vacaresse A., Languille F., Alhammoud B., Viallefont F., Pflug B., Bieniarz J., Clerc S., Pessiot L., Trémas T., Cadau E., De Bonis R., Isola C., Martimort P., Fernandez V. 2016. Copernicus Sentinel-2 Calibration and Products Validation Status. Preprints ([www.preprints.org](http://www.preprints.org))
- GURS 2013a. Zemljiški kataster. Ministrstvo za okolje in prostor, Geodetska uprava Republike Slovenije.
- GURS 2013b. Digitalni ortofoto. Ministrstvo za okolje in prostor, Geodetska uprava Republike Slovenije.
- Hladnik D., Pintar A.M. 2017. Ocena sestojne zgradbe na območju Krakovskega pragozdnega rezervata s segmentacijo podatkov laserskega skeniranja. *Gozdarski vestnik*, 75,7-8: 313-327.
- Japelj A., Kobler A., Skudnik M. 2013. Tehnike zaznavanja velikih poškodb v gozdovih. *Gozdarski vestnik*, 71, 1: 26-38.
- Jones H.G., Vaughan R.A. 2010. Remote sensing of vegetation. Principles, techniques, and applications. New York, Oxford University Press, 353 str.
- Ogris N., Čotar K., Kobler A. 2016. Zaznava velikopovršinskih poškodb gozdnega drevoja s pomočjo vegetacijskih indeksov na primeru žledoloma 2014. *Novice iz varstva gozdogov*, 9: 3-7.
- Oštir K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC SAZU, 250 str.
- Pavlovič L. 2016. Slovenija gre v vesolje: zahtevnost tehnologije na krovu satelita. *Elektrotehniški vestnik*, 83, 3: 81-86.
- Polgar C.A., Primack R.B. 2011. Leaf-out phenology of temperate woody plants: from trees to ecosystems. *New Phytologist*, 191: 926-941.
- Puchalka R., Koprowski M., Gričar J., Przybylak R. 2017. Does tree-ring formation follow leaf phenology in pedunculate oak (*Quercus robur* L.)? *European Journal of Forest Research*, 136: 259-268.
- Schulze E.D., Beck E., Mueller – Hohenstein K. 2005. *Plant Ecology*. Springer Berlin Heidelberg, 702 str.
- Schuster C., Foerster M., Kleinschmit B. 2017. Testing the red edge channel for improving land-use classifications based on high-resolution multispectral satellite data. *Internal Journal of Remote Sensing*, 33, 17: 5583-5599.
- Tillack A., Clasen A., Kleinschmit B., Foerster M. 2014. Estimation of the seasonal leaf area index in an alluvial forest using high-resolution satellite-based vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 141: 52-63.

- Turk A. 2017. Kmetija Turk, pridelava zelenjave. Brod v Podbočju.
- Veljanovski T., Švab Lenarčič A., Oštir K. 2014. Sateliti Sentinel - vesoljska komponenta Evropskega programa za opazovanje Zemlje Copernicus. Geodestki vestnik, 58, 3: 583-588.
- Vilhar U., Skudnik M., Simončič P. 2013. Fenološke faze dreves na ploskvah intenzivnega monitoringa gozdov v Sloveniji. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 100: 5-17.
- Vilhar U. 2014. Priročnik za fenološka opazovanja dreves v mestu in urbanih gozdovih. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, 15 str.
- Vitasse Y., Lenz A., Koerner C. 2014. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees. *Frontiers in Plant Science*, 5, 541: 1-12.
- Žust A. 2015. Fenologija v Sloveniji. Priročnik za fenološka opazovanja. Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO, 102 str.
- Žust A. 2017. Podatki za fenološka opazovanja v letu 2017 za fenološko postajo Brod. Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO.
- Wang Q., Adiku S., Tenhunen J., Granier A. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 94: 244-255.