

Razlike v fenološkem razvoju prevladujočih drevesnih vrst na Pahernikovi gozdni posesti ocenjene z analizo satelitskih posnetkov

Differences in the Phenological Development of the Prevailing Tree Species on the Pahernik's Forest Estate, Estimated Using Satellite Images

Anže Martin PINTAR¹, David HLADNIK²

Izveček:

Pintar, A. M., Hladnik, D.: Razlike v fenološkem razvoju prevladujočih drevesnih vrst na Pahernikovi gozdni posesti ocenjene z analizo satelitskih posnetkov; *Gozdarski vestnik*, 77/2019, št. 7-8. V slovenščini z izvečkom in povzetkom v angleščini, cit. lit. 29. Prevod Breda Misja, jezikovni pregled slovenskega besedila Marjetka Šivic.

Fenološke razlike prevladujočih drevesnih vrst na območju Pahernikove posesti smo ocenjevali na podlagi satelitskih posnetkov misije Sentinel-2. Analizirali smo normirane diferencialne vegetacijske indekse (NDVI) v obdobju od 29. marca do 15. oktobra 2017. Na podlagi razlik v vegetacijskem indeksu NDVI je mogoče ocenjevati fenološki razvoj prevladujočih drevesnih vrst bukke (*Fagus sylvatica* L.), smreke (*Picea abies* L. (Karsten)) in macesna (*Larix decidua* Mill.) v gozdnih sestojih. Na območju posesti ugotavljamo omejitve ocenjevanja fenološkega razvoja smreke v mešanih sestojih smreke in jelke (*Abies alba* Mill.), ki imajo podobne vrednosti NDVI. Pri bukvi pa smo ugotovili manjšanje vrednosti NDVI na posnetkih 21. aprila in 5. oktobra z višanjem nadmorske višine, kar povezujemo s poznejšim olistanjem in hitrejšim rumenenjem listov bukke na višjih nadmorskih višinah.

Glavne besede: Raznodobni gozdovi, bukev (*Fagus sylvatica* L.), smreka (*Picea abies* L. (Karsten)), gradient nadmorske višine, Sentinel-2, NDVI, kompozitna slika, Dravsko Pohorje

Abstract:

Pintar, A. M., Hladnik, D.: Differences in the Phenological Development of the Prevailing Tree Species on the Pahernik's Forest Estate, Estimated Using Satellite Images; *Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry)*, 77/2019, vol 7-8. In Slovenian, abstract and summary in English, lit. quot. 29. Translated by Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

Phenological differences of the prevailing tree species in the area of the Pahernik's estate were estimated on the basis of satellite images by the Sentinel-2 mission. We analyzed the normalized difference vegetation indices (NDVI) in the time period from March 29 to October 15, 2017. It is possible to estimate phenological development of the prevailing tree species European beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. (Karsten)), and European larch (*Larix decidua* Mill.) in forest stands, on the basis of the differences in the vegetation index NDVI. We found limitations in assessing the phenological development of Norway spruce in the mixed Norway spruce and silver fir (*Abies alba* Mill.) stands, because of the similar NDVI values of Norway spruce and silver fir. We found the decrease of NDVI on the images of April 21 and October 5 with increasing elevation of the beech stands, which we associate with later start of leaf-out and faster start of autumn leaf colouring of the beech trees growing on higher elevations.

Key words: uneven-aged forests, European beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. (Karsten)), elevation gradient, Sentinel-2, NDVI, composite image, Dravsko Pohorje

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Naravno okolje, katerega del je gozd, se vseskozi spreminja, in sicer po naravni poti pa tudi s človekovimi posegi. Za človekovo upravljanje z okoljem je treba te spremembe prepoznati; lahko jih prepoznavamo in proučujemo v daljših

časovnih obdobjih (desetletja, stoletja), lahko pa tudi v zaporedju posameznih let ali celo znotraj vegetacijskega obdobja. Za spremljanje stanja vegetacije znotraj vegetacijskega obdobja in tudi za ocenjevanje površinskih razsežnosti gozdov in monitoringa strukture gozdnih sestojev so še posebno primerni satelitski posnetki misije Senti-

¹ A. M. P. mag. inž. gozd., Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za načrtovanje in monitoring gozdov in krajine. Večna pot 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija. anzemartin.pintar@gozdis.si

² Izr. prof. dr. D. H., Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Večna pot 83, SI-1000 Ljubljana, Slovenija. david.hladnik@bf.uni-lj.si

nel-2 (satelita Sentinel-2A in Sentinel-2B), ki imajo dobro prostorsko, spektralno in časovno ločljivost (Hladnik, 2018). Fenološki razvoj drevesnih vrst lahko poleg terenskih opazovanj ocenjujemo na podlagi monitoringa sezonskega vzorca sprememb listne površine (*ang. leaf area index* - LAI), in sicer z vegetacijskimi indeksi (Jones in Vaughan, 2010), med katere spada tudi normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI).

Čufar in sod. (2012) so prikazali rezultate fenoloških opazovanj za bukev (*Fagus sylvatica* L.), ki jih je zbirala Agencija Republike Slovenije za okolje na fenološki mreži na 47 lokacijah z nadmorsko višino 55–1050 m v obdobju 1955–2007. Vilhar in sod. (2013) so raziskovali nastop fenofaz prvih listov in iglic ter splošnega rumenjenja listja za listavce na 11 ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov v Sloveniji v obdobju od leta 2004 do 2011. Med tradicionalnim fenološkim opazovanjem in spremljanjem fenološkega razvoja s pomočjo satelitskih posnetkov so podobnosti, zato bi se lahko oba pristopa dopolnjevala (Studer in sod., 2007). Spremljanje fenološkega razvoja na podlagi terenskih opazovanj zagotavlja zelo natančne podatke o posameznih drevesnih vrstah, vendar z omejeno prostorsko pokritostjo. S spremljanjem fenološkega razvoja na podlagi satelitskih posnetkov pa lahko ugotovimo meritve fotosintetske aktivnosti celotne rastlinske odeje s polno prostorsko in gosto časovno pokritostjo. Nanjo lahko vplivajo različne atmosferske motnje, učinki sončnega sevanja, pokrovnost oblakov in trajanje snežne odeje. V dormantnem delu leta so vrednosti NDVI listopadnih gozdov majhne, na začetku rastne sezone pa se hitro povečajo. Z analizo NDVI je mogoče raziskovati velikopovršinsko stanje vegetacije, vendar vrednosti NDVI, pridobljene iz satelitskih posnetkov zaradi njihove slabše prostorske ločljivosti ne moremo neposredno primerjati z na primer začetkom brstenja ali cvetenja posameznih vrst na podlagi terenskih opazovanj (Studer in sod., 2007).

Časovne serije vegetacijskih indeksov NDVI imajo zmožnost prikazovanja stanja različnih tipov proučevane vegetacije, velikosti snežne odeje, ozelenjevanja vegetacije in njenega staranja (Huemrich in sod., 1999). Opazovanje zimzelenih iglastih gozdov z uporabo vegetacijskih indeksov je veliko zahtevnejše kot listopadnih, saj novi brsti predstavljajo majhen delež zelene biomase in tudi

rast poganjkov je relativno počasna (Jönsson in sod., 2010). Na vrednosti vegetacijskih indeksov v proučevanih iglastih gozdnih na Švedskem v času brstenja bolj vpliva dinamika snežne odeje kot sprememba biomase iglic (Jönsson in sod., 2010). Medletna primerjava posnetkov iz istega časovnega obdobja v letu na isti lokaciji kaže tudi antropogene vplive na zmanjšanje vrednosti NDVI, ne samo naravne (Remmel in Perera, 2001). To velja v primeru, da se med analiziranimi obdobji fenološki razvoj ne spremeni značilno in če so streho sestojaja na posnetkih zamenjala tla ali vegetacija z majhno fotosintetsko aktivnostjo (Jin in Sader, 2005).

Prikazane so bile tudi možnosti kartiranja drevesnih vrst na podlagi spektralnega odboja vrstno heterogenih sestojev s klasifikacijo satelitskih posnetkov misije Sentinel-2 iz avgusta 2015 (Immtizer in sod., 2016). Na obravnavanem območju je bila prevladujoča drevesna vrsta smreka (*Picea abies* L. (Karsten)), veliko je bilo tudi bukve in rdečega bora (*Pinus sylvestris* L.). V času analize so imele proučevane drevesne vrste zelo podobno obliko spektralnega odboja. Smreka in rdeči bor sta imela celo podoben spektralni odboj v vseh kanalih misije Sentinel-2. Avtorji ugotavljajo, da klasifikacija ni bila popolnoma zanesljiva zaradi strukturne raznovrstnosti in mozaične vrstne zgradbe proučevanih gozdov. Klasifikacija je bila zanesljivejša pri dominantnih vrstah. Na spektralni odboj in s tem tudi na vrednosti NDVI in njihovo variabilnost znotraj sestojev vplivajo predvsem gostota sestojev, pokrovnost krošenj in podstojna vegetacija (Ozdemir, 2014).

V Sloveniji so bile razlike v fenološkem razvoju in možnosti določanja prevladujočih drevesnih vrst z analizo satelitskih posnetkov satelita Sentinel-2 ocenjene na območju Krakovskega gozda (Hladnik, 2018) in na območju GGE Lovrenc na Pohorju (Šprah, 2019). V prispevku želimo prikazati možnosti določanja dominantnih drevesnih vrst na podlagi fenoloških razlik z interpretacijo satelitskih posnetkov na območju Pahernikove gozdne posesti, na kateri prevladujejo raznodobni smrekovo-jelovo-bukovi gozdovi.

2 RAZISKOVALNI OBJEKT IN METODE DELA

2 RESEARCH OBJECT AND RESEARCH METHODS

2.1 Raziskovalni objekt

2.1 Research object

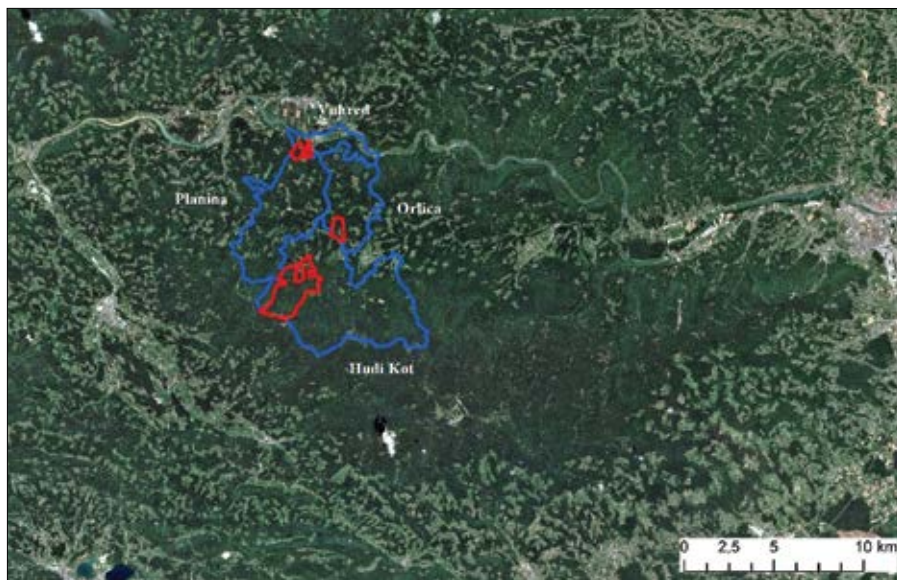
Pahernikova posest geografsko pripada Dravskemu Pohorju; leži med reko Dravo na severu in grebenom Pohorja na jugu (slika 1) (Posestni načrt ..., 2015). Razprostira se v dveh občinah, in sicer Radlje ob Dravi in Ribnica na Pohorju. V Občini Radlje ob Dravi sta dva oddelka, ki se navezujeta na kraj Vuhred in ležita v katastrskih občinah Vuhred in Planina (sliki 1 in 2). V osrednjem delu posesti je značilna poselitve v obliki celkov, na najvišjih delih pa prevladuje gozd. Osrednji in zgornji del posesti je v Občini Ribnica na Pohorju in v katastrskih občinah Orlica in Hudi Kot. Najnižja točka Pahernikove posesti ima nadmorsko višino 350 m v Vuhredu, najvišjo pa 1543 m na Veliki Kopi. Površina gozdne posesti znaša 570,13 ha (Posestni načrt ..., 2015). Sestojna zgradba na Pahernikovi gozdni posesti in njena pestrost sta že bili podrobno predstavljeni (Pintar in Hladnik, 2018).

Na Pahernikovi gozdni posesti je prevladujoč gozdni rastiščni tip kisloljubno gorsko-zgornjegorsko bukove z belkasto bekico oziroma asociacija *Luzulo-Fagetum* (Rozman in Dakskobler, 2015). Sestoji te asociacije na posesti ležijo v pasu od okoli

700 m do 1450 m nadmorske višine. Na posesti se pojavljajo štiri subasociacije, po površini je največja subasociacija *Luzulo-Fagetum abietetosum*. Najbolj tipični sestoji le-te ležijo na nadmorski višini 850–1100 m (Rozman in Dakskobler, 2015). V drevesni sestavi je poleg bukve in smreke pogosta tudi jelka (*Abies alba* Mill.). V višinskem pasu od 1200 do 1450 m nadmorske višine na glinastih skrilačih prevladujejo sestoji subasociacije *Luzulo-Fagetum luzuletosum sylvaticae*, kjer je v drevesni plasti smreka pogosto enakovredna bukvi ali celo prevladuje (Rozman in Dakskobler, 2015).

Drugi najbolj razširjeni rastiščni tip oziroma asociacija na posesti je jelovje s praprotmi *Galio rotundifolii-Abietetum* (Rozman in Dakskobler, 2015). V katastrski občini Hudi Kot na nadmorski višini od 1450 do 1530 m ležijo večinoma čisti, v glavnem vrzelasti smrekovi sestoji drugotnega nastanka, saj so v njih v preteklosti in deloma še zdaj pasejo živino. Ti sestoji so uvrščeni v rastišči tip zgornjegorsko smrekovje z gozdno bekico oziroma v asociacijo *Luzulo sylvaticae-Piceetum* (Rozman in Dakskobler, 2015).

Površine nekdanjih senožeti in pašnikov na rastiščih združb *Galio-Abietetum* in *Luzulo-Fagetum*, za katere domnevajo, da se je na njih smreka



Slika 1: Pohorje z označenimi mejami Pahernikove posesti (rdeče) in mejami katastrskih občin (modro), v katerih se razprostira (ESA, 2017; GURS, 2017b).

Figure 1: Pohorje hills with marked boundaries of the Pahernik's estate (red) and boundaries of the cadastral municipalities (blue), where it is located (ESA, 2017; GURS, 2017b).

spontano naselila sama, so uvrščene v rastiščni tip drugotno smrekovje na silikatni podlagi oziroma asociacijo *Avenello flexuosae-Piceetum*. V tej združbi v drevesni plasti posamično rastejo bukev, gorski javor (*Acer pseudoplatanus* L.), jelka in macesen (*Larix decidua* Mill.) (Rozman in Dakskobler, 2015).

2.2 Analiza satelitskih posnetkov satelita Sentinel-2

2.2 Analysis of the satellite images provided by the Sentinel-2 satellite

Sentinel-2 je misija programa Kopernikus, sestavljenega iz dveh satelitov, s katerima pridobivamo optične multispektralne visoko ločljive posnetke za opazovanje zemeljskega površja (posnetki o vegetaciji, pokrovnost s prstjo, celinske vode, obalna območja, nadzor naravnih nesreč, pomoč pri reševanju). Sentinel-2A je bil izstreljen 23. junija 2015, 7. marca 2017 pa mu je sledil Sentinel-2B (ESA ..., 2018). Podatke o površju Zemlje obeh satelitov je mogoče pridobiti vsakih pet dni na ekvatorju, na višjih zemljepisnih širinah pa celo pogosteje. Satelita snemata pasove površja Zemlje s širino 290 km. Oba satelita sta utirjena na višini 786 km.

Sentinel-2 zajema podatke v 13 spektralnih kanalih, in sicer v štirih z ločljivostjo 10 m, šestih z ločljivostjo 20 m in treh z ločljivostjo 60 m (Drusch in sod., 2012). Za spremljanje fenološkega razvoja dreves so najpomembnejši kanali z ločljivostjo 10 m. To so modri (B2) s povprečno vrednostjo valovne dolžine kanala (*ang. central wavelength*) 490 nm, zeleni (B3) s povprečno vrednostjo 560 nm, rdeči (B4) s povprečno vrednostjo 665 nm in bližnji infrardeči kanal (B8) s povprečno vrednostjo 842 nm.

S spletnega portala Copernicus Open Access Hub (ESA, 2017) smo pridobili satelitske posnetke misije Sentinel-2 za območje Pahernikove posesti za devet dni v letu 2017, in sicer 9. marca, 1. aprila, 21. aprila, 1. maja, 20. junija, 20. julija, 26. avgusta, 5. oktobra in 15. oktobra. Posnetki so bili ortorektificirani s podpikselsko natančnostjo (kartografska projekcija UTM, elipsoid WGS 84). Posnetka z 9. marca in 1. aprila sta radiometrično in geometrijsko popravljena – nivo splošne predobdelave posnetkov L-1C (*top of atmosphere reflectance* - TOA). Preostali posnetki so radiometrično,

geometrijsko in atmosfersko popravljene – nivo splošne predobdelave posnetkov L-2A (*bottom of atmosphere reflectance* - BOA). Vrednosti NDVI, pridobljene iz posnetkov nivoja splošne predobdelave BOA, so višje od vrednosti NDVI TOA, razen pri manjših vrednostih NDVI (NDVI ..., 2019). Pri manjših vrednostih so vrednosti NDVI pridobljene iz satelitskih posnetkov nivoja splošne predobdelave BOA primerlivejše vrednostim TOA. Razlog je v dejstvu, da je atmosfera »modra«, kar pomeni, da je njen učinek največji pri kratkih valovnih dolžinah. Tako na odbojnost bližnjega infrardečega dela spektra manj vpliva atmosfera kot na vidno svetlobo. Atmosferska korekcija bolj zmanjša odbojnost rdečega dela spektra kot odbojnost bližnjega infrardečega dela spektra (NDVI ..., 2019). Satelitskih posnetkov za 9. marec in 1. april nismo posebej atmosfersko korigirali, ker izvirajo iz obdobja pred začetkom olistanja. Zato so na teh dveh posnetkih tudi vrednosti NDVI manjše.

Za vsak pridobljen posnetek smo v programskem okolju GIS ArcMap 10.5 (ESRI, 2017) z orodjem *Raster Calculator* izračunali normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI). NDVI je razmerje med razliko bližnjega infrardečega in rdečega kanala in njuno vsoto (Oštir, 2006). Pri misiji Sentinel-2 to predstavlja razmerje med razliko kanalov B8 in B4 in njuno vsoto. NDVI zavzame vrednosti med -1 in 1. Višje vrednosti pomenijo intenzivnejšo vegetacijo, negativne vrednosti pa predstavljajo površine brez vegetacije (Oštir, 2006). Na gozdnih površinah so vrednosti predvsem v rastni sezoni večje od 0,4 (Baird in sod., 2012).

Z združitvijo NDVI smo za posamezna obdobja z orodjem *Composite Bands* naredili kompozitni sliki. V prvi smo združili posnetke iz 21. aprila, 20. julija in 5. oktobra (kompozitna slika 1), v drugi pa iz 20. julija, 26. avgusta in 5. oktobra (kompozitna slika 2). V prvi kompozitni sliki so zajeta obdobja po začetku olistanja (zadnja dekada aprila), največjih vrednosti NDVI (julij) in jesenskega obarvanja listov (oktober). Primerjati smo želeli tudi, kako na kompozitni sliki vplivajo razlike med spomladanskim olistanjem (april, julij, oktober) in obdobjem največjih vrednosti poleti (julij, avgust, oktober).

Na podlagi normaliziranega digitalnega modela površja (Kobler, 2015), sestojne karte na Pregledo-

valniku podatkov o gozdovih (ZGS, 2018), ortofoto posnetkov (GURS, 2017a) smo razmejili čim bolj homogene sestoje prevladujočih drevesnih vrst na posesti (slika 2). Upoštevali smo sestojni sklep, drevesno sestavo in višino strehe sestoja. Za vsak razmejen homogen sestoj smo v programskem

okolju GIS ArcMap 10.5 (ESRI, 2017) z orodjem *Zonal Statistics as Table* pridobili povprečne vrednosti in standardne odklone vrednosti NDVI za vsa proučevana obdobja v letu 2017.

Skupna površina štirih testnih sestojev smreke je znašala 0,5 ha, petih bukve 1,1 ha in dveh



Slika 2: Lokacije homogenih sestojev, prikazane na izseku iz satelitskega posnetka satelita Sentinel-2 dne 21. 4. 2017: 1 – trije čisti sestoji bukve, 2 – čista sestoja bukve, 3 in 4 – po dva čista smrekova sestoja, 5 – smrekovo-jelova sestoja, 6 – smrekovo-jelov sestoj, 7 – macesnova sestoja, 8 – trije sestoji jelke in rdečega bora, 9 – sestoj jelke in smreke, 10 – sestoja smreke in rdečega bora in 11 – sestoja smreke in jelke. Zunanje meje zunanjih oddelkov, na katerih se razprostira Pahernikova posest, so označene oranžno (ESA, 2017).

Figure 2: Locations of homogenous stands, shown on the section of the satellite image by the Sentinel-2 satellite of April 21, 2017: 1 – three pure European beech stands, 2 – two pure European beech stands, 3 and 4 – two pure Norway spruce stands each, 5 – two Norway spruce and silver fir stands, 6 – a Norway spruce and silver fir stand, 7 – two European larch stands, 8 – three silver fir and Scots pine stands, 9 – a silver fir and Norway spruce stand, 10 – two Norway spruce and Scots pine stands, and 11 – two Norway spruce and silver fir stands. Outer boundaries of the forest management compartments, in which the Pahernik's estate is located, are marked orange (ESA, 2017).

macesna 0,3 ha. Na območju posesti nismo našli čistih jelovih sestojev. Pet izločenih sestojev jelke s smreko obsega skupno površino 1,5 ha, sestoj jelke s smreko pa 0,5 ha. V delih posesti v katastrskih občinah Orlica, Vuhred in Planina smo izločili tudi pet testnih sestojev smreke in rdečega bora s površino 1,4 ha. Na širšem območju Pahernikove posesti nismo našli večjih homogenih sestojev, kar nakazuje na malopovršinsko gospodarjenje z gozdovi na tamkajšnjem območju.

3 REZULTATI

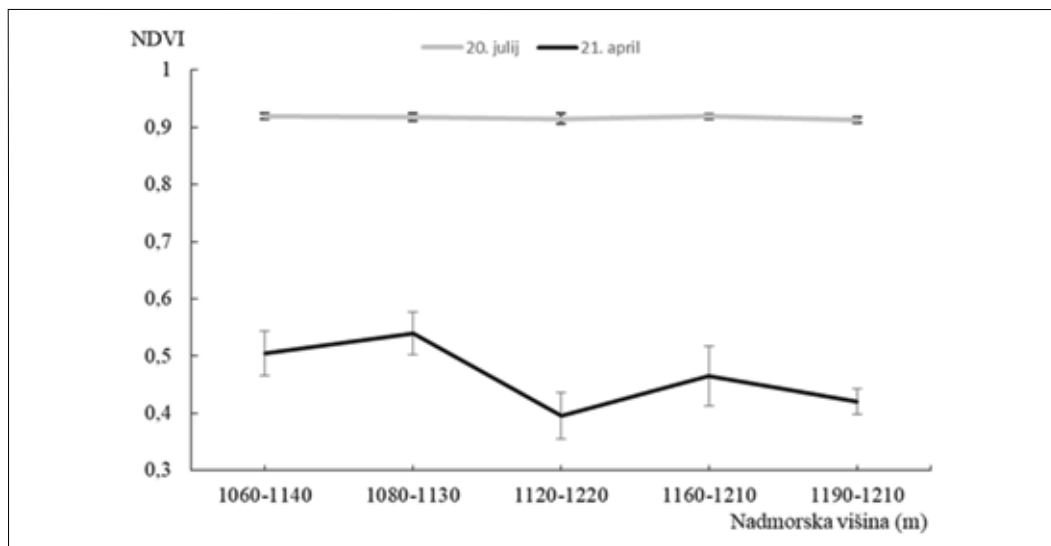
3 RESULTS

Najmanj razlik v vrednosti NDVI med posameznimi homogenimi sestoji bukve smo ugotovili poleti, in sicer konec julija in avgusta (sliki 3 in 4). Tedaj je bila tudi variabilnost vrednosti NDVI v posameznih sestojih najmanjša. Z višanjem nadmorske višine je bilo predvsem konec aprila, pa tudi v začetku oktobra, opazno manjšanje vrednosti NDVI (sliki 3 in 4). Le v sestoju na nadmorski višini od 1160 do 1210 m so višje vrednosti NDVI v teh dveh obdobjih, kot bi pričakovali.

Bukev ima najvišje vrednosti NDVI konec junija, julija in avgusta (slika 5). Opazne so velike razlike

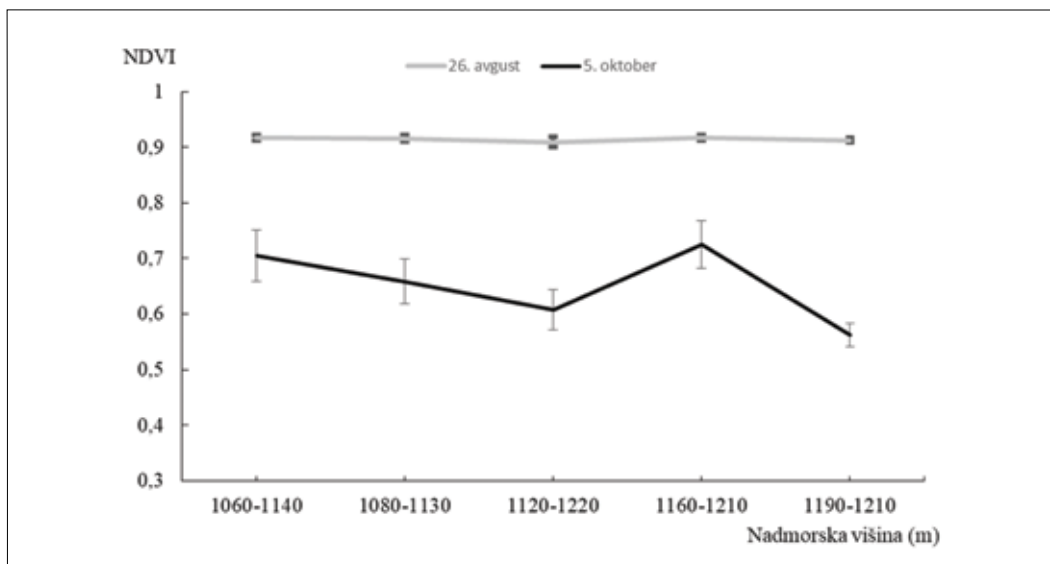
vrednosti NDVI med smreko in macesnom ter bukvijo konec aprila in v začetku oktobra (slika 5). Dokler spomladi po 1. maju v bukovih sestojih ni prišlo do zastrtja zeliščne in grmovne plasti z olistanjem bukve, je bila variabilnost vrednosti NDVI velika. Pri skoraj popolni zastrtosti tal s krošnjami bukovih dreves junija, julija in avgusta pa je variabilnost vrednosti NDVI pri večjih vrednostih NDVI zaradi fotosintetske aktivnosti listov bukve zelo majhna. Podobno kot spomladi je variabilnost vrednosti NDVI velika tudi na oktobrskih posnetkih. Pri sestojih smreke, smreke z jelko, jelke s smreko in smreke z rdečim borom so razlike v vrednosti NDVI skozi celotno proučevano obdobje zelo majhne (sliki 5 in 6), še največje razlike smo zaznali v začetku marca, aprila in oktobra.

Na obeh kompozitnih slikah je predvsem v zgornjem delu posesti v katastrski občini Hudi Kot opaziti razlike v sestojih s prevladujočo smreko in prevladujočo bukvijo (sliki 7 in 8). Sestoji bukve so na kompozitni sliki 1 sestavljeni iz NDVI iz konca aprila, julija in začetka oktobra, prikazani v zelenih odtenkih, smreke pa v rožnatih odtenkih. Modri odtenki na kompozitni sliki 1, predvsem v zgornjem delu posesti, ki otežujejo interpretiranje te kompozitne slike, so posledice zaznane zmrzali



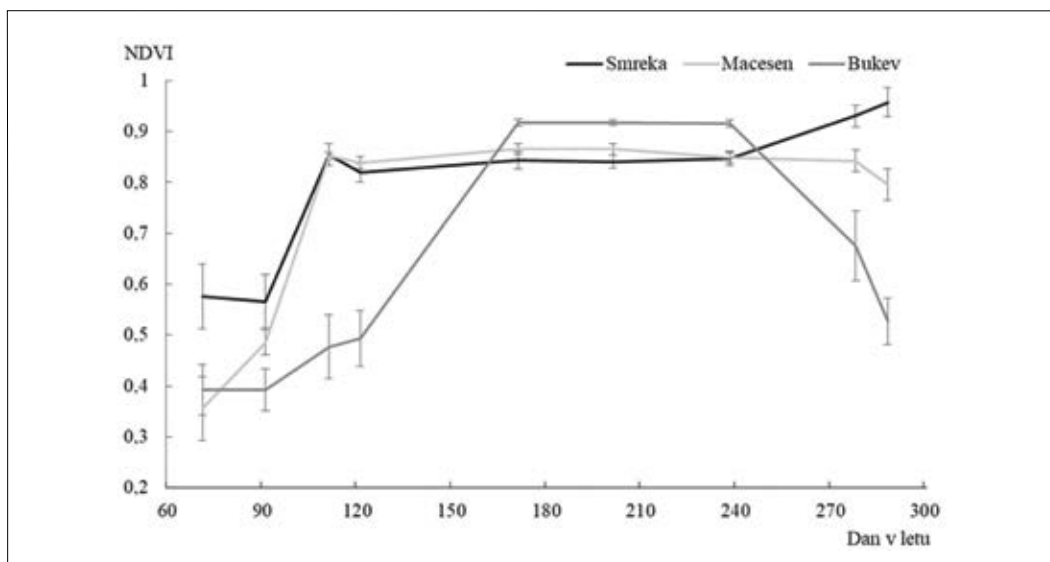
Slika 3: Vrednosti normiranega diferencialnega vegetacijskega (NDVI) indeksa aprila in julija 2017 v homogenih sestojih bukve z različno nadmorsko višino na območju Pahernikove posesti. Pri posameznem sestoju so označeni standardni odkloni.

Figure 3: The normalized difference vegetation index (NDVI) values in April and June 2017 in homogenous European beech stands with diverse elevation in the Pahernik's estate area. Standard deviations are marked at individual stands.



Slika 4: Vrednosti normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI) avgusta in oktobra 2017 v homogenih sestojih bukve z različno nadmorsko višino na območju Pahernikove posesti. Pri posameznem sestoji so označeni standardni odkloni.

Figure 4: The normalized difference vegetation index (NDVI) values in August and October 2017 in homogenous European beech stands with diverse elevation in the Pahernik's estate area. Standard deviations are marked at individual stands.



Slika 5: Vrednosti normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI), pridobljene iz homogenih sestojev smreke, macesna in bukve na območju Pahernikove posesti za devet časovnih obdobjev v letu 2017. Pri vsakem časovnem obdobju so prikazani tudi standardni odkloni. V izbranih sestojih smreke je nadmorska višina od 990 do 1120 m, bukve od 1060 do 1220 m, sestojev macesna pa 620 do 650 m.

Figure 5: The normalized difference vegetation index (NDVI) values, acquired from homogenous stands of Norway spruce, European larch and European beech in the Pahernik's estate area for nine time periods in the year 2017. At every time period, standard deviations are shown. The elevation of the selected Norway spruce stands is from 990 to 1120 m, the beech stands from 1060 to 1220 m, and larch stands from 620 to 650 m.

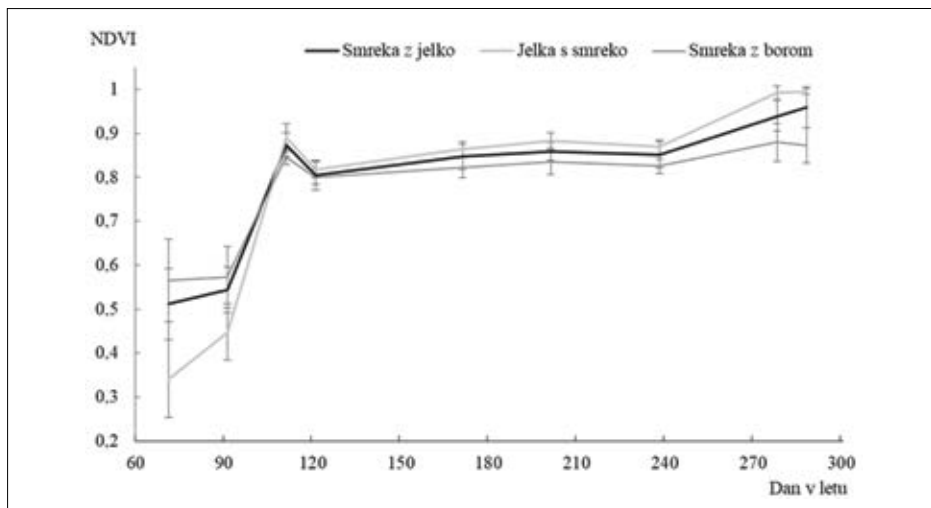
na posnetku iz 21. aprila. Na kompozitni sliki 2, sestavljeni iz NDVI iz konca julija, avgusta in začetka septembra, pa so v vrhnjem delu posesti v katastrski občini Hudi Kot sestoji s prevladujočo smreko prikazani v modrih odtenkih, sestoji s prevladujočo bukvijo pa v rumenih.

V jugozahodnem delu posesti v katastrski občini Orlica so na kompozitni sliki 1 vidni temnejši odtenki rožnate in na kompozitni sliki 2 vijolične barve. Tam so sestoji smreke z rdečim borom. Obe kompozitni sliki nakazujeta veliko pestrost drevesnih vrst na tamkajšnjem delu posesti, pa tudi na delu v katastrskih občinah Vuhred in Planina.

4 RAZPRAVA 4 DISCUSSION

Z uporabljeno vizualno analizo satelitskih posnetkov ne moremo jasno razlikovati različnih fenoloških dogodkov, še posebno, ker cvetenje dreves marsikdaj poteka skupaj s olistanjem. Z interpretacijo satelitskih posnetkov le ocenjujemo fenološki razvoj, o katerem sklepamo na podlagi razlik v spektralnem odboju vegetacije. Pri raziskovanju

možnosti razlikovanja dominantnih drevesnih vrst na Pahernikovi posesti s satelitskih posnetkov misije Sentinel-2 smo na širšem območju posesti s težavo našli homogene sestoje posameznih drevesnih vrst ali pa so bili le-ti premajhni. Veliko sestojev je bilo vrzelastih. Pri obeh izločenih homogenih sestojih macesna smo po terenskem ogledu ugotovili, da je v tem sestoju macesnu primešana tudi smreka. Njena primes pojasnjuje večje vrednosti NDVI macesna od bukve aprila, maja in oktobra. Jelka pa se na posesti sploh ne pojavlja v čistih sestojih, največkrat je prisotna skupaj s smreko in bukvijo. Težave pri izločanju testnih sestojev navajajo tudi Immitzer in sod. (2016) predvsem zaradi majhnih površin jelovih in macesnovih sestojev. Pri bukvi smo ugotovili manjšanje vrednosti NDVI na posnetkih 21. aprila in 5. oktobra z višanjem nadmorske višine. Manjše vrednosti NDVI v višje ležečih sestojih bukve je v omenjenem časovnem obdobju ocenil tudi Šprah (2019). Pri tem je izstopal le sestoj z nadmorsko višino od 1160 do 1210 m. Na terenskem ogledu smo ugotovili, da so v tem sestoju podstojne smreke (slika 9), kar večja vrednost NDVI, dokler se bukev

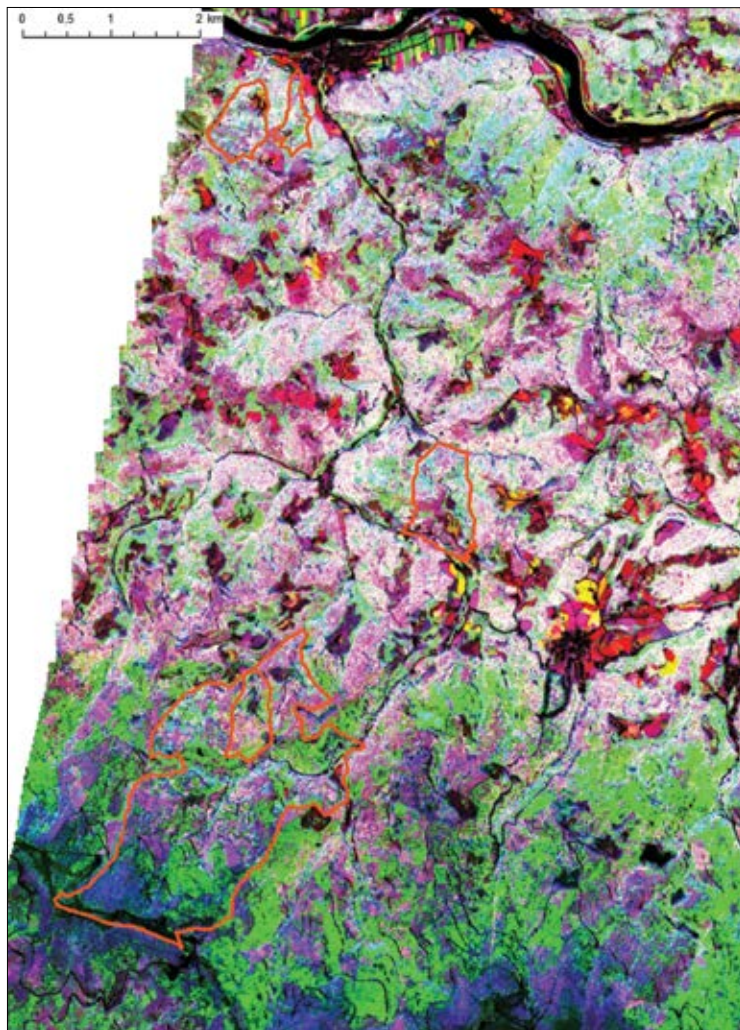


Slika 6: Vrednosti normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI), pridobljene iz mešanih sestojev za smreko in jelko, jelko in smreko ter smreko in rdeči bor na območju Pahernikove posesti za devet časovnih obdobjev v letu 2017. Pri vsakem časovnem obdobju so prikazani tudi standardni odkloni. Nadmorska višina izbranih sestojev smreke z jelko je od 480 do 990 m, jelke s smreko od 480 do 530 m, sestoj smreke z rdečim borom pa od 390 do 710 m.

Figure 6: The normalized difference vegetation index (NDVI) values, acquired from mixed stands of Norway spruce and silver fir, silver fir and Norway spruce, and Norway spruce and Scots pine in the Pahernik's estate area for nine time periods in the year 2017. At every time period, standard deviations are shown. The elevation of the selected Norway spruce and silver fir stands is from 480 to 990 m, silver fir and Norway spruce stands from 480 to 530 m, and Norway spruce and Scots pine stands from 390 to 710 m.

popolnoma ne olista. Vpliv podstojne vegetacije na vrednosti NDVI ugotavlja tudi Ozdemir (2014). Poznejši začetek olistanja oziroma fenofaze prvih listov na višjih nadmorskih višinah so ocenili Vilhar in sod. (2013). Prikazali so značilne razlike v času splošnega rumenenja bukve med ploskvami, ki so na različnih nadmorskih višinah in v različnih ekoloških regijah. Poznejše olistanje in trend hitrejšega rumenenja listov z višanjem nadmorske višine so v raziskavi prikazali Čufar in sod. (2012).

Čufar in sod. (2012) so na fenološki mreži z nadmorsko višino 55–1050 m ocenili povprečen začetek olistanja bukve od 104. dne do 134. dne v letu (od 14. aprila. do 13. maja) oziroma najprej v tem proučevanem obdobju od 85. dne v letu in najpozneje do 151. dne v letu. Vilhar in sod. (2013) so za obdobje od 2004 do 2011 na ploskvi, ki je na nadmorski višini 950 m, sicer v predalpski ekološki regiji ugotovili začetek fenofaze prvih listov v povprečju 134. dan v letu. Najprej se je v



Slika 7: Kompozitna slika 1, sestavljena iz vegetacijskih indeksov NDVI satelitskih posnetkov misije Sentinel-2 iz 21. aprila, 20. julija in 5. oktobra 2017. Zunanje meje zunanjih oddelkov, na katerih se razprostira Pahernikova posest, so označene oranžno.

Figure 7: Composite image 1, composed of NDVI vegetation indices of the Sentinel-2 mission satellite images of April 21, July 20, and October 5, 2017. Outer boundaries of the forest management compartments, in which the Pahernik's estate is located, are marked orange.

tem obdobju začela fenofaza olistanja 107. dan, najpozneje pa 154. dan v letu. Ugotovitve so primerljive z našimi, saj smo najvišje vrednosti NDVI pri testnih sestojih bukve na posesti ocenili po 121. dnevu v letu 2017. Tudi Studer in sod. (2007) so zapisali, da se vrednosti NDVI v listopadnih gozdovih na začetku rastle sezone hitro povečajo. A vseeno, Badeck in sod. (2004) opozarjajo, da je na satelitskih posnetkih v listopadnih gozdovih najprej mogoče zaznati zelenenje podstojne

vegetacije, lahko tudi nekaj tednov pred začetkom olistanja. Taka opozorila kažejo, da je potrebna previdnost pri interpretaciji vrednosti NDVI in primerjavi z rezultati fenoloških raziskav.

Vrednosti NDVI pri bukvi so se začele zmanjševati po 238. dnevu v letu 2017 (po 26. avgustu). Žal za območje Pahernikove posesti nismo pridobili nobenega primernege neoblačnega satelitskega posnetka iz septembra 2017, da bi z njim natančneje opredelili začetek zmanjševanja vrednosti



Slika 8: Kompozitna slika 2, sestavljena iz vegetacijskih indeksov NDVI satelitskih posnetkov misije Sentinel-2 iz 20. julija, 26. avgusta in 5. oktobra 2017. Zunanje meje zunanjih oddelkov, na katerih se razprostira Pahernikova posest, so označene oranžno.

Figure 8: Composite image 2, composed of NDVI vegetation indices of the Sentinel-2 mission satellite images of July 20, August 26, and October 5, 2017. Outer boundaries of the forest management compartments, in which the Pahernik's estate is situated, are marked orange.

NDVI, kar pomeni zmanjševanje fotosintetske aktivnosti bukke in s tem začetek rumenenja listov. Čufar in sod. (2012) so za bukev ocenili povprečen čas splošnega rumenenja listov bukke v Sloveniji med 276. in 302. dnevom v letu. Vilhar in sod. (2013) pa so na ploskvi, ki je na nadmorski višini 950 m, sicer v predalpski ekološki regiji, ugotovili povprečen začetek splošnega rumenenja 290. dan v letu (najprej 268. in najpozneje 306. dan v letu).

Na ploskvi v Pohorski ekološki regiji na nadmorski višini 1304 m so Vilhar in sod. (2013) ugotovili povprečen začetek fenofaze prvih iglic 168. dan v letu. Na območju Pahernikove posesti pa smo ugotovili veliko povečanje vrednosti NDVI že med 91. in 111. dnevom v letu 2017. Razlike lahko pojasnimo z dejstvom, da so naši testni sestoji smreke na nižji nadmorski višini (990 m do 1120 m) in z morebitnim ozelenjevanjem pritalne vegetacije v ne popolnoma strnjenih smrekovih sestojih, kot na to možnost opozarjajo Jönsson in sod. (2010). Pallerin in sod. (2012) prikazujejo nadmorsko višino kot glavni dejavnik za poznejši začetek fenofaze prvih iglic oziroma listov smreke, macesna, breze (*Betula pendula* Roth.) in velikega jesena (*Fraxinus excelsior* L.). Z višanjem nadmorske višine za 100 m se je ta fenofaza začela od 2,4 do 3,4 dni pozneje. Razlike lahko pojasnimo tudi z ugotovitvijo Jönssona in sod. (2010), da je med začetkom vegetacijske dobe in brstenjem smreke oziroma rdečega bora v borealnih gozdovih tudi zaradi taljenja snega mogoče opaziti znatno povečanje vrednosti NDVI.

Pri smreki in pri mešanih sestojih z jelko in rdečim borom smo ugotovili majhne sezonske razlike v vrednosti NDVI in nenavadno visoke vrednosti NDVI v začetku in sredini oktobra, ki jih ugotavljajo tudi Huemmrich in sod. (1999) v podobnem časovnem obdobju oziroma nekoliko pozneje pri iglavih v borealnih gozdovih Kanade. Konec novembra oziroma v začetku decembra pa nato ugotavljajo zmanjšanje vrednosti NDVI pri iglavih. Za območje Pahernikove posesti na žalost zaradi oblačnosti nismo pridobili nobenega primernega satelitskega posnetka iz novembra oziroma začetka decembra, da bi lahko prikazali morebitno zmanjšanje vrednosti NDVI. Višje vrednosti NDVI v jesenskem času pripisujejo spremembi v zenitnem kotu, ki je tedaj večji kot poleti. Tako bi lahko pojasnili tudi vrednosti

NDVI pri smreki in mešanih sestojih z jelko in rdečim borom na območju Pahernikove posesti.

Na podlagi fenoloških razlik je mogoče ocenjevati dominantne drevesne vrste z interpretacijo satelitskih posnetkov na območju Pahernikove gozdne posesti. Mogoče je ocenjevati bukev, macesen in smreko. Pri smreki se že pojavljajo omejitve, saj je na območju posesti veliko sestojev smreke in jelke, ki imajo podobne vrednosti NDVI. Same jelke pa na območju posesti ni mogoče ocenjevati, saj na Pahernikovi posesti nismo našli njenih sestojev. A vseeno je na kompozitnih slikah v zgornjem delu posesti v katastrski občini Hudi Kot mogoče razlikovati čiste sestoje smreke in bukke. Hladnik (2018) je ocenil, da je zaradi malopovršinskega načina gospodarjenja v slovenskih gozdovih težko pričakovati zanesljivo ocenjevanje vrstne sestave gozdnih sestojev s standardiziranimi postopki, ki bi jih hitro posploševali iz posameznih raziskovalnih objektov. Enako ugotavljamo tudi za gozdove na območju Pahernikove gozdne posesti. V prihodnosti bi bilo lahko zanimivo ocenjevanje razlik v fenološkem razvoju drevesnih vrst z brezpilotnimi letalniki in multispektralnimi kamerami, ki imajo mnogo večjo ločljivost kot satelitski posnetki, kot je bilo na primer na ravni krošnje že prikazano ocenjevanje vitalnosti na podlagi vrednosti NDVI pridobljenih s posnetkov z multispektralno kamero na brezpilotnem letalniku (Buras in sod., 2018).

5 POVZETEK

5 SUMMARY

In the article, we presented the possibilities for determining the prevailing tree species (European beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. (Karsten)), silver fir (*Abies alba* Mill.), European larch (*Larix decidua* Mill.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)) on the basis of phenological differences with the interpretation of the Sentinel-2 mission satellite images, acquired on the Copernicus Open Access Hub (ESA ..., 2017) portal. We analysed the images for nine days in the year 2017, i.e. for March 9, April 1, April 21, May 20, June 20, July 20, August 26, October 5, and October 15.

We calculated the normalized difference vegetation indices (NDVI) with the *Raster Calculator* tool in the GIS ArcMap 10.5 (ESRI, 2017). For certain homogenous stands of the prevailing tree species in the estate area, we acquired mean values and standard

deviations of NDVI values for all studied periods in year 2017 using *Zonal Statistics as Table* tool.

The fewest differences in the NDVI value between individual homogenous European beech stands were discovered in the summer, i.e. at the end of July and in August. In European beech stands, we also found a decrease of the vegetation index NDVI value on the images of April 21 and October 5 with increasing elevation, which we tie with later leaf-out and faster autumn leaf colouring of the beech leaves on higher elevations.

The European beech has the highest NDVI value at the end of June, in July and August. Large differences in NDVI between Norway spruce, European larch, and European beech are noticeable at the end of April and in the beginning of October. The variability of NDVI values was very high, as long as the European beech leafing offered no mulching of the herbal and shrub layer in the spring, after the 1st of May. In the conditions of a nearly full cover of the soil due to the European beech tree crowns in June, July and August, the variability of NDVI values at higher NDVI values is very low due to the photosynthetic activity of the European beech leaves. Similarly, as in the spring, variability of the NDVI values is high also on the images from October. In Norway spruce, Norway spruce and silver fir, silver fir and Norway spruce, and Norway spruce

and Scots pine stands, the differences in the NDVI value are very low throughout the entire studied period; the highest differences were observed in the beginning of March, April and October.

In the study area of the Pahernik's estate, it is possible to estimate the dominant tree species on the basis of phenological differences by interpreting satellite images; the silver fir, which does not form pure stands in the estate area, is excluded. We observed limitations in analyzing Norway spruce stands, since there are many mixed Norway spruce and silver fir stands with similar NDVI values in the estate area. Thus, it is possible to estimate phenological development of the prevailing tree species European beech, Norway spruce, and European larch in forest stands in the basis of the differences in the NDVI vegetation index.

6 ZAHVALA

6 ACKNOWLEDGEMENT

Raziskava je bila opravljena v okviru priprave magistrskega dela Anžeta Martina Pintarja, ki je v času študija na magistrskem študijskem programu druge stopnje Gozdarstvo in upravljanje gozdnih ekosistemov prejemal štipendijo Pahernikove ustanove. Zahvala velja tudi recenzentu in dr. Galu Kušarju za pregled prispevka in koristne pripombe ter predloge.



Slika 9: Homogen sestoj buke z nadmorsko višino od 1160 do 1210 m s podstojnimi smrekami v juniju 2018.
Figure 9: Homogenous European beech stand on elevation from 1160 to 1210 m with understory Norway spruces in June 2018.

7 VIRI

7 REFERENCES

- Badeck F. W., Bondeau A., Böttcher K., Doktor D., Lucht W., Schaber J., Sitch S. 2004. Responses of spring phenology to climate change. *New phytologist*, 162: 295–309.
- Baird R. A., Verbyla D., Hollingsworth T. N. 2012. Browning of the landscape of interior Alaska based on 1986–2009 Landsat sensor NDVI. *Canadian Journal of Forest Research*, 42: 1371–1382.
- Buras A., Schunk C., Zaitřäg C., Herrmann C., Kaiser L., Lemme H., Straub C., Taeger S., Gößwein S., Klemmt H. J. 2018. Are Scots pine forest edges particularly prone to drought-induced mortality? *Environmental Research Letters*, 13, 2: 1–13.
- Čufar K., De Luis M., Saz M., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. 2012. Temporal shifts in leaf phenology of beech (*Fagus sylvatica*) depend on elevation. *Trees - structure and function*, 26, 4: 1091–1100.
- Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of environment*, 120: 25–36.
- ESA 2017. Open Access Hub. 2017. Paris, European Space Agency <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (10. 12. 2017).
- ESA 2018. Copernicus observing the Earth. 2018. Paris, European Space Agency http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4 (27. 5. 2018).
- ESRI 2017. ArcGIS Desktop Release 10.5; Environmental Systems Research Institute: Redlands, CA, USA.
- GURS 2017. Grafični podatki o katastrskih občinah. 2017. Ljubljana, Geodetska uprava republike Slovenije. <https://egp.gu.gov.si/egp/> (20. 10. 2017).
- GURS 2017a. Ortofoto posnetki. 2017. Ljubljana, Geodetska uprava republike Slovenije.
- Hladnik D. 2018. Ocenjevanje razlik v fenološkem razvoju dreves v nižinskem poplavnem gozdu na podlagi satelitskih posnetkov. *Gozdarski vestnik*, 76, 4: 181–195.
- Huemmerich K. F., Black T. A., Jarvis P. G., McCaughy J. H., Hall F. G. 1999. High temporal resolution NDVI phenology from micrometeorological radiation sensors. *Journal of geophysical research*, 104, D22: 27935–27944.
- Immitzer M., Vuolo F., Atzberger C. 2016. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe. *Remote sensing*, 166, 8: 1–27.
- Jones H. G., Vaughan R. A. 2010. Remote sensing of vegetation. Principles, techniques, and applications. New York, Oxford University Press, 353 str.
- Jin S., Sader S. A. 2005. MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects. *Remote Sensing of Environment*, 99: 462–470.
- Jönsson A. M., Eklundh L., Hellström M., Barring L., Jönsson P. 2010. Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology. *Remote sensing of environment*, 114: 2719–2730.
- Kobler A. 2015. Normalizirani digitalni model površja. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije.
- NDVI (BOA) vs. NDVI (TOA). 2019. <https://feed.terramonitor.com/ndvi-boa-ndvi-toa/> (2. 8. 2019).
- Oštir K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Inštitut za antropološke in prostorske študije. Znanstveno raziskovalni center SAZU: 250 str.
- Ozdemir I. 2000. Linear transformation of imagery to minimize the effects of variability in understory to estimate percent tree canopy cover using RapidEye data. *GIScience & Remote sensing*, 51, 3: 288–300.
- Pellerin M., Delestrade A., Mathieu G., Rigault O., Yoccoz N. 2012. Spring tree phenology in the Alps: effects of air temperature, altitude and local topography. *European journal of forest research*, 131, 6: 1957–1965.
- Pintar A. M., Hladnik D. 2018. Strukturna pestrost gozdnih sestojev na Pahernikovi gozdni posesti. *Acta Silvae et Ligni*, 117: 1–16.
- Posestni načrt za gozdove Pahernikove ustanove 2014–2023. 2015. Slovenj Gradec, Zavod za gozdove Slovenije, Območna enota Slovenj Gradec: 90 str.
- Rommel T. K., Perera A. H. 2001. Fire mapping in a northern boreal forest: assessing AVHRR/NDVI methods of change detection. *Forest Ecology and Management*, 152: 119–129.
- Rozman A., Dakskobler I. 2015. Fitocenološka karta Pahernikovih gozdov nad Vuhredom in v Hudem Kotu na severnih pobočjih Velike Kope na Pohorju v merilu 1: 5000. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire (neobjavljeno).
- Studer S., Stöckli R., Appenzeller C., Vidale P. L. 2007. A comparative study of satellite and ground-based phenology. *International journal of biometeorology*, 51: 405–414.
- Šprah R. 2019. Ocenjevanje gozdnih ekotopov v gozdnogospodarski enoti Lovrenc na Pohorju: magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, 54 str.
- Vilhar U., Skudnik M., Simončič P. 2013. Fenološke faze dreves na ploskvah intenzivnega monitoringa gozdov v Sloveniji. *Acta Silvae et Ligni*, 100: 5–17.
- ZGS 2018. Pregledovalnik podatkov o gozdovih. 2018. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije. <http://prostor.zgs.gov.si/pregledovalnik/> (18. 2. 2018).