



PREDHODNO VREDNOTENJE OBSTOJEČIH MODELOV ZA SIMULIRANJE ZALOG OGLJIKA

LIFE IP CARE4CLIMATE (LIFE17 IPC/SI/000007)



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR



GOZDARSKI INŠTITUT SLOVENIJE
SLOVENIAN FORESTRY INSTITUTE

Predhodno vrednotenje obstoječih modelov za simuliranje zalog ogljika

C8.1: Vzpostavitev sistema spremljanja emisij in ponorov v sektorju LULUCF

Avtorji: Boštjan Mali, Gal Kušar

Uredniki: Boštjan Mali

Ljubljana, 10. december 2021

LIFE IP CARE4CLIMATE (LIFE17 IPC/SI/000007) je integralni projekt, sofinanciran s sredstvi evropskega programa LIFE, sredstvi Sklada za podnebne spremembe in sredstvi partnerjev projekta.

Za več informacij obiščite www.care4climate.si.

Vsak partner v projektu LIFE IP CARE4CLIMATE je odgovoren za strokovnost vsebin in sporočila v dokumentih in stališčih, ki jih pripravi oziroma izrazi v okviru navedenega projekta.

Predhodno vrednotenje obstoječih modelov za simuliranje zalog ogljika

Povzetek

V zdajšnjem času se zdijo modeli za simuliranje zalog ogljika neizogiben pripomoček pri oblikovanju politik in odločanju o ukrepih za doseganje podnebnih ciljev. Pregled modelov je bil izveden z raziskovanjem strokovne in znanstvene literature. Izmed številnih je bilo izbranih devet modelov za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi in štirje za simuliranje zaloge ogljika v tleh. V prvem delu so bili modeli na kratko opisani, predstavljene so bile njihove glavne značilnosti. V drugem delu je bilo opravljeno vrednotenje modelov na podlagi rangiranja po modelu tehtane vsote glede na pomembnost posameznega merila oziroma presoje, kot so zahtevani vhodni podatki, vključenost okoljskih spremenljivk, utemeljenost in kakovost algoritmov in podobno. Med izbranimi modeli nadzemne biomase so se glede na vrednotenje najbolje izkazali modeli CBM, CALDIS in MASSIMO, med talnimi modeli pa modela CENTURY in Yasso. Na podlagi značilnosti modelov, njihovih prednosti in vrednotenja ocenjujemo, da sta modela CBM in Yasso najprimernejša za uporabo v Sloveniji. Širšo uporabo modelov pri nas še vedno omejujeta razpoložljivost podatkov ter zmogljivost človeških virov in znanja.

Ex-ante evaluation of existing models to simulate carbon stocks

Abstract

At present, carbon simulation models appear to be an indispensable tool in policy making and decision making on measures to achieve climate goals. A review of the models was conducted through a search of the technical and scientific literature. From the set of models, nine models for simulating carbon stock in aboveground biomass and four models for simulating carbon stock in soil were selected. In the first part, the models were briefly described and their main features were presented. In the second part, the evaluation of the models was based on a ranking using the weighted sum model according to the importance of criteria such as input data required, inclusion of environmental variables, validity and quality of algorithms, etc. After evaluation, CBM, CALDIS and MASSIMO models were found to be the best among the selected models of above ground biomass, while CENTURY and Yasso models were the best among the soil models. Based on the characteristics of the models, their advantages and their evaluation, we estimate that the CBM and Yasso models are the most suitable for use in Slovenia. The wider application of models in our country is still limited by the availability of data and the capacity of human resources and knowledge.

Kazalo vsebine

1	Uvod	8
2	Pregled modelov	9
2.1	Modeli za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi	9
2.1.1	Opis izbranih modelov	11
2.1.1.1	CO2FIX.....	11
2.1.1.2	EFISCEN	12
2.1.1.3	CBM.....	13
2.1.1.4	WEHAM.....	14
2.1.1.5	EFDM.....	15
2.1.1.6	CALDIS	16
2.1.1.7	MASSIMO	17
2.1.1.8	FORMIT-M.....	18
2.1.1.9	CRAFT	19
2.2	Modeli za simuliranje zaloge ogljika v tleh.....	20
2.2.1	Opis izbranih modelov	21
2.2.1.1	CENTURY	21
2.2.1.2	CANDY	21
2.2.1.3	RothC.....	22
2.2.1.4	Yasso	23
3	Vrednotenje modelov	24
3.1	Primerjava značilnosti modelov.....	24
3.2	Rangiranje modelov	29
4	Primernost uporabe modelov v Sloveniji	32
4.1	Ocena primernosti modelov za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi	32
4.2	Ocena primernosti modelov za simuliranje zaloge ogljika v tleh	32
5	Viri	34

Kazalo preglednic

Preglednica 1: Izbrani modeli za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi	10
Preglednica 2: Model CO2FIX.....	11
Preglednica 3: Model EFISCEN	12
Preglednica 4: Model CBM.....	13
Preglednica 5: Model WEHAM.....	14
Preglednica 6: Model EFDM	15
Preglednica 7: Model CALDIS.....	16
Preglednica 8: Model MASSIMO.....	17
Preglednica 9: Model FORMIT-M.....	18
Preglednica 10: Model CRAFT.....	19
Preglednica 11: Izbrani modeli za simuliranje zaloge ogljika v tleh.....	20
Preglednica 12: Značilnosti modelov nadzemne biomase	24
Preglednica 13: Možnosti napovedovanja modelov nadzemne biomase	25
Preglednica 14: Projekcije glavnih modulov modelov nadzemne biomase	26
Preglednica 15: Zunanji vplivni dejavniki modelov nadzemne biomase.....	27
Preglednica 16: Značilnosti talnih modelov	27
Preglednica 17: Skladišča talnih modelov	28
Preglednica 18: Zahtevani minimalni vhodni podatki talnih modelov	29
Preglednica 19: Vrednotenje modelov za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi....	30
Preglednica 20: Vrednotenje modelov za simuliranje zaloge ogljika v tleh	30
Preglednica 21: Rangiranje modelov.....	31

Seznam kratic in okrajšav

Kratica/simbol	Beseda ali besedna zveza	Slovenski prevod
CANDY	<i>Carbon And Nitrogen DYnamics</i>	dinamika ogljika in dušika
CBM	<i>Carbon Budget Model</i>	model ogljičnega proračuna
CFS	<i>Canadian Forest Service</i>	Kanadska gozdarska služba
CRAFT	<i>CaRbon Accumulation in ForesTs</i>	akumulacija ogljika v gozdovih
EFDM	<i>European Forestry Dynamics Model</i>	evropski model gozdarske dinamike
EFI	<i>European Forest Institute</i>	Evropski inštitut za gozdove
EFISCEN	<i>European Forest Information SCENario model</i>	evropski model ocene verjetnosti na podlagi informacij o gozdovih
EU	<i>European Union</i>	Evropska unija
FORMIT	<i>project "FORest management strategies to enhance the MITigation potential of European forests"</i>	projekt "Strategije upravljanja gozdov za povečanje blažitvenega potenciala evropskih gozdov"
FRL	<i>forest reference level</i>	referenčna vrednost za gospodarjenje z gozdovi
GPP	<i>gross primary production</i>	bruto primarna produkcija
IOM	inert organic matter	inertna organska snov
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>	Medvladni forum za podnebne spremembe
JRC	<i>Joint Research Centre</i>	skupni raziskovalni center
LAI	<i>leaf area index</i>	indeks listne površine
LULUCF	<i>land use, land use change and forestry</i>	raba zemljišč, sprememba rabe zemljišč in gozdarstvo

MASSIMO	<i>MAnagement Scenario Simulation Model</i>	simulacijski model predvidevanja upravljanja
NFI	<i>national forest inventory</i>	nacionalna gozdna inventura
NPP	<i>net primary production</i>	neto primarna produkcija
PAR	<i>photosynthetically active radiation</i>	fotosintetsko aktivno sevanje
RCP	<i>representative concentration pathway</i>	vzorčna koncentracijska pot
SDI	<i>stand density index</i>	indeks gostote sestoja
SLU	<i>Sveriges lantbruksuniversitet</i>	Švedska univerza za kmetijske vede
UNFCCC	United Nation Framework Convention on Climate Change	Okvirna konvencija Združenih narodov o spremembi podnebja
VPD	vapour pressure deficit	primanjkljaj parnega tlaka
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodell	model razvoja gozdov in model oskrbe z lesom

1 Uvod

Informacije o dinamiki gozdov na različnih prostorskih ravneh so ključnega pomena za razumevanje vzorcev sprememb (trendov) zaloge ogljika. Ta se lahko zelo spremeni, če na ekosistem vplivajo dejavniki oziroma procesi, kot so osnovanje gozda, rast, posek, mortaliteta ali naravne motnje. Po eni strani gozdovi skladiščijo velike količine ogljika, ki ga v procesu fotosinteze vežejo v biomaso. Po drugi strani so lahko vir emisij, če se z njimi ne gospodari trajnostno (npr. dejanski posek je večji od možnega poseka) oziroma so predmet velikopovršinskih sprememb v rabi zemljišč (npr. krčenje tropskih gozdov). Zato so informacije o zalogah ogljika koristne za upravljavce gozdov, odločevalce in vladne organizacije, ki imajo interes za blaženje in prilagajanje podnebnim spremembam.

Skupna zaloga ogljika v gozdu je vsota zaloge ogljika v živi nadzemni in podzemni biomasi, odmrllem lesu, opadu in organskem ogljiku v mineralnem delu tal. Med temi imata največjo zalogo ogljika živa nadzemna biomasa in tla, ki na globalni ravni vsebujejo celo več kot 50 % skupne zaloge ogljika (Jobàggy in Jackson, 2000), kar je približno tri- do štirikrat več kot je zaloga ogljika v vegetaciji (Bispo et al., 2017). Zato niti ni čudno, da je bilo največ modelov za simuliranje zalog ogljika razvitih prav za ti dve skladišči.

Z naraščajočimi obvezami mednarodnih dogovorov (npr. Pariški sporazum), ki od držav zahtevajo spremljanje zalog in sprememb zalog ogljika v gozdovih ter poročanje o njih, so modeli razvoja gozdov na državni ravni postali ključno orodje v primerjavah in zavzemanju stališč do novih podnebnih ciljev, še posebej v okviru podnebne in energetske politike EU (Böttcher et al., 2012). V obdobju 2021–2030 bodo emisije in ponori zaradi rabe zemljišč, spremembe rabe zemljišč in gozdarstva (LULUCF) vključeni v podnebne cilje EU, kar določa nedavno sprejeta uredba (Uredba LULUCF, 2018). Obračunavanje emisij in ponorov v sektorju LULUCF bo pravno zavezujoče – na gozdnih zemljiščih, s katerimi se gospodari, pa se bodo v obdobju 2021–2025 ti obračunavali glede na referenčno vrednost za gospodarjenje z gozdovi – FRL (Mali in Simončič, 2019).

Večina držav članic EU je svoje projekcije referenčnih vrednosti za gospodarjenje z gozdovi za obdobje 2021–2025 določila z uporabo modelov (Böttcher in Graichen, 2015). Ti modeli so vse bolj pomembni, saj z njimi lahko simuliramo razvoj zaloge ogljika oziroma oblikujemo projekcije ponorov in emisij toplogrednih plinov (TGP) glede na sprejete ukrepe in politike po različnih predvidevanjih. Do nedavnega Slovenija ni namenila veliko pozornosti modeliranju zalog ogljika na državni ravni, zaradi česar tudi ni bilo potreb po večjem naboru podatkov, ki se rabijo za zagon modelov in pripravo simulacij. Ne glede na to se različni modeli za simuliranje zalog ogljika v Evropi in drugje po svetu že dalj časa uporabljajo kot pripomoček pri sprejemanju odločitev in oblikovanju ciljev v okviru podnebnih načrtov in strategij.

2 Pregled modelov

2.1 Modeli za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi

Model razvoja gozdov je dinamična kvantitativna predstavitev gozda na kateri koli stopnji kompleksnosti, ki temelji na nizu podmodelov ali modulov, ki skupaj napovedujejo dinamiko gozda, kot je opredeljena z vrednostmi niza spremenljivk, značilnih za gozd v danem trenutku (Tomé in Faias, 2011). Na splošno se modeli razlikujejo po zasnovi, številu modulov in zahtevah glede vhodnih podatkov. Modeli običajno vključujejo module, ki se nanašajo na rast, način gospodarjenja, motnje, spremembe rabe zemljišč, povpraševanje (po lesu), ekonomiko in podobno. Najpomembnejši je rastni modul, saj določa, kako se spreminjajo vrednosti statičnih spremenljivk. Medtem ko rastni modul temelji na prirastnih krivuljah pri empiričnih modelih, ta modul sestavljajo različni algoritmi fizioloških in bioloških procesov v primeru procesnih modelov.

Med empiričnimi in procesnimi modeli obstaja nekaj bistvenih razlik, obe idejni zasnovi modelov pa imata svoje prednosti in slabosti. Glavne razlike med tema dvema idejnima zasnovama modeliranja razvoja gozdov lahko primerjamo po tipu povezav, celovitosti, vključitvi mehanizma, primarnem viru napak, negotovosti modela, zahtevanih podatkih, prostorskem okviru za umerjanje ter prostorskem skaliranju napovedi (Adams et al., 2013). Empirični modeli so enostavni in pogosto temeljijo na podatkih nacionalnih gozdnih inventur. Slabost empiričnih modelov je, da niso občutljivi na okoljske parametre, poleg tega pa veljajo le za gozdnogojitvene sisteme gospodarjenja, na katerih so bile v določenem obdobju opravljene meritve (Landsberg, 2003). Po drugi strani procesni modeli zahtevajo vrsto parametrov in vhodnih spremenljivk, kar je tudi glavni razlog, da so redko uporabljeni kot orodje na operativni ravni. Bolj zapletene procesne modele je težko kalibrirati, ker običajno vsebujejo veliko parametrov, značilnih za določeno območje in drevesno vrsto. Po drugi strani imajo zelo enostavni procesni modeli običajno nižje zahteve za umerjanje, vendar pogosto ne morejo ustrezno obravnavati zapletenosti gospodarjenja z gozdovi zaradi podnebnih sprememb (Seely et al., 2015).

Kompromisni pristop je vključen v hibridne modele, ki združujejo značilnosti empiričnih in procesnih modelov. Hibridni modeli temeljijo na postopkih, v katerih se empirični podatki, vneseni v model, uporabljajo za samoumerjanje vsaj nekaterih parametrov algoritma, povezanih z ekosistemskimi procesi (Kimmins et al., 2010).

Pregled modelov smo izvedli z raziskovanjem strokovne in znanstvene literature v podatkovnih zbirkah, kot so ScienceDirect, Springer Link, Taylor & Francis, Wiley idr. Poleg tega smo literaturo iskali tudi z iskalnikom Google in Google "učenjaki", pri čemer smo uporabili naslednje ključne besede in besedne zveze: "forest model", "growth model", "model of forest growth", "forest growth model", "simulator", "forest simulator", "forest growth modelling", "growth and yield modeling", "forest resource projection", "forest carbon budget", "projection of carbon stock" ter "forest inventory-based projection".

Iz množice modelov smo izbrali devet modelov razvoja gozdov, ki bi jih bilo možno uporabljati na državni ravni za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi. Ti modeli so: CO2FIX, CBM, WEHAM, EFISCEN, EFDM, CALDIS, MASSIMO, FORMIT-M in CRAFT. Večina izbranih modelov je empiričnih, izjema sta modela FORMIT-M in CRAFT, ki sta hibridna. Glavna merila za izbor so bila naslednja: model je mogoče uporabiti za simuliranje zaloge ogljika v živi nadzemni biomasi, vhodni podatki lahko temeljijo na podatkih nacionalne gozdne inventure, model je dobro opisan in ima recenziran vir, model je prostodostopen in zanj po možnosti obstajajo uporabniška navodila.

V nadaljevanju smo pripravili kratek opis izbranih modelov, vključno s pregledom glavnih modulov, zahtevanih vhodnih podatkov ter izhodov. Za izbrane modele smo v drugem koraku naredili primerjalno analizo, v kateri smo ovrednotili značilnosti modelov ter jih rangirali po različnih merilih. V zadnjem delu smo ocenili, kateri modeli se zdijo najprimernejši za uporabo v Sloveniji glede na analizo vrednotenja.

Preglednica 1: Izbrani modeli za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi

Model	Vir	Dostop
CO2FIX	Schelhaas et al., 2004	http://dataservices.efi.int/casfor/models.htm
EFISCEN	Schelhaas et al., 2007	https://github.com/EuropeanForestInstitute/efiscen
CBM	Kurz et al., 2009	https://www.nrcan.gc.ca/climate-change/impacts-adaptations/climate-change-impacts-forests/carbon-accounting/carbon-budget-model/13107
WEHAM	Rock et al., 2013	
EFDM	Packalen et al., 2014	https://github.com/ec-jrc/efdm
CALDIS	Ledermann et al., 2017	
MASSIMO	Stadelmann et al., 2019	
FORMIT-M	Härkönen et al., 2019	https://data.mendeley.com/datasets/344n6ts3tg/1
CRAFT	Le Noë et al., 2020	

2.1.1 Opis izbranih modelov

2.1.1.1 CO2FIX

Prva različica modela CO2FIX je bila razvita že v devetdesetih (Mohren et al., 1999). Model so nadgrajevali v okviru projektov CASFOR in CASFOR II, ki ju je deloma sofinancirala Evropska komisija in je prosto dostopen. Uporabiti ga je mogoče za ocenjevanje potenciala sekvestracije ogljika v gospodarjenih gozdovih, na pogozdenih površinah oziroma na območjih, kjer se izvaja tako imenovano agrogozdarstvo. Struktura modela, moduli ter navodila za uporabo so dobro opisali Schelhaas et al. (2004).

Preglednica 2: Model CO2FIX

Struktura modela	Vhodni podatki	Izhodni podatki
Biomasn modul	bruto letni prirastek debla (kot funkcija starosti drevesa ali sestoja – običajno iz prirastoslovnih tablic oziroma kot funkcija kohorte skupne in maksimalne nadzemne biomase), proizvodna sposobnost rastišča, stopnja mortalitete, jakost poseka, obrat listja, vej in korenin	prirast debla, listja, vej in korenin
Talni modul (model Yasso)	količina opada in odmrlega lesa, različni parametri (npr. podnebje, razgradnja)	skupna količina oz. sprememba količine organskega ogljika v opadu in odmrlem lesu ter organski snovi v mineralnem delu tal do globine 1 m
Modul za proizvode	biomasa deblovine in vejevine iz poseka (hlodovina, les za celulozo, sečni ostanki)	zaloga ogljika v lesnih proizvodih (žagan les, lesne plošče, papir)
Modul za bioenergijo	količina letno proizvedenega biogoriva, energijska vrednost biogoriv in fosilnih goriv, učinkovitost tehnologije bioenergije in fosilnih goriv, emisijski faktorji sedanjega in alternativnega goriva oz. tehnologije	zmanjšanje emisij v enotah toplogrednega plina
Finančni modul	diskontna stopnja, stroški, koristi	neto sedanja vrednost
modul za obračun ogljika	zaloga ogljika v času t_1 in t_2 , obdobje	sprememba zaloge ogljika izražena v ekvivalentih CO ₂

2.1.1.2 EFISCEN

Model EFISCEN so začeli razvijati na univerzi SLU na Švedskem konec osemdesetih let (Sallnäs, 1990). Razvoj modela je pozneje potekal na Evropskem inštitutu za gozdove (EFI), uporabljali pa so ga tudi drugje po Evropi (npr. na Finskem, v Nemčiji, Franciji, na Poljskem). Namenjen je modeliranju razvoja enodobnih gozdov, vendar so ga uporabili tudi za kvantifikacijo vplivov različnih praks za povečanje ponora ogljika (Schelhaas, 2007), kot tudi za pripravo projekcij ponora na ravni EU (Böttcher et al., 2012).

Glavni vhodni podatki običajno izvirajo iz nacionalne gozdne inventure. Staranje gozda simuliramo s premikanjem površine v višji starostni razred, rast pa s premikom površine v višji prostorninski razred. Predvidevanja v tem modelu se oblikujejo na podlagi sprememb različnih komponent, kot so: prihodnje potrebe po lesu, spremembe v površini gozda, spremembe stopnje rasti, načini gospodarjenja z gozdovi, premene gozdov po končnem poseku (Barreiro in Tomé, 2017).

Gre za matrični model, ki je dokaj fleksibilen, dobro opisan in prosto dostopen (Verkerk et al., 2016). Prirastne funkcije se običajno razvijejo na osnovi podatkov o prirastku, alternativno pa se lahko določijo tudi z uporabo donosnih tablic. V zadnjem desetletju je model doživel vrsto nadgradenj, ki se nanašajo na obdelavo podatkov, standardizacijo parametrov ter avtomatizacijo simulacijskih nastavitev.

Model vsebuje tudi talni modul, ki se nanaša na model Yasso (Liski et al., 2005). To je pogosto uporabljen model za simuliranje zaloge ogljika v gozdnih tleh, zlasti v Evropi. Model je bil razvit na Finskem, zato je treba parametre (npr. stopnja razgradnje opada) validirati za izboljšanje rezultatov simulacij.

Preglednica 3: Model EFISCEN

Struktura modela	Vhodni podatki	Izhodni podatki
Matrični simulator	površina gozdov po gozdnih tipih, povprečna lesna zaloga in letni ali bruto neto prirastek po starostnih razredih za vsak gozdni tip, podatki o režimu redčenj in končnih posekov, parametri za prirastne funkcije, mortaliteta kot delež lesne zaloge	lesna zaloga, prirastek, posek, površina gozdov, naravna mortaliteta, odmrli les
Ogljični modul	funkcije porazdelitve biomase	zaloga ogljika v živi in odmrli biomas
Talni modul (model Yasso)	količina opada in odmrlega lesa, različni parametri (npr. podnebje, razgradnja)	skupna količina oz. sprememba količine organskega ogljika v opadu in odmrlem lesu ter organski snovi v mineralnem delu tal do globine 1 m

2.1.1.3 CBM

Model CBM so začeli razvijati v Kanadi že v devetdesetih letih, za njegov razvoj pa ima največ zaslug Werner Kurz s Kanadske gozdarske službe (CFS). Z modelom lahko simuliramo zaloge ogljika v gozdovih na sestojni, krajinski in državni ravni (Kurz et al., 2009). Za simulacijo rasti so ključne prirastne krivulje, ki jih je možno povzeti po prirastoslovnih tablicah ali za posamezne sestoje oziroma gozdne tipe razviti na osnovi inventurnih podatkov. Model je bil prvotno namenjen modeliranju enodobnih gozdov, kar pomeni, da je treba razpolagati s podatki o starosti sestojev.

V modelu je mogoče upoštevati spremembe rabe tal in različne vrste motenj, kot so ujme, gradacije lubadarjev in požari. Model je bil uporabljen povsod po svetu, od leta 2007 pa ga uporablja tudi skupno raziskovalno središče (JRC) Evropske komisije v Ispri. Model je prosto dostopen, prilagodljiv in usklajen s smernicami dobre prakse (IPCC). Poleg tega CFS neprekinjeno pripravlja posodobitve modulov ter organizira vsakoletne izobraževalne delavnice in treninge. Z določenimi predvidevanji je model mogoče uporabiti tudi za raznodobne gozdove, kar je bilo predstavljeno na primeru Italije (Pilli et al., 2013).

Preglednica 4: Model CBM

Struktura modela	Vhodni podatki	Izhodni podatki
Rastni modul	prirastne krivulje (opredeljene kot podatkovni pari starosti sestoja in lesne zaloge sestoja)	lesna zaloga, prirastek
Modul za posek	stopnja poseka (količina, površina ali delež evidenc o sestojih)	posek
Podatki o gozdovih	podatkovni klasifikatorji (identifikator sestoja, administrativne enote, ekološke regije, lastništvo), atributi sestoja (površina, starost, drevesna sestava, gozdni tip, lesna zaloga, vrsta nedavnih motenj)	lesna zaloga, starostna struktura gozdov, starostni razredi
Konverzija volumna v biomasa in zalogo ogljika	podatki o volumnu nadzemne biomase, parametri za konverzijske faktorje	biomasa po skladiščih, zaloga ogljika in sprememba zaloge ogljika po skladiščih
Motnje	površina, prizadeta zaradi motnje, delež skladišča, ki prehaja v drugo skladišče, atmosfero ali lesne proizvode	površina
Spremembe rabe zemljišč	podatki o krčitvah in pogozditvah	površina krčitev in pogozditev
Podatki o opadu in razgradnji	parametri za stopnjo razgradnje	

2.1.1.4 WEHAM

Model WEHAM je bil razvit v devetdesetih letih na inštitutu za raziskave gozdov v Baden-Württembergu. Uporablja se kot orodje za ocenjevanje gozdnih virov na državni ravni, za presojo trajnosti ter različne namene ekološkega, ekonomskega in političnega načrtovanja. Model obsega tri glavne komponente modulov, in sicer za rast, gospodarjenje in razvrščanje lesnih sortimentov.

Rastni modul napoveduje prsni premer in višine dreves na podlagi podatkov o debelinskem prirastku, ki se izračunajo v okviru NFI (Kändler in Riemer, 2017). Projekcija posameznega drevesa je povezana s svojo rastno krivuljo, ki je značilna, vrstno specifična, in odvisna od trenutnega prsnega premera in starosti drevesa. Podatki o višini dreves se ne zahtevajo, temveč so izračunani iz tarifnih funkcij, pri čemer je vhodni podatek prsni premer. Modul za gospodarjenje obsega gojitvene ukrepe na osnovi parametrov, ki določajo čas ter intenziteto redčenj in končnih posekov. Ti so odvisni od drevesne vrste, starosti in razsežnosti drevesa. Intenziteta redčenj je odvisna od donosnih tablic, ki jih lahko zagotovi uporabnik. Možna je tudi simulacija razvoja brez ukrepanja, pri čemer se predvideva (naravno) redčenje po konceptu indeksa SDI glede na prilagojeno Reinekejevo pravilo (Sterba, 1987).

Prednost modela je ta, da vsebuje modul za razvrščanje volumna hlodovine, pri čemer se izloči količina skorje. Podobno kot pri drugih empiričnih modelih, ki temeljijo na rasti posameznih dreves, je tudi pri modelu WEHAM možno naknadno agregiranje rezultatov po ploskvah, sestojih, regijah ali deželah ter glede na drevesne vrste, starostne razrede in njihove kombinacije. Splošnih pogojev, kot so podnebje, izbor drevesnih vrst ali območja gozdov, z zakonskimi omejitvami izkoriščanja ni mogoče parametrizirati. Model WEHAM izključuje tudi ekonomske parametre, tehnične pogoje za sečnjo (npr. naklon, gostota gozdnih cest) in mortaliteto dreves.

Nova različica modela omogoča posebej oceno zalog ogljika in ponora v nadzemni biomasi ter biomase poseka v skladu z metodami za potrebe poročanja UNFCCC. Dolžina projekcij je omejena na 40 let, saj ocena verjetnosti ne predvideva spremembe rastnih pogojev, gojitvenih ukrepov ali ekonomskih ter družbenopolitičnih okvirnih pogojev.

Preglednica 5: Model WEHAM

Struktura modela	Vhodni podatki	Izhodni podatki
Rastni modul	prsni premer, starost (prirastne krivulje po drevesnih vrstah), funkcija vzorca sprememb (trenda)	lesna zaloga, prirastek
Modul za gospodarjenje	intenziteta redčenj in končnih posekov (čas, jakost), proizvodna doba, ciljni premer	posek
Modul za razvrščanje lesnih sortimentov	drevesna vrsta, volumen drevesa s skorjo	les za prodajo – lesni sortimenti (hlodovina, lesna vlakna)

2.1.1.5 EFDM

Model EFDM je rezultat skupnega sodelovanja JRC in konzorcija mnogih evropskih držav, ki so predložile podatke nacionalnih gozdnih inventur. To je matrični model, ki temelji na Markovskih verigah, določajo pa ga kombinacije dejavnikov in delovanj ter njihove ustrezne prehodne verjetnosti. V praksi obstaja nabor prehodnih matrik, po ena na vsako (fiksno) kombinacijo dejavnikov. Poleg tega se v modelu verjetnosti prehoda kombinirajo z verjetnostmi pogojnih dejavnosti. Kot rezultat imamo matriko prehoda na kombinacijo dejavnikov in na dejavnost. Model je bil razvit kot možnost za usklajeno modeliranje vseevropske gozdne ocene verjetnosti (Schelhaas et al., 2007).

Vhodni podatki so običajno pridobljeni iz nacionalnih gozdnih inventur, pri čemer je treba podatke združiti na osnovi podatkov iz vzorčnih ploskev. Predvidevanja glede verjetnosti pojavov se določijo za naslednje tri dejavnosti: brez ukrepanja, redčenja in končni posek. Model EFDM je sorazmerno preprost, prilagodljiv, prosto dostopen in odprtokoden (programski jezik R) z možnostjo geografskih sklicev na podatke, odvisno od opredelitve enot za modeliranje (Packalen et al., 2014).

Model so prvotno testirale Avstrija, Finska, Francija in Portugalska, nato pa tudi Slovenija, in sicer v okviru pogodbe z JRC (Skudnik in Mali, 2015). Nedavno je bil model EFDM posodobljen v različico, ki lahko simulira razvoj raznodobnih gozdov, vendar so zanj potrebna nadaljnja testiranja (Sallnäs et al., 2015). Prednost modela je ta, da se zanj zagotavlja krepitev zmogljivosti (npr. centra JRC z vidika organiziranja delavnic in treningov), posebej za države, ki nimajo razvitih svojih modelov. Poleg tega so na spletu dostopna gradiva z navodili in dodatne informacije.

V prihodnosti bi bilo treba model nadalje razvijati za obvladovanje bolj zapletenih naravnih motenj ter s tem povezanih možnih vplivov podnebnih sprememb (Packalen et al., 2014).

Preglednica 6: Model EFDM

Struktura modela	Vhodni podatki	Izhodni podatki
Klasifikacija stanja (gozdov) v prostoru	porazdelitev lesne zaloge po volumnu ali številu dreves/ha, drevesna sestava, rastiščni razred, lastništvo	kombinacije dejavnikov
Začetno stanje	starost in lesna zaloga ali število dreves in lesna zaloga po kombinacijah dejavnikov	lesna zaloga
Verjetnosti prehoda za gozdove brez gospodarjenja	vhodni parametri – ocena iz podatkov NFI	
Verjetnosti prehoda za dejavnosti (redčenja, končni poseki)	vhodni parametri – ocena iz podatkov NFI	

2.1.1.6 CALDIS

V Avstriji so bili modeli razvoja gozdov razviti zaradi spreminjajočih ravninskih pogojev in omejenih možnosti uporabe donosnih tablic, ki so najbolj uporabne v čistih enodobnih gozdnih sestojih. Na podlagi podatkov NFI je bil v devetdesetih letih razvit model PROGNAUS, ki se je pozneje nadgradil v model CALDIS (Ledermann et al., 2017). Glavne komponente vključujejo module za prirastek temeljnice, višinski prirastek, vrst, posek in mortaliteto, poleg tega pa tudi talni modul. Modul za prirastek deluje neodvisno od starosti in napoveduje prirastek neposredno.

Prednost modela je ta, da se lahko uporablja za mešane enodobne in raznodobne sestojne upoštevajoč drevesne vrste in tipe redčenj ter strategij poseka, ki so v Avstriji. Model CALDIS ima podobne module kot PROGNAUS in zahteva osnovne podatke posameznega drevesa, kot so drevesna vrsta, prsni premer, višina in dolžina krošnje, ter druge podatke na ravni ploskve, kot so temperatura, padavine, naklon, relief, vrsta tal in podobno. Model CALDIS se od modela PROGNAUS razlikuje v tem, da je občutljiv na podatke o spremembi podnebja. Prednost modela CALDIS je ta, da je bilo umerjanje narejeno na daljšem časovnem nizu podatkov, poleg tega pa so bile izvedene tudi nekatere izboljšave same strukture modela (Kindermann, 2010).

Preglednica 7: Model CALDIS

Struktura modela	Vhodni podatki	Izhodni podatki
Modul za prirastek temeljnice	temeljnica, prsni premer, število dreves/ha, velikost krošnje, lesna zaloga	lesna zaloga, prirastek
Modul za višinski prirastek	višina drevesa	
Modul za vrst	značilnosti drevesa, sestoja in rastišča	ocena količine vraslih dreves
Modul za posek	drevesna sestava, debelinski razredi, jakost poseka (količina)	posek
Modul za sanitarni posek in mortaliteto	značilnosti drevesa, sestoja in rastišča, podnebni parametri, hitrost vetra	ocena količine za posek
Okoljski parametri	nadmorska višina, naklon, ekspozicija, relief, talni tip, vlažnost tal, vsota letne temperature zraka nad 3 °C, letna količina padavin, vsota temperature zraka in padavin v rastni sezoni	
Talni modul (model Yasso)	količina opada in odmrlega lesa, različni parametri (npr. podnebje, razgradnja)	skupna količina oz. sprememba količine organskega ogljika v opadu in odmrlem lesu ter organski snovi v mineralnem delu tal do globine 1 m

2.1.1.7 MASSIMO

V Švici za pripravo predvidevanj razvoja gozdov uporabljajo model MASSIMO, ki je bil razvit na podlagi podatkov nacionalne gozdne inventure konec devetdesetih. Potrebe po oblikovanju predvidevanj razvoja gozdov so se pojavile predvsem zaradi ocenjevanja razpoložljivosti lesa, zaloge ogljika in sonaravnosti gozdarstva (Fischer et al., 2017).

Osnovni moduli zajemajo rast, motnje ter posek in (naravno) mortaliteto, pri čemer so simulacije mogoče za enodobne in raznodobne gozdove. Model predvideva razvoj rasti dreves s posodabljanjem informacij o prsnem premeru na ravni posameznega drevesa za vsa rastišča. Biomasa se ocenjuje z uporabo alometričnih modelov na podlagi ocene prsnega premera, ki služi kot napovedovalna spremenljivka (Thürig in Herold 2013). Za drevesa s premerom, večjim od 12 cm, lahko ocenimo pet različnih sestavnih delov drevesa, in sicer vejice, veje, deblo, panj in korenine. S seštevkom (agregatom) ocen volumna za posamezna drevesa pridobimo oceno lesne zaloge, prirastka in izgub za sestoj. Poleg tega ima model dva podmodula, in sicer za vrast in prirastek po redčenjih.

Prednost modela je ta, da je bil razvit s podatki NFI na sistematični mreži za vse vrste gozdov v Švici, s čimer se domneva, da so napovedi statistično reprezentativne. Kljub temu model MASSIMO ne upošteva morebitnih okoljskih, ekonomskih in socialnih sprememb, saj temelji na čisto empiričnem načinu obravnave (Stadelmann et al., 2019). Nejasne so tudi domneve o rasti dreves s premerom, manjšim od 12 cm, saj model uporablja enak modul kot za drevesa s premerom večjim od 12 cm, kar lahko vodi v bias. Slabost modula za motnje je ta, da lahko upošteva le vetrolome, ne pa tudi drugih naravnih motenj (npr. izbruhi podlubnikov). Medtem ko se redčenje v modelu lahko nadomesti (potencialno kompenzira) s podcenjeno stopnjo mortalitete, je lahko ta še vedno podcenjena v ocenah verjetnosti, kjer je intenziteta gospodarjenja z gozdovi majhna oziroma gospodarjenja ni, na primer v gozdnih rezervatih (Temperli et al., 2017). V prihodnje je pričakovati nadgradnjo modela tako, da bo občutljiv na okoljske spremembe (npr. sprememba temperatur) ter vplive mešanih gozdov zaradi večjih ekonomskih in ekoloških koristi.

Preglednica 8: Model MASSIMO

Struktura modela	Vhodni podatki	Izhodni podatki
Rastni modul	prсни premer, temeljnica	lesna zaloga, prirastek
Modul za motnje	vhodni parametri – ocena iz podatkov NFI	
Modul za posek in mortaliteto	proizvodna doba, ocena izgub iz podatkov NFI	količina posekanih in odmrlih dreves
Podmodul za pomlajevanje (vrast)	število dreves s premerom, manjšim of 12 cm	lesna zaloga, prirastek
Podmodul za prirastek po redčenjih	vhodni parametri – ocena iz podatkov NFI	lesna zaloga, prirastek

2.1.1.8 FORMIT-M

Model FORMIT-M je bil razvit v okviru projekta FORMIT, po katerem je dobil ime (Härkönen et al., 2019). Razvoj modela temelji na podatkih nacionalnih gozdnih inventur desetih evropskih držav, vendar upošteva tudi vremenske podatke. Na podlagi teh se s pomočjo modela PRELES (Peltoniemi et al., 2015) izračuna bruto primarno produkcijo ekosistema. Ker model poleg statičnih spremenljivk oziroma parametrov vključuje nekatere fiziološke algoritme, govorimo, da je hibridni. Je prostodostopen in odprtokoden ter napisan v programskem jeziku R.

V modelu je treba določiti skupno količino poseka na državni ravni. Podatke je treba pripraviti za vsako ploskev posebej, pri čemer se drevesne vrste združijo v šest skupin. Za vsako ploskev oziroma sestoj je treba določiti tudi način gospodarjenja (npr. panjevsko, zastorno, prebiralno). Model vsebuje algoritem za redčenje, ki pa je simulator, zato posameznim ploskvam ne moremo določiti časa in intenzitete redčenja. Za določene države, ki so sodelovale pri razvoju tega modela, so na voljo posebne funkcije za izračun biomase, volumna in podobnega, vendar se za Slovenijo zdijo najprimernejše avstrijske. Model ima privzete ocene verjetnosti za maksimalno bruto primarno produkcijo do leta 2100, ki je odvisna od koordinat ploskev. V model se vstavijo podatki bruto primarne produkcije, ki pomeni razvoj podnebja v odvisnosti od predvidevanj RCP, od katerih so na voljo RCP45, RCP85 in RCP26. Rezultati simulacij so podani na letni ravni za vsako ploskev in skupino drevesnih vrst posebej in zajemajo številne parametre, kot so na primer bruto in neto primarna produkcija, starost, višina, sestojna temeljnica, lesna zaloga, biomasa po različnih skladiščih ogljika (tenke in debele korenine, listni opad, deblo itn.).

Preglednica 9: Model FORMIT-M

Struktura modela	Vhodni podatki	Izhodni podatki
Podatki o sestoju	višina in prsni premer, gostota in starost sestoja ter povprečna višina dna krošnje	lesna zaloga, prirastek
Modul za izračun letne bruto primarne produkcije (model PRELES)	povprečna letna temperatura zraka, primanjkljaj parnega tlaka (VPD), fotosintetsko aktivna radiacija (PAR)	bruto primarna produkcija (GPP)
Modul za vezavo ogljika	bruto primarna produkcija, razmerje med neto in bruto primarno produkcijo, volumen drevesa, oblikovno število, delež neto primarne produkcije v deblu, indeks listne površine (LAI), letna količina opada	
Talni modul (model Yasso)	količina opada in odmrlega lesa, različni parametri (npr. podnebje, razgradnja)	skupna količina oz. sprememba količine organskega ogljika v opadu in odmrlem lesu ter organski snovi v mineralnem delu tal do globine 1 m

2.1.1.9 CRAFT

V Franciji je bil razvit model CRAFT, ki omogoča kvantificiranje dejanske dolgoročne bilance ogljika v gospodarjenih gozdovih in boljše razumevanje gonilnih sil. Model se osredotoča na količinsko opredelitev spremembe zaloge ogljika v gozdovih na ravni sestoja zaradi rasti in mortalitete, okoljskih sprememb in upravljanja zemljišč, hkrati pa omogoča pripisovanje opaženih sprememb osnovnim dejavnikom na regionalni in državni ravni (Le Noë et al., 2020). Model projicira večplastne ekosistemske procese, kot so spremembe zaloge ogljika, ki so rezultat vhodnih in izhodnih tokov, in s tem posredno ključne dinamike, kot so spremembe starostne strukture. Način obravnave združuje prednosti obračunavanja emisij in procesnih modelov na vmesni stopnji zahtevnosti. Za razvoj in potrjevanje modeliranja ter oceno gonilnih sil je bila uporabljena posebna analiza razgradnje, pri čemer so uporabili podatke na državni in regionalni ravni za Francijo za obdobje 1850–2015.

Model sestavljata dva modula, in sicer biomasni in talni modul. Izračun v biomasnem modulu temelji na empiričnem razmerju med neto primarno produkcijo dreves in zalogo (stoječe) biomase za celotno gozdno območje določene prostorske enote (regionalno ali državno), ločeno za listavce in iglavce. Za določitev razmerja so spremljivke v donosnih tablicah pretvorili v zaloge ogljika in tokove v gozdovih. Po določitvi omenjenega razmerja je bila bruto primarna produkcija biomase izračunana kot ravnovesje med neto primarno produkcijo, naravno mortaliteto in stopnjo poseka. Vhodne podatke za talni modul predstavlja odmrla biomasa, ki je posledica naravne mortalitete in materiala, ki ostane na gozdni tleh po sečnji in spravilu lesa. V tem modulu je stopnja razgradnje listja in finih korenin odvisna od temperature in vlage. Naravni prehodi iz stoječe biomase v opad se izračunajo z uporabo deleža posameznega organa v celotni biomasni ter stopnje njihovega obrata, kot so predlagali Liski et al. (2002). Isti avtorji so to razmerje prilagodili glede na zbrane podatke (Berg et al., 1993) s povprečno letno temperaturo in razliko med padavinami in potencialno evapotranspiracijo v rastni sezoni.

Analiza razgradnje je bila narejena z namenom, da se kvantificirajo glavne biofizikalne gonilne sile za spremembo zaloge ogljika v gozdni biomasni v skladu z zamislijo analize gozdne identitete (Kauppi in sod., 2006).

Preglednica 10: Model CRAFT

Struktura modela	Vhodni podatki	Izhodni podatki
Biomasni modul	površina gozdov, lesna zaloga in prirastek (krivulje po donosnih tablicah), neto primarna produkcija, posek, mortaliteta	lesna zaloga, prirastek, izgube
Talni modul (model FORCLIM-D)	odmrla biomasa (opad – veliki in mali lesni ostanki, velike korenine, listni opad), povprečna letna temperatura zraka, potencialna evapotranspiracija (med majem in septembrom)	zaloga ogljika v opadu, zaloga organskega ogljika v tleh

2.2 Modeli za simuliranje zaloge ogljika v tleh

Razumevanje dinamike kroženja kopenskega ogljika je bistveno za oceno emisij TGP ter za blažitev podnebnih sprememb in prilagajanje nanje. Raba zemljišč in sprememba rabe zemljišč sta drugi najpomembnejši antropogeni vir ogljika v ozračje, za emisijami, ki so posledica zgorevanja fosilnih goriv. Znano je, da dolgoročne spremembe rabe zemljišč (npr. iz gozdov in travnikov v njive) zmanjšujejo zaloge organskega ogljika v tleh (Poeplau et al., 2011). Vsebnost organskega ogljika v tleh je sicer močno povezana s praksami upravljanja tal, lastnostmi tal in podnebjem (Lal et al., 2004; Reichstein et al.; 2013).

Modeli za simuliranje organske snovi v tleh so se v zadnjih nekaj desetletjih obsežno uporabljali za izboljšanje razumevanja dinamike organske snovi v tleh. Ti modeli lahko simulirajo zapletene procese pri humifikaciji in razgradnji organske snovi ter opišejo razmerje med številnimi lastnostmi tal, ki kontrolirajo razvoj ogljika v tleh. Uporaba teh modelov je pomembno raziskovalno orodje za raziskovanje razvoja organske snovi v tleh in za preučevanje posledic različnih ukrepov. Razumevanje porazdelitve in dinamike ogljika v tleh na regionalni ravni je poleg tega pomemben korak za količinsko opredelitev ravnovesja ogljika na regionalni in globalni ravni ter oceno odziva kopenskih ekosistemov na podnebne spremembe (povzeto po Di Tizio & Grego, 2008).

Iz množice modelov smo uporabili štiri modele za simuliranje zaloge ogljika v tleh (preglednica 11). Te modele smo izbrali s pregledom strokovne in znanstvene literature ter podatkovnih zbirk, podobno kot pri modelih za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi. Merila za izbor so bila naslednja: model je mogoče uporabiti za simuliranje zaloge ogljika v tleh, model je dobro opisan in zanj obstaja recenzirani vir, model je prosto dostopen in zanj obstajajo uporabniška navodila.

Enega najbolj celovitih pregledov modelov za modeliranje ogljika v tleh sta opravila Manzoni in Porporato (2009). Od teh modelov je najpogosteje navajan CENTURY, ki kaže široko uporabnost za različne kategorije zemljišč, poleg tega je po njem največkrat citirana teorija (Campbell & Paustian, 2015).

Preglednica 11: Izbrani modeli za simuliranje zaloge ogljika v tleh

Model	Vir	Dostop
CENTURY	Parton et al., 1994	https://www.nrel.colostate.edu/projects/century/century-obtain.php
CANDY	Franko et al., 1995	https://www.ufz.de/index.php?en=39725
RothC	Coleman in Jenkinson, 1996	https://www.rothamsted.ac.uk/rothamsted-carbon-model-rothc
Yasso	Liski et al., 2005	https://en.ilmatieteenlaitos.fi/yasso-download-and-support

2.2.1 Opis izbranih modelov

2.2.1.1 CENTURY

Model CENTURY je bil razvit za simulacijo dolgoročne (tj. desetletja do stoletja) dinamike organske snovi v tleh, rasti rastlin ter kroženja dušika, fosforja in žvepla za različne sisteme rastlin in tal. Model je bil prvotno razvit za travinje (Parton et al., 1994), vendar je uporaben tudi za polja, gozdove in savane. Travniki, polja in gozdovi imajo različne module rastlinske pridelave, ki so povezani s skupnim modulom organske snovi v tleh. Modul organske snovi v tleh simulira pretok ogljika, dušika, fosforja in žvepla skozi opad in različna anorganska ter organska skladišča v tleh. Uporablja mesečni časovni okvir z mesečnim povprečjem podatkov o najvišjih in najnižjih temperaturah ter mesečnimi količinami padavin. Upošteva dve obliki opada: presnovno in strukturno ter tri oblike za talno organsko snov: aktivno, počasno in pasivno. Delež ogljika, ki zapušča aktivno organsko snov, model razdeli glede na razmerje, ki je določeno s teksturo tal, komponento CO₂ in počasno obliko. Tekstura tal določa tudi hitrost prenosa med počasnimi in pasivnimi oblikami. Model je bil uporabljen za simulacijo kopičenja ogljika med oblikovanjem tal in za spremembe zaloge ogljika v tleh glede na ocene verjetnosti podnebnih sprememb.

Model deluje z uporabo mesečnega časovnega koraka in zahteva naslednje vhodne podatke:

- povprečna mesečna najvišja in najnižja temperatura zraka,
- mesečno povprečje padavin,
- vsebnost dušika v ligninu ter vsebnost fosforja in žvepla v rastlinskem materialu,
- tekstura tal,
- atmosferski in zemeljski vnos dušika.

2.2.1.2 CANDY

Model CANDY je modularni sistem simulacijskih modelov in sistem podatkovnih zbirk za parametre, merilne vrednosti, začetne vrednosti, vremenske podatke in podatke o obdelavi tal. Simulira dinamiko dušika in ogljika v tleh, temperaturo in vodo, na podlagi katerih zagotovi informacije o vnosu dušika v pridelke, izpiranju dušika in kakovosti voda.

Model uporablja polkohortni sistem za sledenje razkroja opada in izračuna biološko aktiven čas, ki omogoča primerjave med vzorčnimi mesti. Komponento inertne organske snovi (IOM) model izračuna iz deleža delcev tal, ki so manjši od 6 µm.

Glavni cilj pri razvoju modela je bil dati orodje kmetom za izračun kratkoročne dinamike sprememb dušika in dolgoročne spremembe vsebnosti ogljika v tleh, zato je model sestavljen iz vmesnika podatkovne zbirke in več modulov. Glavni modul izračuna dnevne spremembe vrednosti vode, temperature, ogljika in dušika za profil tal do globine 2 m. Ob dnevnem koraku za simulacijo dušika obstaja tudi dolgoročni modul ogljika, ki izračuna količino razgradljivega ogljika v stanju dinamičnega ravnovesja za določen način kolobarjenja. Izračun je opravljen

posebej za lokacijo in obdelovalne tehnike ter temelji na povprečnih pogojih prometa, donosa in vnosa organskih snovi.

Model CANDY zahteva naslednje parametre:

- Za modul tal: gostota tal, gostota delcev, vodna kapaciteta, točka venenja in tekstura tal, opisana z deležem delcev velikosti $< 6 \mu\text{m}$ (glina in fini mulj) na enoto prostornine. Parametre je treba navesti za vse talne horizonte.
- Za meteorološki modul: dnevne vrednosti padavin, temperature zraka in globalno obsevanja ali dolžino sonca. Te vhodne podatke lahko bere iz podatkovne zbirke, mogoče pa jih ustvariti tudi s pomočjo posebnega vremenskega generatorja. Izhodi so dnevne vrednosti za korigirane padavine, globalno obsevanje, temperaturo zraka in potencialno evapotranspiracijo.
- Za modul talne vode: vrednosti za korigirane padavine in potencialno evapotranspiracijo. Spremenljivke stanja so vsebnost vode v tleh in vodni ekvivalent snežne odeje. Ta modul temelji na modelu kapacitet in upošteva kopičenje snega, taljenje, prestrezanje padavin, evapotranspiracijo in drenažo.
- Za modul talne temperature: temperatura zraka v zadnjih treh dneh in vegetacijska pokritost tal.
- Za modul sprememb stanja tal: obdelava zemlje, dodajanje dušikovih gnojil in gnoja ali druge sveže organske snovi, namakanje, vznik ali obiranje rastlin.
- Za modul pridelka: višina pridelka, pokritost, globina korenin in zahteve po dušiku. Zahteve po dušiku lahko modul izračuna funkcijsko, glede na pričakovan donos ali porabo vode. Modul pridelka je mogoče izklopiti, tako da simulira samo dinamiko ogljika. V tem primeru se donos uporabi kot vhodna vrednost za izračun količine korenin in rastlinskih ostankov.
- Modul prometa organskih snovi in dinamike dušika je glavni del modela in zajema tri vrste organskih snovi:
 - svežo organsko snov (dodan material v tla),
 - aktivirano organsko snov v tleh (najpomembnejši delež celotnega prometa) in
 - stabilizirano organsko snov v tleh; stabilizirana organska snov v tleh in aktivirana organska snov v tleh skupaj tvorita razgradljivo organsko snov v tleh.

2.2.1.3 RothC

Model RothC (Rothamsted C) je model, pri katerem je tok ogljika v aerobnih tleh odvisen od vrste tal, temperature, vlage in vegetacijske poraslosti. Dinamika dušika in ogljika v modelu nista medsebojno povezani, komponenta 10M je količinsko opredeljena z datacijo ogljika, začetne vrednosti pa dobimo z modeliranjem ravnovesja. Za razliko od drugih preučeni modelov je bil ta uporabljen za izračunavanje vnosa organske snovi v tla in neto primarne produkcije z uporabo organskih snovi v tleh in za meritve radioaktivnega ogljika. Oblikovan je kot diskretna vsota eksponentov, ki jih je mogoče pretvoriti v neprekinjeno obliko, ki lahko daje analitične rezultate. Ti so lahko dodatno koristni za vpogled v tok organskih snovi v tleh.

Model zahteva naslednje vhodne podatke:

- povprečna mesečna količina padavin,

- povprečno mesečno izhlapevanje,
- povprečna mesečna temperatura zraka,
- podatki o tleh (vsebnost gline v zgornjem sloju tal, vsebnost organskega ogljika, globina tal, gostota tal),
- ocena razgradljivosti vhodnega rastlinskega materiala,
- raba zemljišča,
- pokrovnost tal – ali so tla v določenem mesecu gola ali porasla z vegetacijo,
- mesečni vnos rastlinskih ostankov,
- mesečni vnos hlevskega gnoja, če obstaja.

2.2.1.4 Yasso

Yasso je dinamični model, ki simulira zalogo in spremembe količine organskega ogljika v tleh in heterotrofno dihanje tal (Liski et al., 2005) na podlagi ravnovesja med razpadajočo organsko snovjo tal in vnosom opada. Model je bil razvit predvsem za količinsko opredelitev sprememb zaloge ogljika v mineralnem delu gozdnih tal. Kalibriran je bil na podlagi obsežnih podatkov iz Evrope, Severne in Južne Amerike in Finske (Tuomi et al., 2009), danes pa se pogosto uporablja za poročanje v okviru UNFCCC (Tůpek et al., 2019).

Model je sestavljen iz petih razdelkov za razgradnjo in dveh razdelkov za lesni opad (Liski et al., 2005) ter temelji na naslednjih petih predvidevanjih:

- lesni opad, ki prehaja v tla, je razdeljen na ekstrakte, celulozo in ligninu podobne spojine glede na kemično sestavo,
- nelesni opad se odlaga v razdelek finega opada (veje, korenine) in grobega opada (deblo), odvisno od svoje velikosti, pri čemer se domneva, da je razgradnja lesnega opada počasnejša kot pa razgradnja nelesnega opada, saj vsebuje lignin (Kobal et al., 2014),
- vsak od razdelkov lesnega opada ima stopnjo frakcioniranja, ki določa delež njegove vsebine, ki se v časovnem koraku sprosti v razdelke za razgradnjo; vsak razdelek za razgradnjo ima stopnjo razgradnje, ki določa delež njegove vsebine, ki se odstrani v časovnem koraku,
- frakcije odstranjenih količin se prenesejo v nadaljnje razdelke z nižjo stopnjo razgradnje, preostale pa se odstranijo iz sistema,
- izpostavljenost lesnega opada mikrobni razgradnji in stopnje razgradnje so odvisne od temperature in padavin.

Na splošno za uporabo modela potrebujemo tri vrste vhodnih podatkov. To so: zaloga ogljika v tleh na začetku simulacije, vnos ogljika v tla med simulacijo ter podnebni podatki v času simulacije. Podatki o zalogi ogljika v tleh vključujejo pet sestavin, in sicer nepolarni topni organski ogljik v tleh (npr. voski), polarno topilo, topni organski ogljik v tleh (sladkorji ipd.), kisli organski ogljik v tleh, ki ga je mogoče hidrolizirati (celuloze ipd.), organski ogljik v tleh, ki ga ni mogoče topiti s hidrolizo (lignini ipd.), in organska humusna tla ogljika.

3 Vrednotenje modelov

3.1 Primerjava značilnosti modelov

V tem delu smo izbrane modele razvoja gozdov primerjali po naslednjih merilih: osnovne značilnosti, možnosti napovedovanja, projekcije glavnih modulov in zunanji vplivni dejavniki. Večina modelov omogoča dolgoročne simulacije razvoja gozdov (tj. 100 let ali več), razen modelov EFISCEN in WEHAM, ki imata omejitve simulacij na nekaj desetletij (preglednica 12).

Časovni korak modelov je različen, in sicer največkrat od 1 do 5 let. Švicarski model MASSIMO ima časovni korak desetih let, pri modelu EFDM pa je časovni korak kar širina starostnega razreda, ki ga določi uporabnik. Pri več modelih je mogoče časovni korak simulacije poljubno določiti. Vsi izbrani modeli so primerni za simuliranje razvoja gozdov na državni ravni, vendar so med njimi nekatere pomembne razlike, ki jih bomo razložili v nadaljevanju.

Preglednica 12: Značilnosti modelov nadzemne biomase

Model	Vrsta modela	Časovni korak [leta]	Prostorska raven	Dolžina projekcije [leta]
CO2FIX	empirični	1	državna	100-300
EFISCEN	empirični	5	državna	50-60
CBM	empirični	1	državna	100
WEHAM	empirični	5	državna	40
EFDM	empirični	-	državna	100
CALDIS	empirični	5	regionalna/državna	10-200
MASSIMO	empirični	10	državna	100
FORMIT-M	hibridni	1	državna	100
CRAFT	hibridni	1	regionalna/državna	?

Velja opozoriti, da so bili modeli CBM, CRAFT, EFISCEN, WEHAM in EFDM prvotno razviti za simulacije enodobnih gozdov. Model CBM je z določenimi predvidevanji možno uporabiti tudi za raznodobne gozdove, kar je bilo predstavljeno na primeru Italije (Pilli et al., 2013),

model EFDM pa je bil nedavno nadgrajen v različico za simuliranje razvoja raznodobnih gozdov (Sallnäs et al., 2015).

Med modeli so precejšnje razlike pri zahtevanih formatih in obliki vhodnih podatkov, čeprav se praktično vsi lahko napajajo s podatki nacionalnih gozdnih inventur. Za večino izbranih modelov se vhodni podatki nanašajo na ploskev, medtem ko se za modele CO2FIX, CBM, FORMIT-M, CRAFT ter EFISCEN in EFDM podatki pripravijo na ravni sestoja oziroma v obliki matrik.

Med izbranimi modeli sta na podnebne podatke občutljiva le dva modela, in sicer CALDIS in FORMIT-M (preglednica 13). Glavni parametri v teh modelih so letna temperatura zraka in padavine, temperatura zraka in padavine v rastni sezoni, dolžina rastne sezone, fotosintetsko aktivna radiacija ter vlažnost tal. Čeprav je model FORMIT-M občutljiv za podnebne podatke, je treba opozoriti, da se podatki o letni bruto primarni produkciji izračunajo z uporabo modela PRELES (Härkönen et al., 2019).

Modeli, ki vsebujejo talni modul, so CO2FIX, EFISCEN, CBM, CALDIS, FORMIT-M in CRAFT. Talni modul pri njih deluje na osnovi modela Yasso (Liski et al., 2005), z izjemo modelov CBM in CRAFT, ki imata svoje algoritme.

Preglednica 13: Možnosti napovedovanja modelov nadzemne biomase

Model	Vrsta gozda	Podatki	Odvisnost drevesi	med	Talni modul
CO2FIX	enodobni, raznodobni	sestoj	/		✓
EFISCEN	enodobni	matrika	/		✓
CBM	enodobni	sestoj	/		✓
WEHAM	enodobni	ploskev	×		×
EFDM	enodobni, raznodobni	matrika	/		×
CALDIS	enodobni, raznodobni	ploskev	×		✓
MASSIMO	enodobni, raznodobni	ploskev	×		×
FORMIT-M	enodobni, raznodobni	sestoj	/		✓
CRAFT	enodobni	sestoj	/		✓

Preglednica 14: Projekcije glavnih modulov modelov nadzemne biomase

Model	Starostna struktura	Lesna zaloga, prirastek in posek	Mortaliteta	Obnova	Lesni proizvodi
CO2FIX	✓	✓	✓	✓	✓
EFISCEN	✓	✓	✓	✓	×
CBM	✓	✓	✓	✓	×
WEHAM	✓	✓	✓	×	✓
EFDM	✓	✓	✓	✓	×
CALDIS	✓	✓	✓	✓	✓
MASSIMO	✓	✓	✓	✓	×
FORMIT-M	✓	✓	×	✓	×
CRAFT	✓	✓	✓	✓	×

Vsi izbrani modeli imajo module za prikaz starostne strukture in lahko projicirajo razvoj lesne zaloge in prirastka glede na predvidevanja o poseku in vplivu zunanjih dejavnikov, kot so na primer motnje. Modula za mortaliteto in simuliranje obnove nimata modela FORMIT-M ter WEHAM. Z modeli CO2FIX, WEHAM in CALDIS pa je možno izračunati skladiščenje ogljika oziroma simulirati spremembe zaloge ogljika v lesnih proizvodih (preglednica 14).

Od izbranih modelov imajo posebni modul za motnje le modeli CBM, MASSIMO in CALDIS (preglednica 15). V modelu CBM je več vrst motenj, ki so v modulu prednastavljene, na primer gozdni požari ali napad podlubnikov. Uporabnik ima možnost, da določi vrsto motnje, vendar mora pri tem določiti stopnjo vpliva te motnje (Kull et al., 2019). Švicarski model MASSIMO lahko upošteva le motnje zaradi neviht, kot so vetrolomi (Stadelmann et al., 2019).

Medtem ko je možno določiti spremembe rabe tal v modelih CBM, EFISCEN in CRAFT, je modul za ekonomiko, ki lahko daje različne izhodne rezultate, vključen le v modelih CO2FIX in CALDIS. Ekonomske parametre je sicer mogoče oceniti tudi pri nekaterih drugih modelih, povezanih z drugimi orodji ali modeli. Povezava modela FORMIT-M z ekonomskim simulatorjem EFI-GTM je na primer omogočila vključitev uresničljivih predvidevanj povpraševanja, ki vplivajo na prihodnjo rast in dinamiko ogljičnega ravnovesja (Härkönen et al., 2019).

Preglednica 15: Zunanji vplivni dejavniki modelov nadzemne biomase

Model	Motnje	Spremembe rabe tal	Podnebje
CO2FIX	×	×	×
EFISCEN	×	✓	×
CBM	✓	✓	×
WEHAM	×	×	×
EFDM	×	×	×
CALDIS	✓	×	✓
MASSIMO	✓	×	×
FORMIT-M	×	×	✓
CRAFT	×	✓	×

Vsi izbrani modeli za simuliranje zaloge ogljika v tleh so dinamični (preglednica 16). Časovni korak izbranih talnih modelov se zelo razlikuje, in lahko traja od dneva do leta. Pri tem je treba poudariti, da imajo nekateri modeli možnost spreminjanja časovnega koraka, v preglednici pa so prikazani najmanjši intervali korakov, ki jih omogoča simulacija. Vsi modeli, razen modela CANDY, imajo možnost dolgoročnih simulacij, kar lahko pomeni tudi več stoletij. Glavni vhodni podatek je količina opada oziroma organske snovi, pri čemer vsi modeli upoštevajo kinetično oziroma biomasno/kinetično načelo delovanja procesov v tleh. Z modeli je možno oceniti dinamiko zaloge ogljika v tleh na globini tal od 20 cm do 1 m.

Preglednica 16: Značilnosti talnih modelov

Model	Vrsta modela	Časovni korak	Dolžina projekcije	Organska snov in/ali sestavine opada	Globina
CENTURY	dinamični	meseč/dan	stoletja	biomasni/kinetični	20 cm
CANDY	dinamični	dan	meseči/leta	kinetični	3 m
RothC	dinamični	meseč	stoletja	biomasni/kinetični	1 m
Yasso	dinamični	leto	stoletja	biomasni/kinetični	1 m

Model CENTURY ima od izbranih talnih modelov edini modul, s katerim je mogoče oceniti količine rastlinske pridelave. V modelih je opad opredeljen po različnih vrstah, večina modelov ima dve vrsti opada. Talni modeli imajo večinoma tri vrste skladišč, v katerih se kopiči organska snov v tleh, odvisno od algoritmov oziroma teoretične zasnove. Ena od omejitev izbranih modelov je ta, da nimajo možnosti delitve skladišč med organsko in mineralno plast tal.

Preglednica 17: Skladišča talnih modelov

Model	Sestoj	Opad	Organska snov v tleh	Skladišča, razdeljena med organsko in mineralno plast tal
CENTURY	podmodel rastlinske pridelave (listje, drobne korenine, fine veje, veliki lesni kosi in korenine)	2 (nadzemni in podzemni opad)	3 skladišča (aktivno, počasno, pasivno)	ne
CANDY	-	1 (dodana sveža organska snov)	3 skladišča (inertno, biološko aktivno, stabilizirano)	ne
RothC	-	2 (odporen in razgradljiv rastlinski material)	3 skladišča (biološko, humozno, inertno)	ne
Yasso	-	2 (fini in grobi opad)	5 skladišč (ekstrakti, celuloza; spojine, podobne ligninu; 2 vrsti humusa)	ne

Minimalni vhodni podatki, zahtevani za simulacije izbranih talnih modelov, so količina opada, temperatura tal ali zraka in padavine ali vlažnost tal (preglednica 18). Modeli Yasso, RothC in CENTURY zahtevajo podatke o temperaturi zraka in padavinah, medtem ko model CANDY zahteva tudi podatke o celotnem obsevanju ali dolžino sonca, vlažnosti in temperaturi tal. Poleg tega vsi modeli zahtevajo podatke o teksturi, z izjemo modela Yasso, predvsem podatek o vsebnosti gline. Meteorološki podatki in podatki o teksturi tal so ključni, saj vplivajo na stopnjo oziroma hitrost razgradnje opada (Peltoniemi et al., 2007).

Za modela CENTURY in CANDY se zahtevajo tudi podatki o vnosu dušika v tla, saj je z njuno uporabo mogoče oceniti ne le dinamiko ogljika, ampak tudi dinamiko dušika v tleh. Čeprav je bil model CENTURY prvotno razvit za travinje, se oba omenjena modela pogosto uporabljata za njivska tla za ugotavljanje vpliva obdelave tal in gnojenja na dinamiko ogljika in dušika v

tleh. Treba je opozoriti, da model CENTURY zahteva tudi druge podatke o hranilih, in sicer vsebnost fosforja in žvepla v rastlinskem materialu.

Preglednica 18: Zahtevani minimalni vhodni podatki talnih modelov

Model	Opad	Temperatura tal ali zraka	Padavine ali vlažnost tal	Tekstura	Vnos hranil (N, P, S)
CENTURY	✓	✓	✓	✓	✓
CANDY	✓	✓	✓	✓	✓
RothC	✓	✓	✓	✓	×
Yasso	✓	✓	✓	×	×

3.2 Rangiranje modelov

Vrednotenje izbranih modelov smo opravili s klasičnim rangiranjem po modelu tehtane vsote (Song in Kang, 2016), kjer so relativne uteži (tj. 0 do 1) razvrščene glede na pomembnost merila, dejanske vrednosti modelov pa dodeljene glede na značilnost izbranih modelov z vidikov določenega merila (tj. + = 10, ++ = 20, +++ = 30). Najboljša alternativa je tista, ki doseže največje število točk tako imenovane tehtane vsote. To je najbolj enostavna metoda primerjave z vidika več meril in je v določeni meri tudi subjektivna, saj na končni rezultat vpliva tako dodelitev uteži merilom kot tudi dejanskih točk, ki jih podeli ocenjevalec. Merila za rangiranje modelov so bila: zahtevani vhodni podatki, vključenost okoljskih spremenljivk in algoritmov za gospodarjenje, utemeljenost in kakovost algoritmov ter ustreznost izhodnih spremenljivk (preglednici 19 in 20).

Pri vrednotenju smo se poleg lastnih ocen pri merilih zanašali tudi na vrednotenje modelov, ki so ga opravili tuji avtorji (Powlson et al., 1996; Smith et al., 1997; Peltoniemi et al., 2007; Vospornik in Eckmüller, 2012; Kim et al., 2015; Vospornik et al., 2015; Blattert et al., 2016; Ťupek et al., 2019; Vospornik, 2017). Analiza vrednotenja z rangiranjem je pokazala, da je med izbranimi modeli nadzemne biomase največje število točk dosegel model CBM, med izbranimi talnimi modeli pa model CENTURY (preglednica 21). V prvi skupini modelov je zelo dobro oceno prejel še model CALDIS, v drugi skupini je bil to model Yasso. Pri modelih nadzemne biomase je bilo največ razlik v točkovanju pri merilu "ustreznost izhodnih spremenljivk", pri talnih modelih pa pri merilih "zahtevani vhodni podatki" in "ustreznost izhodnih spremenljivk".

Kot poudarjata Vanclay in Skovsgaard (1997), je učinkovito vrednotenje modelov razvoja gozdov zapleten in stalen proces, ki lahko vključuje dodatne neodvisne validacije, izvedene na različnih ravneh, statistične teste, analizo občutljivosti glavnih vhodnih podatkov ter druge grafične postopke, ki lahko pomagajo pri umerjanju in vrednotenju modelov.

Preglednica 19: Vrednotenje modelov za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi

Model/ merilo	Zahtevani vhodni podatki [0,3]	Vključenost okoljskih spremenljivk [0,1]	Vključenost algoritmov za gospodarjenje [0,2]	Utemeljenost in kakovost algoritmov [0.2]	Ustreznost izhodnih spremenljivk [0,2]
CO2FIX	++	+	++	++	+++
EFISCEN	++	+	++	++	+
CBM	++	++	++	+++	+++
WEHAM	+	+	++	++	++
EFDM	+++	+	++	++	+
CALDIS	++	+++	++	++	+++
MASSIMO	++	+	++	++	++
FORMIT-M	++	+++	++	++	++
CRAFT	++	+	++	++	+

Preglednica 20: Vrednotenje modelov za simuliranje zaloge ogljika v tleh

Model/ merilo	Zahtevani vhodni podatki [0,3]	Vključenost okoljskih spremenljivk [0,1]	Vključenost algoritmov za gospodarjenje [0,2]	Utemeljenost in kakovost algoritmov [0.2]	Ustreznost izhodnih spremenljivk [0,2]
CENTURY	++	++	+++	+++	+++
CANDY	+	+++	+++	++	+
RothC	++	++	++	+++	++
Yasso	+++	++	++	++	++

Preglednica 21: Rangiranje modelov

Model	Število točk	Model	Število točk	Model	Število točk
1. CBM	26	6. FORMIT-M	19	1. CENTURY	24
2. CALDIS	23	7. WEHAM	18	2. Yasso	23
3. MASSIMO	21	8. EFISCEN	15	3. RothC	22
4. EFDN	20	9. CRAFT	15	4. CANDY	18
5. CO2FIX	19				

4 Primernost uporabe modelov v Sloveniji

4.1 Ocena primernosti modelov za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi

Modeli razvoja gozdov se zdijo vse bolj uporabni za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi. Tradicionalno zbiranje podatkov o gozdovih na terenu v okviru nacionalnih gozdnih inventur je sorazmerno drago, zato so v zadnjem času vse bolj v ospredju prednosti uporabe modelov in podatkov daljinskega zaznavanja.

Z analizo vrednotenja smo ugotovili, da so modeli CBM, CALDIS in MASSIMO med najbolj uporabnimi za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi. Od slednjih je bil nedavno pri nas uporabljen model CBM (Jevšenak in sod., 2020), ki je bil najbolje ocenjen in kaže dober obet za uporabo v Sloveniji. Že v opisu modela (poglavje 2) smo navedli vrsto njegovih prednosti: lahko se napaja iz podatkov gozdnih inventur, zanj se zagotavljajo posodobitve in izobraževanja razvijalcev, model je usklajen z zahtevami in pravili, ki jih opredeljujejo smernice IPCC, itn. Čeprav model ni odprtokoden, je razvijalcem mogoče podati uporabniško izkušnjo oziroma predloge za njegovo izboljšavo. Glede na zahteve vhodnih podatov in vključenost modulov predlagamo, da se v prihodnje za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi uporabita in testirata še modela CALDIS in MASSIMO.

Za širšo uporabo empiričnih modelov za simuliranje zaloge ogljika v nadzemni biomasi bi morali razširiti nabor znakov, ki se snemajo v okviru načrtnega spremljanja oziroma monitoringa gozdnih ekosistemov. Ključen podatek, ki zdaj manjka v inventurah gozdov v Sloveniji, je starost dreves. Dosedanje izkušnje namreč kažejo, da je ocena starosti za prevladujočo razvojno stopnjo premalo natančna, da bi se lahko uporabila za potrebe modeliranja. Ker sklepanje o starosti na podlagi izmere prsnega premera drevesa ni zanesljivo, ocenjujemo, da bi do zanesljivih podatkov o starosti lahko prišli z vrtnjem dreves in analizo izvrtkov.

4.2 Ocena primernosti modelov za simuliranje zaloge ogljika v tleh

Model CENTURY se zdi najbolj zmogljiv model za simuliranje dinamike zaloge ogljika v tleh. Ima zelo kakovostno teoretično zasnovo in je najbolj citiran v literaturi. Vendar ima ta model tudi svoje slabosti oziroma omejitve. Prvič, potrebuje več vhodnih podatkov in parametrov v primerjavi z drugimi modeli. Medtem ko se pri drugih modelih v glavnem zahtevajo vremenski podatki in količina opada, model CENTURY zahteva tudi podatke o vnosu hranil, kot so dušik, žveplo in fosfor. Drugič, model zagotavlja simulacije le do globine tal 20 cm in se zdi bolj uporaben za njivska tla, ki se obdelujejo. Tretjič, nekatere študije poročajo, da je bila zaloge ogljika v gozdnih tleh, ki je bila simulirana s tem modelom, precenjena za več kot 50 % (Motavalli et al., 1994, cit. po Di Tizio in Grego, 2008).

Izbira modela je prvi korak pri oblikovanju monitoringa zaloge ogljika v gozdnih tleh, postopek pa sta temeljito dokumentirala Ogle in Paustian (2005). Medtem ko bi na državni ravni lahko uporabili kateri koli talni model, ki je bil izbran za to študijo, je izbira modela običajno omejena z razpoložljivostjo vhodnih podatkov, ki jih zahteva model (Peltoniemi et al., 2007). Z vidika razpoložljivosti podatkov in uporabnosti modela za simuliranje zaloge ogljika v gozdnih tleh se za Slovenijo zdi najprimernejši model Yasso. Model je bil v Sloveniji že uporabljen za pripravo različnih predvidevanj podnebnih sprememb ter kaže zmožnost za simuliranje zaloge in spremembe zaloge ogljika v tleh v različnih evropskih gozdovih (Hernández et al., 2017). Primeren je torej za uporabo, vendar pa je določitev negotovosti modelnih izračunov pogoj za opravljanje simulacij (Kobal in sod., 2014). Priporočajo se tudi njegove izboljšave z uporabo intenzivnih študij vzorčenja in neodvisne validacije, preden se lahko uporabi na državni ravni (Black et al., 2014).

5 Viri

Adams H. D., Park Williams A., Chonggang X., Rauscher S. A., Jiang X., McDowell N. G. 2013. Empirical and process-based approaches to climate-induced forest mortality models. *Frontiers in Plant Science*, 4: 1–5.

Barreiro S., Tomé M. 2017. Projection systems in Europe and North America: Concepts and Approaches. V: *Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability*. Barreiro S., Schelhaas M.-J., McRoberts R.E., Kändler G. (eds.). Springer International Publishing: 25–48.

Berg B., Berg M. P., Bottner P., Box E., Breymer A., Calvo de Anta R., Couteaux M., Escudero A., Gallardo A., Kratz W., Madeira M., Mälkönen E., McClaugherty C., Meentemeyer V., Muñoz F., Piussi P., Remacle J., Virzo de Santo A. 1993. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality. *Biogeochemistry*, 20: 127–159.

Bispo A., Andersen L., Angers D. A., Bernoux M., Brossard M., Cécillon L., Comans R. N. J., Harmsen J., Jonassen K., Lamé F., Lhuillery C., Maly S., Martin E., Mcelnea A.E., Sakai H., Watabe Y., Eglin TK. 2017. Accounting for carbon stocks in soils and measuring ghgs emission fluxes from soils: do we have the necessary standards? *Frontiers in Environmental Science*, 5:41.

Black K., Creamer R. E., Xenakis G., Cook S. 2014. Improving forest soil carbon models using spatial data and geostatistical approaches. *Geoderma*, 232–234: 487–499.

Blattert C., Lemm R., Thess O. 2016. Evaluation of Growth Simulators for Forest Management in Terms of Functionality and Software Structure Using AHP. V: *Applications and Theory of Analytic Hierarchy Process - Decision Making for Strategic Decisions*. De Felice F, Saaty T. L., Petrillo A. (eds.). InTech: 219–245.

Böttcher H., Verkerk P.J., Gusti M., Havlík P., Grassi G. 2012. Projection of the future EU forest CO₂ sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models. *GCB Bioenergy*, 4: 773–783.

Böttcher H., Graichen J. 2015. Impacts on the EU 2030 climate target of including LULUCF in the climate and energy policy framework. Berlin, Öko-Institut e.V.

Campbell. E. E., Paustian K. 2015. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review. *Environmental Research Letters*, 10: 123004.

Coleman K., Jenkinson D. 1996. RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil. V: *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets*. Powlson D.S., Smith P., Smith J. U. (eds.). Springer, Berlin/Heidelberg, Germany: 237–246.

Di Tizio A., Grego S. 2008. Soil organic carbon balance using Century model. V: *Soil Carbon Sequestration Under Organic Farming in the Mediterranean Environment*. Marinari S., Caporali F. (eds.), 9: 145–157.

Fischer C., Camin P., Kaufmann E., Thürig E. 2017. Switzerland. V: Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability. Barreiro S., Schelhaas M.-J., McRoberts R. E., Kändler G. (eds.). Springer International Publishing: 303–313.

Franko U., Oelschlägel B., Schenk S. 1995. Simulation of temperature-, water- and nitrogen dynamics using the model CANDY. *Ecological Modelling*, 81: 213–222.

Hernández L., Jandl R., Blujdea V.N.B., Lehtonen A., Kriiska K., Alberdi I., Adermann V., Cañellas I., Marin G., Moreno-Fernández D., Ostonen I., Varik M., Didion M. 2017. Towards complete and harmonized assessment of soil carbon stocks and balance in forests: The ability of the Yasso07 model across a wide gradient of climatic and forest conditions in Europe. *Science of the Total Environment*, 599-600: 1171–1180.

Härkönen et al. 2019. A climate-sensitive forest model for assessing impacts of forest management in Europe. *Environmental Modelling and Software*, 115: 128–143.

Jevšenak J., Klopčič M., Mali B. 2020. The effect of harvesting on national forest carbon sinks up to 2050 simulated by the CBM-CFS3 model: a case study from Slovenia. *Forests*, 11: 1090.

Jobbàgy E.G., Jackson R.B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Application*, 10: 423–436.

Kauppi P.E., Ausubel J.H., Fang J., Mather A.S., Sedjo R.A., Waggoner P.E., 2006. Returning forests analyzed with the forest identity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103: 17574–17579.

Kändler G., Riemer U. 2017. Germany. V: Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability. Barreiro S., Schelhaas M.-J., McRoberts R. E., Kändler G. (eds.). Springer International Publishing: 175–183.

Hojung K, Young-Hwan K., Rahyun K., Hyun P. 2015. Reviews of forest carbon dynamics models that use empirical yield curves: CBM-CFS3, CO2FIX, CASMOFOR, EFISCEN. *Forest Science and Technology*, 11: 212–222.

Kimmins J. P., Blanco J. A., Seely B., Welham C., Scoullar K. 2010. *Forecasting forest futures: a hybrid modelling approach to the assessment of sustainability of forest ecosystems and their values*. London: Earthscan Ltd.; 2010.

Kindermann G. E. 2010. Weiterentwicklung eines Kreisflächenzuwachsmo­dells – Refining a basal area increment model. V: Beiträge zur Jahrestagung 2010 in Körbecke/Möhnesee. Nagel J. (ur.). Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde, Göttingen: 82–95.

Kobal M., Eler K., Simončič P., Kraigher H. 2014. Assessment of organic matter changes in the soil of the Brdo plot under different climate change scenarios through the Yasso07 model application. *Acta Silvae et Ligni*, 103: 21–34.

Krug J., Koehl M., Riedel T., Bormann K., Reuter S., Elsasser P. 2009. Options for accounting carbon sequestration in German forests. *Carbon Balance and Management*, 4:5.

- Kull, S. J., Rampley G. J., Morken S., Metsaranta J., Neilson E. T., Kurz W. A. 2019. Operational-scale Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3). Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta.
- Kurz W. A. et al. 2009. CBM-CFS3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*, 220: 480–504.
- Liski J., Perruchoud D., Karjalainen T. 2002. Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management*, 169: 159–175.
- Liski J., Palosuo T., Peltoniemi M., Sievänen R. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling*, 189: 168–182.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623–1627.
- Landsberg J. 2003. Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and the future directions. *Canadian Journal of Forest Research*, 26: 1174–1186.
- Ledermann T. 2017. Ein Modell zur Abschätzung der Zufallsnutzungen in Österreich. V: Beiträge zur Jahrestagung 2017 in Untermarchtal/Baden-Württemberg. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Klädtke J., Kohnle U. (ur.). Freiburg: 9–19.
- Ledermann T., Kindermann G., Gschwantner T. 2017. Austria. V: Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability. Barreiro S., Schelhaas M.-J., McRoberts R. E., Kändler G. (ur.). Springer International Publishing: 79–95.
- Le Nöe J., Matej S., Magerl A., Bhan M., Erb K. H., Gingrich S. 2020. Modeling and empirical validation of long-term carbon sequestration in forests (France, 1850–2015). *Global Change Biology*, 26: 2421–2434.
- Mali B., Simončič B. 2019. Raba zemljišč, sprememba rabe zemljišč in gozdarstvo (LULUCF) v Sloveniji ter v okviru podnebne in energetske politike EU do leta 2030 in referenčna vrednost za gozdarstvo. V: Gozd in les kot priložnost za regionalni razvoj. Bončina A., Oven P. (ur.). Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, *Studia Forestalia Slovenica*, 164: 51–56.
- Manzoni S., Porporato A. 2009. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology and Biochemistry*, 41: 1355–1379.
- Mohren G.M.J., Garza Caligaris J.F., Masera O., Kanninen M., Karjalainen T., Pussinen A., Nabuurs G.J., 1999. CO2FIX for Windows: a dynamic model of the CO₂-fixation in forests, Version 1.2. IBN Research Report 99/3, Wageningen.
- Ogle S.M., Paustian K. 2005. Soil organic carbon as an indicator of environmental quality at the national scale: inventory monitoring methods and policy relevance. *Canadian Journal of Soil Science*, 85: 531–540.
- Packalen T. et al. 2014. The European Forestry Dynamics Model: Concept, design and results of first case studies. Publications Office of the European Union.

- Parton W. J., Rasmussen P.E. 1994. Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY model simulations. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 530–536.
- Peltoniemi M., Thürig E., Ogle S., Palosuo T., Schrumph M., Wutzler T., Butterbach-Bahl K., Chertov O., Komarov A., Mikhailov A., Gärdenäs A., Perry C., Liski J., Smith P., Mäkipää R. 2007. Models in country scale carbon accounting of forest soils. *Silva Fennica*, 41: 575–602.
- Peltoniemi M., Pulkkinen M., Aurela M., Pumpanen J., Kolari P., Mäkelä A., 2015. A semi-empirical model of boreal forest gross primary production, evapotranspiration, and soil water – calibration and sensitivity analysis. *Boreal Environment Research*, 20: 151–171.
- Pilli R., Grassi G., Kurz W.A., Smyth C.E., Blujdea V. 2013. Application of the CBM-CFS3 model to estimate Italy's forest carbon budget, 1995–2020. *Ecological Modelling*, 266: 144–171.
- Poeplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., van Wesemael B., Schumacher J., Gensior A. 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*, 17: 2415–2427.
- Powlson D. S., Smith P., Smith J.U. 1996. Evaluation of Soil Organic Matter Models using Existing Long-Term Datasets. V: NATO Advanced Research Workshop "Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets" : 1995 : Harpenden, England. NATO ASI series. Series I, Global environmental change, vol. 38, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Reichstein M., Bahn M., Ciais P. et al. 2013. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 500: 287–295.
- Rock J., Bösch B., Kändler G. 2013. WEHAM 2012 – Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung für die dritte Bundeswaldinventur. V: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagung. Klädtke J., Kohnle U. (ur.). Rychnov nad Kneznou: 127–133.
- Sallnäs O. 1990. A matrix growth model of the Swedish forest. *Studia Forestalia Suecica* 183:1–23.
- Sallnäs O., Berger A., Rätty M., Trubins M. 2015. An area-based matrix model for uneven-aged forests. *Forests*, 6: 1500–1515.
- Schelhaas, M. J., van Esch P.W., Groen T. A., de Jong B. H. J., Kanninen M., Liski J., Masera O., Mohren G. M. J., Nabuurs G.J., Palosuo T., Pedroni L., Vallejo A. Vilén T. 2004. CO2FIX V 3.1 – A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. Wageningen, Alterra.
- Schelhaas M. J., Eggers J., Lindner M., Nabuurs G. J., Pussinen A., Päivinen R., Schuck A., Verkerk P. J., van der Werf D.C., Zudin S. 2007. Model documentation for the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 3.1.3). Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1559/EFI Technical Report 26, Joensuu, Finland.

Seely B., Welham C., Scoullar K. 2015. Application of a hybrid forest growth model to evaluate climate change impacts on productivity, nutrient cycling and mortality in a montane forest ecosystem. *Plos One* 10(8): e0135034

Skudnik M., Mali B. 2015. SC15 EFDM Country Report Slovenia. Ljubljana, Slovenian Forestry Institute.

Smith P., Smith J. U., Powlson D. S., McGill W. B., Arah J. R. M., Chertov O. G., Coleman K., Franko U., Frolking S., Jenkinson D. S., Jensen L. S., Kelly R. H., Klein-Gunnewiek H., Komarov A. S., Li C., Molina J. A. E., Mueller T., Parton W. J., Thornley J. H. M., Whitmore A. P. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81: 153–225.

Song B., Kang S. 2016. A method of assigning weights using a ranking and nonhierarchy comparison. *Advances in Decision Sciences*, 2016: 1–9.

Stadelmann G., Temperli C., Rohner B., Didion M., Herold A., Rösler E., Thürig E. 2019. Presenting MASSIMO: a management scenario simulation model to project growth, harvests and carbon dynamics of Swiss forests. *Forests*, 10: 1–18.

Sterba H. 1987. Estimating potential density from thinning experiments and inventory data. *Forest Science*, 33: 1022-1034.

Temperli C., Stadelmann G., Thürig E., Brang P. 2017. Silvicultural strategies for increased timber harvesting in a central european mountain landscape. *European Journal of Forest Research*, 136: 493–509.

Thürig E., Herold A. 2013. Recalculation of emission factors in Swiss forests for the Swiss GHGI. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Switzerland.

Tomé M., Faias S. 2011. Report describing the regional simulators and the European simulator. EFI Technical Report 69. European Forest Institute, Finland.

Tuomi M., Thum T., Järvinen H., Fronzek S., Berg B., Harmon M., Trofymow J. A., Sevanto S., Liski J. 2009. Leaf litter decomposition – Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling*, 220: 3362–3371.

Župek in sod., 2019 Župek B., Launiainen S., Peltoniemi M., Sievänen R., Perttunen J., Kulmala L., Penttilä T., Lindroos A-J., Hashimoto S., Lehtonen A. 2019. Evaluating CENTURY and Yasso soil carbon models for CO₂ emissions and organic carbon stocks of boreal forest soil with Bayesian multi-model inference. *European Journal of Soil Science*, 70, 847–858.

Uredba LULUCF. 2018. Uredba (EU) 2018/841 Evropskega parlamenta in Sveta vključitvi emisij toplogrednih plinov in odvzemov zaradi rabe zemljišč, spremembe rabe zemljišč in gozdarstva v okvir podnebne in energetske politike do leta 2030 ter spremembi Uredbe (EU) št. 525/2013 in Sklepa št. 529/2013/EU. Uradni list EU, L 156.

Verkerk P. J. Schelhaas M.-J., Immonen V., Hengeveld G. M., Kiljunen J., Lindner M., Nabuurs G. J., Suominen T., Zudin S. 2016. Manual for the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 4.1). EFI Technical Report 99. Joensuu, European Forest Institute.

Vanclay J.K., Skovsgaard J. P. 1997. Evaluating forest growth models. *Ecological Modelling*, 98:1–12.

Vospersnik, S., Eckmüllner O. 2012. Evaluation of the individual tree growth model Prognaus. 2012. *Austrian Journal of Forest Science*, 129: 22–55.

Vospersnik S., Monserud R.A., Sterba H. 2015 Vospersnik S., Monserud R.A., Sterb H. 2015. Comparing individual-tree growth models using principles of stand growth for Norway spruce, Scots pine and European beech. *Canadian Journal of Forest Research*, 45: 1006–1018.

Vospersnik S. 2017. Possibilities and limitations of individual-tree growth models – A review on model evaluations. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 68: 103–112.