

# Interreg



UNIONE EUROPEA  
EVROPSKA UNIJA

## ITALIA-SLOVENIJA



DuraSoft

Progetto standard co-finanziato dal Fondo europeo di sviluppo regionale  
Standardni projekt sofinancira Evropski sklad za regionalni razvoj

# Poročilo o testiranju lesa na prostem

Verzija: Št 1

Referenčni DS: 3.2.3; 3.2.4 (AKT 10, AKT 11)

Odgovorni partner: ULJ PP2

Avtor: Miha Humar (ULJ PP2), Boštjan Lesar (ULJ PP2), Blaž Jemec (ULJ PP2)

Datum: 31.08.2022



PRIMORSKA  
GOSPODARSKA  
ZBORNICA



Silvaproduct  
od 1951



## KAZALO

1. Testiranje lesa v tretjem razredu uporabe.....	2
2. Testiranje lesa v četrtem razredu uporabe.....	8
3. Validacija testiranj - strešniki.....	16
4. Validacija in demonstracija testiranj - modelne klopi.....	18
BIBLIOGRAFIJA.....	22

## KRATICE

Les, zaščita lesa, modifikacija lesa, razkroj, odpornost, validacija, demonstracija

## POVZETEK

V raziskavi smo uporabili les iglavcev iz Interreg Slo-Italija območja: smrekovino, jelovino in borovino. Za primerjavo smo v posameznih testih uporabili še les kostanja in/ali macesna. Za testiranja lesa, ki ni bil v stiku z zemljo smo uporabili tudi les, ki smo ga dobili iz smrekovine, ki so jo napadli lubadarji. Ta les je manjvreden zato mu želimo z inovativnimi postopki zaščite dvigniti dodano vrednost. Tako smo les impregnirali z biocidnim proizvodom Silvanolin, del lesa pa smo modificirali v skladu s postopkom Silvapro ali Accoya. Les smo izpostavili v stiku z zemljo (Benetke, Ljubljana, Bilje), ali nad zemljo (Ljubljana, Bilje). Rezultati testiranj so pokazali, da nezaščiten les hitro propade. Najhitreje je propadel les v Ljubljani, tako v stiku z zemljo kot nad zemljo. Smreka je propadla tako hitro kot jelovina. Še posebej hitro je propadel les lubadark. Z ustreznim postopkom zaščite (Impregnacija s Silvanolinom ali termična modifikacija) smo lahko močno upočasnili razkroj lesa, na vseh lesnih vrstah. Rezultate smo validirali z analizo strešnikov (impregniranih, modificiranih in nezaščitenih), ki so bili okoljskim vplivom izpostavljeni 8 let. Rezultate testiranj smo širši javnosti predstavili preko modelnih klopi, ki so bile postavljene v Ljubljani, Biljah, Pesnici, Veliki planini, Jamljah, Seči in Škocjanskem zatoku.

### 1. Testiranje lesa v tretjem razredu uporabe

Les smo izpostavili v tretjem razredu uporabe, kot ga opisuje standard EN 335. Les v tretjem razredu je komercialno najpomembnejši razred uporabe. Es v tretjem razredu uporabe je izpostavljen vremenskim vplivom, vendar ni v stiku z zemljo. Tipični primeri rabe lesa v tretjem razredu uporabe so: terase, vrtno pohištvo, fasade ki niso zaščitene z nadstreški  
...

Za testiranje odpornosti v drugem razredu uporabe smo uporabili dvoslojni test. Vzorce (2,5 × 5,0 × 50 cm<sup>3</sup>), izdelane iz izbranih lesnih vrst, smo preizkusili tudi na terenskem polju Oddelka za lesarstvo v Rožni dolini v Ljubljani in v Biljah na pretežno senčni in zatišni legi. Izpostavljeni so bili v tretjem razredu uporabe (nepokrito na prostem, pogosto močenje) (CEN, 2013). Za določanje življenjske dobe lesa smo v naši raziskavi uporabili dvoslojni test (ang. double layer test) (Rapp, A.O. and Augusta, 2004). Devet ali enako obdelanih vzorcev smo zložili v dve vrsti. Vzorci v zgornji vrsti so bili za polovico vzorca

zamaknjeni. Ocenjevanje vzorcev je potekalo vsako leto med petnajstim majem in petnajstim junijem. Vsak vzorec smo si natančno ogledali in ocenili stopnjo razkroja po standardu EN 252 (CEN, 2015).

Tabela 1: Ocene razkroja vzorcev v skladu s 252 (CEN, 2015)

Ocena Rating	Razvrstitev Classification	Opis preizkušanca Definition of condition
0	Ni znakov razkroja	Na preizkušancu ni zaznavnih sprememb
1	Neznaten razkroj	Na vzorcu so vidni znaki razkroja, vendar razkroj ni intenziven in je zelo prostorsko omejen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Spremembe, ki se pokažejo predvsem kot sprememba barve ali zelo površinski razkroj, mehčanje lesa je najpogostejši kazalec, razkroj sega do 1 mm v globino.</li> </ul>
2	Zmeren razkroj	Jasne spremembe v zmernem obsegu: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Spremembe, ki se kažejo kot mehčanje lesa 1 mm do 3 mm globoko na 1 cm<sup>2</sup> ali večjem delu vzorca.</li> </ul>
3	Močen razkroj	Velike spremembe: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Izrazit razkroj lesa 3 mm do 5 mm globoko na velikem delu površine (večje od 20 cm<sup>2</sup>), ali mehčanje lesa globlje kot 10 mm na površini, večji od 1 cm<sup>2</sup>.</li> </ul>
4	Propadanje	Preizkušanec je močno razkrojen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ob padcu z višine 0,5 m se zlomi.</li> </ul>

V okviru tega testa smo določali odpornost lesa na dejavnike razkroja. Osredotočili smo se na les iglavcev in sicer:

Smreka (*Picea abies*) - to je ena ključnih lesnih vrst v Sloveniji, Furlaniji Julijski krajini in Benečiji. Les ni odporen in je zelo dovzeten na razkroj.

Pomodrela Smreka (*Picea abies*) - Smrekova drevesa so zelo ogrožena zaradi delovanja lubadarjev. Lubadarji živijo v simbiozi z glivami modrivkami, ki povsem obarvajo z lubadarji napaden les. Za les lubadark je značilno, da zato izgublja vrednost. V okviru te raziskave nas zanima ali lahko z ustrezno impregnacijo ali termično modifikacijo lesu lubadark dodamo vrednost.

Jelka (*Abies alba*) - Jelka je lesna vrsta, ki relativno dobro prenaša podnebne spremembe. Les jelke je slabo odporen. Stare jelke imajo mokro srce, ki ima nižjo vrednost, kot les običajne jelke. Ključno vprašanje je, ali je mokro srce jelke primerno za postopke impregnacije in termične modifikacije.

Za impregnacijo smo uporabili vakuumsko-tlačni postopek s Silvanolinom. Del vzorcev je bil termično modificiran pri temperaturi 220°C IN 230°C, kot je opisano v poročilu o pripravi vzorcev.



*Slika 1: Hlod, z značilnim obarvanjem, ki je posledica delovanja gliv modrivk, ki jih je v les zanesel luadar*



*Slika 2: Izpostavitve vzorcev v dvoslojnem testu v Biljah ob izpostavitvi leta 2017*



*Slika 3: Izpostavitve vzorcev v dvoslojnem testu v Biljah po petih letih izpostavitve leta 2022*

Tabela 2: Ocene razkrojenosti vzorcev, ki so bili izpostavljeni v Ljubljani leta 2017

les	obdelava	Termin ocenjevanja				
		2018	2019	2020	2021	2022
<b>smreka</b>	kontrola	0,0	0,2	1,2	2,0	2,7
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,4	0,8
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>smreka modrivke</b>	kontrola	0,2	0,9	2,2	3,2	3,4
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,7	1,4
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>jelka</b>	kontrola	0,0	0,9	2,2	3,0	3,6
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
<b>macesen</b>	kontrola	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0

Tabela 3: Ocene razkrojenosti vzorcev, ki so bili izpostavljeni v Biljah leta 2017

les	obdelava	Termin ocenjevanja				
		2018	2019	2020	2021	2022
<b>smreka</b>	kontrola	0,3	0,7	1,1	2,0	2,4
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>smreka modrivke</b>	kontrola	0,8	1,4	2,2	2,9	3,8
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,9	1,9
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>jelka</b>	kontrola	0,2	0,7	1,6	2,7	3,3
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>macesen</b>	kontrola	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0

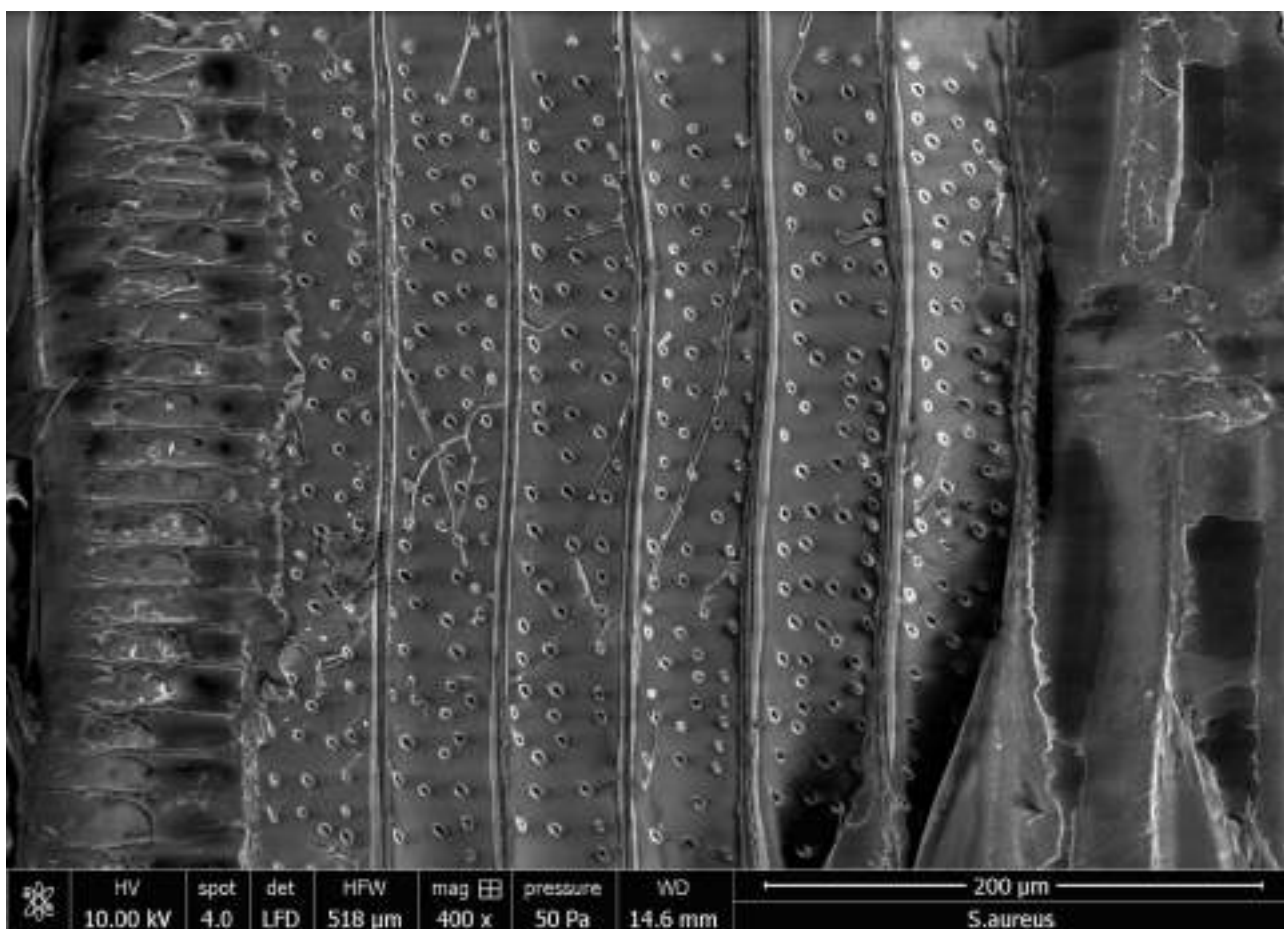
Dinamika razkroja v Biljah in Ljubljani je primerljiva. Na primer hitrost razkroja smreke je intenzivnejša v Ljubljani, na lubadarkah pa v Biljah. Dinamika razkroja macesna v Biljah in Ljubljani je povsem enaka. V obeh primerih smo po petih letih razkroja določili razkroj 1. Ta razkroj je 2 do 3x počasnejši, kot pri smrekovini.

Razkroj pri lubadarkah poteka hitreje, kot pri neokuženi smrekovini. Glive modrivke v lesu s prodiranjem hif odprejo nove vrzeli, ki omogočajo lažje prodiranje vode in gliv razkrojevalk v les. To se odraža v hitrejšem razkroju lesa lubadark. Po petih letih

izpostavitve lesa lubadark v Biljah smo stanje lubadark ocenili z oceno 3,8, stanje smrekovine pa z oceno 2.4 (Tabela 3). Tudi dinamika razkroja lesa jelke z mokrim srcem je v Biljah in Ljubljano potekala hitreje, kot pri smrekovini. Ta podatek nakazuje, da lesa lubadark in lesa mokrega srca jelke brez zaščite ne smemo uporabljati na prostem.

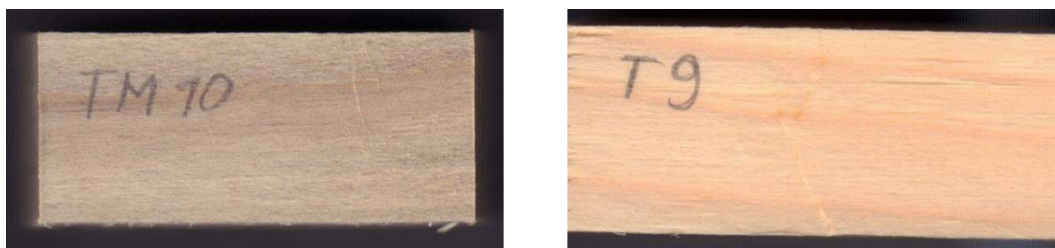
Z ustreznim postopkom zaščite lesa lahko zelo podaljšamo življenjsko dobo lesa. Na primer, nezaščiten les smreke, lubadark in jelke je bil po petih letih izpostavitve skoraj povsem razkrojen. V primeru, ko smo les zaščitili s Silvanolinom smo razkroj povsem preprečili. Na nobeni od lokacij, niti v Biljah niti v Ljubljani nismo na lesu zaščitenem s Silvanolinom opazili znakov razkroja.

Tudi termična modifikacija je upočasnila glivni razkroj. Termična modifikacija, ki je potekala pri nižji temperaturi (220°C) je preprečila razkroj na smrekovini in jelovini. Na lesu lubadark, pa ta postopek ni bil dovolj. Pri lubadarkah se je razkroj nadaljeval, kljub izvedeni modifikaciji. Temu je verjetno vzrok večja permeabilnost lesa lubadark, v primerjavi z nepoškodovano smrekovino (Kržišnik et al., 2018).



Slika 4: Analiza z vrstično elektronsko mikroskopijo je potrdila hudo okužbo, kar je razvidno tudi iz intenzivne diskoloracije lesa. Predvsem v parenhimskih celicah je bilo opaziti veliko prisotnost hif.

Modifikacija, ki je bila izvedena pri višji temperaturi (230 °C) je učinkovito preprečila razkroj na vseh lesnih vrstah (smreka, jelka, lubadarka). Barvno med seboj ni mogoče ločiti termično modificiranega lesa lubadark in referenčne smrekovine.



Slika 5: Les lubadark (levo) in referenčne smrekovine (desno)



Slika 6: Presek termično modificiranega lesa lubadark (levo) in referenčne smrekovine (desno)

## 2. Testiranje lesa v četrtem razredu uporabe

Les v četrtem razredu uporabe je izpostavljen širšemu spektru organizmov, kot v tretjem razredu uporabe. V četrtem razredu uporabe na les delujejo tako glive, kot tudi bakterije (Schmidt, 2006). Vzorci dimenzij (2,5 cm × 5,0 cm × 50 cm) so bili do polovice zapičeni v zemljo. Vzorce smo po 18 mesecih potegnili iz zemlje in ocenili razkroj v skladu z lestvico (Tabela 1).

Tabela 4: Ocene razkrojenosti vzorcev, ki so bili izpostavljeni v stiku z zemljo v Ljubljani in Benetkah po 18 mesecih izpostavitve

Lesna vrsta	Postopek zaščite	Benetke		Ljubljana	
		Suh del	Močvirje	Suh del	
<b>Kostanj</b>	Referenca		0,80	0,60	1,4
<b>Jelka</b>	Referenca		2,00	2,00	2,1
	Silvanolin UC4 (0,5)		0,00	0,00	0,0
<b>Bor</b>	Referenca		1,40	1,40	1,6
	Accoya		0,00	0,00	0,0
	Silvanolin UC4 (0,5)		0,00	0,00	0,0
	TMT 230 C		0,00	0,40	0,0
<b>Smreka</b>	Referenca		1,40	1,00	2,1
	Silvanolin UC4 (0,5)		0,00	0,00	0,0



Primerjava lokacij v Benetkah in Ljubljani pokaže, da je okolje v Ljubljani bolj ogrožajoče, kot v Benetkah. Slano in vlažno okolje je očitno manj ugodno za glivni razkroj, kot suho okolje v Ljubljani. Smrekovina v Ljubljani je po 18 mesecih dosegla oceno 2,1, kar je znatno več kot v Benetkah (1,4). Razkroj smo opazili tudi na nezaščiteni jelovini in borovini ter celo kostanjevini. Stanje kostanja nas je presenetilo, saj kostanj spada med odpornejše lesne vrste. Večja intenziteta razkroja kostanja je verjetno posledica podnebnih sprememb in slabše kakovosti kostanja (Thaler et al., 2014).



*Slika 7: Izpostavitve vzorcev v stiku z zemljo v Ljubljani. Zadaj so vinogradniški koli, kjer poteka primerljiv test.*



*Slika 8: Izpostavitve vzorcev po 18 mesecih v stiku z zemljo v Benetkah*



*Slika 9: Delovanje bakterij na lesu po 18 mesecih v stiku z zemljo v Benetkah*

Na impregniranem in modificiranem lesu ni bilo opaziti razkroja ne v Benetkah, ne v Ljubljani. To nakazuje na primernost obeh postopkov zaščite tudi za uporabo v stiku z zemljo. Na lesu v Benetkah smo opazili znake razvlaknjevanja in depozite soli, ki so značilni za okolje z visoko slanostjo.



*Slika 10: Vlakna na lesu, kot posledica slanega okolja po 18 mesecih v stiku z zemljo v Benetkah*

Poleg manjših vzorcev, smo v Benetkah, Biljah in Ljubljani izpostavili tudi kole večjih premerov. Podobni koli se uporabljajo tudi za rešitve v kmetijstvu (vinogradniški koli).

Razkrojenost kolov smo določali z uporovnim vrtnjem. Naprava resistograph temelji na beleženju upora pri vrtnanju. Z drobnim svedrom premera 2 mm v les izvrtamo luknjico in pri tem beležimo upor pri vrtnanju. V kolikor naprava ne zabeleži upora, to pomeni, da je les močno razkrojen. Metoda temelji na tem, da se za vrtnanje luknje v razkrojen les uporabi manj energije, kot za vrtnanje v zdrav les (Wang et al., 2005).



*Slika 11: Koli v Biljah*

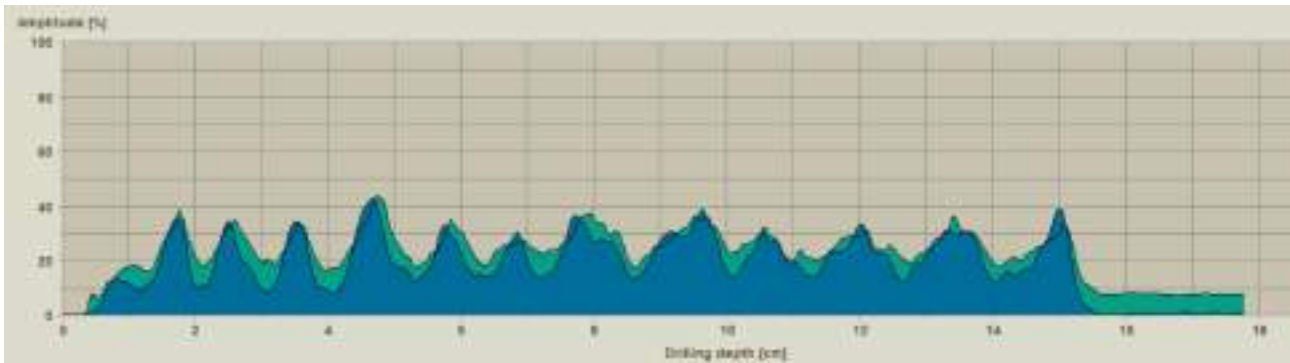


*Slika 12: Koli v Benetkah*



*Slika 13: Ocena razkrojenosti kolov z rezistografom v Benetkah*

Po 18 mesecih testiranj, se je izkazalo da so rezultati testiranj večjih kolov, primerljivi s testiranjmi v skladu s standardom EN 252. Na impregniranem in modificiranem lesu ni bilo zabeležiti znakov razkroja. Šibek površinski razkroj, na stiku lesa z zemljo in zrakom smo zabeležili le na lesu smreke in bora, ki ni bil impregniran.



Slika 14: Meritev razkrojenosti kolov z rezistografom v Benetkah z rezistografom. Modra krivulja prikazuje meritve sile s katero prodira igla v les, zelena pa odpor pri vrtnanju. Razlike so posledice različne gostote ranega in kasnega lesa pri letnicah.

Ker je bila izpostavitve kolov relativno kratkotrajna, smo na kolih v Ljubljani spremljali še vlažnost lesa. In sicer v stiku z zemljo, na sredi kola pod vrhom. Za spremljanje vlažnosti lesa in estriha smo v namestitvi opremo proizvajalca Scantronik in sicer merilec Gigamodul in zapisovalnik podatkov Thermofox. Na Gigamodul so preko koaksialnih kablov pritrjene elektrode, ki so nameščene na osem izbranih mest na posameznem objektu. Thermofox Universal je zapisovalnik podatkov (data logger) in termometer s tremi temperaturnimi senzorji. Prvi je vgrajen v sam modul in deluje v temperaturnem razponu od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , drugi in tretji sta zunanja senzorja z razponom od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ločljivost senzorjev je  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , napaka je manjša od  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Na kolih rojstni hiši beležimo podatke 2 x dnevno, predvsem zaradi omejitev povezanih s spremljanjem vlažnosti lesa. Če vlažnost merimo prepogosto, pride do omejene elektrolize, kar vpliva na rezultat meritev. Modul za napajanje uporablja 2 AAA bateriji, s katerima lahko deluje do dve leti. Zunanje dimenzije modula so  $100 \times 60 \times 20\text{ mm}$ , teža z baterijama je 100 g.

Material Moisture Gigamodul ni samostojna enota, ampak se uporablja kot razširitev Thermofoxa, ki merjenju temperature doda še merjenje vlažnosti materiala. Merjenje se izvaja na podlagi električne upornosti materiala (večja kot je upornost, nižja je vlažnost). Gigamodul ima 8 mest za merjenje upornosti z razponom od  $10\text{ k}\Omega$  do več kot  $100\text{ G}\Omega$ , s čimer lahko merimo vlažnost lesa od 6 % do 90 % (m/m) (vlažnost). Veliko merilno območje omogoča uporabo na raznolikih materialih v veliko različnih okoljih, od proizvodnih prostorov do laboratorijev.



*Slika 15: Merilnik lesne vlažnosti Gigamodul in oprema za beleženje podatkov Thermofox v jekleni komori. Črne žice vodijo do senzorjev za določanje vlažnosti, rdeče do senzorjev za določanje temperature. Poleg merilne tehnike, smo v komoro vstavili še silikagel.*

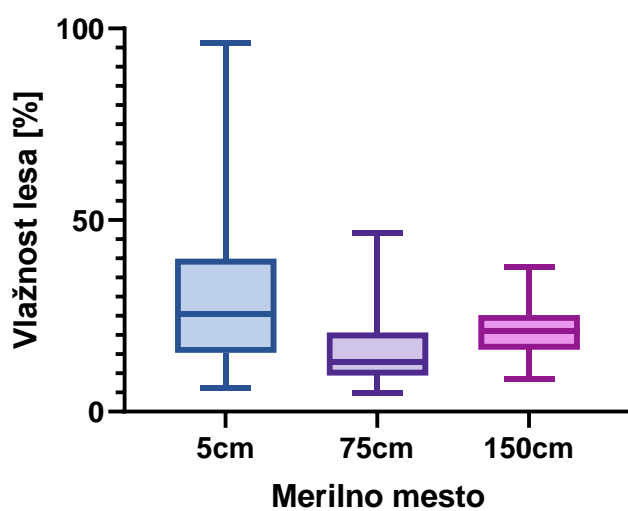
Elektrode smo v pritrdili z vijaki. Vijaki so delovali kot elektrode, ki so bili dobro pritrjeni v les in jih ni bilo mogoče po nesreči izvleči.

Meritve vlažnosti so pokazale, da je najbolj izpostavljeno merilno mesto na meji med zrakom in tlemi. Temu sledi konica stebra. Konica stebra se ob padavinskih dogodkih bolj navlaži, kot osrednji del stebra.

Rezultati meritev se skladajo z drugimi opazovanji. Na podlagi veljavnih modelov o dinamiki razkroja lesa (Meyer-Veltrup et al., 2017), je pričakovati, da se bo na spodnjih delih nezaščiteneh stebrov razkroj pojavil po 2 letih, na konici po 5 letih in na sredi po 7 letih izpostavitve, če v tem obdobju ne pride do bistvene spremembe dinamike padavin. Na impregniranem lesu se bodo prvi znaki razkroja pojavili po 25+ letih.



Slika 16: Senzorji za spremljanje vlažnosti lesa na kolih



Slika 17: Vlažnost lesa v odvisnosti od višine merilnega mesta na kolu. Meritve so potekale med 20. 1. 2021 in 31. 8. 2022. Vsak stolpec predstavlja 2200 meritev.

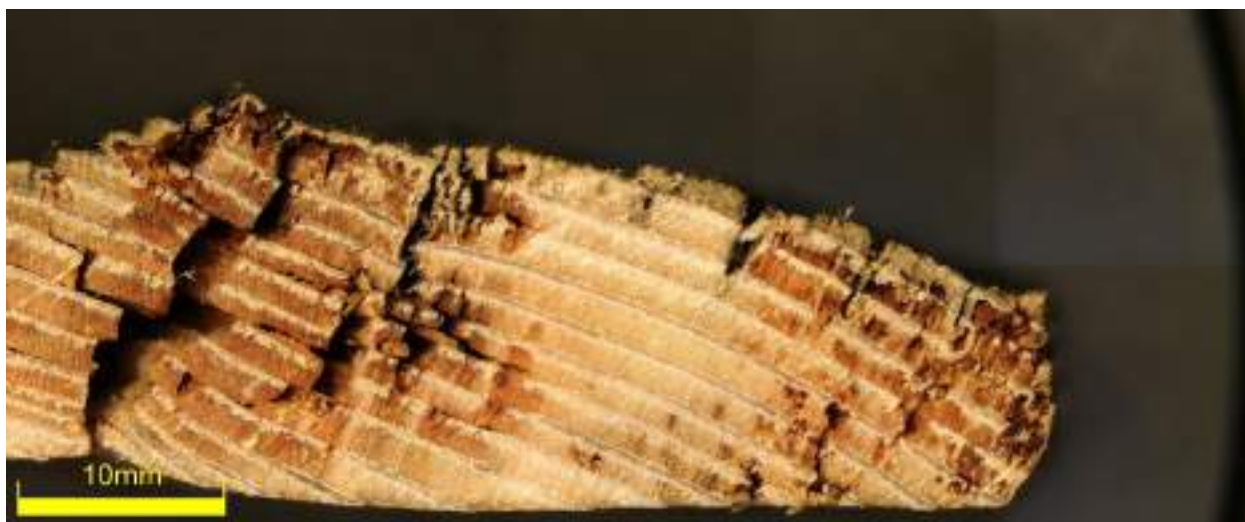
### 3. Validacija testiranj - strešniki

Les je tradicionalni material za izdelavo strešnih kritin v alpskih regijah. V 17. stoletju so leseno kritino običajno uporabljali na pomembnejših stavbah. Še danes se pretežno uporablja na kočah in hišah v hribovitih predelih severne in severozahodne Slovenije. Ker je lesena kritina draga, smo raziskali možnost podaljšanja življenjske dobe kritine z impregnacijo in modifikacijo. Lesene skodle iz neobdelane, z bakrom impregnirane (Silvanolin) in termično modificirane smrekove kritine smo izolirali in analizirali z digitalno mikroskopijo in konfokalno mikroskopijo. Poleg tega so bili določeni tudi tlačna trdnost, hrapavost površine in kontaktni koti lesenih skodel. Rezultati so pokazali, da so skodle iz neobdelanega lesa norveške smreke po sedmih letih izpostavljenosti popolnoma razpadle. Po drugi strani pa skodle, obdelane z bakrom in termično modificirane, niso bile degradirane. Vendar se je hrapavost površine termično modificiranega in neobdelanega lesa po vremenskih vplivih znatno zmanjšala, kar je imelo za posledico slabšo odpornost na navlaževanje.



*Slika 18: Streha, iz katere so bili izolirani strešniki po 8 letih uporabe*





*Slika 19: Presek smrekovega strešnika osem let po vgradnji*



*Slika 20: Presek termično modificiranega smrekovega strešnika osem let po vgradnji*



Slika 21: Presek s silvanolinom impregniranega smrekovega strešnika osem let po vgradnji

#### 4. Validacija in demonstracija testiranj - modelne klopi

---

Na sedmih lokacijah v Sloveniji (Seča, Škocjanski zatok, Bilje, Ljubljana, Velika planina, Pesnica) in zamejstvu (Doberdob) postavili lesene klopi. Klopi so načrtovane tako, da služijo kot model za fasado in teraso. Izdelane so iz lesa najpomembnejših iglavcev v projektnem območju, in sicer iz navadne smreke (*Picea abies*), rdečega bora (*Pinus sylvestris*) in macesna (*Larix decidua*). Del smrekovih elementov je zaščiten z bakrovim biocidnim proizvodom Silvanolin oziroma toplotno modificiran po komercialnem postopku Silvapro.

Na posamezne elemente so nameščeni senzorji za spremljanje vlažnosti lesa. Naši modeli kažejo, da se razkroj na smrekovem lesu pojavi po približno 300 dneh, ko vlažnost lesa presega 25 odstotkov. Tako lahko na podlagi meritev vlažnosti že po nekaj letih ocenimo, kolikšna je življenjska doba lesa na posamezni lokaciji. V vzorce smo na sredino tangencialne ploskve pod kotom  $10^\circ$  na razdalji 32 mm privijačili 2 vijaka iz nerjavnega jekla premera 3,9 mm (Bauhaus Profi Depot, Nemčija), ki smo ju predhodno izolirali z univerzalno toploskrčljivo cevjo DERAY®-H. Na vijake smo pritrčili elektrode in jih povezali z merilno opremo. Vlažnost smo ugotavljali v sredini, saj se večina gliv navadno razvije v osrednjem delu vzorcev, zato je to mesto najpomembnejše. Električno upornost smo merili vsakih dvanajst ur z merilno opremo Gigamodul (Scantronik, Nemčija) in jo zapisovali z zapisovalci podatkov Thermofox (Scantronik, Nemčija). Vzporedno z vlažnostjo smo opazovali tudi temperaturo na površini vzorcev. Iz podatkov o električni upornosti in temperaturi lesa smo izračunali vlažnost lesa, kot je opisano v literaturi (Brischke & Lampen, 2014).



Slika 22: Slika modelnih klopi

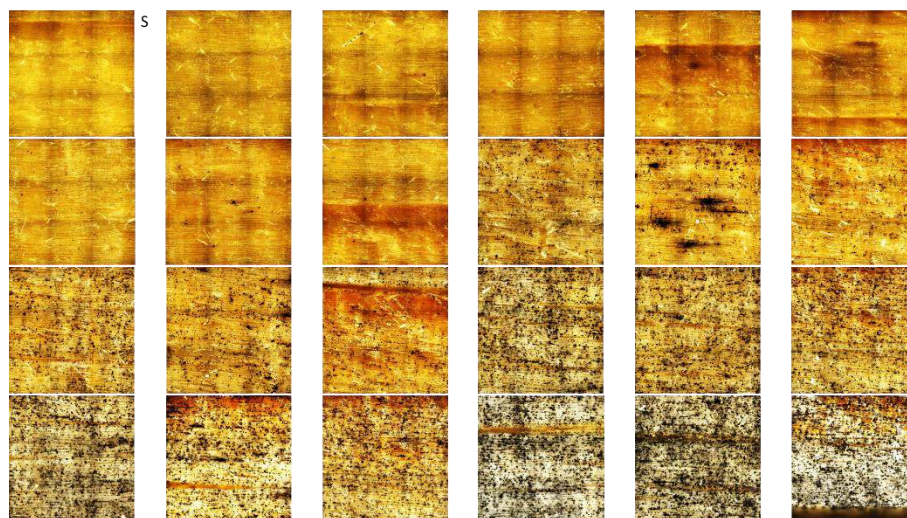
Tabela 5: Delež dni med novembrom 2020 in marcem 2022, ko vlažnost posameznega materiala presega 25 odstotkov. PiAb – smreka, LaDe – Macesen.

	PiAb	LaDe	Silvanolin PiAb	TM PiAb	PiAb	LaDe	Silvanolin PiAb	TM PiAb
	Naslonjalo	Naslonjalo	Naslonjalo	Naslonjalo	Sedež	Sedež	Sedež	Sedež
Seča	3,2 %	2,8 %	7,3 %	20,7 %	19,1 %	13,9 %	18,3 %	77,7 %
Škocjanski zatok	0,0 %	0,0 %	0,7 %	3,5 %	0,0 %	1,5 %	15,3 %	1,7 %
Jamlje	0,4 %	0,5 %	6,1 %	4,1 %	0,7 %	5,6 %	13,4 %	7,4 %
Pesnica	0,3 %	1,4 %	10,8 %	6,8 %	1,6 %	16,7 %	21,5 %	41,5 %
Ljubljana	11,4 %	11,2 %	19,2 %	35,0 %	14,8 %	15,3 %	35,7 %	15,0 %
Velika planina	6,6 %	6,3 %	8,8 %	54,8 %	16,1 %	29,5 %	82,5 %	75,6 %

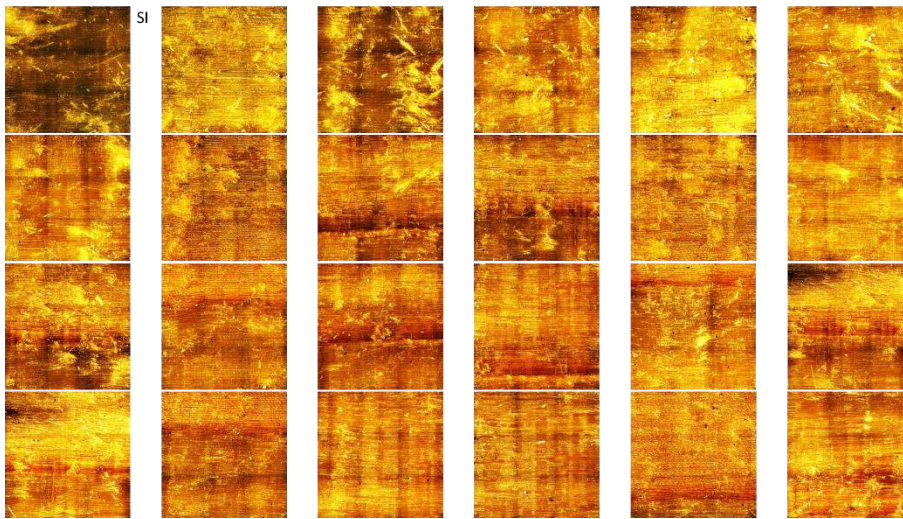
Iz rezultatov v preglednici 5 je razvidno, da na dinamiko vlažnosti lesa vplivajo naslednji parametri:

- Izpostavitveni položaj: delež vlažnih dni pri sedežu je 22,5 odstotka, pri naslonjalu pa 9,2 odstotka.
- Material: delež vlažnih dni je najmanjši pri smrekovini (6,2 odstotka), največji pa pri termično modificirani smrekovini (28,6 odstotka).
- Lokacija: delež vlažnih dni je najmanjši v Škocjanskem zatoku (2,8 odstotka), največji pa na Veliki planini (35,0 odstotka).

Na klopeh smo spremljali tudi sprememo barve. Sprememba barve je posledica delovanja UV žarkov in gliv modrivk. Primer razvoja gliv modrivk je viden iz spodnje mikroskopske analize lesa iz klopi v Ljubljani. Na smrekovem lesu se je že v 16 tednih razvilo intenzivno glivno obarvanje. Podoben rezultat smo opazili tudi na borovem in macesnovem lesu. Po drugi strani pa modrenja ni bilo opaziti na lesu, ki je bil impregniran. Biocidi v lesu so uspešno preprečili modrenje.

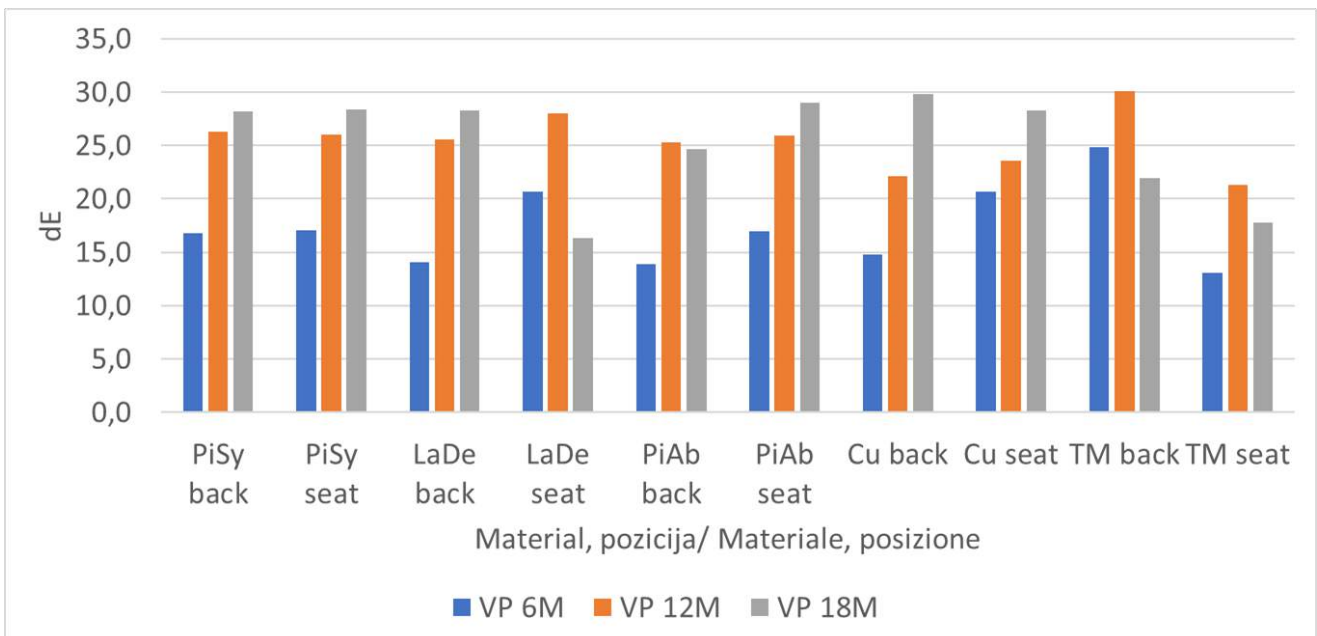


Slika 23: Razvoj gliv modrivk na smrekovem lesu na klopeh v Ljubljani v 16 tedenskem obdobju

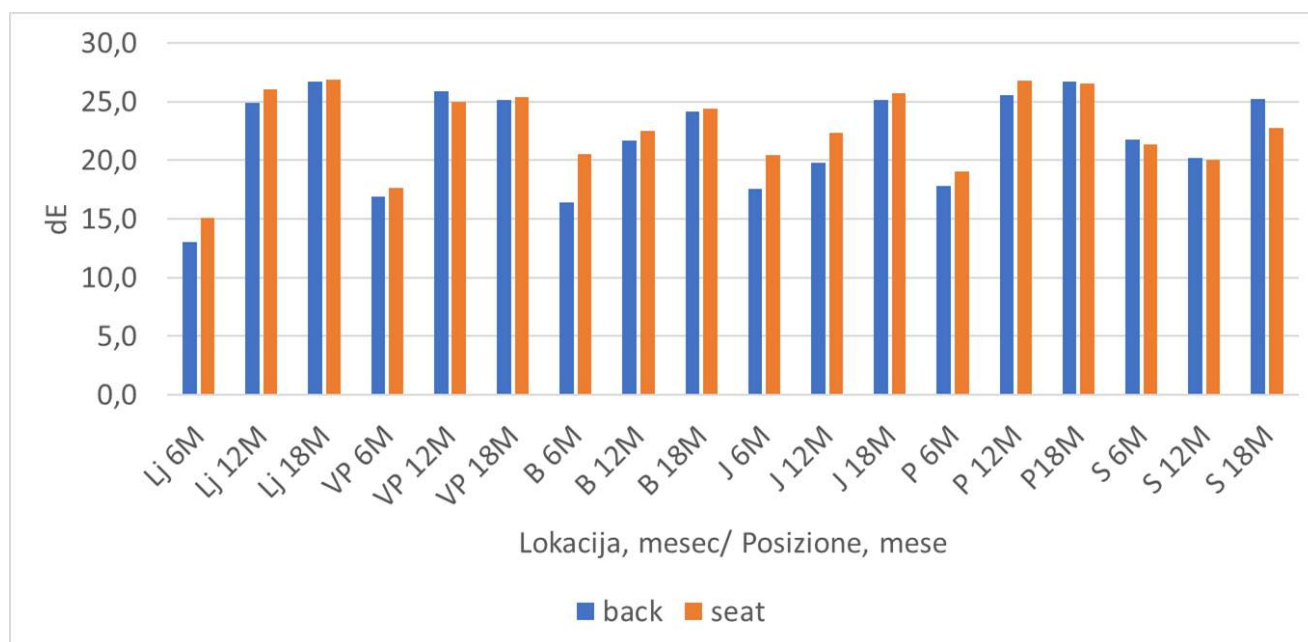


Slika 24: Razvoj gliv modrivk na impregniranem (Silvanolin) smrekovem lesu na klopeh v Ljubljani v 16 tedenskem obdobju

Iz podatkov spremljanja barve je razvidno, da se največja sprememba zgodi v prvih 6 mesecih, kasneje pa se dinamika sprememb barve umri. Na primeru analize barvnih sprememb na Veliki planini je razvidno, da so barvne spremembe na vseh materialih primerljive. Les sčasoma posivi in posamezne lesne vrste težko ločimo med seboj. To pomeni, da barva lesa ne sme biti ključni kriterij pri izbiri lesne vrste.



Slika 25: Razvoj gliv modrivk na impregniranem (Silvanolin) smrekovem lesu na klopeh v Ljubljani v 16 tedenskem obdobju



Slika 26: Barvne spremembe sedeža n naslonjala klopi na posameznih testiranih lokacijah

V kolikor med seboj primerjamo posamezne lokacije vidimo, da so barvne spremembe najpočasnejše na Veliki planini (mraz, sneg), najhitrejše pa Seči in Biljah. To sta kraja ki sta toplejša predvsem pozimi. Klop je bila izpostavljena novembra 2020, zato je bila zimska klima vplivnejša. Pozimi so na primorskem višje temperature z več sončnega obsevanja, kar se odraža v intenzivnejših barvnih spremembah.

## BIBLIOGRAFIJA

- Brischke, C., & Lampen, S. C. (2014). Resistance based moisture content measurements on native, modified and preservative treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(2), 289–292. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0775-3>
- CEN. (2013). *European standard EN 335, Durability of wood and wood-based products - Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products*. (European Committee for Standardization), Brussels.
- CEN. (2015). *European Standard EN 252 - Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact*.
- Kržišnik, D., Lesar, B., Thaler, N., & Humar, M. (2018). Performance of Bark Beetle Damaged Norway Spruce Wood Against Water and Fungal Decay. *BioResources*, 13(2). <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.3473-3486>
- Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., Alfredsen, G., Humar, M., Flæte, P. O., Isaksson, T., Brelid, P. L., Westin, M., & Jermer, J. (2017). The combined effect of wetting ability and durability on outdoor performance of

wood: development and verification of a new prediction approach. *Wood Science and Technology*, 51(3), 615–637. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0893-x>

Rapp, A.O. and Augusta, U. (2004). The full guideline for the “double layer test method” -a field test method for determining the durability of wood out of ground. *International Research Group on Wood Preservation*, 23.

Schmidt, O. (2006). Wood and tree fungi: Biology, damage, protection, and use. In *Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-32139-X>

Thaler, N., Žlahtič, M., & Humar, M. (2014). Performance of recent and old sweet chestnut (*Castanea sativa*) wood. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 94, 141–145. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.016>

Wang, X., Wiedenbeck, J., Ross, R. J., Forsman, J. W., Pilon, C., & Brashaw, B. K. (2005). Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. *Technology Review*, 11. [http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr162.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr162.pdf)

*Projekt je sofinanciran iz Evropskega sklada za regionalni razvoj »Program sodelovanja Interreg V-A Italija-Slovenija 2014-2020.*

*Vsebina tega dokumenta v nobenem primeru ne odraža mnenja Organa upravljanja »Programa sodelovanja Interreg V-A Italija-Slovenija 2014-2020. Odgovornost za vsebino dokumenta nosi avtor.*

# Relazione sulle prove su legno all'aperto

**Versione: n. 1**

**WP di riferimento: 3.2.3; 3.2.4 (ATT10-ATT11)**

**Partner responsabile: Università di Lubiana PP2**

**Autore: Miha Humar (ULJ PP2), Boštjan Lesar (ULJ PP2), Blaž Jemec (ULJ PP2)**

**Data: 31/08/2022**



## INDICE

---

1. Prova su legno della classe di uso 3 .....	2
2. Prova su legno della classe di uso 4.....	10
3. Validazione delle prove - scandole .....	18
4. Validazione e dimostrazione delle prove - modelli di panchina .....	20
BIBLIOGRAFIA .....	25

## PAROLE CHIAVE

---

Legno, protezione del legno, modifica del legno, decomposizione, resistenza, validazione, dimostrazione

## SOMMARIO

---

Nella presente indagine sono stati utilizzati legni di conifera dell'area del Programma Interreg Italia-Slovenia: abete rosso, abete bianco e pino. Nei singoli test sono stati inoltre utilizzati, a titolo comparativo il castagno e/o il larice. Nella valutazione del legno che non è stato in contatto diretto con il suolo, sono stati altresì presi in considerazione i legni ottenuti dall'abete rosso attaccato dal bostrico tipografo. Trattandosi di un legno meno nobile, si intende migliorare il valore di questa essenza con l'applicazione di trattamenti innovativi. A tal fine il legno è stato impregnato con il biocida Silvanolin, mentre una parte delle essenze è stata modificata mediante le procedure Silvapro o Accoya. I legni sono stati esposti a diretto contatto con il suolo (Venezia, Lubiana, Bilje) o sopra il suolo (Lubiana, Bilje). Dai risultati delle sperimentazioni è stato rilevato un rapido decadimento del legno non trattato. Detto processo è stato il più veloce a Lubiana, sia nelle condizioni di contatto diretto con il suolo che sopra il suolo. L'abete rosso ha registrato la stessa velocità di decadimento dell'abete bianco, in particolare il legno bostricato si è degradato con notevole rapidità. Con un adeguato trattamento protettivo (impregnazione con soluzione Silvanolin o modifica termica) è stato possibile rallentare sensibilmente il processo di degrado per tutte le essenze di legno. I risultati sono stati validati mediante l'analisi delle scandole (impegnate, modificate e non trattate) esposte per 8 anni alle intemperie. I risultati delle sperimentazioni sono stati presentati al pubblico con l'allestimento di panchine prova a Lubiana, Bilje, Pesnica, Velika planina, Jamiano, Seča e Škocjanski zatok (Val Stagnon).

### 1. Prova su legno della classe di uso 3

---

Il legno è stato esposto alla terza classe di uso, come descritta nella norma EN 335, che, in termini commerciali, rappresenta la classe d'uso più importante. Il legno di questa classe è esposto agli agenti atmosferici, pur non trovandosi a diretto contatto con il terreno. Tipici esempi di applicazione del legno secondo le condizioni di classe d'uso 3 sono le terrazze, l'arredamento da esterno, le facciate non protette da pensiline, ecc.

La resistenza del legno rientrante nella seconda classe di uso è stata valutata mediante la prova a due livelli (double-layer test). I provini (2,5 × 5,0 × 50 cm<sup>3</sup>) nelle essenze di legno selezionate sono stati testati anche sul campo sperimentale del Dipartimento di scienze del legno a Rožna dolina, a Lubiana e a Bilje, in posizione riparata e prevalentemente in ombra. Essi sono stati esposti alle condizioni di utilizzo della classe 3 (all’aperto, non riparato e spesso bagnato) (CEN, 2013). Nell’ambito della presente indagine è stata effettuata una prova a due livelli per determinare la durabilità del legno (Rapp, A.O. and Augusta, 2004). 9 provini, sottoposti allo stesso trattamento, sono stati disposti su due file. I campioni della fila superiore erano sfasati rispetto al punto mediano. La valutazione dei provini è stata realizzata a cadenza annuale, nel periodo compreso tra il quindici di maggio e il quindici di giugno. Ogni campione è stato osservato minuziosamente e valutato secondo la scala di decomposizione prevista dalla norma EN 252 (CEN, 2015).

Tabella 1: Valutazione del degrado secondo la norma 252 (CEN, 2015)

Valutazione <i>Rating</i>	Classificazione <i>Classification</i>	Stato del campione <i>Definition of condition</i>
0	Assenza di degrado	Il campione non presenta alterazioni.
1	Degrado trascurabile	Sul campione ci sono segni di degrado, la cui entità non è tuttavia importante ed è molto limitata: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si hanno principalmente alterazioni cromatiche o un degrado superficiale, l’ammorbidimento del legno è un indicatore ricorrente; il degrado raggiunge la profondità di 1 mm.</li> </ul>
2	Degrado moderato	Evidenti alterazioni di moderata entità: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le alterazioni si esplicitano nell’ammorbidimento del legno a una profondità compresa tra 1 e 3 mm, su una porzione del campione pari o maggiore a 1 cm<sup>2</sup>.</li> </ul>
3	Degrado importante	Notevoli alterazioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evidente degrado del legno a una profondità di 3 - 5 mm su una porzione estesa (superficie maggiore di 20 cm<sup>2</sup>), o ammorbidente del legno a una profondità superiore a 10 mm su una superficie maggiore di 1 cm<sup>2</sup>.</li> </ul>
4	Decadimento	Il campione appare in stato di forte degrado: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si spezza se cade da un’altezza di 0,5 m.</li> </ul>

Nell’ambito di questa prova è stata determinata la resistenza del legno rispetto ai fattori di degrado, con particolare attenzione ai legni di conifere, nello specifico:

Abete rosso (*Picea abies*) - è una delle specie più importanti in Slovenia, Friuli-Venezia Giulia e Veneto. Questo tipo di legno non è resistente ed è particolarmente suscettibile al degrado.

---

Abete rosso azzurrato (*Picea abies*) - Gli alberi di abete rosso sono fortemente minacciati dall'azione del bostrico tipografo. Questo insetto coleottero vive in simbiosi con i funghi dell'azzurramento che assieme al bostrico tipografo causano la colorazione del legno attaccato. Ciò causa la perdita di valore del legno. Con la presente ricerca abbiamo voluto indagare se il trattamento impregnante o la modifica termica potrebbero migliorare il valore del legno attaccato dal bostrico tipografo.

Abete bianco (*Abies alba*) - L'abete bianco è un'essenza che sopporta abbastanza bene i cambiamenti climatici. Il legno di abete bianco ha una scarsa resistenza. Gli esemplari maturi presentano un durame con elevato tasso di umidità ("cuore bagnato") e un valore inferiore rispetto a quello dell'abete rosso. Il quesito è se il cuore bagnato dell'abete bianco sia adatto ai trattamenti impregnanti e di modifica termica.

L'impregnazione è stata eseguita mediante pompa del vuoto con l'utilizzo del preparato Silvanolin. Una porzione dei campioni è stata modificata termicamente a 220-230°C, come descritto nella relazione sulla preparazione dei campioni.



*Immagine 1: Ceppo con tipica colorazione ascrivibile ad attacco da fungo dell'azzurramento, immesso nel legno da parte del bostrico tipografo.*



*Immagine 2: Campioni sottoposti alla prova a due livelli a Bilje, iniziata nel 2017.*



*Immagine 3: Campioni sottoposti alla prova a due livelli a Bilje, dopo cinque anni di esposizione - anno 2022.*

Tabella 2: Valutazione del livello di degrado dei campioni esposti a Lubiana nel 2017.

legno	trattamento	Data di valutazione				
		2018	2019	2020	2021	2022
<b>abete rosso</b>	controllo	0,0	0,2	1,2	2,0	2,7
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,4	0,8
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>abete rosso attaccato da funghi dell'azzurramento</b>	controllo	0,2	0,9	2,2	3,2	3,4
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,7	1,4
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>abete</b>	controllo	0,0	0,9	2,2	3,0	3,6
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
<b>larice</b>	controllo	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0

Tabella 3: Valutazione del livello di degrado dei campioni esposti a Bilje nel 2017.

legno	trattamento	Data di valutazione				
		2018	2019	2020	2021	2022
<b>abete rosso</b>	controllo	0,3	0,7	1,1	2,0	2,4
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>abete rosso attaccato da funghi dell'azzurramento</b>	controllo	0,8	1,4	2,2	2,9	3,8
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,9	1,9
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>abete</b>	controllo	0,2	0,7	1,6	2,7	3,3
	Silvanolin UC3 (0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 220 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	TMT 230 C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>larice</b>	controllo	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0

A Bilje e Lubiana sono stati rilevati trend di degrado paragonabili. A titolo esemplificativo, la velocità del processo di decomposizione dell'abete rosso è risultata superiore a Lubiana, a Bilje ha invece interessato il legno bostricato. A Bilje e Lubiana sono stati rilevati trend di degrado del larice del tutto sovrapponibili. In entrambi i siti, il livello di degrado raggiunto dopo cinque anni era pari a 1 ed è stato di 2 fino a 3 volte più lento rispetto all'abete rosso.

---

Il legno bostricato deteriora a una velocità accelerata rispetto all'abete non infestato. I funghi dell'azzurramento penetrano nel legno creando nuovi fori che facilitano l'accesso dell'acqua e di funghi lignivori, accelerando così il degrado del legno attaccato dal bostrico litografo. Dopo cinque anni di esposizione a Bilje il legno bostricato è stato valutato con un giudizio pari a 3,8, mentre l'abete 2,4 (Tabella 3). Anche il decadimento dell'abete bianco con cuore bagnato, esposto a Bilje e Lubiana, ha evidenziato dinamiche di decadimento accelerato rispetto all'abete rosso. Questo dato evidenzia quindi che il legno attaccato dal bostrico tipografo e il legno di abete bianco con cuore bagnato non sono adatti all'utilizzo all'aperto, se non sono stati precedentemente trattati.

Un adeguato trattamento potrebbe invece aumentare sensibilmente la durata di vita del legno. A titolo esemplificativo va sottolineato che il legno di abete rosso, il legno bostricato e il legno di abete bianco sono risultati quasi completamente degradati dopo cinque anni di esposizione. Per contro, l'impregnazione con Silvanolin ha del tutto contrastato il degrado ligneo. Su nessuno dei siti di Bilje e Lubiana si sono osservati sul legno trattato con Silvanolin segni di decadimento.

Anche il trattamento di modifica termica ha rallentato il degrado da funghi. Detta procedura, realizzata a temperature più basse (220°C), ha infatti ostacolato il decadimento dell'abete rosso e dell'abete bianco, mentre non ha avuto sufficiente efficacia su legno bostricato dove il processo di degrado è continuato nonostante l'intervento di modifica. Ciò dovrebbe essere probabilmente ascrivibile alla maggiore permeabilità di questo legno rispetto all'abete non infestato (Kržišnik et al., 2018).

---

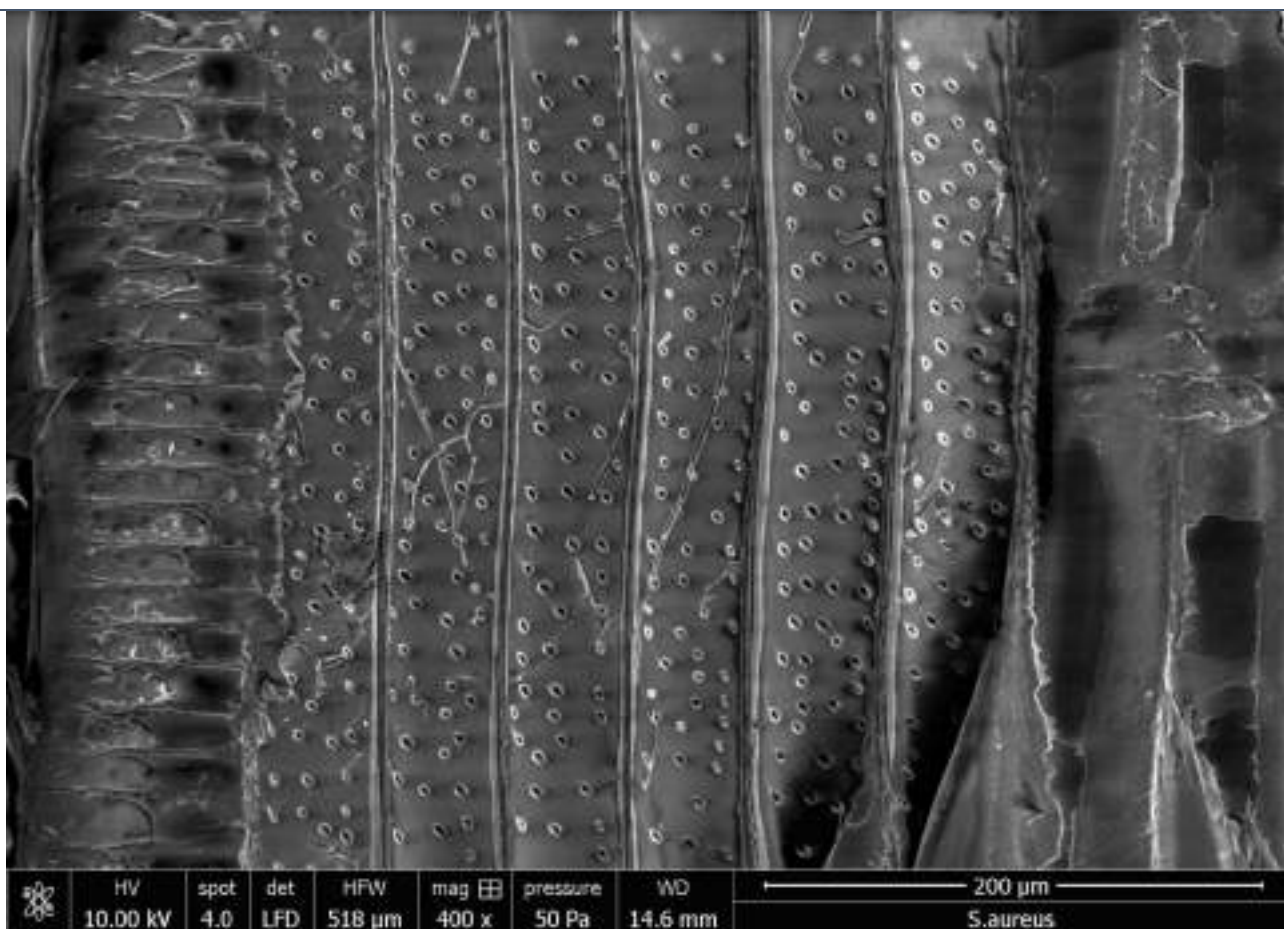


Immagine 4: L'analisi con microscopia elettronica a scansione ha confermato l'importante infezione, come lo dimostrano anche le evidenti alterazioni cromatiche. In particolare, nelle cellule parenchimatice è stata osservata un'abbondante presenza di filamenti fungini.

La modifica termica a temperature più elevate (230 °C) ha contrastato in modo efficace il decadimento in tutte le essenze di legno (abete rosso, abete bianco, legno bostricato). In termini cromatici non è possibile distinguere il legno bostricato modificato termicamente dal legno di abete rosso di riferimento.

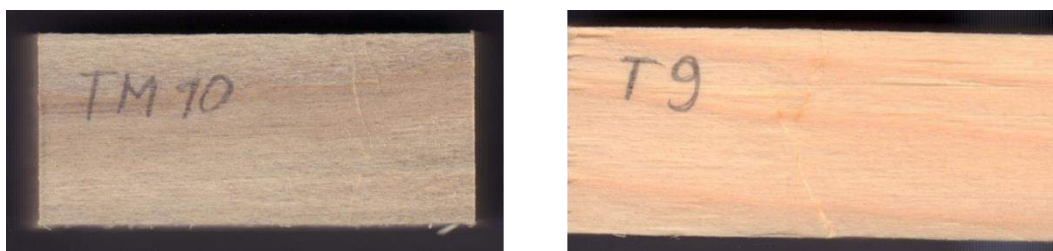


Immagine 5: Legno bostricato (a sinistra) e abete rosso di riferimento (a destra).



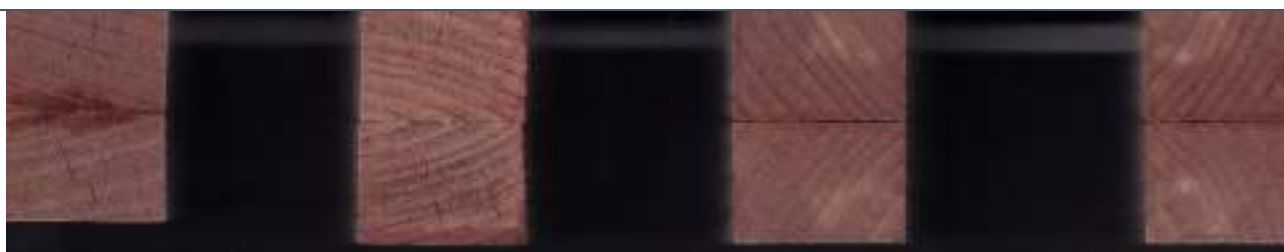


Immagine 6: Sezione del legno bostricato modificato (a sinistra) e abete rosso di riferimento (a destra).

## 2. Prova su legno della classe di uso 4

Il legno appartenente alla classe di uso 4 viene esposto a una più ampia gamma di organismi rispetto alla classe 3; sul legno di questa classe agiscono infatti sia i funghi che i batteri (Schmidt, 2006). I campioni, dimensionati 2,5 cm × 5,0 cm × 50 cm, sono stati conficcati nel terreno fino alla metà della loro altezza. Dopo 18 mesi sono stati estratti per procedere alla valutazione dello stato di degrado secondo la relativa scala (Tabella 1).

Tabella 4: Valutazione dello stato di degrado dei campioni dopo essere stati esposti per 18 mesi a diretto contatto con il suolo a Lubiana e Venezia.

Tipo di legno	Trattamento	Venezia		Lubiana	
		Porzione asciutta	Palude	Porzione asciutta	
<b>Castagno</b>	Riferimento	0,80		0,60	1,4
<b>Abete bianco</b>	Riferimento	2,00		2,00	2,1
	Silvanolin UC4 (0,5)	0,00		0,00	0,0
<b>Pino</b>	Riferimento	1,40		1,40	1,6
	Accoya	0,00		0,00	0,0
	Silvanolin UC4 (0,5)	0,00		0,00	0,0
	TMT 230 C	0,00		0,40	0,0
<b>Abete rosso</b>	Riferimento	1,40		1,00	2,1
	Silvanolin UC4 (0,5)	0,00		0,00	0,0

Dal raffronto tra i siti di Venezia e Lubiana si evidenzia che l'ambiente di Lubiana sia più critico in termini di minacce rispetto a Venezia. L'ambiente marino e umido sembra essere infatti meno favorevole allo sviluppo dei funghi rispetto all'ambiente secco di Lubiana. Dopo 18 mesi di esposizione, l'abete rosso ha riportato un giudizio di valutazione pari a 2,1, che è di gran lunga superiore rispetto ai valori registrati a Venezia (1,4). Segni di decadimento sono stati osservati anche su abete bianco e pino non trattato e persino su legno di castagno. Le constatazioni relative al castagno ci hanno sorpreso in quanto questa essenza rientra tra le specie lignee più resistenti. Il maggior degrado del castagno è verosimilmente imputabile ai cambiamenti climatici e a una qualità del legno più scadente (Thaler et al., 2014).



*Immagine 7: Campioni esposti a contatto diretto con il suolo a Lubiana. Dietro sono visibili i pali da vite dove è in corso un test analogo.*



*Immagine 8: Campioni esposti a contatto diretto con il suolo, a Venezia.*



*Immagine 9: Azione dei batteri sul legno, rimasto per 18 mesi a diretto contatto con il suolo, a Venezia.*

Sul legno impregnato e modificato non sono stati osservati segni di degrado né a Venezia né a Lubiana, ne consegue che entrambi i trattamenti siano adeguati per l'applicazione in condizioni di contatto diretto con il suolo. Sul legno esposto a Venezia erano visibili segni di sfibramento e depositi di sale, tipici per un ambiente dall'elevato livello di salinità.



*Immagine 10: Le fibre sul legno si sono sviluppate durante i 18 mesi nei quali sono state in contatto diretto con l'ambiente salato di Venezia.*

Oltre ai campioni di piccole dimensioni sono stati esposti a Venezia, Bilje e Lubiana anche pali di diametro maggiore, simili a quelli utilizzati in viticoltura (pali per vigneto).

Il degrado del legno è stato determinato mediante il metodo di misurazione della resistenza. Il resistografo rileva infatti la resistenza alla perforazione del legno mediante una trivella del diametro di 2 mm. Se lo strumento non riscontra alcuna resistenza, significa che il legno è in stato di forte degrado. Il metodo si fonda sul principio secondo cui la perforazione nel legno degradato richiede minor energia rispetto al legno sano (Wang et al., 2005).



*Immagine 11: Pali a Bilje.*



*Immagine 12: Pali a Venezia.*



Immagine 13: Valutazione dello stato di degrado dei pali a Venezia mediante resistografo.

I risultati delle prove effettuate su pali di maggior diametro, dopo 18 mesi di esposizione, sono equiparabili ai test secondo la normativa EN 252. Sul legno trattato e modificato non si sono osservati segni di decomposizione. È stato tuttavia evidenziato un lieve degrado superficiale del legno a contatto diretto con la terra e l'aria solo nell'abete rosso e nel pino non trattato.

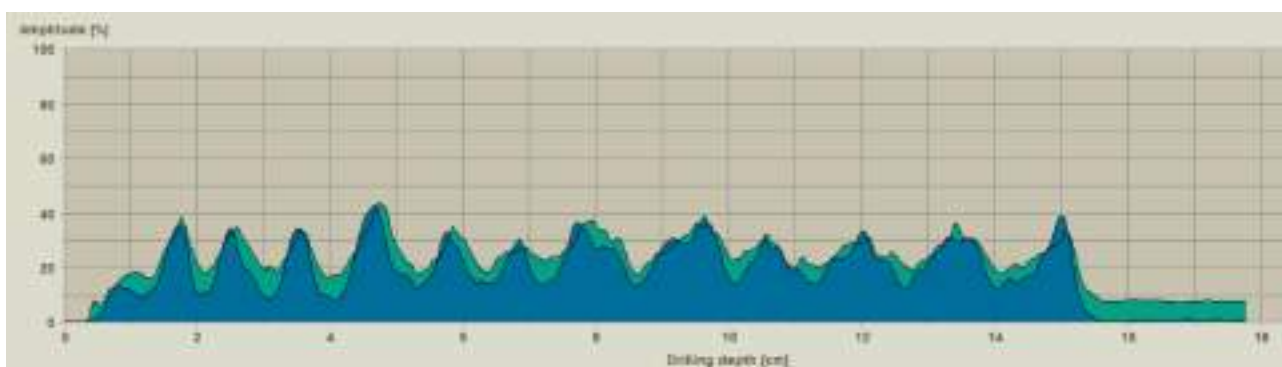


Immagine 14: Misurazione dello stato di degrado dei pali a Venezia mediante resistografo. La curva blu indica le misurazioni della forza impressa dall'ago durante la penetrazione nel legno, il colore verde la resistenza alla perforazione. Le differenze rappresentano le diverse densità del legno giovane e maturo per anno.

Considerati i tempi relativamente brevi di esposizione dei pali, a Lubiana è stata anche monitorata l'umidità del legno nel punto di contatto con il suolo, a metà del palo e sotto

la sommità. Per le misurazioni dell'umidità del legno e del massetto sono stati installati lo strumento Gigamodule e il registratore di dati Thermofox del produttore Scantronik. Sul misuratore Gigamodule vengono fissati mediante cavi coassiali gli elettrodi, posizionati su otto punti della struttura. Il data logger Thermofox Universal registra i dati e rileva la temperatura mediante tre sensori. Il primo sensore, installato direttamente sul modulo, rileva le temperature comprese tra  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$ , mentre il secondo e terzo sono dei sensori esterni con intervalli di temperatura da  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $120^{\circ}\text{C}$ . I sensori hanno un'accuratezza pari a  $0,1^{\circ}\text{C}$  e un margine di errore inferiore a  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Viste le restrizioni legate al monitoraggio dell'umidità del legno, i dati relativi ai pali posati in sede vengono registrati 2 volte al giorno. Un monitoraggio troppo frequente del tasso di umidità limiterebbe infatti l'elettrolisi, alterando così i risultati di misurazione. Il modulo di alimentazione utilizza 2 batterie AAA che ne garantiscono il funzionamento per due anni. Il modulo ha dimensioni esterne  $100 \times 60 \times 20$  mm e un peso, batterie incluse, pari a 100 g.

Material Moisture Gigamodule non è un modulo autonomo bensì viene utilizzato come estensione del Thermofox, che oltre alla temperatura rileva anche l'umidità del materiale. La misurazione avviene in base alla resistenza elettrica impressa dal materiale (maggiore è la resistenza, minore sarà l'umidità). Il sistema Gigamodule è dotato di 8 punti di misurazione della resistenza con un intervallo da  $10 \text{ k}\Omega$  a oltre  $100 \text{ G}\Omega$ , che consentono di misurare l'umidità del legno compresa tra 6% e 90% (m/m) (umidità). Grazie al suo campo di misura straordinariamente ampio può essere applicato su diversi materiali in svariate condizioni, dagli ambienti produttivi ai laboratori.



*Immagine 15: Il misuratore di umidità del legno Gigamodule e il datalogger Thermofox in camera d'acciaio. I cavi neri collegano i sensori di umidità, quelli rossi i sensori di temperatura. Oltre agli strumenti di misura, all'interno della camera è stato inserito del silica gel.*

Gli elettrodi sono stati fissati mediante delle viti che fungevano da elettrodi. Esse sono state saldamente fissate al legno in modo da evitare un accidentale estrazione.

Le misurazioni dell'umidità hanno evidenziato che il punto di misurazione più esposto è il punto di contatto tra l'aria e il suolo, seguito dalla sommità del palo che, rispetto alla parte centrale, si inumidisce maggiormente in caso di pioggia.

I risultati coincidono con le altre osservazioni. In base agli attuali modelli relativi alle dinamiche di decadimento del legno (Meyer-Veltrup et al., 2017) si può prevedere che il degrado del legno sulla porzione inferiore dei pali non trattata si manifesti dopo 2 anni, sulla sommità dopo 5 anni e sulla porzione centrale dopo 7 anni di esposizione, salvo non si manifestino importanti cambiamenti dell'andamento meteorico. Sul legno impregnato i primi segni di decadimento saranno osservabili dopo 25+ anni.



*Immagine 16: Sensori sui pali per il monitoraggio dell'umidità del legno.*



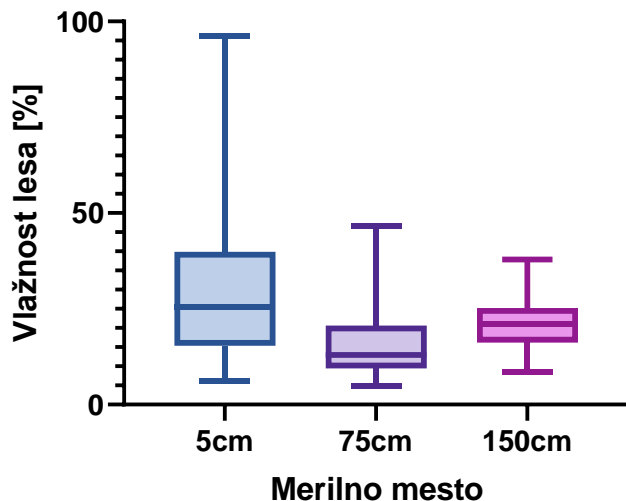


Immagine 17: Umidità del legno rispetto all'altezza del punto di misurazione sul palo. Le misurazioni sono state effettuate dal 20/1/2021 al 1/8/2022. Ogni colonna rappresenta 2200 misurazioni.

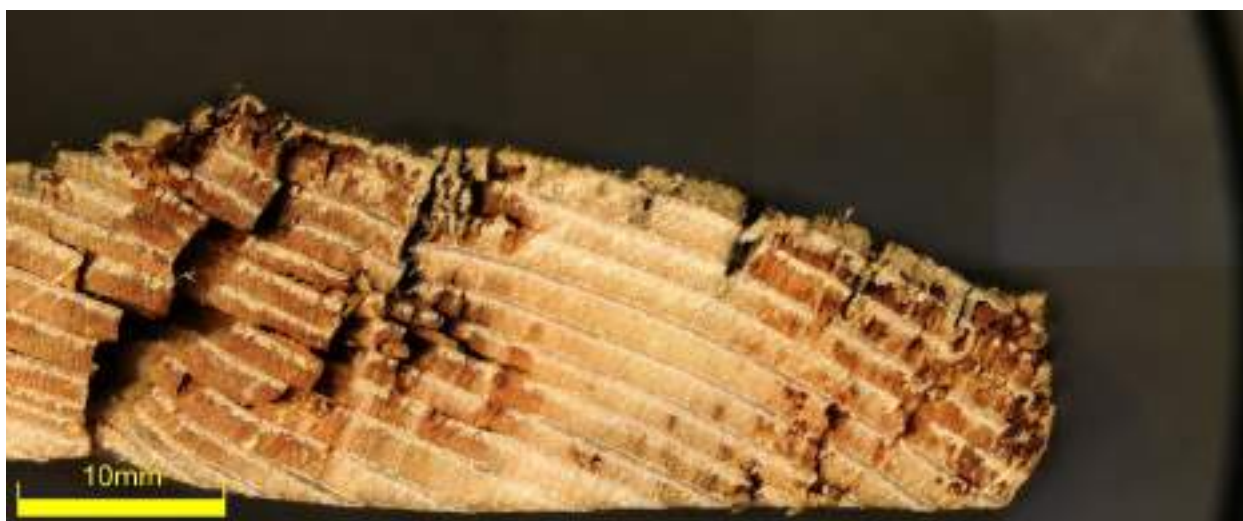
Legenda: Vlažnost lesa = Umidità del legno, Merilno mesto = Punto di misurazione

### 3. Validazione delle prove - scandole

Nello spazio alpino il legno viene tradizionalmente utilizzato per la realizzazione di coperture. Nel XVIII secolo i tetti in legno venivano solitamente impiegati sugli edifici più importanti. Ancora oggi il legno rappresenta il materiale maggiormente diffuso per la costruzione di rifugi e case nella zona montana della Slovenia settentrionale e nord-occidentale. Visto l'elevato costo di questo tipo di copertura abbiamo valutato la possibilità di prolungarne la durata mediante i processi di impregnazione e modifica. Le scandole in legno di abete non trattato, impregnato con soluzione a base di rame (Silvanolin) e modificato termicamente sono state isolate e analizzate con microscopio digitale e microscopio confocale. Sono stati inoltre determinati la resistenza alla compressione, la ruvidità della superficie e gli angoli di contatto delle scandole. I test hanno mostrato che le scandole in abete rosso non trattato appaiono completamente degradate dopo sette anni di esposizione, mentre le scandole in legno trattato con rame e modificato termicamente non presentano segni di decadimento. Tuttavia, i fenomeni atmosferici hanno ridotto sensibilmente la ruvidità della superficie del legno modificato termicamente e non trattato, abbassandone di conseguenza la resistenza all'inumidimento.



*Immagine 18: Tetto dal quale sono state prelevate le scandole dopo 8 anni di utilizzo.*



*Immagine 19: Sezione della scandola in abete, otto anni dopo la posa.*



*Immagine 20: Sezione della scandola in abete modificato termicamente, dopo otto anni dalla posa.*



*Immagine 21: Sezione della scandola in abete impregnata con Silvanolin, dopo otto anni dalla posa.*

#### 4. Validazione e dimostrazione delle prove - modelli di panchina

---

Su sette siti in Slovenia (Seča, Škocjanski zatok, Bilje, Lubiana, Velika planina, Pesnica) e nella parte italiana dell'area di confine (Doberdò del Lago) sono state allestite delle panchine in legno. Sviluppate come modelli per facciate e terrazze, queste strutture sono realizzate con legno di conifere più utilizzato nell'area di progetto, nello specifico con abete rosso (*Picea abies*), pino silvestre (*Pinus sylvestris*) e larice (*Larix decidua*). Una parte degli elementi in abete rosso è stata trattata con biocida a base di rame Silvanolin e modificata termicamente secondo la procedura Silvapro disponibile sul mercato.

Sui vari elementi sono stati posizionati dei sensori per monitorare l'umidità del legno. I nostri modelli hanno mostrato i primi segni di decadimento del legno di abete rosso dopo 300 giorni, quando il tasso di umidità del legno supera il 25%. In base alle misurazioni dell'umidità è quindi possibile, dopo alcuni anni, valutare la durabilità del legno in un determinato sito. A metà della superficie tangenziale, a un angolo di  $10^\circ$  e una distanza di 32 mm, sono state infisse nel campione 2 viti in acciaio inossidabile del diametro di 3,9 mm (Bauhaus Profi Depot, Germania), precedentemente isolate con guaina termorestringente DERAY®-H, alle quali sono stati saldati gli elettrodi, collegati allo strumento di misura. L'umidità è stata rilevata nella porzione centrale dei campioni, dove si sviluppa solitamente la maggior parte dei funghi. Questo punto ha quindi una particolare rilevanza. La resistenza elettrica è stata misurata ogni dodici ore mediante il misuratore Gigamodule (Scantronik, Germania) e registrata con il datalogger Thermofox (Scantronik, Germania). Assieme all'umidità è stata monitorata anche la temperatura sulla superficie dei campioni. In base ai dati sulla resistenza elettrica e temperatura del legno è stata quindi calcolata l'umidità del legno secondo il metodo descritto in letteratura (Brischke & Lampen, 2014).



*Immagine 22: Foto delle panchine modello.*

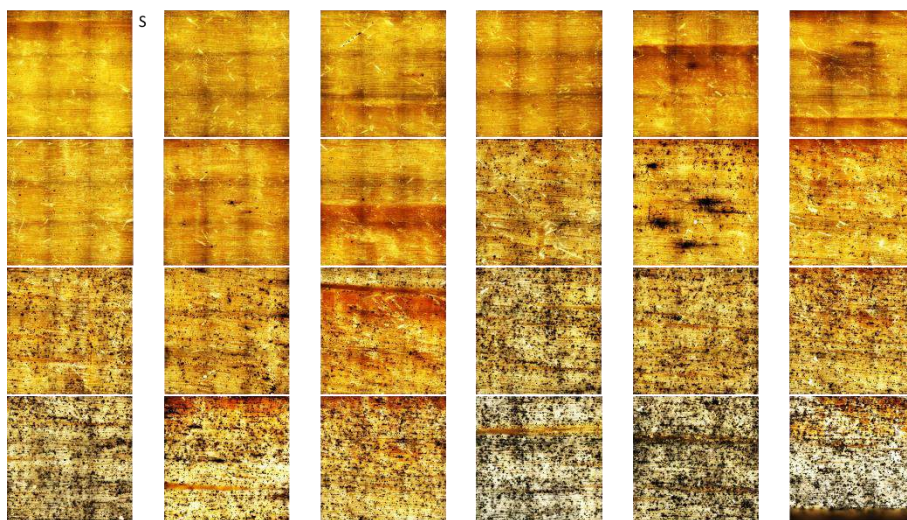
Tabella 5: Quota giorni nel periodo tra novembre 2020 e marzo 2022, quando l'umidità del singolo materiale ha superato il 25 per cento. PiAb – Abete rosso, LaDe – Larice.

	PiAb	LaDe	Silvanolin PiAb	TM PiAb	PiAb	LaDe	Silvanolin PiAb	TM PiAb
	Schienale	Schienale	Schienale	Schienale	Seduta	Seduta	Seduta	Seduta
Seča	3,2%	2,8%	7,3%	20,7%	19,1%	13,9%	18,3%	77,7%
Škocjanski zatok	0,0%	0,0%	0,7%	3,5%	0,0%	1,5%	15,3%	1,7%
Jamlje	0,4%	0,5%	6,1%	4,1%	0,7%	5,6%	13,4%	7,4%
Pesnica	0,3%	1,4%	10,8%	6,8%	1,6%	16,7%	21,5%	41,5%
Lubiana	11,4%	11,2%	19,2%	35,0%	14,8%	15,3%	35,7%	15,0%
Velika planina	6,6%	6,3%	8,8%	54,8%	16,1%	29,5%	82,5%	75,6%

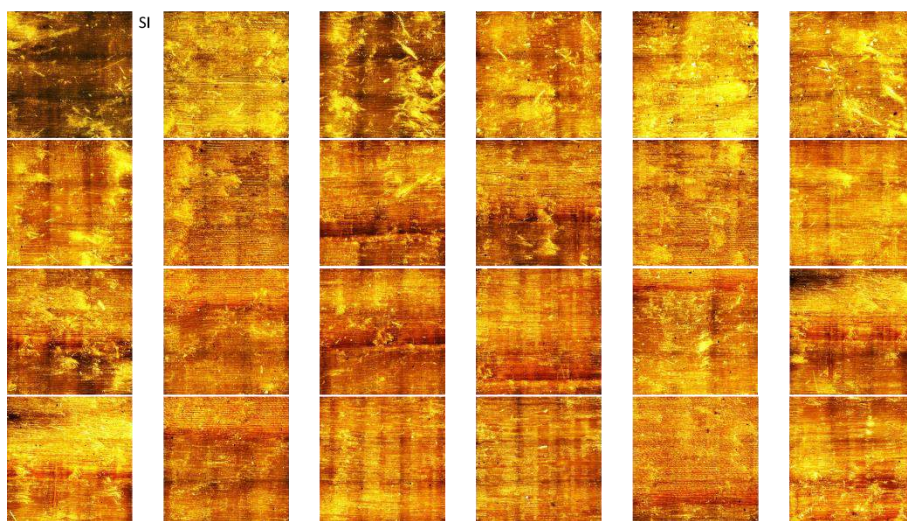
Dai risultati indicati nella Tabella 5 si evidenzia che l'andamento dell'umidità del legno viene influenzato dai seguenti parametri:

- Punto di esposizione: la percentuale di giorni umidi sulla seduta è pari al 22,5%, sullo schienale al 9,2%.
- Materiale: sull'Abete rosso è stata registrata la più bassa percentuale di giorni umidi (6,2%), mentre sull'Abete rosso modificato termicamente quella più elevata (28,6%).
- Posizione: la più bassa percentuale di giorni umidi è stata registrata a Škocjanski zatok (2,8%), quella più elevata a Velika planina (35,0%).

È stata inoltre monitorata l'alterazione cromatica delle panchine causata dai raggi UV e dai funghi dell'azzurramento. Nella seguente analisi microscopica del legno della panchina, collocata a Lubiana, si nota un esempio di sviluppo di funghi dell'azzurramento. Già dopo 16 giorni è stata osservata, nel legno di abete rosso, un'intensa attività di questo fungo cromogeno. Analoghi risultati sono stati riscontrati anche sulle essenze di pino e larice, mentre il legno impregnato non presentava alterazioni cromatiche. I prodotti biocidi hanno quindi avuto un'efficace azione preventiva dell'azzurramento.



*Immagine 23: Sviluppo dei funghi da azzurramento su legno di Abete rosso delle panchine a Lubiana durante un periodo di 16 settimane.*



*Immagine 24: Sviluppo dei funghi da azzurramento su legno di Abete rosso impregnato (Silvanolin) delle panchine a Lubiana durante un periodo di 16 settimane.*

I dati di monitoraggio hanno evidenziato che il maggior cambiamento avviene nei primi 6 mesi, dopodiché il processo subisce un rallentamento. Le analisi delle alterazioni cromatiche, effettuate a Velika planina, hanno mostrato situazioni paragonabili per tutti i materiali. Con il trascorrere del tempo il legno assume una colorazione grigiastria, tanto da rendere le varie essenze difficilmente distinguibili. Il colore non deve quindi costituire un criterio chiave nella scelta del tipo di legno.

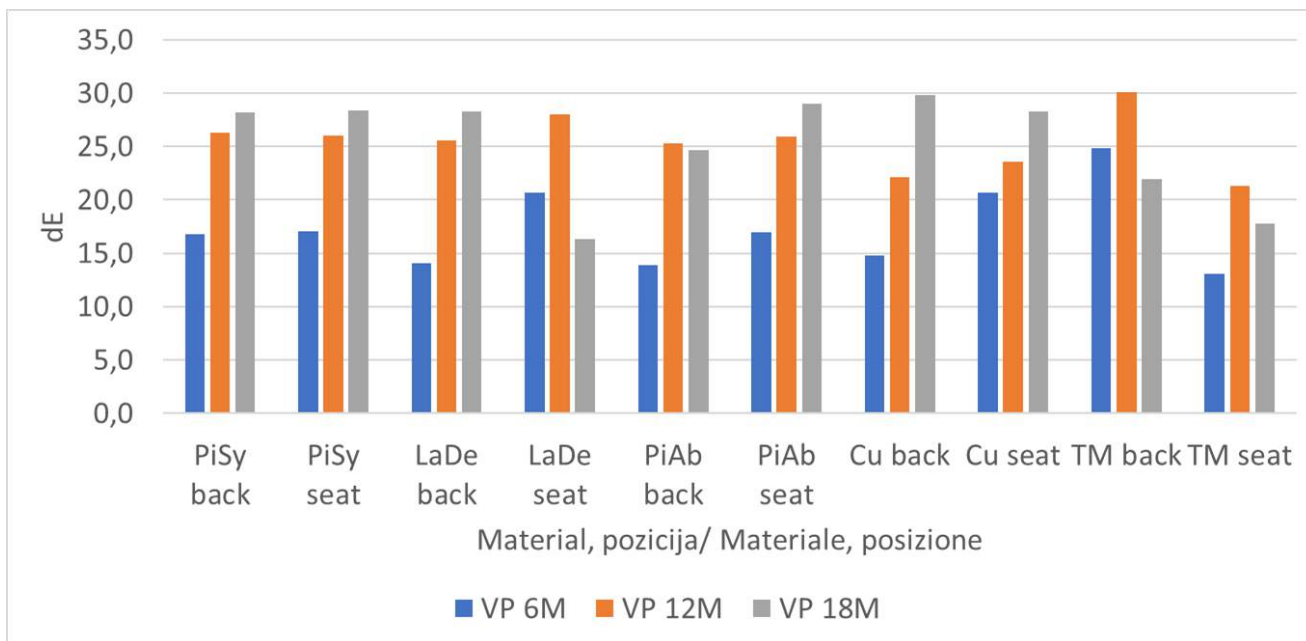


Immagine 25: Sviluppo dei funghi da azzurramento su legno di Abete rosso impregnato (Silvanolin) delle panchine a Lubiana durante un periodo di 16 settimane.

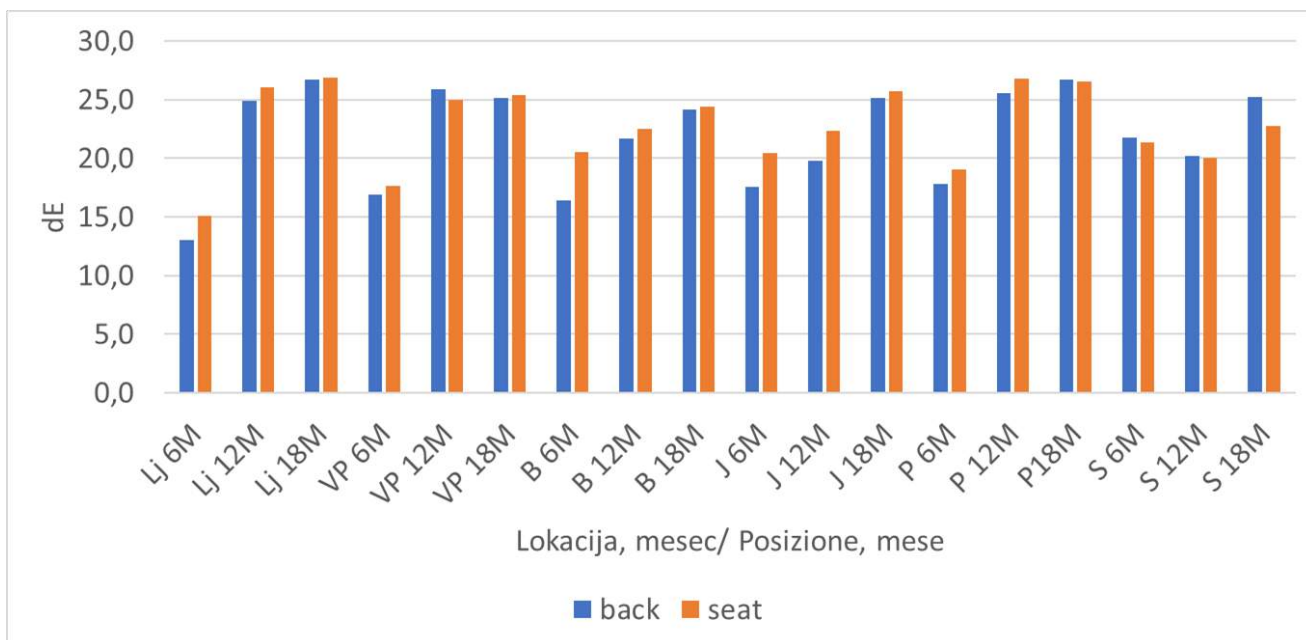


Immagine 26: Alterazioni cromatiche della seduta e dello schienale delle panchine, posizionate su diversi siti sperimentali.

Paragonando i vari siti si nota che le alterazioni cromatiche sono più lente a Velika planina (freddo, neve) e più rapide a Seča e Bilje - queste località sono più calde, soprattutto in inverno. La panchina è stata esposta a novembre 2000, pertanto il fattore di maggior impatto è stato determinato dal clima invernale. Sulla zona del litorale sloveno si hanno

in inverno temperature più elevate e maggiore irradiazione solare che hanno quindi incrementato l'intensità dell'alterazione cromatica.

---

## BIBLIOGRAFIA

---

- Brischke, C., & Lampen, S. C. (2014). Resistance based moisture content measurements on native, modified and preservative treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(2), 289–292. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0775-3>
- CEN. (2013). *European standard EN 335, Durability of wood and wood-based products - Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products*. (European Committee for Standardization), Brussels.
- CEN. (2015). *European Standard EN 252 - Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact*.
- Kržišnik, D., Lesar, B., Thaler, N., & Humar, M. (2018). Performance of Bark Beetle Damaged Norway Spruce Wood Against Water and Fungal Decay. *BioResources*, 13(2). <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.3473-3486>
- Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., Alfredsen, G., Humar, M., Flæte, P. O., Isaksson, T., Brelid, P. L., Westin, M., & Jermer, J. (2017). The combined effect of wetting ability and durability on outdoor performance of wood: development and verification of a new prediction approach. *Wood Science and Technology*, 51(3), 615–637. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0893-x>
- Rapp, A.O. and Augusta, U. (2004). The full guideline for the “double layer test method” -a field test method for determining the durability of wood out of ground. *International Research Group on Wood Preservation*, 23.
- Schmidt, O. (2006). Wood and tree fungi: Biology, damage, protection, and use. In *Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-32139-X>
- Thaler, N., Žlahtič, M., & Humar, M. (2014). Performance of recent and old sweet chestnut (*Castanea sativa*) wood. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 94, 141–145. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.016>
- Wang, X., Wiedenbeck, J., Ross, R. J., Forsman, J. W., Pilon, C., & Brashaw, B. K. (2005). Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. *Technology Review*, 11. [http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr162.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr162.pdf)



*Progetto cofinanziato dal Fondo europeo di sviluppo regionale nell'ambito del "Programma di cooperazione Interreg V-A Italia-Slovenia 2014-2020"*

*I contenuti del presente documento non riflettono in alcun modo l'opinione dell'Autorità di Gestione del "Programma di cooperazione Interreg V-A Italia-Slovenia 2014-2020". La responsabilità di quanto riportato è a carico degli autori.*