



Ciljni raziskovalni program »NAŠA HRANA, PODEŽELJE IN NARAVNI VIRI«

**NAČRTOVANJE TEHNOLOGIJ IN PRESOJA KAKOVOSTI IZVAJANJA DEL V  
GOZDOVIH V PODPORO BIOGOSPODARSTVU**

**Poročilo v okviru DS2: Merila umeščanja sodobnih tehnologij v gozdni prostor**

## **D2.4 Metodologija za večkriterijsko umeščanje tehnologij v gozdni prostor**

Avtorji: Matevž Triplat, Gašper Ogrin, dr. Nike Krajnc

Ljubljana, 2025

## Kolofon

Naslov publikacije: D2.4 Metodologija za umeščanje tehnologij v gozdni prostor

Avtorji vsebin: Matevž Triplat, Gašper Ogrin, Nike Krajnc

Ostali sodelujoči: Martin Jež, Jaša Saražin, Peter Smolnikar, Janez Krč

Vodja projekta: dr. Nike Krajnc

Ključne besede: sečnja, spravilo, omejitve, pridobivanje lesa, trajnost

Kraj izdaje: Ljubljana

Založil/Published by: Gozdarski inštitut Slovenije/Slovenian Forestry Institute

Leto izdaje dokumenta: 2025

Cena: brezplačno

Publication title: Methodology for Multi Criteria Spatial planning of Harversting technology

Keywords: felling, skidding, restrictions, timber extraction, sustainability

DOI 10.20315/gis018



To delo je ponujeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodna licenca.

Financerji raziskave: Projekt CRP TehGozd financirata Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP) ter Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).



## Kazalo vsebine

|       |                                                                     |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1   | Uvod .....                                                          | 6  |
| 1.2   | Metodologija dela .....                                             | 7  |
| 1.2.1 | Obravnavane tehnologije pridobivanja lesa .....                     | 8  |
| 1.2.2 | Nabor podatkovnih baz .....                                         | 9  |
| 1.2.3 | Podroben opis izbora vhodnih parametrov .....                       | 11 |
| 1.2.4 | Vrednotenje primernosti tehnologij glede na operativne pogoje ..... | 25 |
| 1.2.5 | Zapis modela v programskem orodju R-studio .....                    | 32 |
| 1.3   | Rezultati modela .....                                              | 33 |
| 1.3.1 | Validacija modela .....                                             | 38 |
| 1.4   | Interaktivno orodje .....                                           | 41 |
| 1.5   | Možnosti nadgradnje modela umeščanja tehnologij v prostor .....     | 43 |
| 1.5.1 | Izboljšana ločljivost in ažurnost podatkov .....                    | 43 |
| 1.5.2 | Vključevanje dodatnih parametrov .....                              | 44 |
| 1.6   | Zaključki .....                                                     | 47 |
| 1.7   | Zahvala .....                                                       | 48 |
| 1.8   | Viri .....                                                          | 49 |

## Kazalo preglednic

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Preglednica 1: Prikaz uporabljenih podatkovnih baz in pomen slednjih za parameter .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 9  |
| Preglednica 2: Delež površine sestojev po razredih pravilnih razdalj.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 15 |
| Preglednica 3: Smiselna delitev razvojnih faz po razredih .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 17 |
| Preglednica 4: Vsebinsko prilagojeni parametri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 24 |
| Preglednica 5: Prikaz razredov po posameznih parametrih .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 26 |
| Preglednica 6: Matrika vrednotenja primernosti tehnologij .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 27 |
| Preglednica 7: Določanje uteži uporabljenim parametrom modela za umeščanje tehnologij v gozdni prostor po metodi SMART .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 28 |
| Preglednica 8: Matrika zmede za oceno uspešnosti klasifikacijskega modela .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 39 |
| Preglednica 9: Matrika zmede za primerjavo modelnega umeščanja traktorskega spravila z načrtovano umestitvijo traktorskega spravila (odebeljeno zapisane vrednosti predstavljajo pravilno pozitivno razvrščene zapise (TP); ležeče zapisane vrednosti predstavljajo lažno pozitivno razvrščene primer (FP) in podčrtano zapisane vrednosti predstavljajo lažno negativno razvrščene primere (FN), običajno zapisane vrednosti predstavljajo pravilno negativno razvrščene primere (TN)) ..... | 40 |
| Preglednica 10: Kazalniki statistične uspešnosti klasifikacije po razredih na primeru umeščanja traktorskega spravila .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 40 |
| Preglednica 11: Matrika zmede za primerjavo modelnega umeščanja žičniškega spravila z načrtovano umestitvijo žičniškega spravila (odebeljeno zapisane vrednosti predstavljajo pravilno pozitivno razvrščene zapise (TP); ležeče zapisane vrednosti predstavljajo lažno pozitivno razvrščene primer (FP) in podčrtano zapisane vrednosti predstavljajo lažno negativno razvrščene primere (FN), običajno zapisane vrednosti predstavljajo pravilno negativno razvrščene primere (TN)) .....    | 40 |
| Preglednica 12: Kazalniki statistične uspešnosti klasifikacije po razredih na primeru umeščanja žičniškega spravila .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 41 |

## Kazalo slik

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Naklon terena po razredih za območje celotne Slovenije.....                                                                    | 12 |
| Slika 2: Povprečna pravilna razdalja po razredih za območje celotne Slovenije .....                                                     | 14 |
| Slika 3: Skalnatosť sestojev po razredih.....                                                                                           | 16 |
| Slika 4: Razvojne faze, smiselno razdeljene v razrede, za območje celotne Slovenije .....                                               | 18 |
| Slika 5: Možni posek za obdobje 10 let, razdeljen po posameznih razredih .....                                                          | 19 |
| Slika 6: Delež iglavcev v možnem poseku po razredih .....                                                                               | 21 |
| Slika 7: Dosegljivost sestoja iz prometnic - odaljenost 75 m .....                                                                      | 23 |
| Slika 8: Dosegljivost sestoja iz prometnic - odaljenost 1000 m .....                                                                    | 24 |
| Slika 9: Hierarhični model vrednotenja tehnologij .....                                                                                 | 25 |
| Slika 10: Prikaz najprimernejše kombinacije sečnje in spravila po gozdnih sestojih.....                                                 | 33 |
| Slika 11: Deleži modelno najprimernejša kombinacija sečnje in spravila.....                                                             | 34 |
| Slika 12: Modelne ocene primernosti kombinacije klasične sečnje in traktorskega spravila z uporabo gozdarskega vitla .....              | 35 |
| Slika 13: Modelne ocene primernosti kombinacije klasične sečnje in traktorskega spravila z uporabo gozdarske traktorske prikolicе ..... | 36 |
| Slika 14: Modelne ocene primernosti kombinacije klasične sečnje in žičniškega spravila.....                                             | 36 |
| Slika 15: Modelne ocene primernosti strojne sečnje .....                                                                                | 37 |
| Slika 16: Spletno orodje.....                                                                                                           | 43 |

## 1.1 Uvod

V okviru zadnje (četrte) aktivnosti delovnega sklopa DS2 smo pripravili predlog metodologije za modelno umeščanje tehnologij v gozdni prostor. Metodologija temelji na izsledkih prejšnji aktivnosti delovnega sklopa (D2.2 in D2.3), kjer smo na podlagi natančnega pregleda literature določili merila, kriterije in vplivne dejavnike trajnostnega pridobivanja lesa, merilom določili uteži, vplivne dejavnike pa validirali na podlagi petih kriterijev.

Tehnologije pridobivanja lesa se razlikujejo po tehničnih značilnostih in imajo različen vpliv na ključne dejavnike kot so stroški, produktivnost, varnost, kakovost izvedbe ter okoljske vplive. Izbira ustrezne tehnologije je zato ključnega pomena za učinkovito in trajnostno izvajanje gozdarskih del. V praksi pa je zaradi hitro spreminjajočih se terenskih razmer izbira najprimernejše tehnologije lahko zahtevno opravilo. V Sloveniji so predvidene tehnologije izvajanja gozdnih del opredeljene v gozdnogospodarskih načrtih, ki jih izdela Zavod za gozdove Slovenije. Kljub sistemskemu pristopu pa so tovrstni zaključki lahko pogosto subjektivni in za delo v gozdu ne predvidijo najustreznejše tehnologije z vidika trajnostnega gospodarjenja z gozdovi.

Z namenom izboljšanja odločanja se v zadnjem desetletju razvijajo novi pristopi, ki temeljijo na kombinaciji geografskih informacijskih sistemov (GIS) in večkriterijskega odločanja (Latterini F. in sod., 2022; Stefanoni W. in sod., 2023). Med metodami večkriterijskega odločanja se je analitični hierarhični proces (krajše AHP) izkazal kot ena najprimernejših in najpogosteje uporabljenih tehnik za vrednotenje ter izbiro alternativ v prostorskih analizah (Saaty T.L., 1994). Enostavnejša alternativa je metoda SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique), ki omogoča vrednotenje posameznih kriterijev brez pogosto zapletenih parnih primerjav (Olson D.L., 1996; Kangas A. in sod., 2015; Taherdoost H. in Mohebi A., 2024).

Kombinacija uporabe GIS in večkriterijskih modelov odločanja omogoča oblikovanje sistematičnega pristopa, z objektivno izbiro najprimernejše tehnologije pridobivanja lesa, na podlagi različnih kriterijev (Marčeta D. in sod., 2020), pri čemer je potrebno ponovno poudariti, da je učinkovitost metode odvisna zlasti od natančnosti in kakovosti vhodnih podatkov (Shukla A. in sod., 2017).

Z raziskavo strmimo k novim pristopom umeščanja tehnologij na način, da bodo slednje enostavnejše, objektivnejše, časovno manj potratne in nenazadnje učinkovitejše. Končni rezultat modela bo tehnološka karta, ki bo za prostorske enote (gozdni sestoj) na podlagi razpoložljivih vhodnih dejavnikov ter z uporabo večkriterijskega odločanja predlagala najustreznejšo tehnologijo pridobivanja lesa.

## 1.2 Metodologija dela

V prvih korakih smo na podlagi pregleda literature in aktivne participacije strokovne skupine na delavnicah določili merila, kriterije in vplivne dejavnike trajnostnega pridobivanja lesa. Merila smo vrednotili in na ta način rangirani po svoji pomembnosti. Predlagane vplivne dejavnike smo nato validirali na podlagi petih vsebinskih kriterijev. V postopku validacije smo izločili tiste dejavnike, za katere ni bilo mogoče zagotoviti ustreznih, dostopnih in kakovostnih podatkovnih baz. Tako smo oblikovali ožji nabor vplivnih dejavnikov, ki predstavljajo potencialne dejavnike (parametre) za vključitev v modelno odločanje. Na podlagi pregleda tuje literature, kjer so se avtorji prav tako ukvarjali z modelnim umeščanjem tehnologij v gozdni prostor, smo ugotovili, da je za učinkovitost modela ključno vključevanje raznolikih dejavnikov, ki zajemajo zlasti različne si ekonomske in okoljske vidike (Marčeta D. in sod., 2020; Latterini F. in sod., 2022; Stefanoni W. in sod., 2023). Hkrati se zavedamo, da je potrebno tudi omejevanje števila vključenih dejavnikov, saj preobsežen nabor lahko zmanjša preglednost, oteži interpretacijo rezultatov in zmanjša robustnost modela.

### 1.2.1 Obravnane tehnologije pridobivanja lesa

Pri pripravi tehnološke karte smo oblike tehnologij pridobivanja lesa ločili na tehnologije sečnje in spravila lesa. Sečnjo smo nadalje razdelili na klasično sečnjo (sečnja z motorno žago) in strojno sečnjo (stroj za sečnjo t.j. *harvester*). Pri spravilu lesa smo tehnologije razdelili v štiri možne kategorije: spravilo po tleh (vlačenja po gozdnih tleh - uporaba vitla), spravilo s prikolico I (transport po gozdnih vlakah – traktorska prikolica), spravilo s prikolico II (transport po sečnih poteh in gozdnih vlakah - forwarder) in spravilo po zraku (gozdarska žičnica). V nadaljevanju podrobneje predstavljamo izbrane razrede tehnologij pridobivanja lesa.

Oblike sečnje:

1. **Klasična sečnja** – tradicionalni način pridobivanja lesa, kjer se uporablja ročna ali motorna orodja (motorna žaga). V procesu delavec drevo podre in opravi kleščenje in krojenje.
2. **Strojna sečnja** – sodobna metoda mehanizirane sečnje s specializirano gozdarsko mehanizacijo z uporabo sečne glave, ki omogoča tako sečnjo kot kleščenje in krojenje na mehaniziran način (*harvester*). Metoda primerna zlasti na manj strmih in zmernih naklonih terena, v sestojih z dobro prehodnostjo in pretežnim deležem iglastih dreves.

Oblike spravila lesa:

1. **Spravilo po tleh** - spravilo lesa poteka z vlačanjem hlodov neposredno po gozdnih tleh oziroma vlakah (gozdarski zgibni traktor ali prilagojen kmetijski traktor z vitlom). Uporablja se na manj strmih do zmernih terenih do 40 % naklona terena.
2. **Spravilo s prikolico I** - spravilo lesa poteka s prevozom na prikolici (traktorska prikolica), pri čemer se hlodi ne vlečejo po tleh, ampak se nakladajo na prikolico in prevažajo zgolj po gozdnih vlakah do gozdne ceste. Primerno za manj strme in zmerne terene in območja z razvejano gozdno prometno infrastrukturo.
3. **Spravilo s prikolico II** – spravilo lesa poteka s prevozom na prikolici (forwarder), pri čemer se hlodi ne vlečejo po tleh, ampak se nakladajo na vozila in prevažajo po sečnih poteh in gozdnih vlakah do gozdne ceste. Primerno zlasti za manj strme in zmerne terene z nakloni do 40 % in območja z dobro prehodnostjo (skalnatost do 30 %). Običajno poteka v kombinaciji s strojno sečnjo.

4. **Spravilo po zraku** - oblika spravila, kjer je les transportiran po zraku, na območjih, ki so drugim tehnologijam težje dostopna ali nedostopna oziroma z namenom zmanjšanja vpliva na gozdna tla. Ta metoda je posebej primerna z strme in težko dostopne terene z naklonom terena nad 40 % ali s slabo razvito gozdno prometno infrastrukturo.

### 1.2.2 Nabor podatkovnih baz

Na podlagi preteklih aktivnosti smo se odločili, da v model vključimo 7 parametrov, ki zajemajo reliefne značilnosti terena, značilnosti gozdnih sestojev in prometno infrastrukturo. Podatkovne baze smo sprva obdelovali v prosto dostopnem in odprtokodnem geografske informacijskem sistemu QGIS (QGIS 3.34.11), ki podpira ogled, urejanje in analizo prostorski podatkov, kjer smo testno ugotavljali zmožnosti pretvorbe ideje modela v prakso. Zaradi avtomatizacije, ponovljivosti in morebitnih kasnejših modifikacij modela smo končni zapis modela naredili v programskem orodju RStudio. Za potrebe izdelave modela smo pridobili sledeče vhodne podatke, ki jih predstavljamo v preglednici (Preglednica 1).

*Preglednica 1: Prikaz uporabljenih podatkovnih baz in pomen slednjih za parameter*

| Vir podatkovnih baz                                        | Podatkovna baza                                               |                                | Pomen za parameter           |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Portal Prostor Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS) | Digitalni model reliefa (DMR)                                 | Rastrski (1 x 1m)              | Naklon terena                |
|                                                            | Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture (prometnice) | Vektorski (linijski objekti)   | Spravilna razdalja           |
|                                                            |                                                               |                                | Dosegljivost sestoja         |
| Spletna storitev ZGS pregledovalnik                        | Podatki gozdnih odsekov                                       | Vektorski (poligonski objekti) | Razvojna faza                |
|                                                            |                                                               |                                | Skalnatost                   |
|                                                            | Podatki gozdnih sestojev                                      | Vektorski (poligonski objekti) | Možni posek (etat)           |
|                                                            |                                                               |                                | Delež iglavcev               |
|                                                            | Podatki o gozdnih cestah                                      | Vektorski (linijski objekti)   | Spravilna razdalja           |
|                                                            |                                                               |                                | Dosegljivost sestoja         |
|                                                            | Podatki o gozdnih rezervatih                                  | Vektorski (poligonski objekti) | Izločanje sestojev iz modela |
| Arhiv Zavoda za gozdove Slovenija                          | Podatki o gozdnih vlakih                                      | Vektorski (linijski objekti)   | Dosegljivost sestoja         |

Z uporabo naštetih prostorskih podatkov smo pridobili rastrske in vektorske kartne podlage za posamezne parametre, katere smo kasneje preko funkcij združevanja združili v končno vektorsko karto izbranega raziskovalnega območja. Na podlagi dostopnosti podatkov smo se odločili, da osnovna enota modela predstavlja gozdni sestoj, ki se od drugih sestojev razlikuje po sestojnih značilnostih in je hkrati najnižja prostorska enota za katere se v gozdnogospodarskem načrtovanju zbira informacije (ZGS, 2025). K temu je botrovalo dejstvo, da je večina vhodnih podatkovnih baz že pripravljenih na nivoju gozdnega sestoja ali pa je na ta nivo možen njihov izračun. Izjemo predstavljata parameter skalnatost, za katere smo podatke za posamezne gozdne sestaje predpostavili na podlagi podatkov gozdnih odsekov, kateremu gozdni sestoj pripada.

#### *1.2.2.1 Osnovni nivo izračunov (gozdni sestoj)*

Osnovni nivo modela predstavlja gozdni sestoj. V osnovni vhodni podatkovni bazi je gozdni sestoj pogosto zapisan kot več številčni poligon («multipolygon»). To pomeni, da je sestoj lahko razdrobljen na več enot, ki medsebojno lokacijsko niso povezane, vendar skupaj predstavljajo en sestoj in si delijo skupne lastnosti sestoja. Za potrebe našega modela in pri izračunu spremenljivk nam takšna oblika ne ustreza, zato smo se odločili, da v teh primerih vsak poligon zapišemo kot svoj lasten sestoj. V primeru več številčnih poligonov to pomeni, da bomo več različnih poligonov obravnavali ločeno, vsakega zase, pri čemer bodo vsi ohranili prvotno oznako sestoja, medsebojno pa jih bomo ločevali po oznakah »ID«, ki smo jih določili za vsak samostojen poligon posebej. Vsakemu poligonu smo bili primorani ponovno izračunati površino.

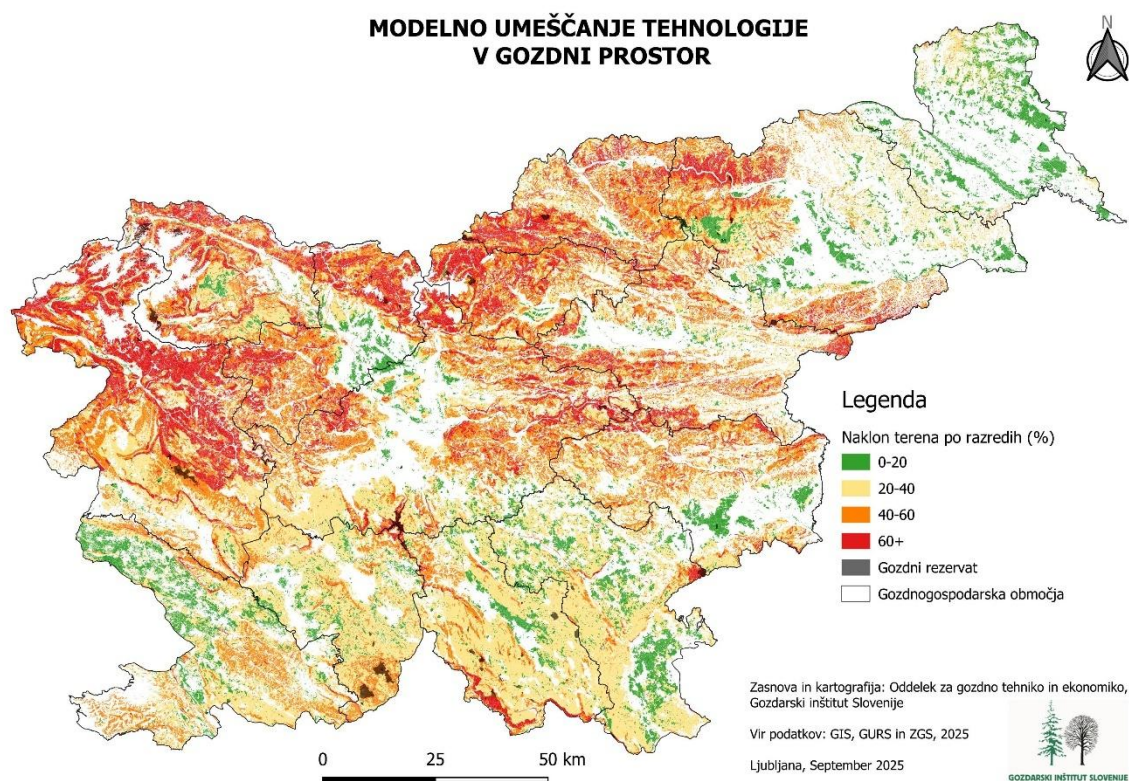
### 1.2.3 Podroben opis izbora vhodnih parametrov

V modelno umeščanje tehnologij v gozdni prostor smo vključili 7 parametrov, katere podrobneje predstavljamo.

#### 1.2.3.1 *Naklon terena*

Naklon terena, merjen v odstotkih (%), predstavlja enega izmed osnovnih parametrov modela, saj lahko odločitveno vpliva na izbiro tehnologije. V splošnem velja, da je sečnja in spravilo lesa na položnejših terenih primernejše za oblike spravila po tleh, med tem ko je žičniško spravilo primernejše na strmejših območjih (Marčeta D. in sod., 2020). Naklon terena ne vpliva zgolj na produktivnost dela, temveč tudi na okoljske in ergonomске vidike. Sečnja in spravilo na strmih pobočjih lahko povzroči večje poškodbe gozdnih tal, jih zbija in povečuje erozijske procese (Naghdi R. in Solgi A., 2014; Poje A. in sod., 2020; Tavankar F. in sod., 2021), položnejši tereni pa so ugodnejši tudi z vidika ergonomije in varnosti delavcev (Picchio R. in sod., 2020).

Na podlagi digitalnega modela reliefa (DMR), z ločljivostjo 1 x 1 m, smo za vsak gozdni sestoj izračunali naklon terena, kar zagotavlja izredno natančnost, katero smo omejili na eno decimalno mesto. Odločili smo se, da za vrednost naklona terena gozdnega sestoja vzamemo izračunano povprečno vrednost. Vhodni podatek *naklon terena* (opisan na ravni gozdnega sestoja) je v primerjavi s podatkom naklona preko ZGS pregledovalnika pridobljen na ravni gozdnega odseka (natančnost 1 stopinja). Naklon terena po razredih prikazujemo na sliki (Slika 1).



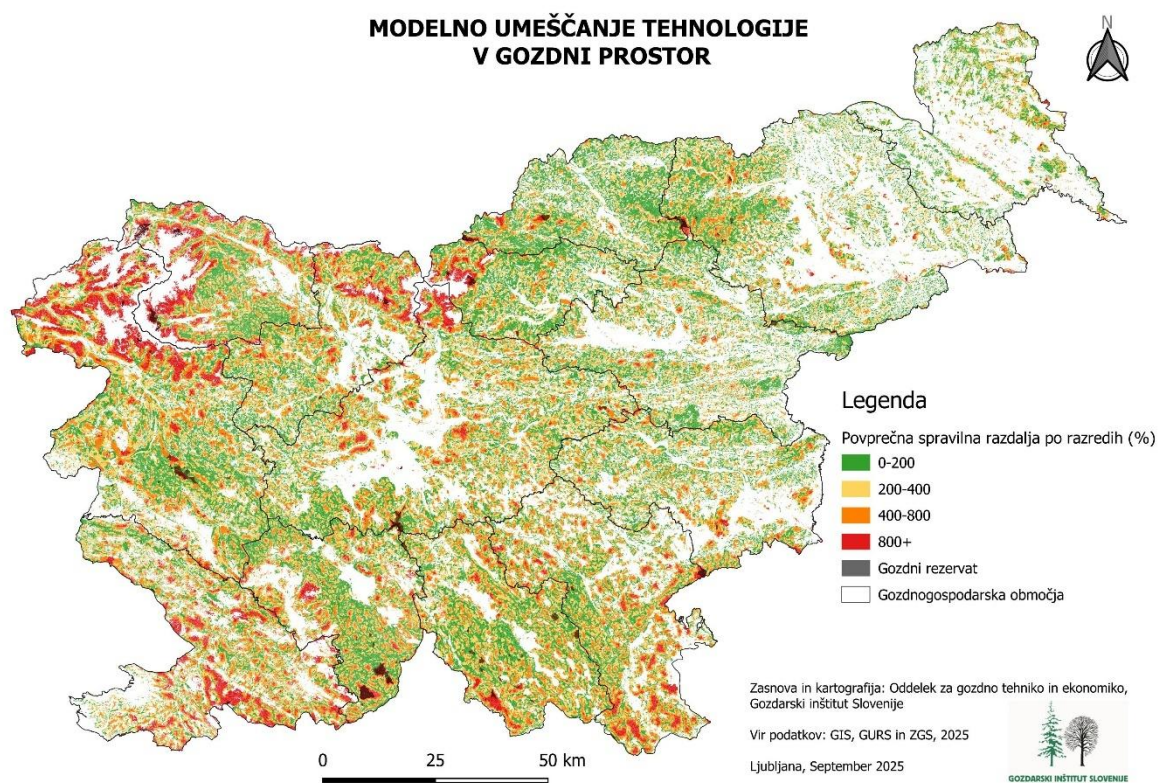
*Slika 1: Naklon terena po razredih za območje celotne Slovenije*

### *1.2.3.2 Spravilna razdalja*

Spravilna razdalja je definirana kot razdalja med posekom dreves in najbližjo prometnico (običajno gozdno cesto), kjer se les nadalje obdeluje ali transportira, je ključnega pomena pri načrtovanju gozdarskih operacij, saj vpliva na produktivnost dela, stroške spravila in okoljske vidike (Enache A. in sod., 2015; Picchio R. in sod., 2018; Sealey L.L. in Van Rees K.C.J., 2019; Gagliardi K. in sod., 2020). Podatki o spravilnih razdaljah so nam sicer dostopni preko pregledovalnika podatkov o gozdovih (ZGS), vendar zgolj na nivoju gozdnogospodarskega odseka. V želji po natančnejši in realnejših vrednosti smo se odločili, da spravilno razdaljo izračunamo na nivoju sestoja. Teoretično spravilno razdaljo smo izračunali na način, da smo v programskem orodju gozdne sestoje prekrili z mrežo navideznih točk (gostota 25 x 25 m), ter za vsako točko izračunali najbližjo razdaljo (evklidska razdalja) do primarne prometnice. Kot primarno prometnico smatramo gozdne ceste (vir: ZGS) in protipožarne preseke (vir: ZGS) ter

vse prometnice zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture (pod šifro GJI\_ATR2 od 3 do 13). Povprečna teoretična razdalja je bila izračunana kot aritmetična sredina pravih razdalj vseh točk v posameznem sestoju.

Dejanska pravilna razdalja se od teoretične pravilne razdalje razlikuje zaradi vpliva naklona terena, smeri in vrste pravila ter značilnosti reliefa, zato je smiselno v model vključiti tudi koeficient pravih razdalj ( $k_s$ ). Po pregledu literature ugotavljamo, da so si koeficient pravila lahko zelo različni in variirajo med 1,1 in 2,5, odvisno od značilnosti raziskovalnega območja in izbranega načina pravila (Dobre A., 1994; Pentek T. in sod., 2004; Stankić I., 2010; Hribernik B., 2013; Lepoglavec K., 2014). Za potrebe naše raziskave smo se odločili, da koeficienta pravih razdalj ( $k_s$ ) ne bomo izračunali neposredno za vsak sestoj posebej, temveč bomo uporabili strokovno ocenjeni približek, ki temelji na analizi primerljivih študij in bo veljal za območje celotne Slovenije. Koeficienti navedeni v pregledani literature so praviloma vezani na specifična raziskovalna območja, zato njihova neposredna aplikacija na naše raziskovalno območje ni primerna, služijo pa kot dobra referenca za primerljive terenske razmere. Na podlagi pregleda literature smo koeficientu pravih razdalj določili vrednost 1,5. V modelu bomo torej uporabili teoretično (evklidsko) pravilno razdaljo pomnoženo s koeficientom pravila ( $k_s = 1,5$ ). Povprečno pravilno razdaljo po razredih prikazujemo na sliki (Slika 1).



*Slika 2: Povprečna pravilna razdalja po razredih za območje celotne Slovenije*

Pri izračunu pravilne razdalje, ki temelji na mreži točk z razmikom  $25 \times 25$  m, so se poligoni z zelo majhno površino ali poligoni podolgovatih oblik pogosto izkazali kot problematični, saj v njih ni bila zajeta nobena točka z razdaljo od prometnice. Zaradi tega model zanje ni mogel izračunati povprečnih vrednosti razdalje od prometnice. V primerih, ko za izbran poligon ni uspel izračun povprečnih vrednosti razdalje od prometnice, smo vrednost pravilne razdalje pripisali od najbližjega poligona, za katerega je bila ta vrednost že izračunana.

Zavod za gozdove Slovenije povprečne pravilne razdalje smatra kot seštevek povprečne razdalje zbiranja in povprečne razdalje vlačjenja. Vrednost povprečne razdalje določijo preko aplikacije glede na dolžino gozdnih vlak in vrste sestoja za posamezna pravilna polja, vrednost pa se prenese na nivo gozdnega odseka. Za potrebe modela smo vhodni podatek pravilnih

razdalj pridobili z lastnim izračunom na nivoju gozdnega sestoja. Metoda izračuna je relativno robustna in ne upošteva spravičnih polj, temveč so vrednosti dobljene zgolj kot povprečna evklidska razdalja do najbližje gozdne ceste pomnožena s koeficientom spravičnih razdalj ( $k_s = 1,5$ ). Delež površine gozdov po posameznih razredih spravičnih razdalja prikazujemo v preglednici (Preglednica 2).

*Preglednica 2: Delež površine sestojev po razredih spravičnih razdalj*

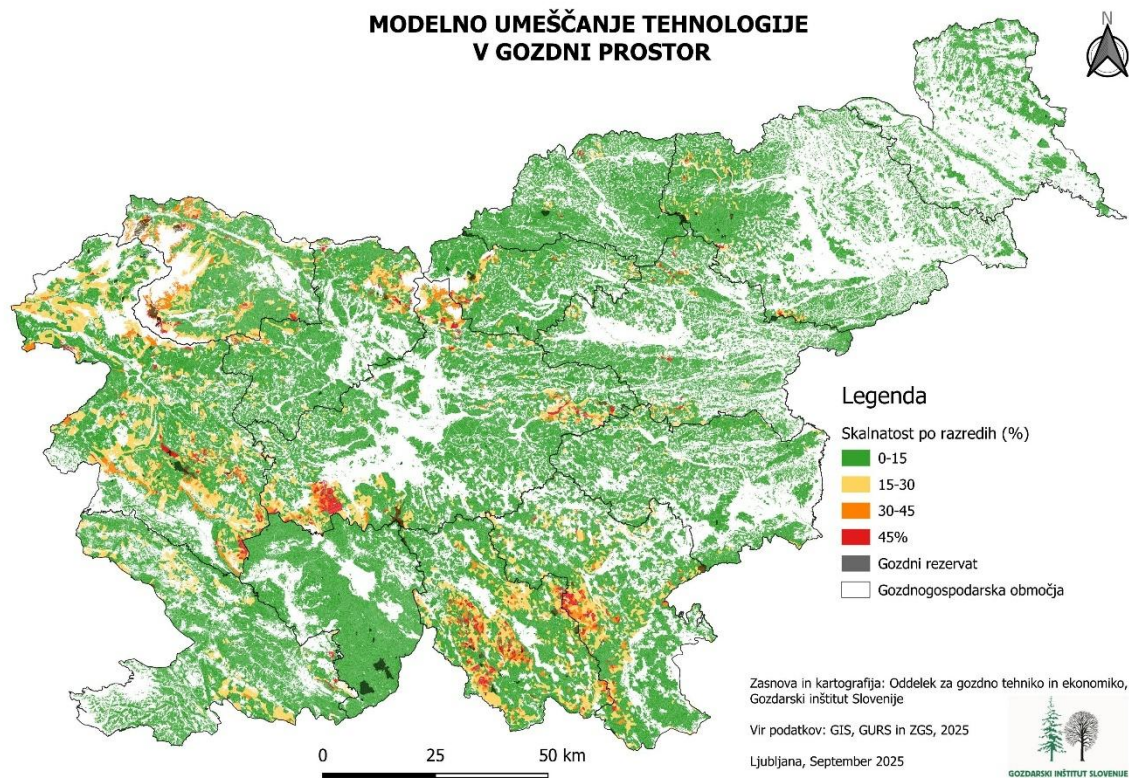
| Razredi spravičnih razdalj (m) | Izračun modela (%) | ZGS pregledovalnik (%) |
|--------------------------------|--------------------|------------------------|
| 0 – 200                        | 39,4               | 12,2                   |
| 200 – 400                      | 32,5               | 42,7                   |
| 400 – 800                      | 20,7               | 37,0                   |
| 800 +                          | 7,4                | 8,1                    |

Ugotavljamo, da obstajajo razlike med deležem gozdov po posameznih razredih spravičnih razdalj glede na izračunane in prosto dostopne podatke ZGS. Razloge vidimo predvsem v dejstvu, da je nivo določanja spravične razdalje različen. ZGS povprečno spravično razdaljo določi na nivoju gozdnega odseka, model pa na nivoju gozdnega sestoja. Hkrati je metodologija pridobivanja vrednosti različna. Pri izračunu spravične razdalje (evklidske razdalje) ne upoštevamo vpliva naklona terena, smeri spraviča in reliefnih značilnosti na povprečno spravično razdaljo, ki je zaradi omenjenih vplivov večja od izračunane. V želji po realnejših vrednostih smo spravične razdalje pomnožili s koeficientom 1,5, ki velja za vse sestoje in je enak za območje celotne Slovenije.

### *1.2.3.3 Skalnatost*

Skalnatost terena predstavlja enega pomembnejših omejitvenih dejavnikov izvajanja gozdarskih del. Visok delež večji površinskih skalnih tvorb otežuje gibanje in dostopnost gozdarske mehanizacije, zmanjšuje produktivnost, hkrati pa povečuje tveganje za nesreče (Enache A. in sod., 2016; Labelle E.R. in sod., 2022). Podrobnih podatkov o skalnatosti na

nivoju gozdnega sestoja nimamo, zato smo delež skalnatosti za posamezen sestoj prepisali iz gozdnega odseka, v katerem se sestoj nahaja. Oceno skalnatosti, kot delež na površino v odstotkih (%), okularno določi Zavod za gozdove Slovenije. Skalnatost sestoja po razredih prikazujemo na sliki (Slika 3).



*Slika 3: Skalnatost sestojev po razredih*

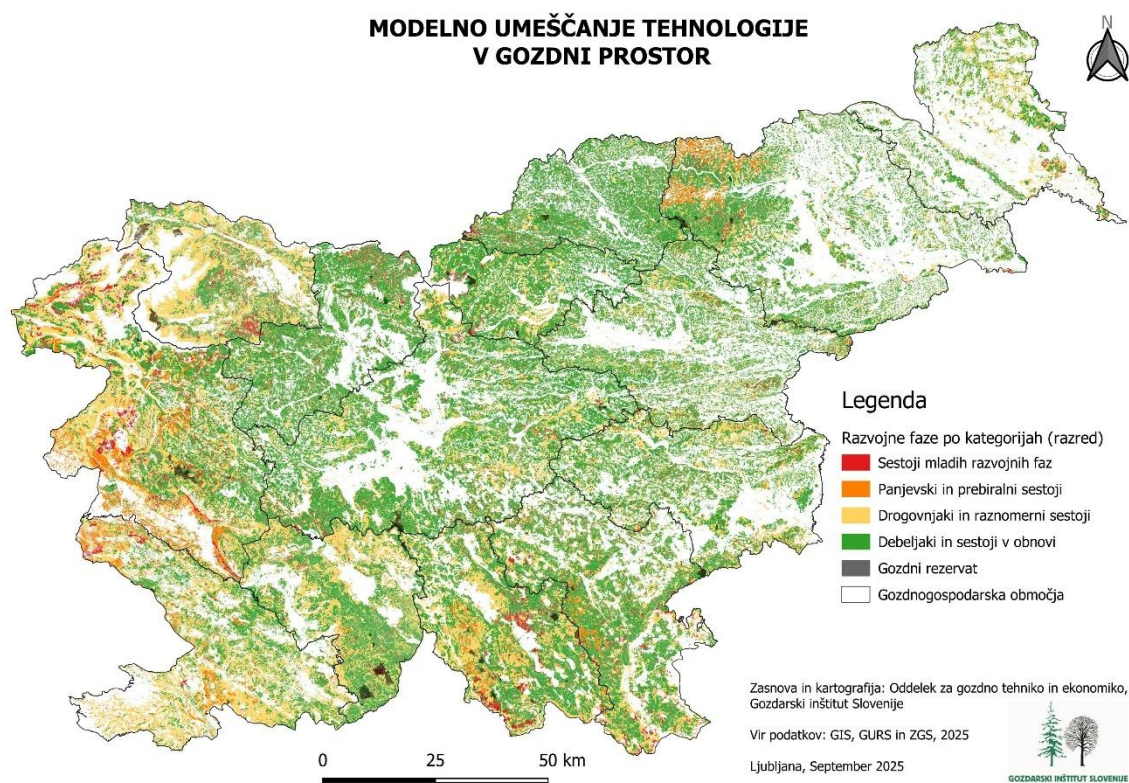
#### *1.2.3.4 Razvojna faza*

Razvojna faza (RF) predstavlja življenjsko obdobje gozdnega sestoja, ki je opredeljeno s prevladujočim prsnim premerom (v cm). Opisana je s kategorično spremenljivko, kjer je možnih 11 izbir kategorije: (1) mladovje, (2) drogovnjak, (3) debeljak, (4) sestoj v obnavljanju, (5) dvoslojni sestoj, (6) posamično do šopasto raznomerni sestoj/prebiralni sestoj, (7) skupinsko do gnezdasto raznomerni sestoj, (8) panjevec, (9) grmičav gozd, (10) pionirski gozd z grmišči in (11) tipični prebiralni sestoji. Za potrebe modela smo kategorije razvojnih faz še

dodatno smiselno razdelili v štiri skupine (tudi z namenom kasnejšega vrednotenja), kjer skupina 1 z vidika ekonomske upravičenosti sečnje in spravila predstavlja najmanj primerne, skupina 4 pa najprimernejše razvojne faze. Z večanjem prsnega premera se namreč praviloma več vrednost posameznega drevesa, kot tudi produktivnost dela (Vadnjal J., 2008). Razvojna faza je opisana na nivoju sestoja, določi jo Zavod za gozdove Slovenije. Smiselno razdeljene kategorije razvojnih faz prikazujemo v preglednici (Preglednica 3), prostorsko razporeditev za območje celotne Slovenije pa na sliki (Slika 4).

*Preglednica 3: Smiselna delitev razvojnih faz po razredih*

| Razred | Opis                                                             | Pripadajoče razvojne faze s šiframi ZGS                                   |
|--------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1      | Sestoji mladih razvojnih faz (pionirski gozd, mladovje, grmišča) | 1 – Mladovje;<br>9 - Grmičast gozd<br>10 – Pionirski gozd z grmišči       |
| 2      | Panjevski sestoji in prebiralni sestoji                          | 8 – Panjevec<br>11 – Tipični prebiralni sestoji                           |
| 3      | Drogovnjaki in raznomerni sestoji                                | 2 – Drogovnjak<br>6 – Raznomerno (ps-šp, preb)<br>7 - Raznomerno (sk-gnz) |
| 4      | Debeljaki in sestoji v obnovi                                    | 3 - Debeljak<br>4 - Sestoj v obnovi<br>5 - Dvoslojni sestoj               |

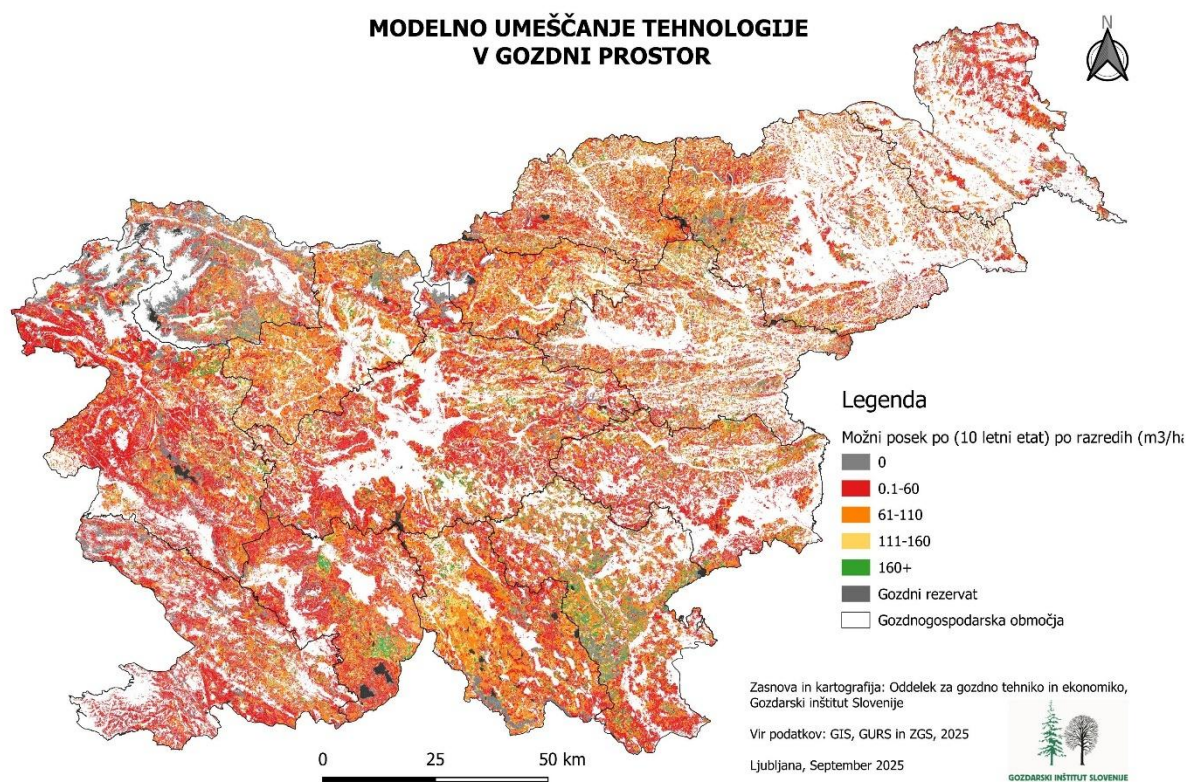


*Slika 4: Razvojne faze, smiselno razdeljene v razrede, za območje celotne Slovenije*

#### *1.2.3.5 Možni posek (10 letni etat)*

Možni posek predstavlja največjo količino lesa ( $m^3$ ), ki jo je v določenem časovnem obdobju dovoljeno posekati na določenem gozdnem območju ne da bi pri tem ogrozili dolgoročno stabilnost in sposobnost obnove gozdnega ekosistema. Določa ga Zavod za gozdove Slovenije v okviru gozdnogospodarskih načrtov, pri čemer se ločeno obravnavajo listavci in iglavci, ter se prilagaja strukturi, razvojnemu stadiju in funkcijam gozda. Gre za ključen element trajnostnega gospodarjenja, saj omogoča usklajevanje proizvodne funkcije gozda z njegovimi ekološkimi in socialnimi vlogami. Možni posek temelji na natančni oceni lesne zaloge, prirastka ter stanja sestojev in zagotavlja trajnostno izrabo gozdne lesne biomase. Višja vrednost možnega poseka pomembno vpliva na izbiro tehnologije pridobivanja lesa. Večji volumen razpoložljivega lesa na enoto površine ( $m^3/ha$ ) omogoča racionalnejšo uporabo

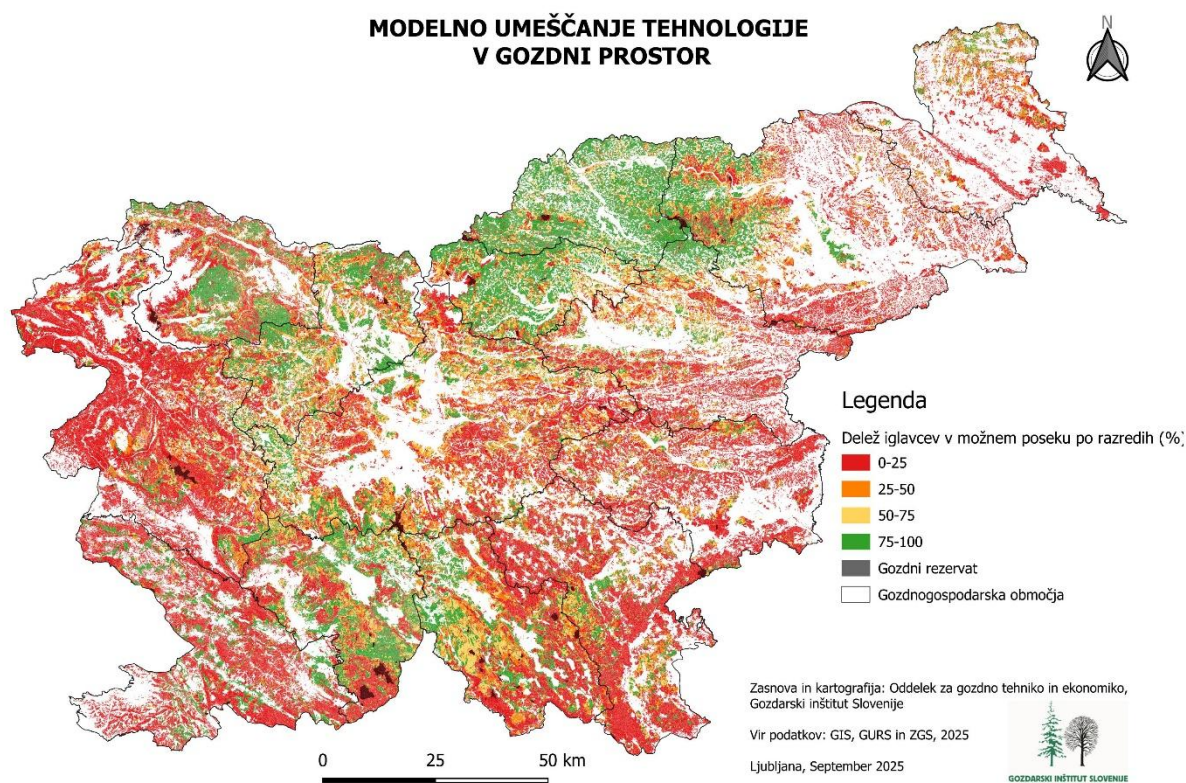
specializirane gozdarske mehanizacije, kar pripomore k večji izkoriščenosti mehanizacije, nižjim stroškom ter povečanju varnosti in učinkovitosti izvajanja gozdarskih del. Za potrebe našega modela možni posek predstavljamo kot razmerje med skupnim možnim posekom ( $\text{m}^3$ ) na površino ( $\text{ha}$ ). Za poligone gozdnih sestoje, ki smo jih za potrebe modela razdelili na manjše enote, smo možni posek določili glede na površino. To pomeni, da smo pri razdelitvi posameznega sestoja na nove poligone vrednosti možnega poseka razporedili sorazmerno z deležem površine posameznega poligona v primerjavi s celotnim sestojem, kateremu pripada. Slika 5 prikazuje možni posek za obdobje 10 let za območje celotne Slovenije. Možni posek smo razdelili v pet razredov ( $0 \text{ m}^3/\text{ha}$ ,  $0.1\text{-}60 \text{ m}^3/\text{ha}$ ,  $61\text{-}110 \text{ m}^3/\text{ha}$ ,  $111\text{-}160 \text{ m}^3/\text{ha}$ , več kot  $160 \text{ m}^3/\text{ha}$ ).



*Slika 5: Možni posek za obdobje 10 let, razdeljen po posameznih razredih*

#### *1.2.3.6 Delež iglavcev*

Podobno kot lesna zaloga je možni posek v posameznem sestoju sestavljana iz poseka listavcev in iglavcev. Z vidika produktivnosti in s tem povezanih stroškov dela ima drevesna sestava (delitev na listavce in iglavce) lahko pomemben vpliv na učinkovitost procesa pridobivanja lesa. Razlike v morfoloških značilnostih drevesnih vrst, kot so oblika in enakomernost debel ter fizikalne lastnosti lesa, vplivajo na zahtevnost obdelave in transporta. Na ta način se v sestojih z večjim deležem iglavcev lahko dosega višje delovne učinke, kar posredno prispeva k nižjim stroškom dela in večji ekonomski upravičenosti uporabe avtomatiziranih strojnih tehnologij pridobivanja lesa (Parajuli M. in sod., 2020; Mederski P.S. in sod., 2022). Delež iglavcev, merjen v odstotkih (%), smo izračunali kot razmerje med možnim posekom iglavcev in skupnim možnim posekom v sestoju. Za poligonske gozdne sestoje, ki smo jih za potrebe modela razdelili na manjše enote, smo delež iglavcev določili glede na površino. To pomeni, da smo pri razdelitvi posameznega sestoja na nove poligone vrednosti deleža iglavcev razporedili sorazmerno z deležem površine posameznega poligona v primerjavi s celotnim sestojem, kateremu pripada. Delež iglavcev v možnem poseku po razredih prikazujemo na sliki (Slika 6).



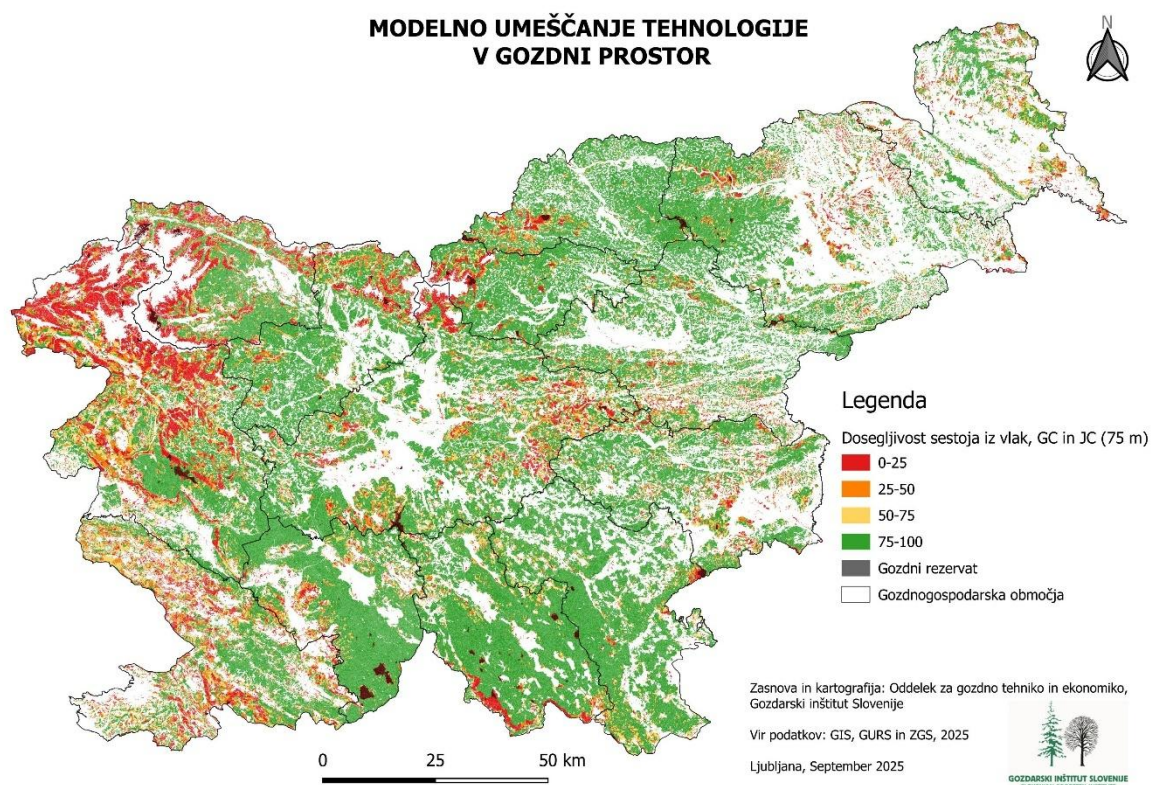
*Slika 6: Delež iglavcev v možnem poseku po razredih*

#### *1.2.3.7 Dosegljivost iz prometnice*

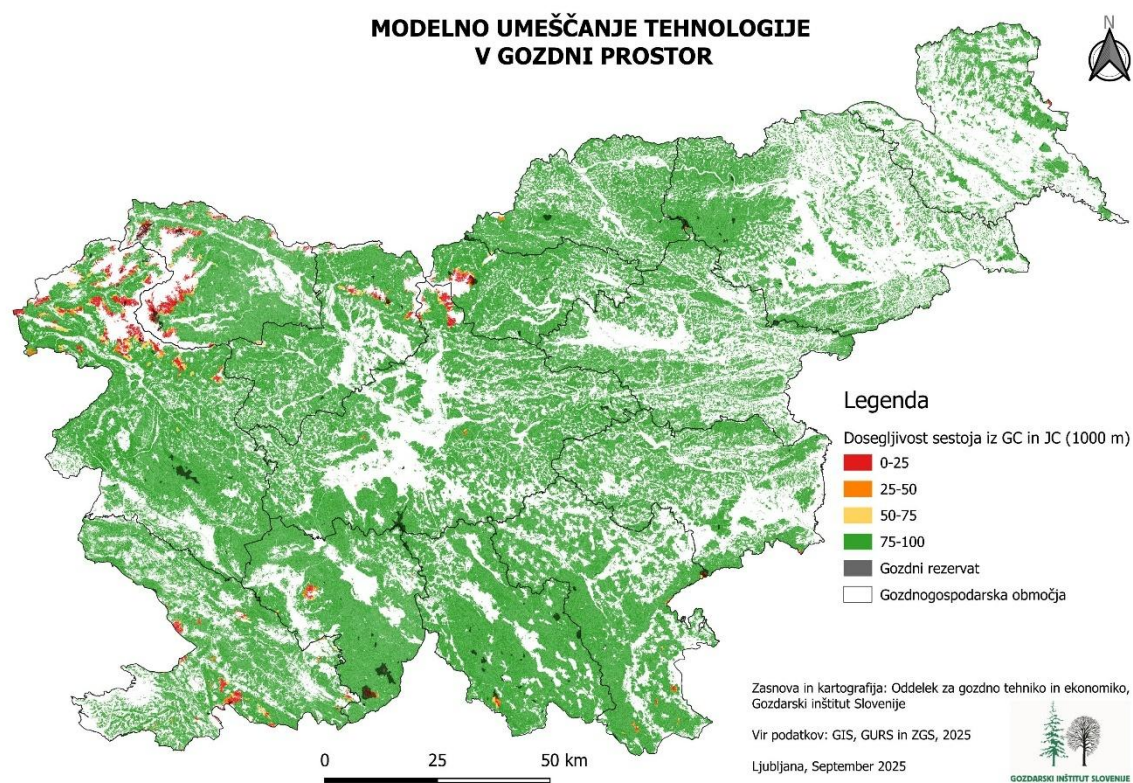
Dosegljivost sestoji iz prometnice, merjen v odstotkih (%), smatramo kot razmerje med dosegljivim gozdnim območjem prek primernih gozdnih prometnic (vlake, gozdne ceste, protipožarne preseke in primerne javne prometnice) in skupno površino sestoja. Dosegljivo gozdno območje definiramo kot območje v vnaprej določenem pasu (»buffer zone«) ob prometnicah, iz katerega lahko privlačujemo s traktorskim vitlom. Širina pasu je teoretična in ni v odvisnosti od drugih parametrov, kot so denimo naklon terena, relief ali smer spravila. S parametrom želimo za vsako tehnologijo posebej ugotoviti kolikšen del sestoja je tehnologiji dejansko odprt oziroma dosegljiv, torej kolikšen delež sestoja je tehnologiji dostopen in posledično primeren za spravilo lesa. Parameter dosegljivosti sestoja je iz tega vidika pomemben predvsem za tehnologije spravila lesa. Širino pasu in primerne prometnice smo

določili posebej za tehnologije spravila. Za spravilo po tleh (z vitlom ali prikolico) smo pas opredelili z 75 m oddaljenostjo od vseh vrst prometnic (ne glede na kategorijo). Za spravilo po zraku (gozdarska žičnica) pa smo upoštevali razdaljo 1000 m od primarnih prometnic (brez gozdnih vlak). Na primeru spravila po zraku predpostavljamo, da so povezave z gozdnimi vlakami za to obliko spravila praktično nepomembne, ključne so zgolj zanesljive prometnice, s širokim in utrjenim voziščem. Zato dostopnost za primer spravilo po zraku uporabimo gozdne ceste in zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture (kategorije GJI\_ATR2 od 3 do 13). Večji pas (1000 m) od prometnice določimo ob predpostavki, da žičniško spravilo omogoča spravilo lesa na večjih razdaljah, kot na primer v primerjavi s traktorskim pravilom v primeru uporabe gozdarskega vitla (kapaciteta sodobnega vrvnega bobna sega do 100 m).

Dosegljivost sestoja za posamezno tehnologijo smo izračunali na način, da smo sprva smiselno združili posamezne sloje prometnic (vlake, gozdne ceste, protipožarne preseke in ostale objekte zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture). Pasove dobimo s funkcijo *buffer* s katero dobimo nove poligone. Sledi združevanje novih poligonov (funkcija *union*) in ugotavljanje prekrivanja dobljenega pasu s slojem sestojev, izračun površine in razmerja površine pasu s celotno površino sestoja. Poudarjamo, da končno razmerje dosegljivosti predpostavlja, da je vožnja po kartiranih gozdnih vlakah in cestah omogočena in primerna za predvideno obliko tehnologije. Hkrati v izračun niso vštete morebitne predvidene sečne poti, s katerimi se v praksi dosegljivost območja povečuje. Dosegljivost sestoja po razredih prikazujemo na naslednjih slikah (Slika 7, Slika 8).



*Slika 7: Dosegljivost sestoja iz prometnic - oddaljenost 75 m*



*Slika 8: Dosegljivost sestoja iz prometnic - oddaljenost 1000 m*

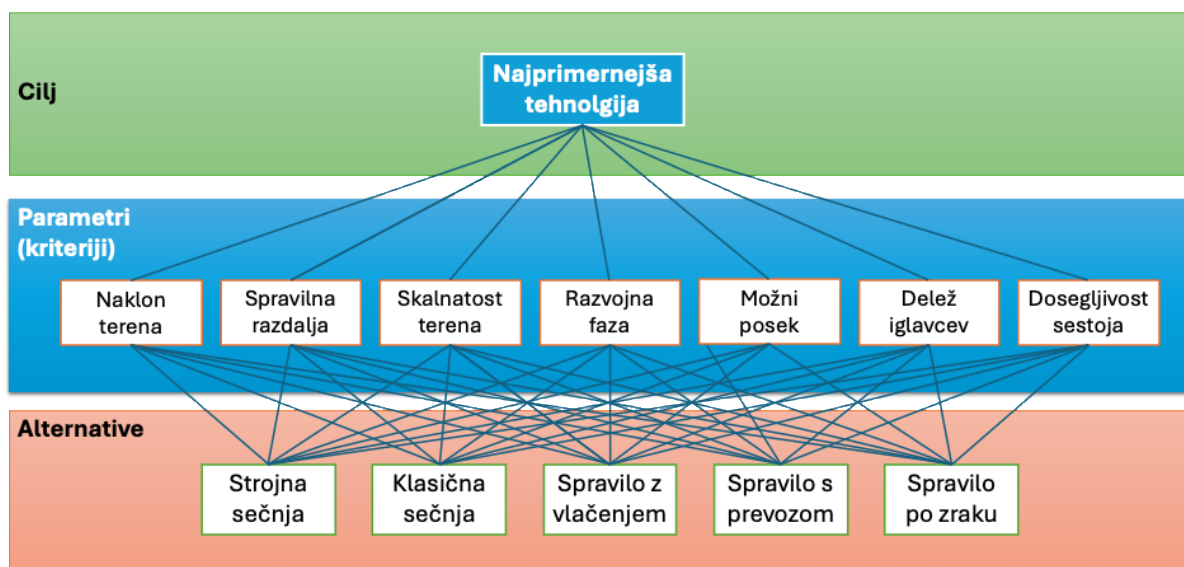
Nekatere parametre, ki smo jih predhodno sicer predvideli kot smiselne za uporabo v modelu smo tekom priprave podatkov iz modela izločili oziroma za potrebe modela prilagodili. Nabor sprememb z utemeljitvijo predstavljamo v preglednici (Preglednica 4).

*Preglednica 4: Vsebinsko prilagojeni parametri*

| Predviden parameter               | Spremenjen parameter             | Utemeljitev                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Relief                            | Izločen                          | Menimo, da je parameter relief, ki je bil podan kot kategorična spremenljivka in za potrebe aplikacije na gozdni sestoj pridobljen iz odseka, kateremu gozdni sestoj pripada, v modelu nepotreben. saj ga v veliki meri definirata naklon in skalnatost, ki sta v model že vključena kot neodvisna parametra.                            |
| Lesna zaloga (m <sup>3</sup> /ha) | Možni posek (m <sup>3</sup> /ha) | Čeprav lahko na podlagi podatka lesne zaloge sestoja sklepamo na potencial sestoja za pridobivanje lesa, pa nam podatek o možnem poseku poda bistveno natančnejši in celovitejši odgovor na količino lesa, ki ga lahko posekamo, hkrati pa količina že vključuje vse elemente trajnostnega gospodarjenja in zagotavljanja funkcij gozda. |

### 1.2.4 Vrednotenje primernosti tehnologij glede na operativne pogoje

Umeščanja tehnologij v gozdni prostor izvedemo na podlagi vrednotenja primernosti različnih tehnologij pridobivanja lesa. Analitični hierarhični proces (AHP) je metoda za podporo odločanju, ki jo je v 70. letih razvil Thomas L. Saaty (Saaty T.L., 1994). Gre za strukturiran pristop, ki temelji na matematičnih in psiholoških načelih ter omogoča sistematično reševanje kompleksnih odločitev. Ključna značilnost metode je razčlenitev problema v hierarhično strukturo, sestavljeno iz cilja, kriterijev (in po potrebi podkriterijev) ter možnih alternativ. Z združitvijo uteži kriterijev in ocen alternativ metoda omogoča izračun skupne vrednosti za vsako alternativo ter izbiro najustrežnejše. AHP omogoča vključevanje subjektivnih mnenj strokovnjakov, kjer objektivnih meril ni mogoče enostavno določiti (Saaty T.L., 1994; Saaty T.L. in Vargas L.G., 2013).



Slika 9: Hierarhični model vrednotenja tehnologij

Za potrebe izvedbe vrednotenja z metodo AHP smo za vsak že določen parameter opredelili območje možnih vrednosti, ki jih ta parameter lahko zajema. Te vrednosti smo nato razdelili v štiri razrede, da smo sistematično opredelili različna območja delovanja tehnologij v različnih operativnih pogojih. Razredov bi lahko sicer oblikovali poljubno število, a je smiselno opredeliti le toliko razredov, da se ustrezno odražajo razlike med obravnavanimi tehnologijami.

Razrede možnih vrednosti posameznih parametrov je uskladila in določila strokovna skupina na podlagi pregleda literature (Marčeta D. in sod., 2020; Latterini F. in sod., 2022; Stefanoni W. in sod., 2023) in lastnih izkušenj. Razrede po posameznih parametrih predstavljamo v preglednici (Preglednica 5).

*Preglednica 5: Prikaz razredov po posameznih parametrih*

| Naklon terena (%) | Spravilna razdalja (m) | Skalnatost terena (%) | Razvojna faza (kategorična spremenljivka) | Možni posek (m <sup>3</sup> /ha) | Delež iglavcev (%) | Dosegljivost sestoja (%) |
|-------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------|
| 0-20              | 0-200                  | 0-15                  | 1                                         | 0-60                             | 0-25               | 0-25                     |
| 20-40             | 200-400                | 15-30                 | 2                                         | 61-110                           | 25-50              | 25-50                    |
| 40-60             | 400-800                | 30-45                 | 3                                         | 111-160                          | 50-75              | 50-75                    |
| 60 +              | 800 +                  | 45 +                  | 4                                         | 160 +                            | 75-100             | 75-100                   |

Vsakemu razredu smo na točkovni lestvici od 0 do 5 določili stopnjo primernosti posamezne tehnologije. Treba je poudariti, da izvedljivost posamezne tehnologije v danem sestoji ni samoumevna. Zaradi terenskih omejitev ali značilnosti sestoja določena tehnologija pridobivanja lesa ni vedno izvedljiva, ali pa je njena uporaba z ekonomsko ali ekološkega vidika neupravičena. V takšnih primerih smo v preglednici ocenjevanja operativne primernosti določene tehnologije v pogojih, ki uporabo in delo tehnologije ne omogočajo, ocenili z vrednostjo 0. Ocena 0 označuje popolno neprimernost, kar pomeni, da uporaba izbrane tehnologije ni izvedljiva z vidika tehničnega ali okoljskega razloga. Tehnologiji, ki prejmejo oceno 0 pri kateremkoli parametru, se ji dodeli skupna ocena 0. Ne glede na vrednost ocen v preostalih parametrih je končni rezultat za to tehnologijo enak 0, kar pomeni, da je bila v danem sestoji samodejno izločena kot neprimerna.

Kadar pa uporaba določene tehnologije ni tehnično onemogočena, a bi bila z ekološkega ali ekonomskega vidika vprašljiva, smo primernost ocenili z najnižjo možno pozitivno vrednostjo, torej z oceno 1. Na ta način se je ohranila možnost vključitve v model, vendar je bila zaradi nizke ocene rezultatsko potisnjena v ozadje, kar ustrezno odraža njeno nizko primernost v

konkretnih pogojih. Ocena 1 pomeni, da je uporaba tehnologije v izbranem razredu sicer izvedljiva, vendar vprašljiva z vidika trajnosti (ekonomskega, družbenega ali okoljskega načela).

Ocena 2 pomeni, da je tehnologija primerna. Medtem, ko ocena 5 pomeni visoko (najustreznejšo) primernost tehnologije za določen razpon vrednosti parametra. Na primer, delo s traktorjem, ki zaradi tehničnih omejitev ni primeren za delo na večjih naklonih, smo pri razredih naklonov dodelili visoko oceno primernosti pri nižjih naklonih, medtem ko smo pri večjih naklonih dodelili nižje ocene. Dodelitev ocen je temeljila na analizi pregledane literature ter vrednosti parametrov znotraj posameznih razredov, s čimer smo sistematično opredelili najustreznejše tehnologije za specifične operative pogoje. Vrednotenje primernosti tehnologij po posameznih razredih prikazujemo v preglednici (Preglednica 6).

*Preglednica 6: Matrika vrednotenja primernosti tehnologij*

|                      | Naklon (%) |       | Spravilna razdalja (m) |       | Skalnost terena (%) |       | Razvojna faza sestoja |       | Delež iglavcev (%) |       | Možni posek (m <sup>3</sup> / ha) |       | Dosegljivost z g. vlake (%) |       |
|----------------------|------------|-------|------------------------|-------|---------------------|-------|-----------------------|-------|--------------------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------|-------|
|                      | Razred     | Ocena | Razred                 | Ocena | Razred              | Ocena | Razred                | Ocena | Razred             | Ocena | Razred                            | Ocena | Razred                      | Ocena |
| Klasična sečnja      | 0-20       | 5     | 0-200                  | 5     | 0-15%               | 5     | 4                     | 5     | 75-100             | 4     | 0-60                              | 5     | 75-100                      | 3     |
|                      | 20-40      | 5     | 200-400                | 5     | 15-30%              | 5     | 3                     | 5     | 50-75              | 4     | 61-110                            | 4     | 50-75                       | 3     |
|                      | 40-60      | 5     | 400-800                | 5     | 30-45%              | 5     | 2                     | 5     | 25-50              | 4     | 111-160                           | 3     | 25-50                       | 3     |
|                      | 60+        | 5     | 800+                   | 5     | 45%+                | 5     | 1                     | 5     | 0-25               | 4     | 160+                              | 1     | 0-25                        | 3     |
| Strojna sečnja       | 0-20       | 5     | 0-200                  | 5     | 0-15%               | 5     | 4                     | 5     | 75-100             | 5     | 0-60                              | 1     | 75-100                      | 3     |
|                      | 20-40      | 5     | 200-400                | 5     | 15-30%              | 4     | 3                     | 4     | 50-75              | 4     | 61-110                            | 2     | 50-75                       | 3     |
|                      | 40-60      | 3     | 400-800                | 5     | 30-45%              | 2     | 2                     | 3     | 25-50              | 3     | 111-160                           | 4     | 25-50                       | 3     |
|                      | 60+        | 0     | 800+                   | 3     | 45%+                | 0     | 1                     | 1     | 0-25               | 2     | 160+                              | 5     | 0-25                        | 3     |
| Spravilo z vlačanjem | 0-20       | 5     | 0-200                  | 5     | 0-15%               | 5     | 4                     | 5     | 75-100             | 5     | 0-60                              | 5     | 75-100                      | 5     |
|                      | 20-40      | 5     | 200-400                | 4     | 15-30%              | 5     | 3                     | 5     | 50-75              | 5     | 61-110                            | 4     | 50-75                       | 4     |
|                      | 40-60      | 3     | 400-800                | 3     | 30-45%              | 4     | 2                     | 3     | 25-50              | 4     | 111-160                           | 3     | 25-50                       | 3     |
|                      | 60+        | 2     | 800+                   | 1     | 45%+                | 3     | 1                     | 1     | 0-25               | 4     | 160+                              | 1     | 0-25                        | 1     |
|                      | 0-20       | 5     | 0-200                  | 5     | 0-15%               | 5     | 4                     | 5     | 75-100             | 5     | 0-60                              | 1     | 75-100                      | 5     |

|                              |       | Naklon (%) |       | Spravilna razdalja (m) |       | Skalnost terena (%) |       | Razvojna faza sestoja |       | Delež iglavcev (%) |       | Možni posek (m <sup>3</sup> / ha) |       | Dosegljivost z g. vlake (%) |       |
|------------------------------|-------|------------|-------|------------------------|-------|---------------------|-------|-----------------------|-------|--------------------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------|-------|
|                              |       | Razred     | Ocena | Razred                 | Ocena | Razred              | Ocena | Razred                | Ocena | Razred             | Ocena | Razred                            | Ocena | Razred                      | Ocena |
| Spravilo s forwarderjem      | 20-40 | 5          |       | 200-400                | 5     | 15-30%              | 4     | 3                     | 4     | 50-75              | 5     | 61-110                            | 3     | 50-75                       | 5     |
|                              | 40-60 | 3          |       | 400-800                | 5     | 30-45%              | 2     | 2                     | 3     | 25-50              | 4     | 111-160                           | 4     | 25-50                       | 5     |
|                              | 60+   | 0          |       | 800+                   | 3     | 45%+                | 0     | 1                     | 1     | 0-25               | 4     | 160+                              | 5     | 0-25                        | 4     |
| Spravilo s prikolico         | 0-20  | 5          |       | 0-200                  | 3     | 0-15%               | 5     | 4                     | 5     | 75-100             | 5     | 0-60                              | 3     | 75-100                      | 5     |
|                              | 20-40 | 5          |       | 200-400                | 4     | 15-30%              | 5     | 3                     | 5     | 50-75              | 5     | 61-110                            | 4     | 50-75                       | 4     |
|                              | 40-60 | 5          |       | 400-800                | 5     | 30-45%              | 4     | 2                     | 3     | 25-50              | 4     | 111-160                           | 5     | 25-50                       | 3     |
|                              | 60+   | 3          |       | 800+                   | 5     | 45%+                | 3     | 1                     | 1     | 0-25               | 4     | 160+                              | 5     | 0-25                        | 1     |
| Spravilo z gozdarsko žičnico | 0-20  | 1          |       | 0-200                  | 1     | 0-15%               | 5     | 4                     | 5     | 75-100             | 5     | 0-60                              | 1     | 75-100                      | 1     |
|                              | 20-40 | 2          |       | 200-400                | 3     | 15-30%              | 5     | 3                     | 4     | 50-75              | 5     | 61-110                            | 3     | 50-75                       | 1     |
|                              | 40-60 | 5          |       | 400-800                | 5     | 30-45%              | 5     | 2                     | 1     | 25-50              | 5     | 111-160                           | 5     | 25-50                       | 3     |
|                              | 60+   | 5          |       | 800+                   | 5     | 45%+                | 5     | 1                     | 0     | 0-25               | 4     | 160+                              | 5     | 0-25                        | 5     |

Za potrebe izdelave tehnološke karte smo uporabili večkriterijsko metodo odločanja SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique). V SMART metodo smo vključili gozdarske strokovnjake, ki so ocenjevali posamezne kriterije na podlagi svojih izkušenj in znanj. Izbrani kriteriji so jim bili predhodno pojasnjeni, ocenjevalci pa so jih nato ocenjevali po pomembnosti glede na to kako po njihovem mnenju posamezen kriterij vpliva na umeščanje tehnologij v prostor. Vprašalnik prikazujemo v preglednici (Preglednica 7).

*Preglednica 7: Določanje uteži uporabljenim parametrom modela za umeščanje tehnologij v gozdni prostor po metodi SMART*

| Parameter                                                                                                                                                                           | Ocena |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Naklon terena (%) – vpliv na produktivnost dela, okoljske in ergonomske vidike                                                                                                      |       |
| Spravilna razdalja (m) – vpliv na produktivnost dela, stroškovne in okoljske vidike;                                                                                                |       |
| Skalovitost (%) – omejitveni dejavnik, ki otežuje dostopnost in premikanje z gozdarsko mehanizacijo, kar se odraža na zmanjšanju produktivnosti dela in večjim tveganjem za nesreče |       |
| Razvojna faza (kategorična spremenljivka) – kriterij preko katerega posredno dobimo informacijo o debelinski strukturi sestoja (prevladujoč prsni premer – cm)                      |       |

| Parameter                                                                                                                                                        | Ocena |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Možni posek(m <sup>3</sup> /ha) – vpliv na produktivnost, stroške in upravičenost uporabe določene gozdarske tehnologije.                                        |       |
| Delež iglavcev (%) – vpliv na produktivnost in posledično stroške. Večji delež iglavcev prispeva k večji učinkovitosti dela.                                     |       |
| Dosegljivost iz prometnice – podobno kot pravilna razdalja kriterij podaja dejansko dosegljivost sestoja, kjer je možno opravljanje dela s določeno tehnologijo. |       |

Matriko parnih primerjav SMART (uteži) smo pomnožili z matriko ocen vrednotenja primernosti tehnologij, da smo dobili končno matriko tehtanega povprečja za vsako obliko pridobivanja lesa, katero smo kasneje uporabili pri izračunu tehnološke karte. Metoda omogoča objektivne in strukturirane odločitve ter zagotavlja, da so izbrane tehnologije prilagojene specifičnim razmeram v gozdu.

#### *1.2.4.1 Modelno ocenjena najprimernejša kombinacija tehnologij*

Tehnološka karta rezultate vrednotenja predstavlja kot kombinacije tehnologij sečnje in spravila. Končni nabor možnih rešitev zajema naslednje kombinacije:

- klasična sečnja in traktorsko spravilo – vitel,
- klasična sečnja in traktorsko spravilo - prikolica,
- klasična sečnja in žičniško spravilo,
- ter strojna sečnja.

Na ravni posameznega gozdnega sestoja bo model kot najprimernejšo določil tisto tehnologijo, ki bo dosegla najvišji skupni rezultat, izračunan kot zmnožek matričnih ocen primernosti in uteži pripadajočih parametrov. V primeru enakega zmnožka dveh tehnologij, smo modelu določili, da kot najprimernejšo kombinacijo tehnologijo izbere po sledečem vrstnem redu:

1. Strojna sečnja
2. Klasična sečnja in traktorsko spravilo - vitel

3. Klasična sečnja in traktorsko spravilo - prikolica
4. Klasična sečnja in žičniško spravilo.

Vrstni red izbire najprimernejše kombinacije tehnologij je temeljil na podlagi okvirnih izračunov stroškov sečnje in spravila na m<sup>3</sup> lesne biomase, pri čemer so prednostno izbrane ekonomsko primernejše tehnologije. Izračune stroškov smo izvedli v prosto dostopnem spletnem orodju, kjer lahko vsak uporabnik samostojno izbira procese in stroje na način, da sestavlja lastne proizvodne verige za katere mu aplikacija izračunava stroške (Triplat M. in Krajnc N., 2020).

#### *1.2.4.2 Primerljive možnosti izbire kombinacije tehnologij*

Rezultat modela prikazuje kombinacijo tehnologij sečnje in spravila, ki je za posamezen gozdni sestoj ocenjena kot najustreznejša. Ker pa se v praksi dejansko stanje na terenu lahko razlikuje, ta kombinacija ne predstavlja edine možne izbire, zato prikazujemo tudi primerljive možnosti (alternativne izbire), torej kombinacije tistih tehnologij, katerih modelne ocene se nahajajo znotraj 10 % intervala najvišje dosežene vrednosti.

#### *1.2.4.3 Druge posebnosti modelnega umeščanja kombinacij tehnologij v gozdni prostor*

Model predvideva, da se gozdni sestoji, ki so predvsem zaradi izjemnih terenskih razmer (izrazit naklon terena) in pomanjkanje gozdne prometne infrastrukture, lahko uvrstijo v posebne kategorije, in sicer kot oteženi ali nedostopni sestoji.

Kategorija oteženo zajema sestoje, kjer je pridobivanje lesa tehnično sicer mogoče, vendar izrazito zahtevno, operativno omejeno in lahko tudi nevarno z vidika varstva pri delu. Pridobivanje lesa na takšnih terenih omejuje kombinacija fizikalnih omejitev in varnostni tveganj. Sile trenja lesne biomase na zelo strmih terenih lahko popustijo, kar privede do

nekontroliranih in nevarnih premikov. Za uvrstitev v to kategorijo mora gozdni sestoj izpolnjevati pogoj, da je povprečni naklon terena večji od 100 %. Rezultat modela bo vseeno prikazal najustreznejšo kombinacijo sečnje in spravilo in ob njen dodal pripis, da je delo v sestoju zaradi velikega naklona oteženo.

Kategorija nedostopno je namenjena gozdnim sestojem, kjer je tehnološka dostopnost v celoti onemogočena. Uvrstitev v to kategorijo je opredeljena z izpolnitvijo dveh pogojev:

1. Za dani sestoj je vrednost parametra dosegljivost z gozdnih vlak enaka 0 %,
2. V radiju 1000 metrov od sestoja ni prisotne nobene gozdne ceste (nedostopnost z gozdarsko žičnico).

Le ob sočasnem izpolnjevanju obeh pogojev je sestoj v modelu označen kot nedostopen, kar pomeni, da je trenutno odprtost z gozdnimi prometnicami za aktivno pridobivanje lesa s tehnologijami opredeljenimi v modelu, nezadostna in spravilo neizvedljivo. V rezultatu modela bo takšen sestoj kategorizirano v »nedostopno«, modelne ocene kombinacij tehnologij sečnje in spravila pa bodo posledično dobile vrednost 0. Model v takšnih primerih ne predvidi uporabe alternativne tehnologije.

#### *1.2.4.4 Izločanje gozdnih rezervatov*

Uredba o varovalnih gozdovih in gozdovih s posebnim namenom določa varovalne gozdove in gozdove s posebnim namenom z izjemno poudarjeno raziskovalno funkcijo, režim gospodarjenja s temi gozdovi, izvajalca tega režima in zavezanca za zagotovitev sredstev za stroške, ki nastajajo zaradi posebnega režima gospodarjenja. V gozdnih rezervatih, ne glede na to, ali veljajo strogi ali blažji varstveni režimi, so prepovedane vse dejavnosti – gospodarske, rekreacijske, raziskovalne ali druge – ki bi lahko posegle v naravno stanje gozda ali ovirale njegov nemoten naravni razvoj. Seznam gozdnih rezervatov je naveden v prilogi 2, ki je sestavni del uredbe (RS, 2020).

Umeščanje tehnologij v gozdne rezervati z vidika varstvenega režima ni smiselno, zato smo z metodologijo slednje v sklepni fazi izločimo in vse ocenjene tehnologije definiramo kot nesprejemljive (s skupno oceno 0). Za pojasnitev skupnih ocen so prikazu rezultatov sestoji, ki so del gozdnih rezervatov označeni s kategorijo "Gozdni rezervat (Strogi režim)" in Gozdni rezervat "(Blažji režim)".

Pri izločanju gozdnih rezervatov je bilo ugotovljeno, da se poligonska maska gozdnih rezervatov in poligonska maska gozdnih sestojev neprimerno prekrivata. Pri tem smo bili za poenostavitev izračunov (ali drobljenju sestojev v manjše poligonske enote) primorani sprejeti predpostavko, da gozdni sestoj pripada v gozdni rezervat, če vsaj 0,25 ha njegove površine soupada s površino gozdnega rezervata. Zaradi navedene predpostavke lahko prihaja do odstopanj pri sestojih, ki mejijo na gozdne rezervate.

### 1.2.5 Zapis modela v programskem orodju R-studio

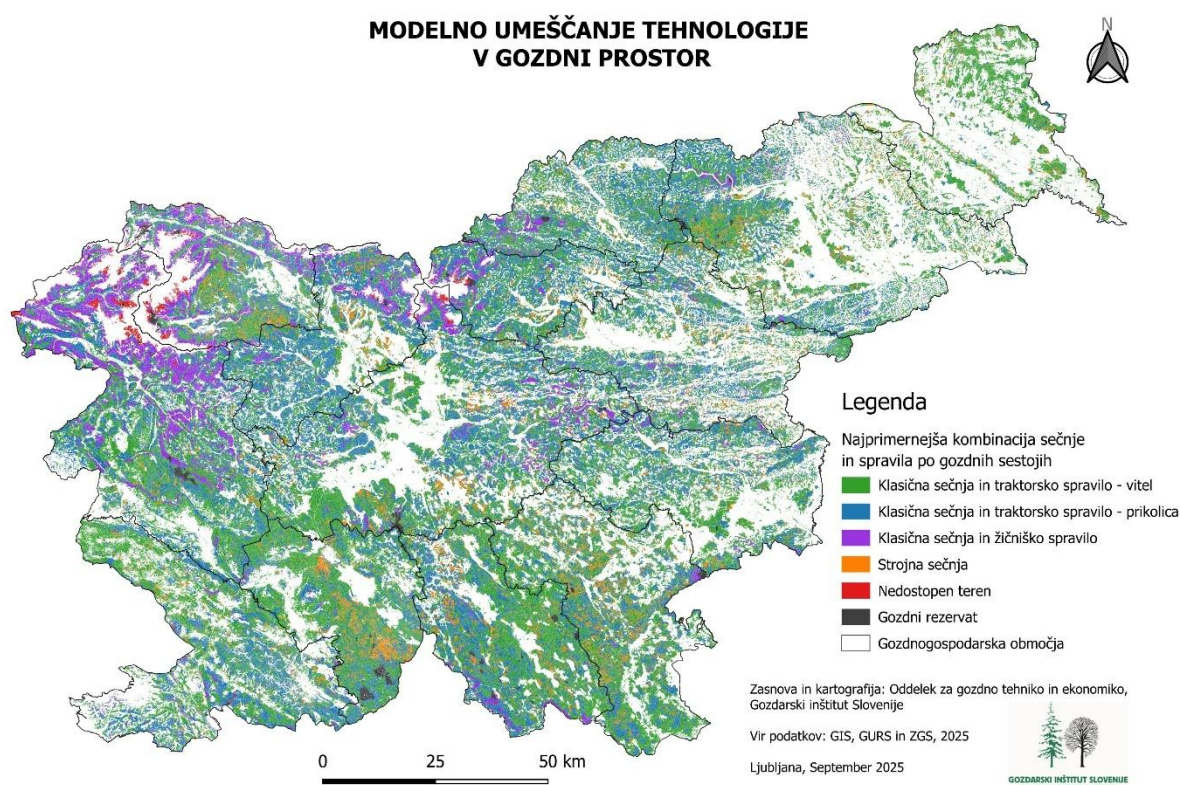
Za potrebe modeliranja na ravni celotne Slovenije smo model razvijali v programskem jeziku R (R Core Team, 2025). Takšen pristop omogoča ponovljivosti celotnega postopka modeliranja. Z zapisom modela v obliki skripte smo zagotovili, da so vsi koraki, vse od uvoza in priprave podatkov do končnih rezultatov, natančno dokumentirani in medsebojno povezani. Ključna prednost takšnega programskega pristopa je, da lahko model enostavno prilagajamo, dopolnjujemo ali spreminjamo, na primer ob posodobitvi vhodnih podatkovnih baz ali celo pri vsebinskih spremembah modela. Poleg tega omogoča, da s posamičnim zagonom celotne skripte izvedemo vse izračune in generiramo rezultate brez ročnega posredovanja, kar bistveno poenostavi postopek in poveča ponovljivost in učinkovitost dela.

Obdelovali smo podatkovne baze reda velikosti več gigabajtov, kar je posledično pomenilo zahtevne in dolgotrajne procese. S tem namenom smo s programsko kodo (paralelizacijo)

določene procese (izračun naklonov, pravih razdalj itd.) razdelili na več procesorskih jeder, s katerimi lahko boljše izkoristimo razpoložljive računalniške kapacitete in na ta način pospešili izvedbo. Optimalnejše delovanje smo dosegli še z omejitvijo izračunov na cela števila (npr. v primeru izračuna naklonov).

### 1.3 Rezultati modela

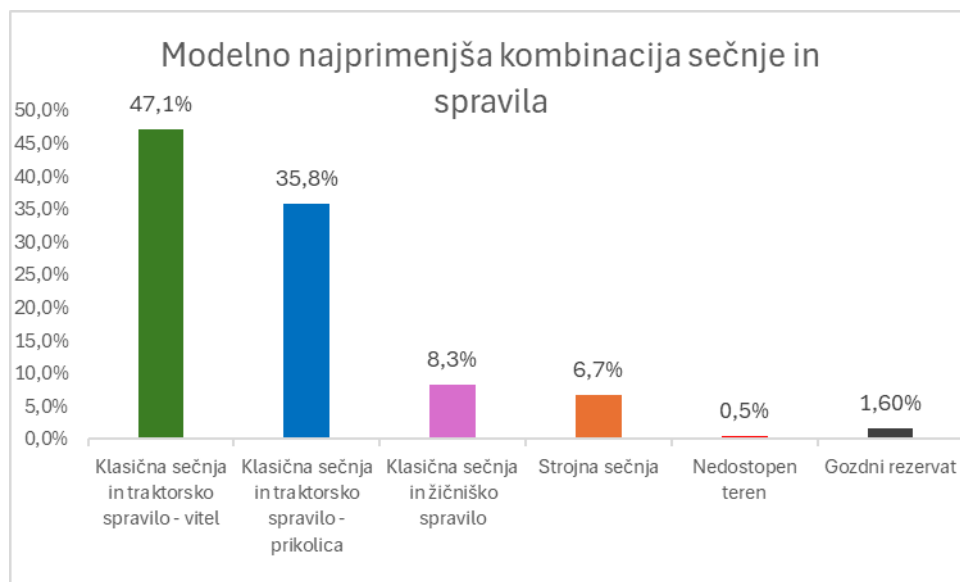
Z modelom smo pridobili končne rezultate v obliki najprimernejše kombinacije sečnje in spravila po gozdnih sestojih (Slika 10).



Slika 10: Prikaz najprimernejše kombinacije sečnje in spravila po gozdnih sestojih

Za največji delež gozdnih sestojev je kot najprimernejšo kombinacijo sečnje in spravila model predvidel klasično sečnjo in traktorsko spravilo - vitel (47,1 %), sledi klasična sečnja in traktorsko spravilo - prikolica (35,8 %), klasična sečnja in žičniško spravilo (8,3 %) najmanjši delež gozdnih sestojev pa z vidika najprimernejše kombinacije tehnologij pripada strojni sečnji

(6,7 %). Rezultati so podani kot delež seštevka skupne površine posamezne kombinacije sečnje in spravila (Slika 11).

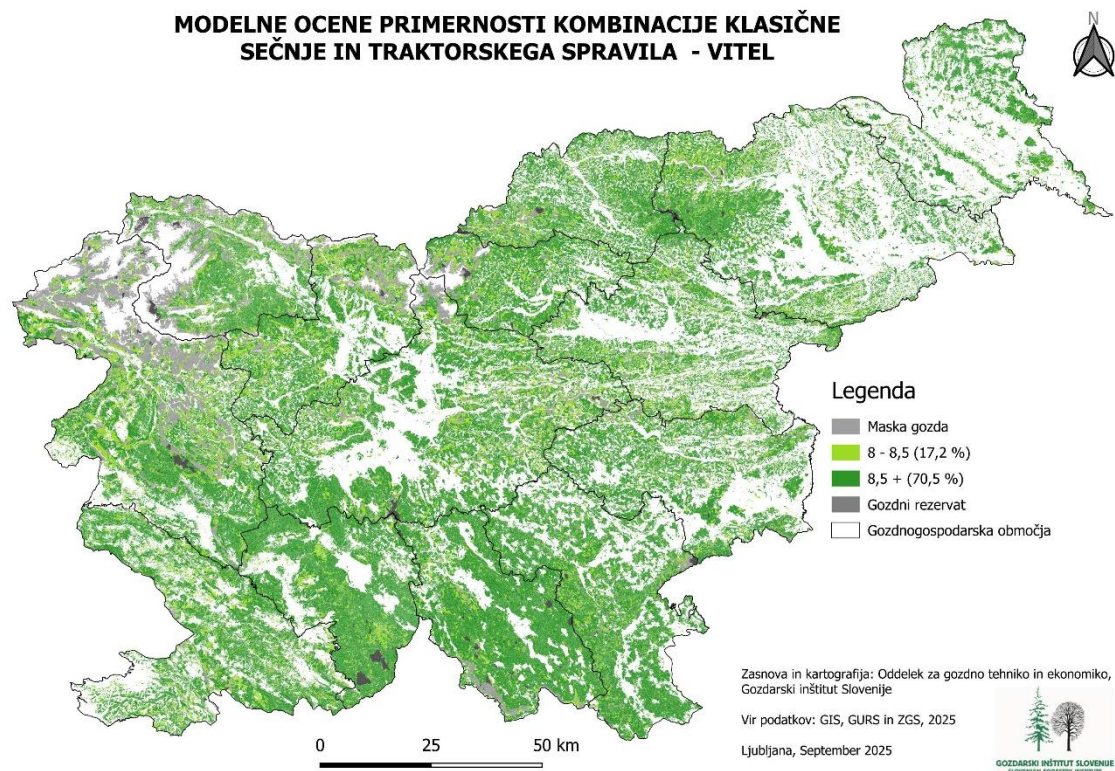


Slika 11: Deleži modelno najprimernejša kombinacija sečnje in spravila

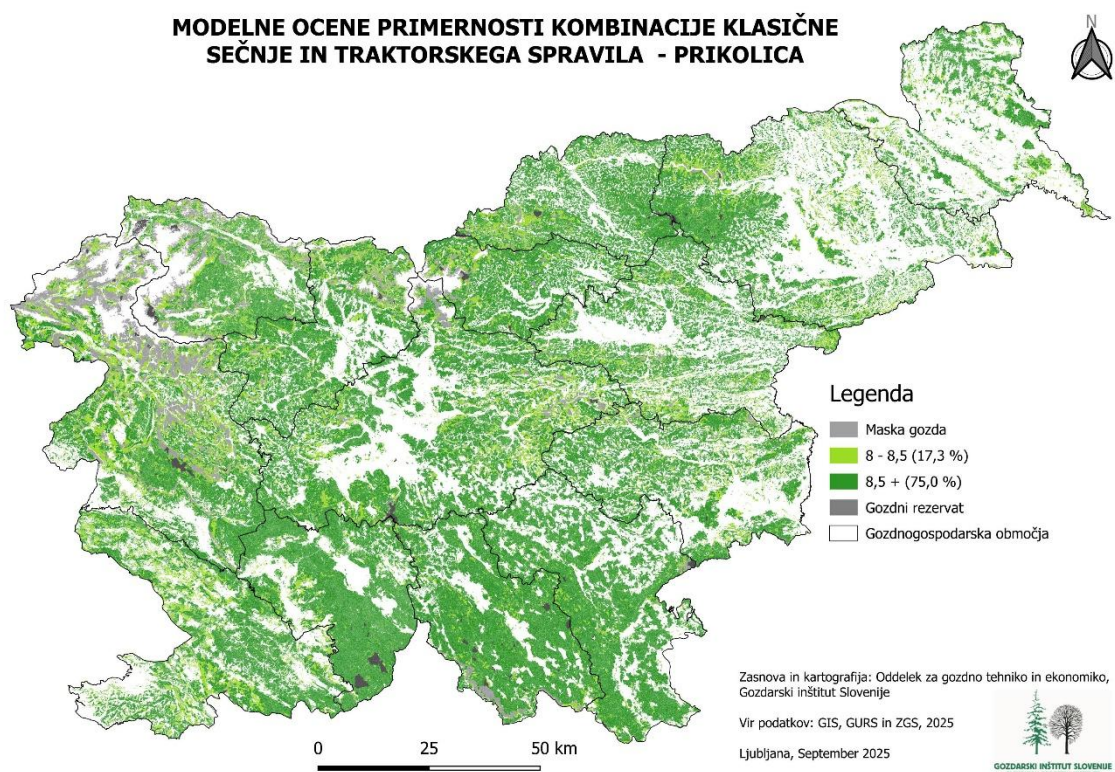
Gozdne sestoje s povprečnim naklonom večjim od 100 % smo uvrstili v kategorijo oteženo. Na podlagi modela smo skupaj vanjo uvrstili 0,8 % celotne površine gozdnih sestojev. V kategorijo nedostopno, ki jo definira ničelna vrednost parametra dosegljivost iz prometnic, smo uvrstili 0,5 % gozdnih sestojev.

Tehnološka karta, kot rezultat modela, za vsak gozdni sestoj prikaže kombinacijo sečnje in spravila, ki je bila glede na uporabljena merila (vhodne podatke) ocenjena kot najprimernejša. Izbirano tehnologijo moramo razumeti kot splošno usmeritev in ne nujno kot omejitev za preostale tehnologije, saj je lahko v praksi primerna in ustrezna tudi katera izmed preostalih tehnologij. V nekaterih pogojih, ki jih model ne obravnava so lahko druge kombinacije celo primernejše, odvisno od dejanskih terenskih pogojev, organizacijskih dejavnikov, morebitnih omejitev gospodarjenja z gozdovi ter razpoložljivosti mehanizacije in usposobljene delovne sile. V nadaljevanju prikazujemo primernost posameznih kombinacij tehnologij sečnje in

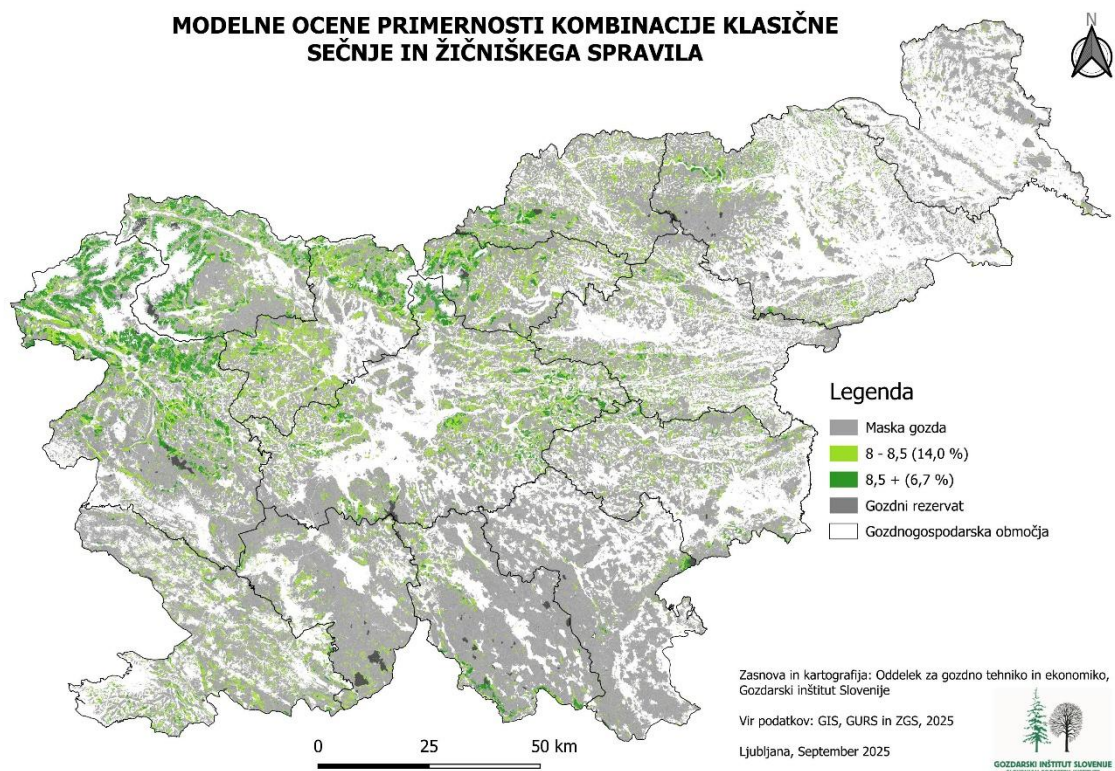
spravila. Osredotočili smo se zgolj na območja, kjer modelna ocena posamezne kombinacije tehnologije dosega vrednosti nad 8, ki jo lahko smatramo kot sprejemljivo modelno oceno.



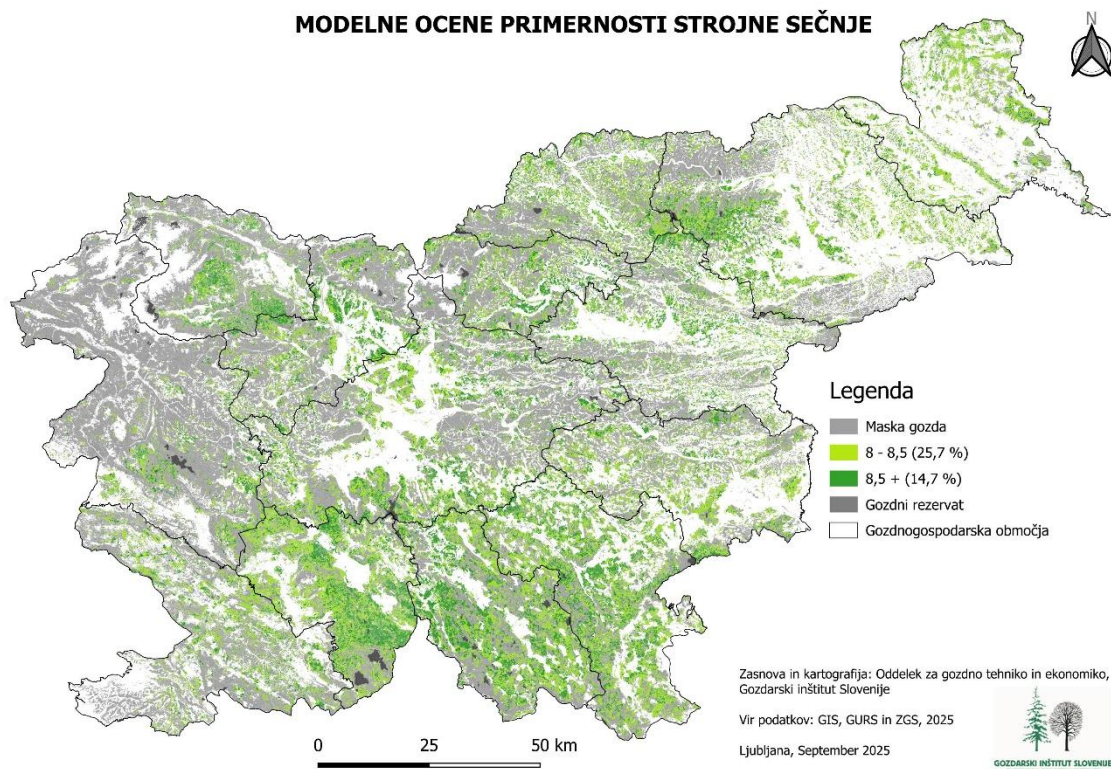
*Slika 12: Modelne ocene primernosti kombinacije klasične sečnje in traktorskega spravila z uporabo gozdarskega vitla*



Slika 13: Modelne ocene primernosti kombinacije klasične sečnje in traktorskega spravila z uporabo gozdarske traktorske prikolice



Slika 14: Modelne ocene primernosti kombinacije klasične sečnje in žičniškega spravila



*Slika 15: Modelne ocene primernosti strojne sečnje*

Model je oblikovan na podlagi večkriterijskega odločanje, ki zajema sedem predstavljenih parametrov, in ni nujno, da vedno odraža vse posebnosti razmer posameznega sestoja ali delovišča. V tem pogledu tehnološka karta ne predstavlja končnih in obvezujočih rešitve, temveč nudi zlasti pregled relativne primernosti različnih tehnologij med posameznimi območji, kar lahko služi kot orodje za nadaljnje presoje in odločanje. Končna odločitev o izbiri tehnologije je vedno vezana na terensko preverjanje, kjer je treba poleg naravnih razmer upoštevati tudi infrastrukturne omejitve, logistiko, varnostne zahteve, ekonomsko upravičenost ter cilje gospodarjenja. Prav iz tega razloga imajo rezultati modela največjo vrednost kot podporno orodje pri odločanju, ki omogoča boljši strateški pregled, medtem ko je praktična izbira tehnologije rezultat združitve modelnih ocen z lokalnimi zmožnostmi in terenskimi razmerami.

### 1.3.1 Validacija modela

Z vidika neposredne primerjave nas zanima zlasti kombinacija klasične sečnje in spravila z žičnico ter seštevka spravila z žičnice in kombinirano II (ročno in žičniško spravilo) po ZGS-ju, kjer ugotavljamo, da je model predvidel za 2,9 % večji delež žičniškega spravila. Ostalih tehnologij spravila med seboj, zaradi velikih vsebinskih razlik, ni moč neposredno primerjati.

Rezultati našega modela, ki prikazujejo najprimernejšo kombinacijo sečnje in spravila po gozdnih sestojih, niso neposredno primerljivi z oblikami spravila, ki so do današnjega dne predvidene z načrti oz. razpoložljivimi javno dostopnimi podatki. Po javno-dostopnih podatkih ZGS so oblike spravila razvrščene v pet kategorij: spravilo s traktorjem, žičnico, ročno spravilo ter kombinirani obliki – kombinirano I (ročno in traktorsko spravilo) in kombinirano II (ročno in žičniško spravilo). Pomembna razlika je tudi v tem, da ZGS določa obliko spravila na ravni posameznega gozdnega odseka, medtem ko naš model predvideva kombinacijo sečnje in spravila za območje posameznega gozdnega sestoja.

Ne glede na to smo izvedli validacijo razvrščanja podatkov. Podatke o načrtovani tehnologiji spravila smo pridobili iz podatkovne baze za opis gozdnih odsekov in jih povezali z bazo sestojev. Validacijo smo izvedli z metodo rasterizacije vektorskih podatkov na ravni 25 x 25 m. Na podlagi rastrskih podatkov umeščenih tehnologij z našo metodo in rastrskih podatkov načrtovanih tehnologij spravila smo izvedli metodo z matriko zmede (ang. "Confusion matrix"). Matrika zmede je orodje za ocenjevanje uspešnosti klasifikacijskih modelov, ki jasno prikaže, kako dobro model razvršča podatke v posamezne razrede. Matrika zmede je zato temeljno orodje za razumevanje delovanja klasifikatorja, še posebej v primerih, kjer je razporeditev razredov neuravnotežena. V obliki preglednice prikaže število pravilnih in napačnih napovedi glede na dejanske vrednosti, pri čemer stolpci predstavljajo dejanske razrede (ZGS), vrstice pa napovedane (naš model).

Preglednica 8: Matrika zmede za oceno uspešnosti klasifikacijskega modela

|                                                          | Traktor | Žičnica | Ročno | Kombinirano I<br>(kombinirano<br>traktorsko in ročno<br>spravilo) | Kombinirano II<br>(kombinirano spravilo<br>z žičnico in ročno<br>spravilo) | Ni podatka | Skupaj model |
|----------------------------------------------------------|---------|---------|-------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------|--------------|
| Klasična sečnja in<br>traktorsko spravilo - vitel        | 39,53%  | 1,23%   | 0,28% | 5,55%                                                             | 0,34%                                                                      | 0,15%      | 47,08%       |
| Klasična sečnja in<br>traktorsko spravilo -<br>prikolica | 27,34%  | 0,95%   | 0,23% | 6,92%                                                             | 0,26%                                                                      | 0,14%      | 35,84%       |
| Strojna sečnja                                           | 6,27%   | 0,05%   | 0,00% | 0,33%                                                             | 0,01%                                                                      | 0,00%      | 6,65%        |
| Klasična sečnja in žičniško<br>spravilo                  | 2,65%   | 1,89%   | 0,69% | 1,83%                                                             | 0,45%                                                                      | 0,81%      | 8,31%        |
| Nedostopen teren                                         | 0,11%   | 0,10%   | 0,08% | 0,10%                                                             | 0,00%                                                                      | 0,14%      | 0,53%        |
| Gozdni rezervat (Strogi<br>režim)                        | 0,08%   | 0,05%   | 0,00% | 0,01%                                                             | 0,00%                                                                      | 0,15%      | 0,30%        |
| Gozdni rezervat (Blažji<br>režim)                        | 0,49%   | 0,06%   | 0,02% | 0,17%                                                             | 0,07%                                                                      | 0,49%      | 1,30%        |
| Skupaj ZGS                                               | 76,46%  | 4,32%   | 1,30% | 14,90%                                                            | 1,13%                                                                      | 1,88%      | 100,00%      |

Ugotavljamo, da je največji delež traktorskega spravila (76,46 %), sledi kombinirano I (14,9 %), spravilo z žičnico (4,32 %), ročno spravilo (1,3 %) in kombinirano II (1,13 %). Nekateri gozdni sestoji spravila nimajo opredeljenega – brez, delež takšnih znaša 1,88 %.

Ključni elementi matrike so: pravilno pozitivni (TP), pravilno negativni (TN), lažno pozitivni (FP) in lažno negativni (FN) primeri. Na podlagi teh vrednosti je mogoče izračunati različne kazalnike uspešnosti, kot so natančnost (accuracy), priklic (recall), natančnost napovedi (precision) in F-vrednost. V našem primeru parametrov natančnosti ni mogoče izračunati, ker model ne uporablja enakim razredov v primerjavi z aktualnimi načrtovanimi tehnologijami spravila. Za oceno kakovosti modela lahko izračunamo parametre ločeno, če primerjamo oblike traktorskega spravila (združeno kategorije Klasična sečnja in traktorsko spravilo – vitel in

Klasična sečnja in traktorsko spravilo – prikolica primerjamo z združenimi kategorijami Traktor in Kombinirano I (kombinirano traktorsko in ročno spravilo)) in oblike žičnega spravila (primerjamo kategorijo Klasična sečnja in žičniško spravilo s združenimi kategorijami Žičnica in Kombinirano II (kombinirano spravilo z žičnico in ročno spravilo)).

*Preglednica 9: Matrika zmede za primerjavo modelnega umeščanja traktorskega spravila z načrtovano umestitvijo traktorskega spravila (odebeljeno zapisane vrednosti predstavljajo pravilno pozitivno razvrščene zapise (TP); ležeče zapisane vrednosti predstavljajo lažno pozitivno razvrščene primer (FP) in podčrtano zapisane vrednosti predstavljajo lažno negativno razvrščene primere (FN), običajno zapisane vrednosti predstavljajo pravilno negativno razvrščene primere (TN))*

|                                                                                  | Klasična sečnja in traktorsko spravilo<br>- vitel; Klasična sečnja in traktorsko<br>spravilo - prikolica | Drugo                |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>Traktor; Kombinirano I<br/>(kombinirano traktorsko in ročno<br/>spravilo)</b> | <b>79,84%</b>                                                                                            | <b><u>11,52%</u></b> |
| <b>Drugo</b>                                                                     | 3,62%                                                                                                    | 5,02%                |

Preglednica 9 prikazuje neposredne primerjave umeščanja traktorskega spravila v gozdni prostor. Izkaže se, da se razviti model v 79,84 % ujema s področji, kjer je tudi ena izmed načrtovanih pravih oblik traktorskega spravila. Model je 11,52% primerov razvrstil drugače kot je načrtovano z gozdnogospodarskim načrtom. Izračunan kazalnik skupne natančnosti model (t.j. *accuracy*) za umeščanje traktorskega spravila znaša 0.8486. Podrobni statistični kazalniki uspešnosti modela so prikazani v preglednici (Preglednica 10).

*Preglednica 10: Kazalniki statistične uspešnosti klasifikacije po razredih na primeru umeščanja traktorskega spravila*

| Razred                                            | Natančnost ( <i>precision</i> ) | Priklic ( <i>recall</i> ) | Ocena F |
|---------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------|
| <b>Združeni razredi traktorskega<br/>spravila</b> | 0.9566                          | 0.8739                    | 0.9134  |
| <b>Drugo</b>                                      | 0.3037                          | 0.5812                    | 0.3989  |

*Preglednica 11: Matrika zmede za primerjavo modelnega umeščanja žičniškega spravila z načrtovano umestitvijo žičniškega spravila (odebeljeno zapisane vrednosti predstavljajo pravilno pozitivno razvrščene zapise (TP); ležeče zapisane vrednosti predstavljajo lažno pozitivno razvrščene primer (FP) in podčrtano zapisane vrednosti predstavljajo lažno negativno razvrščene primere (FN), običajno zapisane vrednosti predstavljajo pravilno negativno razvrščene primere (TN))*

|                                             |              |
|---------------------------------------------|--------------|
| <b>Klasična sečnja in žičniško spravilo</b> | <b>Drugo</b> |
|---------------------------------------------|--------------|

|                                                                                |       |        |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|
| Žičnica; Kombinirano II<br>(kombinirano spravilo z žičnico in ročno spravilo)) | 2,42% | 3,03%  |
| Drugo                                                                          | 6,08% | 88,46% |

Preglednica 11 prikazuje neposredne primerjave umeščanja traktorskega spravila v gozdni prostor. Izkaže se, da se razviti model v 2,42 % ujema s področji, kjer je tudi ena izmed načrtovanih pravih oblik traktorsko spravilo. Model je 3,03% primerov razvrstil drugače kot je načrtovano z gozdnogospodarskim načrtom. Izračunan kazalnik skupne natančnosti model (t.j. *accuracy*) za umeščanje traktorskega spravila znaša 0.9089. Podrobni statistični kazalniki uspešnosti modela so prikazani v preglednici (Preglednica 12).

*Preglednica 12: Kazalniki statistične uspešnosti klasifikacije po razredih na primeru umeščanja žičniškega spravila*

| Razred                               | Natančnost ( <i>precision</i> ) | Priklic ( <i>recall</i> ) | Ocena F |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------|
| Združeni razredi žičniškega spravila | 0.2850                          | 0.4447                    | 0.3474  |
| Drugo                                | 0.9669                          | 0.9357                    | 0.9510  |

## 1.4 Interaktivno orodje

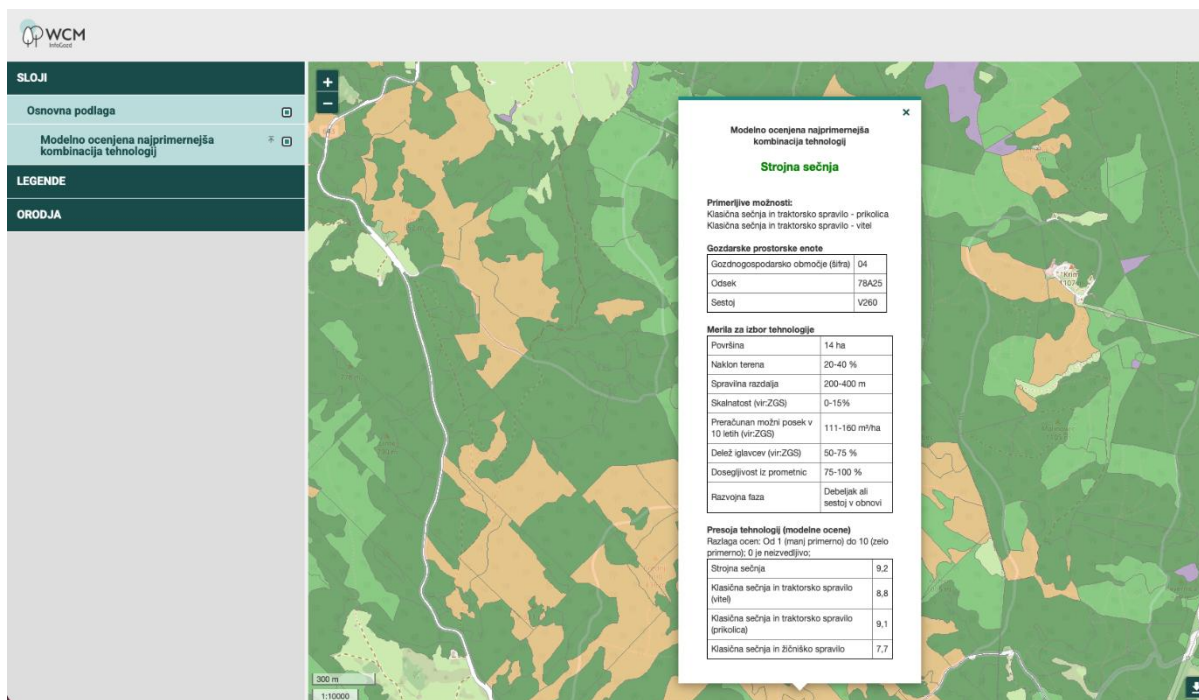
Rezultate modela prikazujemo tudi v spletnem orodju "Modelno umeščanje sodobnih tehnologij v gozdni prostor", ki je prosto dostopen vsem uporabnikom na spletni strani WCM/InfoGozd (<https://wcm.gozdis.si/sl/podatki/zemljevidi/2025092921370067/modelno-umescanje-sodobnih-tehnologij-v-gozdni-prostor/>). Orodje je zasnovano kot interaktivni zemljevid za območje celotne Slovenije. Najmanjšo prostorsko enoto predstavlja gozdni sestoj. Ob kliku nanj, se uporabniku odpre zavihek s podrobnostmi o izbrani tehnologiji in primerljivimi možnostmi tehnologij na izbranem območju:

- Najprimernejša kombinacija sečnje in spravila – kombinacija tehnologije z največjo doseženo oceno primernosti
- Modelne ocene primernosti različnih kombinacij sečnje in spravila – seštevek ocen
- Primerljive možnosti - kombinacije tehnologij sečnje in spravila znotraj 10% intervala najvišje vrednosti

Uporabnik razpolaga tudi s predpostavkami na podlagi katerih je bila umestitev tehnologije izvedena:

- GGO – pripadajoča gozdnogospodarsko območje
- Odsek - šifra pripadajočega odseka
- Sestoj – šifra pripadajočega sestoja
- Površina – površina poligona v hektarjih (ha)
- Naklon terena – pripadajoči razred naklona, prikazan v odstotkih (%)
- Spravidna razdalja – pripadajoča povprečna spravidna razdalja (m) po razredih
- Skalnatost – pripadajoč razred skalnatosti v sestoji (%)
- Razvojna faza – pripadajoč razred razvojne faze (kategorična spremeljivka)
- Delež iglavcev – preračun delež iglavcev v možnem poseku po razredih (%)
- Možni posek – preračunan možni posek v 10 letih po razredih (m<sup>3</sup>/ha)
- Dosegljivost iz prometnic – dosegljivost gozdnega sestoja iz vlak, gozdnih cest in primernih javnih prometnic po razredih (%)

Poleg osnovnih terenskih in sestojnih značilnosti je prikazana tudi najprimernejša kombinacija tehnologije sečnje in spravila, ki jo na podlagi vhodnih podatkov priporoča model. Poleg optimalne rešitve so prikazani tudi skupni seštevki ocen za vse preostale tehnološke možnosti, saj je za uporabnika pomembno, da ima celovit vpogled v rezultate modela (Slika 16). Na ta način lahko izbere tudi drugo tehnologijo, ki morda ni dosegla najvišje skupne ocene, a je kljub temu ocenjena kot ustrezna.



Slika 16: Spletno orodje

## 1.5 Možnosti nadgradnje modela umeščanja tehnologij v prostor

### 1.5.1 Izboljšana ločljivost in ažurnost podatkov

Ena ključnih možnosti za nadgradnjo modela je izboljšanje kakovosti vhodnih podatkov, predvsem njihove resolucije in ažurnosti. Natančnejši podatki bi omogočili realnejše ocene dejanskega stanja in posledično vplivali na kakovost rezultatov. Trenutno dostopni digitalni model reliefa (DMR) v ločljivost 1x1 m smatramo kot zelo primerne (optimalnega). Možnost nadgradnje vidimo predvsem pri parametru pravih razdalj, pri katerem bi lahko za realnejše ocene vključili koeficiente pravih razdalj prilagojene terenskim razmeram. Povprečno teoretično razdaljo smo izračunali kot aritmetično sredino pravih razdalj vseh točk v posameznem sestoju. Zavedamo se, da se dejanska prava razdalja zaradi vpliva naklona terena, smeri in vrste pravila ter značilnosti reliefa, razlikuje od teoretične (pridobljene z uporabo geografskih informacijskih sistemov), zato so smiselne nadaljne raziskave s katerimi bi izboljšali predpostavko koeficienta pravih razdalj ( $k_s$ ). Po pregledu literature

ugotavljamo, da so si koeficient spravila lahko zelo različni in variirajo med 1,1 in 2,5, odvisno od značilnosti raziskovalnega območja in izbranega načina spravila (Dobre A., 1990; Pentek T. in sod., 2004; Stankić I., 2010; Hribernik B., 2013; Lepoglavec K., 2014). Koeficienti navedeni v pregledani literaturi so praviloma vezani na specifična raziskovalna območja, zato njihova neposredna aplikacija na območje celotne Slovenije ni najbolj ustrezna. Enostavni približek smo dosegli že s strokovno ocenjenim koeficientom spravilnih razdalj ( $k_s = 1,5$ ) za območje celotne Slovenije. Z naprednimi GIS analizami kot so geomorfoni, ki omogočajo klasifikacijo terena na terenske oblike (doline, pobočja, vrhovi itd.), pa bi teren lahko razdelili tudi na pravilna polja, ki bi predstavljala osnovno enoto za izračun spravilnih razdalj in smeri spravila.

Ocenjujemo, da bi s podobnim metodološkim pristopom lahko izboljšali tudi podatke o skalnatosti terena oz. zamenjavo parametra z reliefnim indeksom hrapavosti terena, ki bi nadomestili dostopne grobe ocene, kar bi pripomoglo k zanesljivosti modela.

### 1.5.2 Vključevanje dodatnih parametrov

Naslednjo možno nadgradnjo modela vidimo v razširitvi nabora vhodnih parametrov. V trenutni različici smo se omejili na sedem vhodnih parametrov, ki zajemajo terenske in sestojne značilnosti gozdnih sestojev. Z vključevanjem novih parametrov bi model postal kompleksnejši in manj robusten, a bi hkrati zagotavljal bolj natančne rezultate. Potencialni nabor dodatnih parametrov bi lahko zajemal:

- Občutljivost gozdnih tal

Občutljivost gozdnih tal na poškodbe predstavlja enega izmed vplivnejših dejavnikov pri izbiri tehnologije. Na občutljivost gozdnih tal vplivajo številni dejavniki med katere uvrščamo teksturo tal (delež peska, melja in gline), vlažnost tal, vsebnost organske snovi, globina tal,

delež skeleta, poroznost tal, matična podlaga itd. Vsebnost vode v tleh predstavlja enega najpomembnejših, a hkrati tudi spreminjajočih dejavnikov. Mokra oziroma nasičena tla zmanjšujejo trenja med delci in posledično nosilnost tal, kar privede do večje dovzetnosti na zbijanje in plastične deformacije gozdnih tal ob uporabi težke gozdarske mehanizacije. Za območje Slovenije lahko preko Atlasa okolja pridobimo prosto dostopno digitalno pedološko karto s tipi tal v merilu 1:25.000, kar omogoča geografsko umeščanje tipa tal za posamezna območja. Gozdna tla so kompleksna in malopovršinsko raznolika, kar pomeni, da se lastnosti tal lahko na majhnih razdaljah močno spremenijo (Brady N.C. in Weil R.R., 2008), iz česar sklepamo, da bi takšni podatki predstavljali grobo oceno, ki bi kljub temu lahko pomembno pripomogli k izboljšavi modela, zlasti iz okoljskega vidika.

- Vremenski podatki

Model bi bilo mogoče nadgraditi z vključitvijo satelitsko pridobljenih kazalnikov vlažnosti tal ter vremenskih podatkov (padavine, temperature). Takšen pristop bi omogočil prepoznavanje območij z večjo občutljivostjo tal ter posledično prilagoditev izbire tehnologije ali določitev ustreznih časovnih omejitev pri izvedbi del.

- Geomorfoni

Uporaba naprednih GIS-analiz, kot so geomorfoni, omogoča določitev značilnih terenskih oblik, s katerimi bi lahko območja razdelili na manjše podenote (Stepinski T.F. in Jasiewicz J., 2011). Model bi bilo na ta način mogoče nadgraditi z določanjem pravih polj, kar bi omogočilo natančnejšo optimizacijo pravih poti tako z vidika pravilne razdalje in smeri sprava kot tudi dosegljivosti.

- Nadgradnja metodologije pridobivanja uteži z večkriterijskim odločanjem

Čeprav metoda SMART omogoča enostavno in pregledno določitev uteži kriterijev, pa obstajajo številne možnosti za nadgradnjo metodologije večkriterijskega odločanja. Ena izmed pogostejših alternativ je uporaba metod, ki temeljijo na parnih primerjavah, kot je Analytic Hierarchy Process (AHP), ki omogoča bolj natančno ovrednotenje relativne pomembnosti kriterijev ter preverjanje konsistentnosti presoj (Saaty T.L., 1994). Smiselna bi bila tudi uporaba različnih metod ter primerjava njihovih rezultatov (npr. SMART, AHP, BWM, TOPSIS), saj bi s tem lahko prepoznali tisto metodo, ki v danem kontekstu ponuja najboljše razmerje med ustreznostjo rezultatov in zahtevnostjo izvajanja postopka ocenjevanja.

- Razširjen nabor mogočih tehnologij sečnje in spravila

V prihodnje bi bilo smiselno model nadgraditi z razširitvijo nabora obravnavanih tehnologij sečnje in spravila. Poleg klasičnih sistemov, ki jih model že vključuje, bi bilo mogoče dodati še nekatere alternativne in specializirane tehnologije. V optimalne naboru bi bilo smiselno upoštevati tudi ročno spravilo, ki je v našem modelu upoštevan posredno, različne konfiguracije tehnologij (zgibni polprikoličar, *harwarder* in različne zmogljivosti in lastnosti harvesterjev ter žičnih žerjavov in alternativne možnosti, kot je helikoptersko spravilo, primerno zlasti za območja z visoko kulturno ali naravovarstveno vrednostjo in težko dostopnostjo (Triplat M. in sod., 2025). Takšna razširitev bi omogočila natančnejšo in bolj prilagojeno podporo odločanju, saj bi model lahko upošteval specifične značilnosti terenskih, sestojnih in ekoloških razmer.

- Upoštevanje funkcij gozda

Pomembna možnost nadgradnje modela je tudi vključitev različnih funkcij gozda, ki presegajo zgolj proizvodno vlogo. Gozdovi opravljajo številne ekološke, socialne in gospodarske funkcije, ki jih je pri umeščanju tehnologij sečnje in spravila smiselno vključiti, še posebej na območjih z izrazitimi varovalnimi in zaščitnimi funkcijami. Takšna nadgradnja bi omogočila

bolj uravnoteženo podporo odločanju, ki bi upoštevala trajnostni vidik gospodarjenja z gozdovi ter zagotavljala skladnost med proizvodnimi, ekološkimi in družbenimi cilji.

## 1.6 Zaključki

Raziskava je uspešno razvila metodologijo za modelno umeščanje tehnologij sečnje in spravila lesa v gozdni prostor, ki temelji na kombinaciji geografskih informacijskih sistemov (GIS) in večkriterijskega odločanja (SMART). Model omogoča objektivno vrednotenje primernosti tehnologij na ravni gozdnega sestoja, pri čemer upošteva sedem ključnih parametrov: naklon terena, pravilno razdaljo, skalnatost, razvojno fazo, možni posek, delež iglavcev in dosegljivost iz prometnic. Kakovost in zanesljivost razvitega modela sta v veliki meri odvisni od kakovosti vhodnih podatkov. Med razvojem modela, oblikovanjem metodologije in analizo rezultatov smo ugotovili, da obstaja še veliko potencialnih možnosti za njegovo izboljšavo in nadgradnjo v prihodnje. Model ima možnost za izboljšave na različne načine. Potencial vidimo v izboljšanju vhodnih podatkovnih slojev ter v razširitvi nabora parametrov in tehnologij.

Rezultati modela so prikazani v obliki tehnološke karte in interaktivnega spletnega orodja, kar omogoča enostavno uporabo v praksi. Validacija modela je pokazala visoko stopnjo skladnosti z obstoječimi gozdnogospodarskimi načrti, kar potrjuje njegovo uporabnost kot podpornega orodja pri odločanju. Model omogoča tudi identifikacijo oteženih in nedostopnih sestojev, kar je pomembno za načrtovanje del in varstva pri delu.

Pomembna prednost metodologije je prilagodljivost. Zapis v odprtokodnem okolju Rstudio, omogoča enostavno nadgradnjo in prilagajanje modela glede na nove podatke, spremembe v gozdni infrastrukturi ali razvoj novih tehnologij. Poleg tega model ne predpisuje absolutnih rešitev, temveč ponuja relativno oceno primernosti, kar omogoča fleksibilnost pri končni izbiri tehnologije glede na lokalne razmere.

Projekt je pokazal, da je mogoče z uporabo sodobnih analitičnih pristopov bistveno izboljšati kakovost odločanja v gozdarstvu, povečati učinkovitost dela, zmanjšati okoljske vplive in

prispevati k trajnostnemu gospodarjenju z gozdovi. Metodologija predstavlja pomemben korak k digitalizaciji gozdarskega sektorja in odpira možnosti za nadaljnji razvoj prostorskih orodij za podporo odločanju.

Priporočamo, da se metodologija vključi kot podporno orodje pri pripravi gozdnogospodarskih načrtov, zlasti v fazi izbire tehnologij sečnje in spravila. Interaktivno orodje naj služi kot operativna podpora gozdarskim strokovnjakom na terenu, saj omogoča hitro preverjanje primernosti tehnologij glede na konkretne razmere. V praksi naj se modelna priporočila vedno dopolnijo z terenskim preverjanjem, pri čemer naj se upoštevajo tudi lokalne posebnosti, razpoložljivost mehanizacije in cilji gospodarjenja.

Projekt predstavlja pomemben prispevek k digitalizaciji in modernizaciji gozdarskega odločanja v Sloveniji. S tem se odpira prostor za nadaljnje raziskave, ki bi lahko vključile dodatne parametre, kot so občutljivost tal, vremenski vplivi, geomorfološke značilnosti ter funkcije gozda. Nadaljnji razvoj metodologije in širitev nabora tehnologij bi omogočila še bolj celovito in prilagojeno podporo odločanju, kar je ključno za učinkovito, varno in trajnostno upravljanje gozdnih ekosistemov v prihodnosti.

## 1.7 Zahvala

Ciljno raziskovalni projekt TehGozd (V4-2209) financirata Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (50 %) ter Javna agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (50 %).

## 1.8 Viri

- Latterini F., Stefanoni W., Venanzi R., Tocci D., Picchio R. 2022. GIS-AHP Approach in Forest Logging Planning to Apply Sustainable Forest Operations. *Forests*, 13, 3. <https://doi.org/10.3390/f13030484>.
- Stefanoni W., Tocci D., Latterini F., Venanzi R., Gaglioppa P., Pari L., Picchio R. 2023. A Preliminary Validation and Assessment of a GIS Approach Related to Precision Forest Harvesting in Central Italy. *Forests*, 14, 1. <https://doi.org/10.3390/f14010127>.
- Saaty T.L. 1994. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24, 6: 19-43.
- Olson D.L. 1996. *Decision Aids for Selection Problems*.
- Kangas A., Kurttila M., Hujala T., Eyvindson K., Kangas J. 2015. *Decision Support for Forest Management*. (Managing Forest Ecosystems, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23522-6>).
- Taherdoost H., Mohebi A. 2024. Using SMART Method for Multi-criteria Decision Making: Applications, Advantages, and Limitations. *Archives of Advanced Engineering Science*, 2, 4: 190-197. <https://doi.org/10.47852/bonviewAAES42022765>.
- Marčeta D., Petković V., Ljubojević D., Potočnik I. 2020. Harvesting System Suitability as Decision Support in Selection Cutting Forest Management in Northwest Bosnia and Herzegovina. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 41, 2: 251-265. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.744>.
- Shukla A., Kumar V., Jain K. 2017. Site Suitability Evaluation for Urban Development Using Remote Sensing, GIS and Analytic Hierarchy Process (AHP). V: *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Image Processing*. 377-388. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2107-7\\_34](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2107-7_34).
- Pregledovalnik podatkov o gozdovih. 2025. <https://prostor.zgs.gov.si/pregledovalnik/>

- Naghdi R., Solgi A. 2014. Effects of Skidder Passes and Slope on Soil Disturbance in Two Soil Water Contents. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 35, 1: 73-80.  
<https://crojfe.com/archive/volume-35-no-1/effects-of-skidder-passes-and-slope-on-soil-disturbance-in-two-soil-water-contents/>
- Poje A., Ziesak M., Mihelič M., Hribernik B. 2020. Naklon terena in poškodbe tal pri pridobivanju lesa. *Goxfstldo vestnik*, 78, 7/8: 255-269.  
<https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:DOC-FB4Q0VD3>
- Tavankar F., Picchio R., Nikooy M., Jourgholami M., Naghdi R., Latterini F., Venanzi R. 2021. Soil Natural Recovery Process and *Fagus orientalis* Lipsky Seedling Growth after Timber Extraction by Wheeled Skidder. *Land*, 10, 2. <https://doi.org/10.3390/land10020113>.
- Picchio R., Latterini F., Mederski P.S., Tocci D., Venanzi R., Stefanoni W., Pari L. 2020. Applications of GIS-Based Software to Improve the Sustainability of a Forwarding Operation in Central Italy. *Sustainability*, 12, 14. <https://doi.org/10.3390/su12145716>.
- Enache A., Pentek T., Ciobanu V.D., Stampfer K. 2015. GIS base methods for computing the mean extraction distance and its correction factors in Romanian mountain forests. *Šumarski list*, 1-2.
- Picchio R., Pignatti G., Marchi E., Latterini F., Benanchi M., Foderi C., . . . Verani S. 2018. The Application of Two Approaches Using GIS Technology Implementation in Forest Road Network Planning in an Italian Mountain Setting. *Forests*, 9, 5. <https://doi.org/10.3390/f9050277>.
- Sealey L.L., Van Rees K.C.J. 2019. Influence of skidder traffic on soil bulk density, aspen regeneration, and vegetation indices following winter harvesting in the Duck Mountain Provincial Park, SK. *Forest Ecology and Management*, 437, 59-69.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.017>.

- Gagliardi K., Ackerman S., Ackerman P. 2020. Multi-Product Forwarder-Based Timber Extraction. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 41, 2: 231-242. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.736>.
- Dobre A. 1994. Gozdne prometnice. Oddelek za gozdarstvo, Biotehniška fakulteta Univerza v Ljubljani.
- Pentek T., Pičman D., Prošinsky T. 2004. Planning of forest roads in Croatian mountainous forest by the use of modern technologies. V: 2986 Forest engineering: technics, technology and environment, Ukrainian State Forestry University. Lviv, Ukraine, State Forestry University, 380-388.
- Stankić I. 2010. Višekriterijsko planiranje izvoženja drva forvarderima iz nizinskih šuma Hrvatske.
- Hribernik B. 2013. Model zgoščevanja omrežja gozdnih cest v večnamenskem gozdu : doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=72532>
- Lepoglavec K. 2014. Optimization of Primary and Secondary Forest Traffic Infrastructure on Sloped Terrain. Zagreb.
- Enache A., Kühmaier M., Visser R., Stampfer K. 2016. Forestry operations in the European mountains: a study of current practices and efficiency gaps. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31, 4: 412-427. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1130849>.
- Labelle E.R., Hansson L., Högbom L., Jourgholami M., Laschi A. 2022. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*, 8, 1: 20-37. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6>.
- Vadnjal J. 2008. Krojenje lesa iglavcev in listavcev pri strojni sečnji: diplomsko delo. Univerza v Ljubljana. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=15528>

- Parajuli M., Hiesl P., Smidt M., Mitchell D. 2020. Factors influencing productivity and cost in the whole-tree harvesting system. Clemson (SC): Clemson Cooperative Extension, Land-Grant Press by Clemson Extension. <https://lgpress.clemson.edu/publication/factors-influencing-productivity-and-cost-in-the-whole-tree-harvesting-system/>
- Mederski P.S., Schweier J., Đuka A., Tsioras P., Bont L.G., Bembenek M. 2022. Mechanised Harvesting of Broadleaved Tree Species in Europe. *Current Forestry Reports*, 8, 1: 1-19. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00154-7>.
- Saaty T.L., Vargas L.G. 2013. Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks. (International Series in Operations Research & Management Science, Springer US. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7279-7>.
- Triplat M., Krajnc N. 2020. Assessment of Costs in Harvesting Systems Using WoodChainManager Web-based Tool. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 41, 1: 49-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.583>.
- RS. 2020. Uredba o varovalnih gozdovih in gozdovih s posebnim namenom. Uradni list RS, št. 88/05, 56/07, 29/09, 91/10, 1/13, 39/15 in 191/20.
- R Core Team. 2025. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Dobre A. 1990. Nekateri dejavniki odpiranja gozdnega prostora. Inštitut za gozdno in lesno gospodarstvo pri BF v Ljubljani, 147 str.,
- Brady N.C., Weil R.R. 2008. The nature and properties of soils. . Pearson Prentice Hall, 975 str.,
- Stepinski T.F., Jasiewicz J. 2011. Geomorphons-a new approach to classification of landforms. V: 3014 *Geomorphometry 2011: Five days of Digital Terrain Analysis*. Redlands, CA, USA,

Triplat M., Saražin J., Smolnikar P., Ogrin Ž., Krajnc N. 2025. Sočasna sečnja in helikoptersko spravilo lesa z Ljubljanskega Grajskega griča. Gozdarski vestnik, 83, 1/2: 31-42.  
<http://www.dlib.si/?URN=URN:NBN:SI:doc-1P8S964J>