

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andrej GORUP

**KINETIKA SUŠENJA BUKOVINE NA PROSTEM V  
ODVISNOSTI OD LETNIH KLIMATSKIH NIHANJ**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2010

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andrej GORUP

**KINETIKA SUŠENJA BUKOVINE NA PROSTEM V ODVISNOSTI  
OD LETNIH KLIMATSKIH NIHANJ**

DIPLOMSKO DELO  
Univerzitetni študij

**BEECH WOOD AIR DRYING KINETICS IN RELATION TO  
SEASONAL CLIMATIC CHANGES**

GRADUATION THESIS  
University Studies

Ljubljana, 2010

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na katedri za tehnologijo lesa na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Željka Goriška, za recenzenta pa prof. dr. Primoža Ovna.

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzent: prof. dr. Primož Oven

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Andrej Gorup

### **KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

ŠD	Dn
DK	UDK 630*847.1
KG	les/bukev/naravno sušenje/kakovost/klimatski dejavniki
AV	GORUP, Andrej
SA	GORIŠEK, Željko (mentor)/OVEN, Primož (recenzent)
KZ	S1-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII 34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2010
IN	<b>KINETIKA SUŠENJA BUKOVINE NA PROSTEM V ODVISNOSTI OD LETNIH KLIMATSKIH NIHANJ</b>
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	XI, 64 str., 6 pregl., 54 sl., 12 pril., 23 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Preučevali smo vpliv letnih klimatskih nihanj na postopek sušenja na prostem in možnosti povečanja sušilnih kapacitet ter prihranka energije v tehničnih postopkih sušenja ob smotri uporabi naravnega sušenja. Postopek sušenja smo izvajali na bukovih vzorcih debeline do 38 mm in ga spremljali od začetka decembra do začetka avgusta v 8 zaporednih serijah. Vzorce smo sušili od svežega stanja do doseženega ravnovesja z okolico. Med sušenjem na prostem smo natančneje preučevali vpliv temperature in relativne zračne vlažnosti na sušilno krivuljo in hitrost sušenja v posameznih letnih časih. Ugotovili smo, da na hitrost sušenja na prostem najbolj vplivajo temperaturna nihanja. Najvišje hitrosti sušenja so bile dosežene v maju in juniju, najnižje pa v decembru in januarju. Hitrost sušenja na prostem se močno zmanjša ob nenadnih padcih temperature, ki povzročijo hitro povečanje relativne zračne vlažnosti. Med kontrolo kakovosti smo ugotovili, da so bili vzorci kakovostno posušeni in brez napak.

### KEY WORDS DOCUMENTATION

DN	Dn
DC	UDC 630*847.1
CX	wood/beech/air drying/quality/climatic factors
AU	GORUP, Andrej
AA	GORIŠEK, Željko (supervisor)/OVEN, Primož (co-supervisor)
PP	S1-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII 34
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY	2010
TI	BEECH WOOD AIR DRYING KINETICS IN RELATION TO SEASONAL CLIMATIC CHANGES
DT	Graduation thesis (University studies)
NO	XI, 64 p., 6 tab., 54 fig., 12 an., 23 ref.
LA	sl
AL	sl/en
AB	The research studies the influence of seasonal climatic changes on the process of wood seasoning, explores the possibilities of increasing kiln drying capacity, and saving energy in technical processes of wood seasoning at a reasonable use of air drying. The process of wood seasoning was studied on 38 mm thick beech samples and monitored on 8 subsequent series from the beginning of December to the beginning of August. They were submitted to air drying in fresh state and seasoned until they reached balance with the environment. During air drying of wood the effects of temperature and relative humidity on drying curve and speed in different seasons were studied. The results show that the drying rate is most affected by changes of temperature. The highest drying rates were reached in May and June, the lowest in December and January. The drying rate decreased substantially in the event of a sudden drop of temperature, causing a sudden increase of relative humidity. Through a quality assurance process it was confirmed that the samples were seasoned well and without defects.

## KAZALO VSEBINE

	str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION .....	IV
KAZALO VSEBINE .....	V
KAZALO PREGLEDNIC .....	VII
KAZALO SLIK .....	VIII
KAZALO PRILOG .....	X
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA.....	1
1.2 HIPOTEZA.....	1
1.3 CILJI.....	1
<b>2 SPLOŠNI DEL.....</b>	<b>2</b>
2.1 SUŠENJE LESA .....	2
2.2 MEHANIZEM SUŠENJA .....	3
2.2.1 Voda v lesu .....	3
2.2.2 Vlažnostna stanja lesa .....	3
2.2.3 Točka nasičenja celičnih sten .....	3
2.2.4 Ravnovesna vlažnost .....	4
2.2.4.1 Vpliv relativne zračne vlažnosti .....	4
2.2.4.2 Vpliv večkratnega sušenja .....	5
2.2.4.3 Vpliv temperature .....	5
2.3 GIBANJE VODE V LESU .....	6
2.3.1 Masni tok proste vode v lesu.....	6
2.3.2 Difuzijski tok vode v lesu .....	7
2.4 SUŠILNA KRIVULJA .....	8
2.5 DEJAVNIKI SUŠENJA NA PROSTEM .....	9
2.5.1 Temperatura .....	9
2.5.2 Vlaga v zraku .....	10
2.5.3 Relativna zračna vlažnost .....	10
2.5.4 Hitrost zraka .....	11
2.5.4.1 Vpliv vetra na sušenje na prostem .....	12
2.5.5 Vpliv letnega časa na potek sušenja na prostem.....	13
2.5.6 Priprava skladišča .....	17
2.5.7 Urejenost tal .....	19
2.5.8 Oblikovanje zložajev in skladovnic.....	19
2.5.9 Lokacija .....	22
2.5.9.1 Lignoizohigre .....	23
2.5.10 Vrsta lesa .....	24
2.5.11 Debelina .....	24
2.5.12 Potek vlaken .....	25
2.5.13 Jedrovina in beljava .....	25
2.6 PREDNOSTI IN SLABOSTI SUŠENJA NA PROSTEM.....	26
2.7 NAPAKE PRI SUŠENJU LESA NA PROSTEM .....	27

<b>3 MATERIAL IN METODE DELA.....</b>	<b>28</b>
3.1 MATERIAL .....	28
3.2 METODE .....	28
3.2.1 Vzorčenje.....	28
3.2.2 Določanje in spremeljanje lesne vlažnosti.....	28
3.2.3 Spremljanje kinetike sušenja na prostem .....	30
3.2.4 Spremljanje klimatskih nihanj.....	31
3.3 KONTROLA KAKOVOSTI.....	32
3.3.1 Vzorčenje.....	32
3.3.2 Izvedba kontrole kakovosti.....	33
3.3.2.1 Povprečna vlažnost .....	33
3.3.2.2 Notranje napetosti.....	33
3.3.2.3 Vlažnostni gradient.....	34
<b>4 REZULTATI.....</b>	<b>35</b>
4.1 KINETIKA SUŠENJA LESA NA PROSTEM.....	35
4.1.1 Potek sušenja 1. serije .....	36
4.1.2 Potek sušenja 2. serije .....	38
4.1.3 Potek sušenja 3. serije .....	40
4.1.4 Potek sušenja 4. serije .....	42
4.1.5 Potek sušenja 5. serije .....	44
4.1.6 Potek sušenja 6. serije .....	46
4.1.7 Potek sušenja 7. serije .....	48
4.1.8 Potek sušenja 8. serije .....	50
4.2 PREHOD V DIFUZIJSKI REŽIM IN HITROST SUŠENJA.....	52
4.3 KONTROLA KAKOVOSTI .....	53
<b>5 RAZPRAVA.....</b>	<b>55</b>
5.1 ODVISNOST SUŠENJA NA PROSTEM OD LETNEGA ČASA.....	55
5.1.1 Potek sušenja na prostem.....	55
5.1.2 Časi sušenja.....	58
5.2 HITROSTI SUŠENJA V ODVISNOSTI OD LETNEGA ČASA .....	59
<b>6 SKLEPI .....</b>	<b>61</b>
<b>7 POVZETEK .....</b>	<b>62</b>
<b>8 VIRI IN LITERATURA .....</b>	<b>63</b>
<b>ZAHVALA</b>	
<b>PRILOGE</b>	

## KAZALO PREGLEDNIC

<b>Preglednica 2.1:</b> Vlažnostna stanja lesa glede na količino vode, ki se zadržuje v lesnem tkivu.....	3
<b>Preglednica 3.1:</b> Povprečna dolžina ( $D_{pov}$ ), širina ( $s_{pov}$ ), debelina ( $d_{pov}$ ) površina ( $A_{pov}$ ), in število vzorcev ( $N_V$ ) v posamezni seriji (pri izračunu površine vzorcev površin cel nismo upoštevali).....	28
<b>Preglednica 3.2:</b> Kriteriji za ocenjevanje notranjih napetosti .....	33
<b>Preglednica 4.1:</b> Obdobje spremjanja posamezne serije. Začetne vlažnosti ( $U_Z$ ), končne vlažnosti ( $U_K$ ), maksimalna sušilna hitrost ( $\alpha$ ) in vlažnost eksponentnega pojemanja ( $U_C$ ) pri posamezni seriji .....	35
<b>Preglednica 5.1:</b> Povprečni časi sušenja (v dnevih) posameznih serij do različnih končnih vlažnosti .....	58
<b>Preglednica 5.2:</b> Maksimalna hitrost sušenja med izločanjem proste vode (a), vlažnost eksponentnega pojemanja ( $u_c$ ) in pojemanje sušilne hitrosti pod točko $u_c$ pri posamezni seriji .....	59

## KAZALO SLIK

<b>Slika 2.1:</b> Sorpcijska histereza. Ravnovesna vlažnost v odvisnosti od relativne zračne vlažnosti pri temperaturi 21,1 °C po Van Wagnerju (Dimitrov, 2002) .....	4
<b>Slika 2.2:</b> Gibanje vode skozi lesno tkivo in pore pri sušenju (Gorišek, 2006).....	6
<b>Slika 2.3:</b> Odvisnosti difuzijskega koeficienta od vlažnosti lesa in temperature (Keey, 2000) .....	7
<b>Slika 2.4:</b> Teoretični in praktični potek krivulje sušenja (Dimitrov, 2002) .....	8
<b>Slika 2.5:</b> Prehajanje zraka skozi zložaj na skladišču (Air drying of lumber, 1999).....	11
<b>Slika 2.6:</b> Tok zraka v zložaju pri naravnem sušenju lesa; a – normalno zlaganje; b – gosto zlaganje; c – trava pod zložajem ovira tok zraka (Krpan, 1958) .....	12
<b>Slika 2.7:</b> Skladovnice preblizu skupaj (Krpan, 1958) .....	12
<b>Slika 2.8:</b> Zveza med hitrostjo sušenja in lesno vlažnostjo pri zimskem (○) in spomladanskem (●) sušenju na prostem in izračunan matematični model (Straže in Gorišek, 2007) .....	13
<b>Slika 2.9:</b> Simulacija sušenja 25 mm bukovine na prostem spomladi (črtkana črta) in pozimi (Straže in Gorišek, 2007) .....	14
<b>Slika 2.10:</b> Sušilne krivulje bukve pri sušenju na prostem v Poznanu (FSC – točka nasičenja celičnih sten, EMC – ravnovesna vlažnost) (Guzenda s sod., 2004)..	15
<b>Slika 2.11:</b> Diagram sušenja na prostem ameriške bukve v kraju Asheville (Simpson in Hart, 2000) .....	16
<b>Slika 2.12:</b> Diagram sušenja na prostem ameriške bukve v kraju Charlestone (Simpson in Hart, 2000) .....	16
<b>Slika 2.13:</b> Postavitev skladišča glede na smer stalnega vetra (Gorišek s sod., 1994) .....	17
<b>Slika 2.14:</b> Poti med zložaji v skladišču (Gorišek, 2006).....	18
<b>Slika 2.15:</b> Skladovnica: podstavki, gredice, zložaji in streha (Gorišek s sod., 1994) .....	19
<b>Slika 2.16:</b> Primer zasenčenega sušenja v ZDA (Air drying of lumber, 1999) .....	20
<b>Slika 2.17:</b> Žlebate letvice, ki jih uporabljajo v ZDA (Air drying of lumber, 1999).....	21
<b>Slika 2.18:</b> Perforirane letvice, ki jih uporabljajo na Nizozemskem (Foto A. Straže) .....	21
<b>Slika 2.19:</b> Pravilno letvičen zložaj (Foto A. Straže) .....	21
<b>Slika 2.20:</b> Nepravilno letvičen in nepravilno podložen zložaj (Air drying of lumber, 1999) .....	21
<b>Slika 2.21:</b> Letno gibanje relativne zračne vlažnosti in temperature zraka za področje Bleda in Nove Gorice (črtkana črta) (Higrometeorološki zavod Slovenije, 1994) .....	22
<b>Slika 2.22:</b> Odstotek vlage v lesu po sušenju na prostem, črtkana črta predstavlja ravnovesne vlažnosti za Novo Gorico (Gorišek s sod., 1994).....	23
<b>Slika 2.23:</b> Povprečne ravnovesne vlažnosti lesa v Sloveniji za julij (Gorišek s sod., 1994) .....	23
<b>Slika 2.24:</b> Povprečne ravnovesne vlažnosti lesa v Sloveniji za januar (Gorišek s sod, 1994) .....	23
<b>Slika 2.25:</b> Sušenje borovega lesa debeline 25 mm in 50 mm (Kollmann in Cote, 1968) .	24
<b>Slika 2.26:</b> Krivulji sušenja na prostem za bor ( <i>Pinus tadea L.</i> ) preseka 90 mm × 115 mm in dolžine 3 m v ZDA (Krpan, 1958) .....	25
<b>Slika 3.1:</b> Sušilnik, kjer smo sušili manjše vzorce (Laboratorij za sušenje lesa, Oddelek za lesarstvo).....	29
<b>Slika 3.2:</b> Zložaj z vzorci 1., 2., 3., 4., 5., 7., 8. serije (levo) in zložaj 6. serije (desno)....	29

<b>Slika 3.3:</b> Vremenska postaja Davis Vantage Pro, fotografirana na električnem drogu 20 m od zložaja .....	31
<b>Slika 3.4:</b> Sprejemnik vremenske postaje Davis Vantage Pro z zaslonom.....	31
<b>Slika 3.5:</b> Izdelava vzorcev za kontrolo kakovosti .....	32
<b>Slika 3.6:</b> Nastanek reže, do katerega pride zaradi prisotnosti notranjih napetosti v lesnem tkivu po končanem sušenju .....	33
<b>Slika 4.1:</b> Sušilna krivulja 1. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja.....	36
<b>Slika 4.2:</b> Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 1. seriji .....	37
<b>Slika 4.3:</b> Sušilna krivulja 2. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja.....	38
<b>Slika 4.4:</b> Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 2. seriji .....	39
<b>Slika 4.5:</b> Sušilna krivulja 3. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja.....	40
<b>Slika 4.6:</b> Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 3. seriji .....	41
<b>Slika 4.7:</b> Sušilna krivulja 4. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja.....	42
<b>Slika 4.8:</b> Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 4. seriji .....	43
<b>Slika 4.9:</b> Sušilna krivulja 5. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja.....	44
<b>Slika 4.10:</b> Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 5. seriji .....	45
<b>Slika 4.11:</b> Sušilna krivulja 6. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja.....	46
<b>Slika 4.12:</b> Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 6. seriji .....	47
<b>Slika 4.13:</b> Sušilna krivulja 7. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja.....	48
<b>Slika 4.14:</b> Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 7. seriji .....	49
<b>Slika 4.15:</b> Sušilna krivulja 8. serije in klimatska nihanja med spremeljanjem procesom sušenja.....	50
<b>Slika 4.16:</b> Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 8. seriji .....	51
<b>Slika 4.17:</b> Vlažnost prehoda v difuzijski režim sušenja v odvisnosti od hitrosti izločanja proste vode.....	52
<b>Slika 4.18:</b> Povprečne končne vlažnosti vzorcev v posameznih serijah.....	53
<b>Slika 4.19:</b> Povprečni vlažnostni gradient vzorcev v posameznih serijah v %/cm.....	54
<b>Slika 5.1:</b> Krivulje sušenja na prostem v različnih letnih časih .....	56
<b>Slika 5.2:</b> Spremembe klimatskih dejavnikov med procesom sušenja na prostem.....	57
<b>Slika 5.3:</b> Velikost reže v odvisnosti od hitrosti izločanja proste vode ( $\alpha$ ) .....	60

## KAZALO PRILOG

**Priloga A:** Vizualna ocena vzorcev 1. in 2. serije

**Priloga B:** Vizualna ocena vzorcev iz 3., 4. in 5. serije.

**Priloga C:** Vizualne ocene vzorcev iz 6. serije

**Priloga D:** Vizualne ocene vzorcev iz 6. Serije

**Priloga E:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja ( $v$ ) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 1. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

**Priloga G:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja ( $v$ ) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 3. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

**Priloga H:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja ( $v$ ) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 4. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

**Priloga I:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja ( $v$ ) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 5. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

**Priloga J:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja ( $v$ ) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 6. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

**Priloga K:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja ( $v$ ) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 7. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

**Priloga L:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja ( $v$ ) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 8. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

## 1 UVOD

Tako iz teorije kot tudi iz prakse vemo, da ima posušen les veliko prednosti pred vlažnim. Sušenje lesa se prične že takoj po poseku drevesa, v nadalnjem tehnoškem postopku pa sušenje izvajamo po razžagovanju hlodovine v žagarske assortimane. Sušenje žaganega lesa na prostem ali naravno sušenje se v praksi zaradi dolgotrajnosti in potreb po velikih površinah vse bolj zapostavlja in kot najprimernejši način tehničnega sušenja prevladuje komorsko sušenje. Tehnično sušenje je primernejše ali celo nujno pri sušenju v higroskopskem območju, ko je potrebno les osušiti pod točko nasičenja celičnih sten.

V tem diplomskem delu bomo raziskovali vpliv letnega časa in klimatskih pogojev na sam proces sušenja na prostem. Ni namreč vseeno, kdaj les sušimo na prostem. Zaradi velikih nihanj temperature, relativne zračne vlažnosti in vetra obstajajo velike razlike v kinetiki sušenja na prostem v različnih letnih časih. Velika nihanja klimatskih pogojev pa močno vplivajo tudi na dnevni potek sušenja na prostem.

### 1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

Sušenje na prostem je dolgotrajen proces in zahteva velike skladiščne površine. Izkušnje vseeno kažejo na dokaj učinkovito naravno sušenje svežega lesa. Na učinkovitost in racionalnost sušenja lesa na prostem pa vplivajo tudi zelo raznolike vremenske razmere tekom celega leta ali v posameznih letnih obdobjih in seveda tudi lokacija. Poleg tega, da s sušenjem na prostem prihranimo veliko energije, se med tem postopkom vlažnost enakomerneje porazdeli, sprostijo se rastne napetosti in povečamo kapacitete sušilnih naprav.

### 1.2 HIPOTEZA

Letna klimatska nihanja odločilno vplivajo na proces sušenja na prostem. Pozimi, ko so temperature nižje, bodo hitrosti sušenja nižje kot spomladi in poleti, ko so temperature višje. Na hitrost sušenja bo odločilno vplivala tudi ravnovesna vlažnost.

### 1.3 CILJI

Na primeru naravnega sušenja bukovine v različnih letnih obdobjih želimo ugotoviti:

- vpliv letnih klimatskih nihanj na kinetiko sušenja bukovine na prostem predvsem pri sušenju svežega lesa;
- pomen in težo vpliva posameznih klimatskih parametrov (temperature, relativne zračne vlažnosti ipd.) na proces sušenja lesa na prostem;
- dinamiko sušenja bukovine na prostem v odvisnosti od letnega časa;
- vlažnost lesa, do katere je še smotrno izvajati sušenja na prostem;
- učinek ostrine sušenja, ki jo pogojujejo klimatske razmere, na kakovost naravno osušene bukovine.

## 2 SPLOŠNI DEL

### 2.1 SUŠENJE LESA

Sušenje lesa je termodifuzijski proces, kjer iz lesa odstranjujemo vodo z namenom, da bi dobili kakovostnejši produkt. Posušen les ima pred svežim lesom velike prednosti:

- nižja gostota: posušen les je lažji od svežega, zato je manipulacija lažja in transportni stroški so nižji;
- zmanjšanje delovanja lesa: suh les se manj krči in nabreka;
- biološka odpornost: če les posušimo do zračne suhosti (20-odstotna vlažnost ali nižje), je les že odporen proti glivnim okužbam;
- boljše izolacijske lastnosti: manjša topotna in električna prevodnost;
- lažja obdelava in boljše lepljenje;
- večja kalorična vrednost.

Kljub številnim prednostim posušenega lesa pa ima sam proces sušenja dve glavni slabosti: proces sušenja je v lesnopredelovalni industriji energetsko potraten in časovno dolgotrajen proces. Zato je zelo pomembno, da že pred začetkom sušenja vemo na kakšno končno vlažnost bomo les posušili, na podlagi tega pa se nato odločimo, kateri postopek sušenja uporabiti.

Res je, da je komorsko sušenje v primerjavi s sušenjem na prostem relativno hitro, vendar se zaradi velike porabe električne in topotne energije vedno bolj uveljavlja stopenjsko sušenje, kar pomeni, da les najprej sušimo na prostem, nato pa komorsko, pri tem pa privarčujemo z energijo in dodatno izkoristimo prazne čase pri komorskem sušenju.

Pri sušenju na prostem sta hitrost in čas sušenja odvisna predvsem od zunanjih pogojev: temperature, relativne zračne vlažnosti in hitrosti vetra. Ti pogoji pa niso konstantni, temveč pogosto nihajo. Ravno zato je tako pomembno, da vemo kako (letna) klimatska nihanja vplivajo na proces sušenja na prostem.

## 2.2 MEHANIZEM SUŠENJA

Sušenje je sestavljeno iz odstranjevanja vode s površine lesa in toka vode iz notranjosti na površino. Od prevladujočega upora je odvisna vzpostavitev ustreznih parametrov sušenja – temperature, relativne zračne vlažnosti in hitrosti kroženja zraka (Gorišek, 2004).

### 2.2.1 Voda v lesu

Voda v živem drevesu je odraz prevajalne funkcije sekundarnega ksilema, ki prevaja vodo iz koreninskega sistema v krošnjo (Gorišek, 1994). Voda se v svežem lesu nahaja v naslednjih treh oblikah:

1. vezana ali higroskopna voda: v tej obliki se nahaja v lesnem tkivu oziroma v celičnih stenah; ima velik vpliv na lastnosti lesa; nižji kot je procent vlažnosti, teže voda izhaja;
2. prosta ali kapilarna voda: nahaja se v celičnih lumnih; povečuje težo lesa in nima vpliva na ostale lastnosti; njena količina v lesni strukturi je odvisna od poroznosti lesa;
3. vodna para v celičnih lumnih.

### 2.2.2 Vlažnostna stanja lesa

Les je higroskopen material in je zato vselej bolj ali manj vlažen. Glede na količino vode v lesu so znana naslednja vlažnostna stanja lesa (Gorišek, 1994):

**Preglednica 2.1:** Vlažnostna stanja lesa glede na količino vode, ki se zadržuje v lesnem tkivu

Vlažnostno stanje	Vlažnost [%]	Zapolnitev praznih prostorov
Absolutno suh les (sušilnično suh les)	0	
zračno suh les	12–20	delno zapolnjene celične stene
območje nasičenja vlaken	23–35	celične stene nasičene z vodo
gozdno svež les	> TNCS	delno zapoljeni lumi
napojen les	> TNCS	lumi zaliti z vodo

### 2.2.3 Točka nasičenja celičnih sten

Vlažnost, pri kateri so celični lumi prazni, celične stene pa nasičene z vodo, imenujemo točka nasičenja celičnih sten ali s kratico TNCS. Območju vlažnosti lesa od absolutno suhega stanja do TNCS pravimo higroskopsko območje. V takem stanju je les higroskopen, ker sprejema vlago (vodo) iz zraka zaradi uravnovešanja z zunanjim klimom.

V procesu sušenja lesa je prva kritična točka dosežena, ko pada vlažnost površine lesa pod TNCS. Dokler je vlažnost površine nad TNCS, prevladuje konvektivni režim s konstantno hitrostjo sušenja, celotni upor proti snovnemu toku pa predstavlja mirujoči film zraka (debeline 0,1 do 1,0 mm) nad sušečo površino.

## 2.2.4 Ravnovesna vlažnost

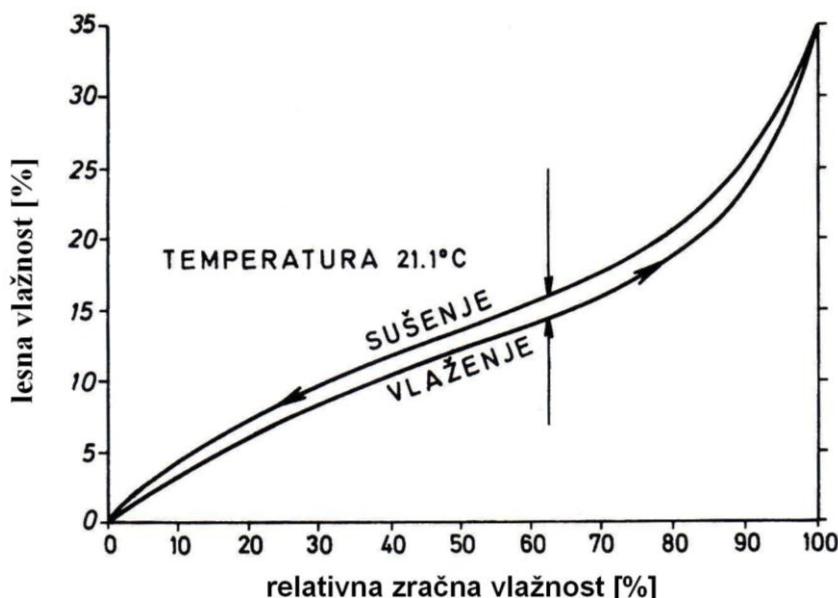
Stanju, ko se les uravnovesi s klimo, pravimo higroskopsko ravnovesje. Vlažnost lesa v higroskopskem ravnovesju je ravnovesna vlažnost ( $U_r$ ).

Ravnovesna vlažnost lesa je sorazmerna z relativno zračno vlažnostjo, na ravnovesno vlažnost pa poleg relativne zračne vlažnosti vplivajo tudi temperatura, večkratna izpostavitev okoliškemu zraku in mehanska obremenitev. Na vrednost relativne zračne vlažnosti vplivajo tudi lesna vrsta, prisotnost jedrovine in beljave in vsebnost ekstraktivov (Skaar, 1988).

V poglavjih, ki sledijo, je opisano, kako temperatura, večkratna izpostavitev okoliškemu zraku in mehanska obremenitev vplivajo na ravnovesno vlažnost.

### 2.2.4.1 Vpliv relativne zračne vlažnosti

Na ravnovesno vlažnost lesa od vseh dejavnikov najbolj vpliva relativna zračna vlažnost oziroma relativni tlak vodne pare. Krivulja, ki prikazuje odvisnost ravnovesne vlažnosti od relativne zračne vlažnosti pri konstantni temperaturi, se imenuje sorpcijska izoterma. Za les je po Urquhartu (1960), ki ga navaja tudi Keey s sodelavci (2000), aplikativna samo sorpcijska izoterma II. tipa (sl. 2.1), ki je kombinacija sorpcijskih izoterm I. in III. tipa.



Slika 2.1: Sorpcijska histereza. Ravnovesna vlažnost v odvisnosti od relativne zračne vlažnosti pri temperaturi 21,1 °C po Van Wagnerju (Dimitrov, 2002)

#### 2.2.4.2 Vpliv večkratnega sušenja

Ravnovesna vlažnost je pri dani relativni zračni vlažnosti običajno najvišja med prvo desorpcijo (sušenjem) svežega lesa, nato pa pada, ker pride z vsako ponovno desorpcijo do ireverzibilne izgube higroskopnosti lesa.

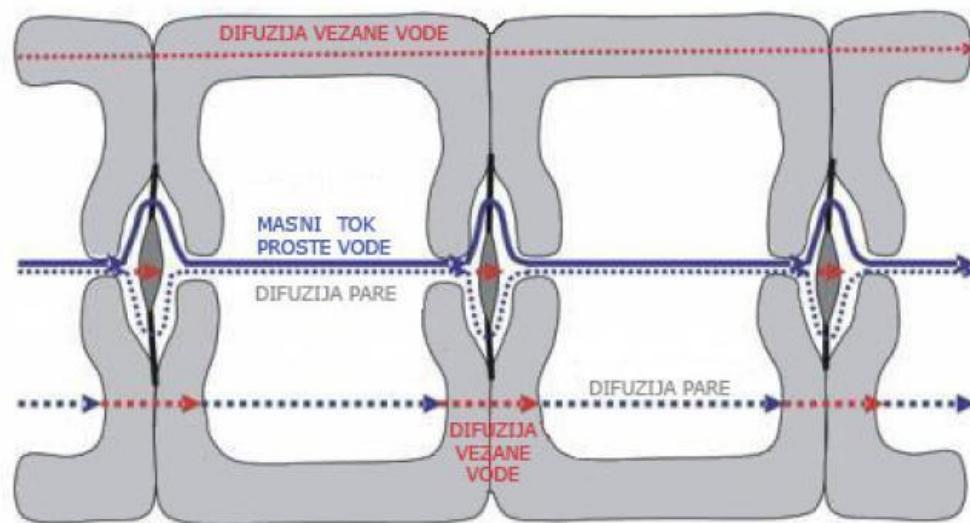
#### 2.2.4.3 Vpliv temperature

Izpostavitev višim temperaturam ima različne posledice na sorpcijske lastnosti lesa. Temperatura povzroči, da les pri dani relativni zračni vlažnosti doseže nižjo ravnovesno vlažnost, vendar je ta učinek reverzibilen, ko se temperatura lesa normalizira. Temperatura pa lahko na les učinkuje tudi tako, da se higroskopnost lesa trajno zmanjša, potem ko les temperiramo na normalno temperaturo. Obseg zmanjšanja higroskopnosti je odvisen od trajanja izpostavitve višji temperaturi in višine temperature.

## 2.3 GIBANJE VODE V LESU

Pri procesu sušenja lesa se pojavi gibanje vode skozi lesno tkivo, ki poteka na dva različna načina: kot masni tok proste ali kapilarne vode in kot difuzijski tok vezane vode in vodne pare. Večinski del vode se iz lesa izloči po difuzijski poti, izjeme so le zelo permeabilne lesne vrste (Gorišek s sod., 1994).

Dejavniki, ki narekujejo difuzivnostne značilnosti, na splošno kontrolirajo tudi sušilno hitrost. Kot splošno pravilo pa velja, da hitrost sušenja pada z naraščajočo gostoto in debelino sortimentov (Gorišek s sod., 1994).



Slika 2.2: Gibanje vode skozi lesno tkivo in pore pri sušenju (Gorišek, 2006)

### 2.3.1 Masni tok proste vode v lesu

Z vidika transporta proste vode je les heterokapilaren sistem, pri čemer tvorijo kapilarni sistem, celični lumni in piknje oziroma pikenjske membrane. Poroznost lesa je potreben, ne pa tudi zadosten pogoj za masni tok vode lesu. Med odprtinami v lesnem tkivu mora obstajati sklenjena povezava, t.j. les mora biti prevoden oziroma permeabilen (Gorišek s sod., 1994).

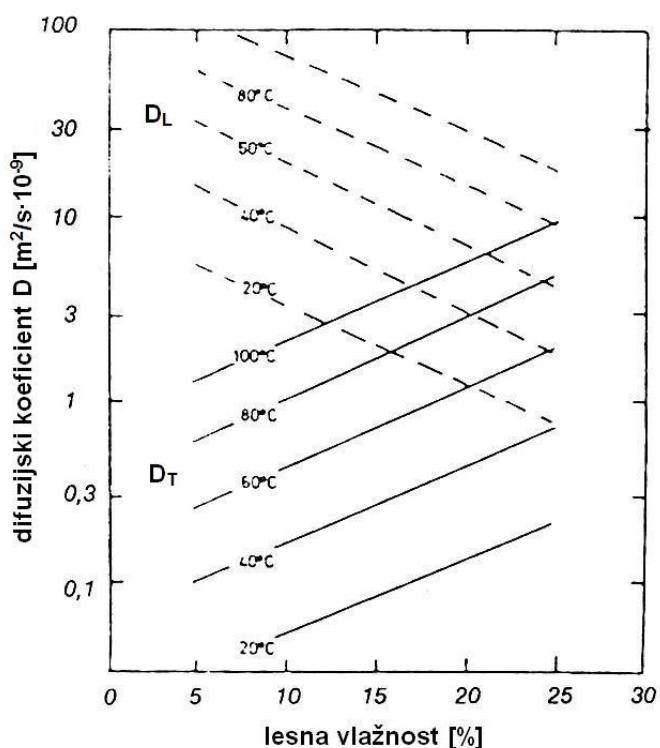
Prosta voda se nahaja v lumnih anatomskeih elementov in se giblje na površino zaradi kapilarne tenzije, ki je obratno sorazmerna s premerom meniska. Ko se vodna gladina s površine sušečega se lesa umakne v drobne piknje in nastanejo meniski z majhnim radijem, nastane močan kapilarni vlek v globino lesnega tkiva, pri čemer nastane tlačni in vlažnostni gradient. Pri zelo prevodnih lesovih se kapilarni vlek vzpostavi vse do sredice deske, meniski vztrajajo na površini, vlažnost površine pa ima vsaj vlažnost TNCS. Tako ugodna situacija se sicer pojavi le pri zelo vlažnih in prevodnih beljavah lesnih vrst in pri sušenju v blagih razmerah. V takšnih okoliščinah se transportirajo maksimalne količine vode ob najmanjši porabi energije (Siau, 1995).

Pri manj prevodnih lesnih vrstah (med katere lahko prištevamo večino evropskih) se površina relativno hitro osuši pod točko nasičenja celičnih sten, poleg konvektivnega upora pa se pojavi še upor proti prenosu snovi v samem materialu – difuzijski upor.

### 2.3.2 Difuzijski tok vode v lesu

Permeabilnost in prevodnost sta pomembni predvsem za transport proste vode, manj pa sta pomembni za transport vezane ali higroskopne vode, ki je sestavljen iz difuzije vezane vode skozi stene in parne difuzije skozi lumne. Pri transportu pare in vezane vode je najodločilnejša difuzivnost lesnega tkiva, ki je odvisna od več dejavnikov, najpomembnejši med njimi pa so: gostota, temperatura, vlažnost, usmerjenost vlaken in smer toka.

Koeficient difuzije pare v lumnih je veliko večji od koeficiente difuzije vezane vode. Koeficient difuzije vodne pare s temperaturo narašča zaradi naraščajočega parnega tlaka in z vlažnostjo pada, medtem ko koeficient difuzije vezane vode z vlažnostjo narašča (Gorišek s sod., 1994) (sl. 2.3).

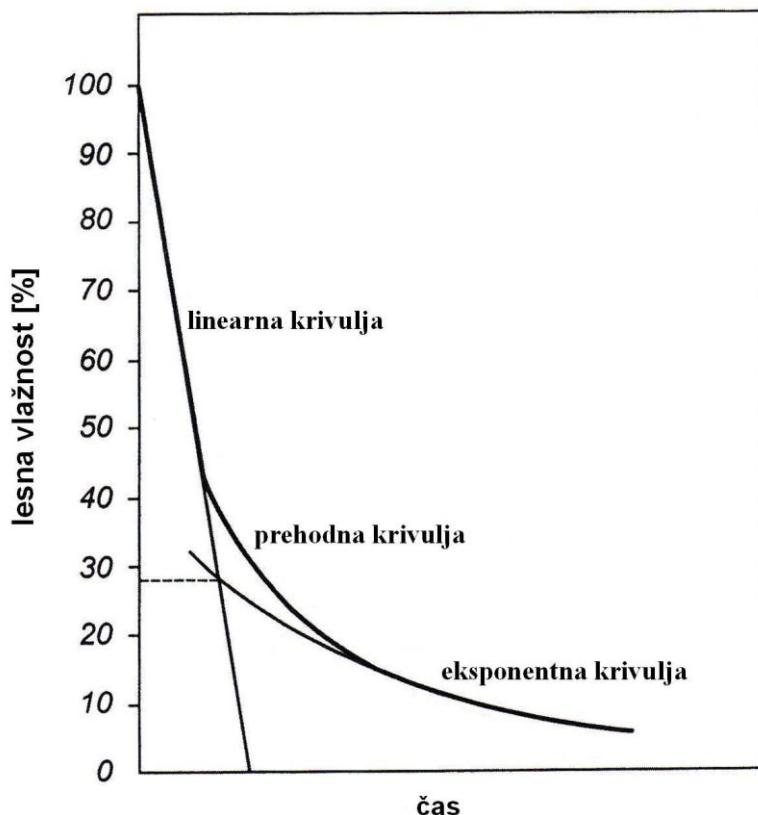


Slika 2.3: Odvisnosti difuzijskega koeficijenta od vlažnosti lesa in temperature (Keey, 2000)

Difuzija v radialni smeri je za 17–25 % večja od difuzije v tangencialni smeri. Razlog je v radialno potekajočih trakovih in v razporeditvi mikrofibril v radialnih stenah. Difuzijski koeficient vezane vode je v vzdolžni smeri približno 2,5-krat večji kot v prečni (Gorišek s sod., 1994).

## 2.4 SUŠILNA KRIVULJA

Sušilna krivulja nam pove, kako se hitrost sušenja spreminja glede na padec lesne vlažnosti, iz sušilnega diagrama pa razberemo spremembo lesne vlažnosti glede na čas sušenja. Po Dimitrovu (2002) je krivulja sušenja sestavljena iz treh delov: linearnega, prehodnega in eksponentnega dela (sl. 2.4).



Slika 2.4: Teoretični in praktični potek krivulje sušenja (Dimitrov, 2002)

Dokler se les suši nad območjem nasičenja lesnih vlaken, inherentne lastnosti lesa ne vplivajo na gibanje vode v lesu. Pod območjem nasičenja lesnih vlaken (higroskopsko območje) pa začne hitrost sušenja zaradi difuzijskega upora padati. Hitrost sušenja se zmanjšuje po eksponentni krivulji. Prehodna krivulja, ki povezuje ravni del krivulje sušenja z eksponentnim, se pojavi v tistem trenutku, ko procesa kapilarne in difuzne kondenzacije poteka vzporedno. Celoten proces sušenja od vlažnosti  $u = 100\%$  do  $u = 0\%$  se lahko brez večjih napak prikaže z eksponentno krivuljo.

## 2.5 DEJAVNIKI SUŠENJA NA PROSTEM

Na proces sušenja na prostem vplivajo naslednji klimatski dejavniki, na katere lahko le delno vplivamo:

- temperatura,
- relativna zračna vlažnost in
- hitrost gibanja zraka.

Naslednja skupina dejavnikov se navezuje na inherentne lastnosti lesa:

- ✓ lesna vrsta,
- ✓ potek vlaken,
- ✓ beljava in jedrovina,
- ✓ debelina sortimentov.

Poleg klime (tipa podnebja) in letnega časa ter lastnosti lesa na kinetiko sušenja vplivajo še naslednji dejavniki: priprava skladišča in skladovnic, višina skladovnic, urejenost tal ter lokacija in makrolokacija skladišča, ki neposredno vplivata na klimo (Air drying of lumber, 1999).

Dimitrov (2002) navaja, da na hitrost sušenja na prostem vplivajo tudi naslednji dejavniki: vrsta vetra, padavine, trajanje sončnega obsevanja (insolacija), oblačnost in smer neba.

### 2.5.1 Temperatura

Temperatura je pri naravnem sušenju relativno nizka in se giblje v območju od -35 °C do +35 °C. Na temperaturo pri naravnem sušenju praktično ne moremo vplivati (Geršak s sod., 1986).

Temperatura je pri sušenju pomembna, ker je med drugim od nje odvisno izhlapevanje vode s površine. Je pomemben atmosferski dejavnik, ker določa količino topote, ki se bo porabila za izparevanje vode. Višja kot je temperatura, več topote je na razpolago za izparevanje vode in hitrejša je difuzija vode v lesu, zato bo tudi proces sušenja na prostem hitrejši.

Temperatura vpliva na proces sušenja tako, da se z njo povečuje količina vodne pare, ki jo zrak lahko sprejme. Poleg tega se s temperaturo povečuje tudi intenzivnost izparevanja vode. Količina izparjene vode je med drugim odvisna tudi od temperature površine, s katere voda izpareva. Če ima površina lesa višjo temperaturo, je pri konstantnih ostalih pogojih tudi količina izparjene vode večja (Dimitrov, 2002).

Dnevno nihanje temperature zraka je odvisno od istih dejavnikov, ki vplivajo na dnevno nihanje temperature tal. Ti dejavniki so geografska širina, prosojnost atmosfere, letni čas, sestava tal, nadmorska višina, sončna izpostavitev, pokritost zemljišča z vegetacijo ali snegom in oblačnost (Dimitrov, 2002).

Dnevno nihanje temperature zraka, če je dan jasen in vreme nespremenljivo, običajno poteka tako, da od sončnega vzhoda do 12. ure temperatura zraka naglo narašča. Nato temperatura zraka stagnira in doseže maksimum približno 1–3 ure po kulminaciji sonca

opoldne, potem pa zaradi zmanjšanega sončnega sevanja pada. Temperatura zraka najhitreje pada po sončnem zahodu. Ob kateri uri bo temperatura zraka najvišja, je odvisno od intenzivnosti segrevanja in intenzivnosti konvekcije. Če je konvekcija močnejša in s tem prenos segretega zraka v višje sloje večji, potem bo dnevni temperaturni maksimum nastopil kasneje kot bi sicer. Zaradi tega nastopijo poletni dnevni temperaturni maksimumi med 15. in 16. uro, pozimi pa med 13. in 14. uro (Dimitrov, 2002).

### 2.5.2 Vlaga v zraku

Vlažen plin (zrak) je sestavljen iz dveh osnovnih sestavin: iz suhega plina in vodne pare. To velja tudi, če se kot suh plin obravnava plinska zmes (zrak) in vlaga kot parna mešanica topil (vodna para). Vlažnost plina je lahko definirana kot masno razmerje med vlažno paro in suhim plinom. Glede na sestavo zraka je povprečna molska masa zraka 0,028966 kg/mol, molska masa vode pa 0,018016 kg/mol. Razmerje molskih mas med vodo in zrakom potem takem znaša 0,622. (Keey s sod., 2000)

Vlaga v zraku je vodna para, primešana suhemu zraku. Vodna para prehaja v atmosfero kot neviden molekularni tok, do katerega pride zaradi izparevanja s površine vode, snega, ledu, vlažnih tal in rastlin. Voda preide v atmosferski zrak fizično (izparjena voda) in fiziološko (transpirirana voda). Vodna para se prenaša v atmosferski zrak z difuzijo, še pogosteje pa s konvekcijo in turbulenco. Zrak, ki vsebuje več vodne pare, je vlažnejši in lažji. Na vlažnost zraka močno vpliva temperatura zraka. Zrak pri določeni temperaturi ne more vsebovati neomejene količine vodne pare. Vsaki temperaturi odgovarja največja možna količina vodne pare v zraku, ko pa je ta količina presežena, se presežek vodne pare kondenzira. Intenzivnost izparevanja vodne pare se tekom dneva spreminja, vrhunec pa doseže v najtoplejšem delu dneva in sicer med 12. in 16. uro po lokalnem času, od 16. ure dalje pa začne padati. Intenzivnost izparevanja je najnižja ponoči, ko se izparevanje vode lahko tudi ustavi (Dimitrov, 2002).

### 2.5.3 Relativna zračna vlažnost

Relativna zračna vlažnost neposredno vpliva na sušenje in vlaženje lesa. Relativna zračna vlažnost ( $\varphi$ ) nam pove, kakšno je razmerje med delnim tlakom vodne pare ( $p_{vp}$ ) in tlakom nasičenja ( $p_s$ ). Zveza med zgoraj omenjenimi parametri je naslednja:

$$\varphi = \frac{p_{vp}}{p_z} \quad (1)$$

Če je vrednost enačbe enaka 1 (100 %), potem je  $p_{vp} = p_s$ , kar pomeni, da je zrak nasičen z vlagom (temperatura in volumen sta konstantna) in sušenje ni možno.

Relativna zračna vlažnost močno vpliva na naravno sušenje, od nje je odvisna hitrost sušenja. V naših krajih se giblje med 50 in 90 %. Čim nižja je, tem intenzivnejše je izhlapevanje vode s površine lesa (Geršak s sod., 1986).

Dnevno nihanje relativne zračne vlažnosti je praviloma nasprotno dnevнемu nihanju temperature. Relativna zračna vlažnost doseže najvišje vrednosti tik pred sončnim vzhodom, najnižja pa je med 15. in 16. uro po lokalnem času. Dnevno nihanje relativne

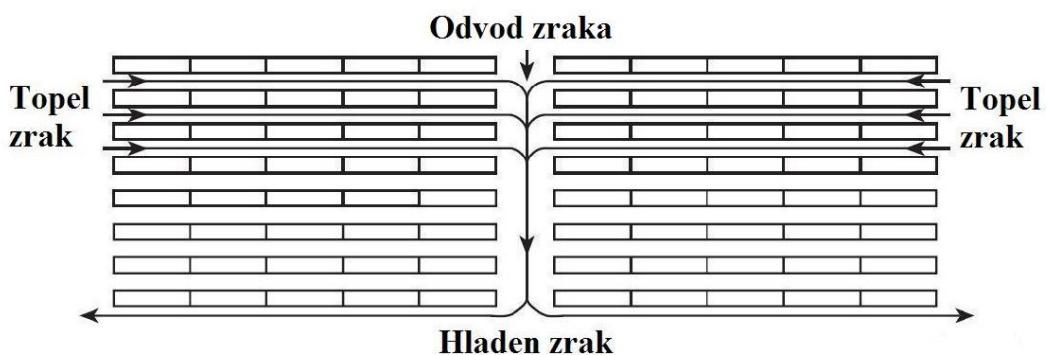
zračne vlažnosti se spreminja tudi z nadmorsko višino. Tako imajo na primer gorski vrhovi ravno nasprotno dnevno nihanje relativne zračne vlažnosti, kjer so zaradi najmočnejše konvekcije najnižje vrednosti dosežene opoldan, najvišje pa zgodaj zjutraj.

Visoka relativna zračna vlažnost, megleno vreme, dež in brezvetrje znatno upočasnujejo proces sušenja (Dimitrov, 2002).

#### 2.5.4 Hitrost zraka

Hitrost zraka je pri naravnem sušenju zelo pomembna, ker zrak prenaša toploto na površino lesa (konvekcija) in odvaja vodno paro s površine lesa. Sušenje je zelo odvisno od jakosti in smeri vetra na skladisču žaganega lesa ter od nemotenega gibanja zraka skozi zložaj. Zrak se skozi zložaj pomika horizontalno (zaradi vetrov) in vertikalno. Ko gre skozi zložaj, odda toploto in prevzame vlago. Ko odda toploto, postane hladnejši, zato je tudi težji, ko pa sprejme vodno paro, postane lažji. Vendar ima večji vpliv prva komponenta, zato zrak skozi zložaj pada. Ravno zaradi tega pojava se žagan les zlaga v zložaj z razmakom (Geršak s sod., 1986).

Ko se zrak spušča skozi zložaj, se ustvarja tlačna razlika, ki za sabo vleče ves ostali zrak in na ta način vzpostavlja vertikalno cirkulacijo zraka (Krpan, 1958).

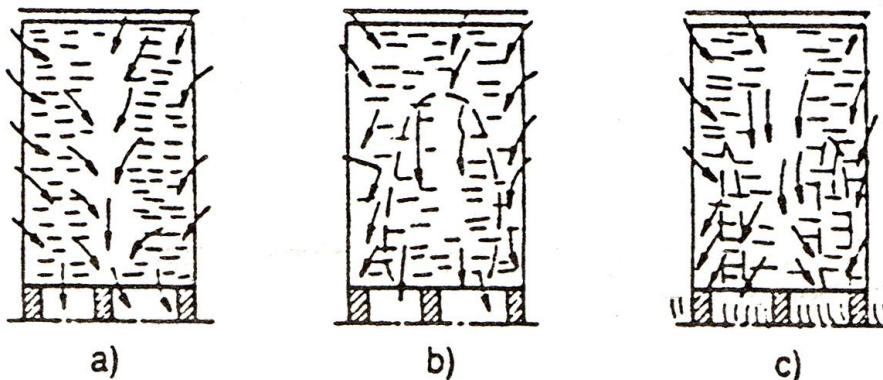


Slika 2.5: Prehajanje zraka skozi zložaj na skladisču (Air drying of lumber, 1999)

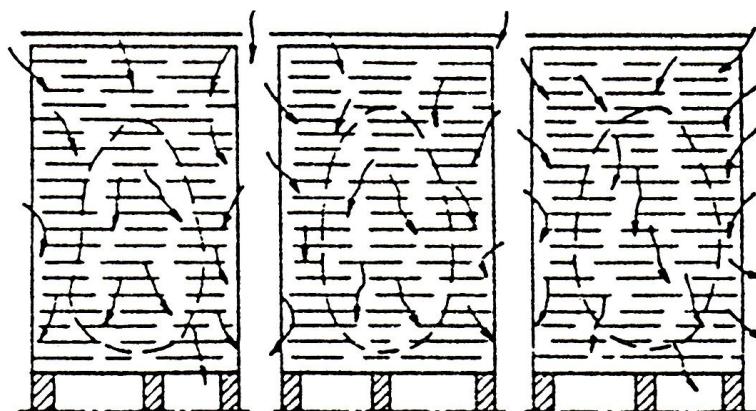
Zložaj lahko oblikujemo tudi tako, da na sredini zložaja pustimo prazen prostor oziroma dimnik, ki omogoča lažji tok zraka skozi zložaj (sl. 2.5).

Če zložaj prepihuje suh veter, je hitrost sušenja bistveno večja, kot če bi se isti zložaj v istem letnem obdobju in na istem mestu sušil v vlažnem in brezvetrnem vremenu (Kollmann in Cote, 1968).

Če je zložaj dovolj dvignjen od tal, horizontalni zračni tok potiska vlažen zrak skozi zložaj navzdol in ven iz zložaja (sl. 2.6 in 2.7). Če pa so pod zložajem plevel, trava, smeti ali kakšna druga ovira, ki zaustavlja zračni tok, ali če zložaj ni dovolj odmaknjen od tal, se vlažen zrak zadržuje v spodnjih delih zložaja.



**Slika 2.6:** Tok zraka v zložaju pri naravnem sušenju lesa; a – normalno zlaganje; b – gosto zlaganje; c – trava pod zložajem ovira tok zraka (Krpan, 1958)



**Slika 2.7:** Skladovnice preblizu skupaj (Krpan, 1958)

Kadar so zložaji (skladovnice) preblizu skupaj, je proces sušenja na prostem zaradi oslabljenega zračnega toka skozi zložaje močno otežen.

#### 2.5.4.1 Vpliv vetra na sušenje na prostem

Veter je pomemben meteorološki element pri sušenju lesa na prostem. Suh veter namreč močno pospeši proces sušenja. Hitrost sušenja in postavitev skladišča za sušenje lesa na prostem pa sta odvisni od lokalnih vetrov.

Relief in geografske prepreke močno vplivajo na smer pihanja in fizične lastnosti vetra, to pa močno vpliva na sam proces sušenja na prostem (Dimitrov, 2002).

Učinek vetra na sušenje lesa na prostem je zelo pomemben. Veter mora namreč prinašati suh zrak, takemu vetrju pravimo fenski veter. Ni pa zaželen veter, ki prinaša vlažen zrak.

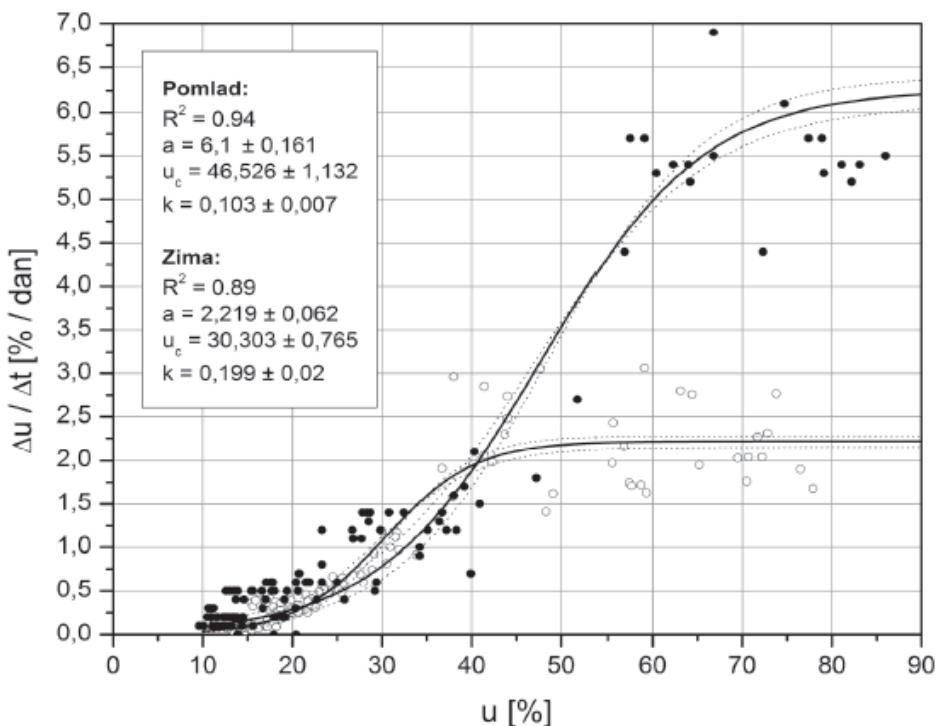
Če se les suši v suhem in vetrovnem vremenu, je hitrost sušenja 4- do 5-krat večja kot če bi se sušil v vlažnem in brezveternem vremenu. Kakšen veter bo pihal skozi zložaje, je odvisno tudi od regije.

Velikokrat se tudi zgodi, da je fenski veter močan in relativna zračna vlažnost nizka (zlasti v krajih blizu morja, kot so na primer slovenski kras, Istra z okolico, Dalmacija ...), zato je sušenje lesa v takih okoliščinah prehitro in kaj hitro pride do zaskorjenja ter čelnih in površinskih razpok, kar močno zniža kvaliteto sušenja na prostem.

### 2.5.5 Vpliv letnega časa na potek sušenja na prostem

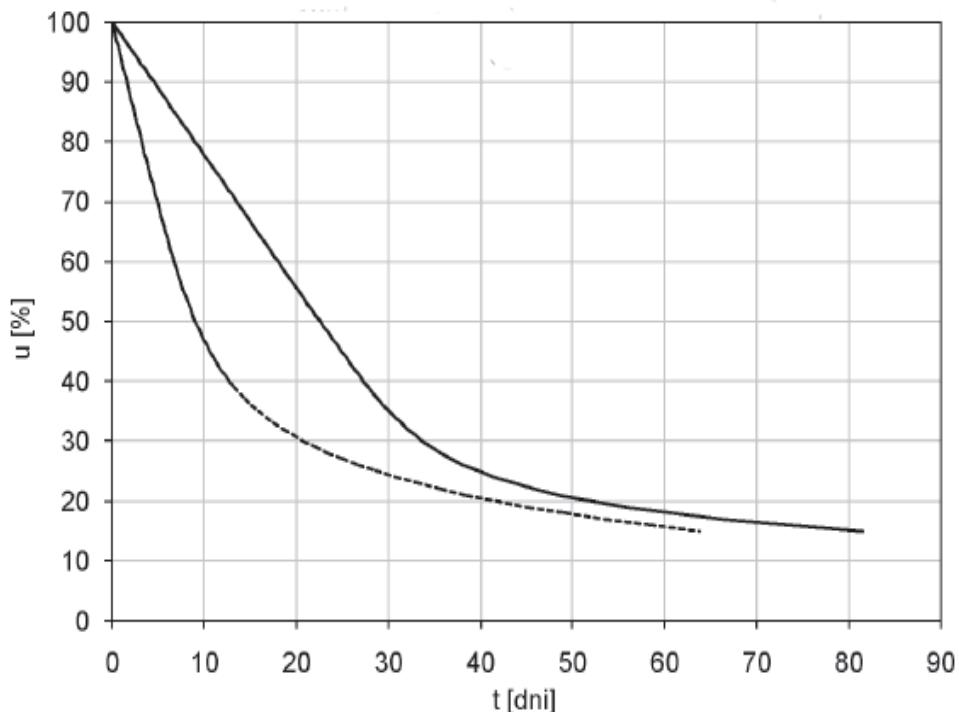
Straže in Gorišek (Les, 2007) sta s pomočjo CAE analize spremljala sušenje na prostem 25 mm debelih bukovih elementov. Sušenje na prostem se je izvajalo v zimskem in spomladanskem času. Prišla sta do naslednjih ugotovitev.

1. Sušenje bukovine na prostem je potekalo zadovoljivo hitro ob značilnem vplivu letnega časa in lesne vlažnosti.
2. Pri izločjanju proste vode pri sušenju svežih bukovih elementov je sušilna hitrost v pomladanskem obdobju znašala 6,2 %/dan, v zimskem obdobju pa se je zmanjšala na 2,2 %/dan (sl. 2.8).



**Slika 2.8:** Zveza med hitrostjo sušenja in lesno vlažnostjo pri zimskem (○) in spomladanskem (●) sušenju na prostem in izračunan matematični model (Straže in Gorišek, 2007)

3. Upočasnitev sušenja se je pojavila v območju nasičenja lesnih vlaken, v higroskopnem območju pa je sledilo eksponentno padanje sušilne hitrosti ne glede na letno obdobje in se je pri doseženi ravnovesni vlažnosti okolice ustavilo.
4. Skladno s pričakovano konstantno hitrostjo sušenja svežega lesa krivulji sušenja nakazujeta linearno zmanjševanje lesne vlažnosti na začetku postopka. V zimskem času se odmik od linearnosti pojavi po 3 tednih, v spomladanskem pa po 1 tednu.
5. V tem času v obeh primerih pri sušenju svežega lesa v začetnem, linearjem poteku sušenja izločimo kar polovico vsebovane vode (sl. 2.9).



**Slika 2.9:** Simulacija sušenja 25 mm bukovine na prostem spomladi (črtkana črta) in pozimi (Straže in Gorišek, 2007)

Eksperimentalno določeno hitrost sušenja sta avtorja korelirala ( $R^2 \geq 0,8$ ) z računalniškim algoritem z modelom naravne rasti,

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{a}{1 - e^{(-k(u-u_c))}}, \quad (2)$$

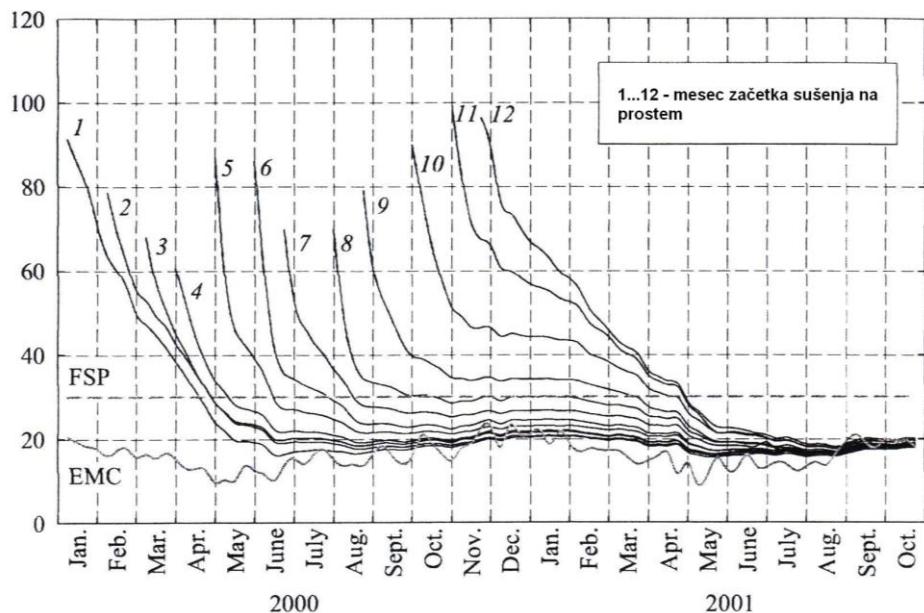
kjer  $a$  predstavlja maksimalno sušilno hitrost, doseženo pri izločanju proste vode,  $u_c$  je vlažnost eksponentnega pojemanja sušilne hitrosti z nižanjem lesne vlažnosti,  $k$  pa določa pojemanje sušilne hitrosti pod vrednostjo  $u_c$ .

Guzenda je s sodelavci (2004) preučil vpliv letnih klimatskih nihanj na sušenje lesa na prostem na Poljskem in ugotovili, da je proces sušenja lesa pri krajsih časovnih intervalih odvisen od naključnih sprememb klimatskih pogojev. Pri daljših časovnih intervalih pa se naključni vpliv klimatskih pogojev močno zmanjša in klimatski pogoji so funkcija geografske lege in letnega časa.

Eksperiment sušenja na prostem so avtorji izvajali z dvema lesnima vrstama: rdeči bor (*Pinus sylvestris*) in bukev (*Fagus sylvatica*). Vzorci debelin 25 mm in 50 mm so bili izžagani iz svežih borovih in bukovih desk. Čela vzorcev so bila zaščitena, da bi preprečili predčasno izgubo vlažnosti. Sušenje na prostem so spremljali na Poljskem, v kraju Poznan.

Avtorji so po končanem eksperimentu prišli do naslednjih ugotovitev:

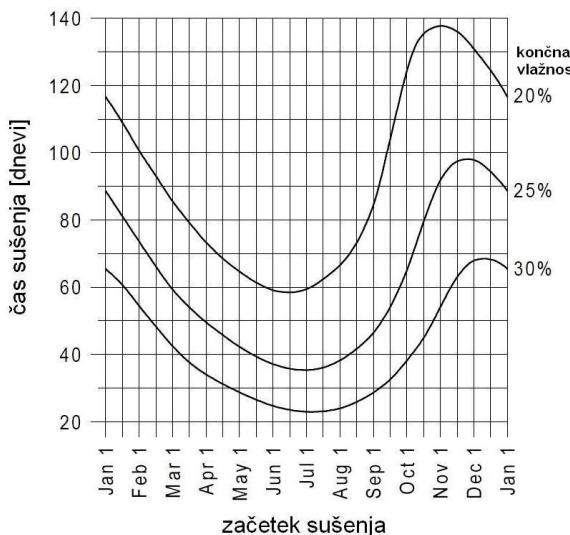
- Izguba lesne vlažnosti pri obeh vrstah ni bila enaka.
- Do upočasnitve sušenja je pri rdečem boru prišlo v območju sušenja pod 25 %, pri bukvi pa, ko je bila vlažnost vzorcev pod 40 % (sl. 2.10).
- Vzorci obeh lesnih vrst so na koncu eksperimenta dosegli vlažnosti, ki so bile blizu ravnovesnim vlažnostim, ki so jih narekovali klimatski pogoji.



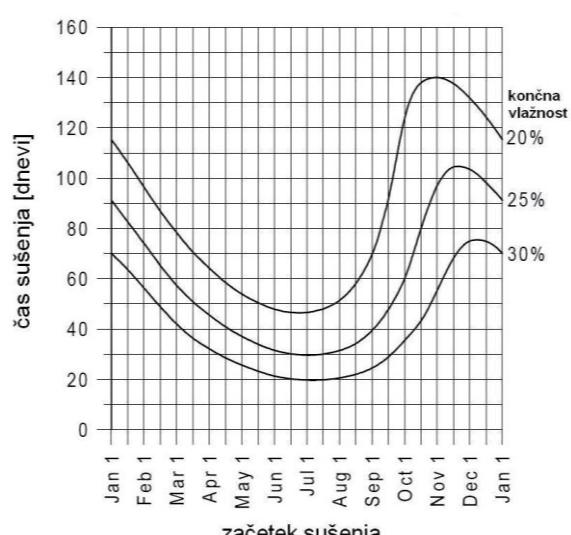
**Slika 2.10:** Sušilne krivulje bukve pri sušenju na prostem v Poznanu (FSC – točka nasičenja celičnih sten, EMC – ravnovesna vlažnost) (Guzenda s sod., 2004)

Simpson in Hart (2000) sta naredila simulacijo sušenja na prostem za različne kraje v vzhodnem delu ZDA, pri čemer sta se oprla na Hartove metode iz leta 1982. Simulacijo sta izvedla za 6 ameriških lesnih vrst 4 različnih debelin v različnih krajih ZDA.

Omenili pa bomo le tisto ameriško lesno vrsto, ki je najbolj podobna naši bukvi (*Fagus sylvatica*), in samo tista dva kraja, katerih podnebje je najbolj podobno podnebju v Ljubljani. Ta lesna vrsta je ameriška bukev (*Fagus grandifolia*). Kot rezultat simulacije sta avtorja izdelala sušilne diagrame, ki nam povedo, koliko časa se žagan les določene lesne vrste in določene debeline suši do različnih končnih vlažnosti. Na diagramu (sl. 2.11 in 2.12) so na abscisni osi predstavljeni dnevi začetka sušenja od 1. januarja tekočega leta do 1. januarja naslednjega leta, na ordinatni osi pa je čas sušenja. Na vsakem takem diagramu so tri krivulje, ki predstavljajo 3 različne končne vlažnosti: 20 %, 25 % in 30 % končno vlažnost.



**Slika 2.11:** Diagram sušenja na prostem ameriške bukve v kraju Asheville (Simpson in Hart, 2000)



**Slika 2.12:** Diagram sušenja na prostem ameriške bukve v kraju Charlestone (Simpson in Hart, 2000)

Iz obeh zgornjih slik lahko opazimo, da je sušenje na prostem v zimskih mesecih precej daljše kot v poletnih. Proses sušenja na prostem je najhitrejši v juniju in juliju, najpočasnejši pa v decembru in januarju. Iz obeh slik lahko razberemo, da se ameriška bukev v juniju in juliju suši dvakrat do trikrat hitreje kot v decembru in januarju. Koliko časa se bo ameriška bukev sušila na prostem in kolikšna bo razlika v časih sušenja med zimskim in poletnim obdobjem, je odvisno od želene končne vlažnosti. Pri sušenju do višjih končnih vlažnosti (30 %) je razlika med zimskimi in poletnimi časi sušenja večja kot pri sušenju do nižjih končnih vlažnosti. Časi sušenja na prostem so pri sušenju na nižje končne vlažnosti daljši.

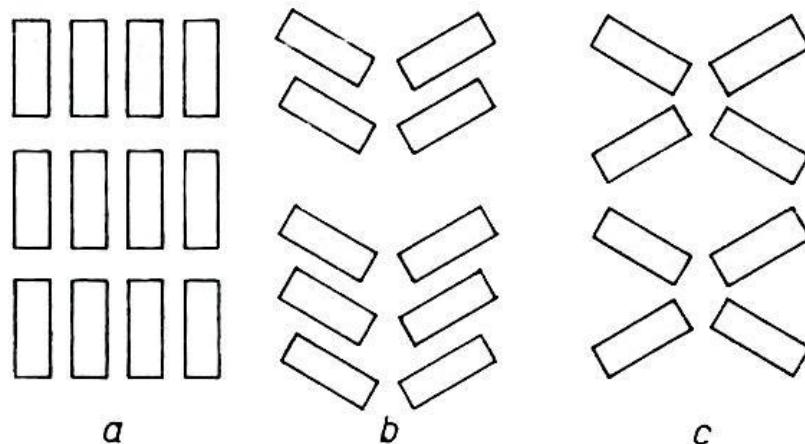
Avtorja sta zaključila, da se žagan les na prostem najhitreje suši junija, najpočasneje pa decembra. To ugotovitev sta podkrepila z dejstvom, da ima december samo 5 efektivnih dni za sušenje lesa, junij pa kar 30.

### 2.5.6 Priprava skladišča

Skladišče za sušenja lesa na prostem mora biti postavljeno tako, da ustreza zahtevam sušenja. Urejeno mora biti tako, da omogoča nemoteno in ekonomično manipulacijo. Pogosto se skladišče za sušenje na prostem postavi blizu žagalnic ali zraven tovarne, ki žagan les potrebuje. Skladišče mora biti na odprttem, da je omogočeno stalno gibanje zraka. Zato imajo prednost ozka in dolga skladišča, ker je gibanje zraka boljše. Os skladišča naj leži v smeri stalnega vetra.

Skladovnice so glede na smer vetra lahko postavljene na tri načine (sl. 2.13):

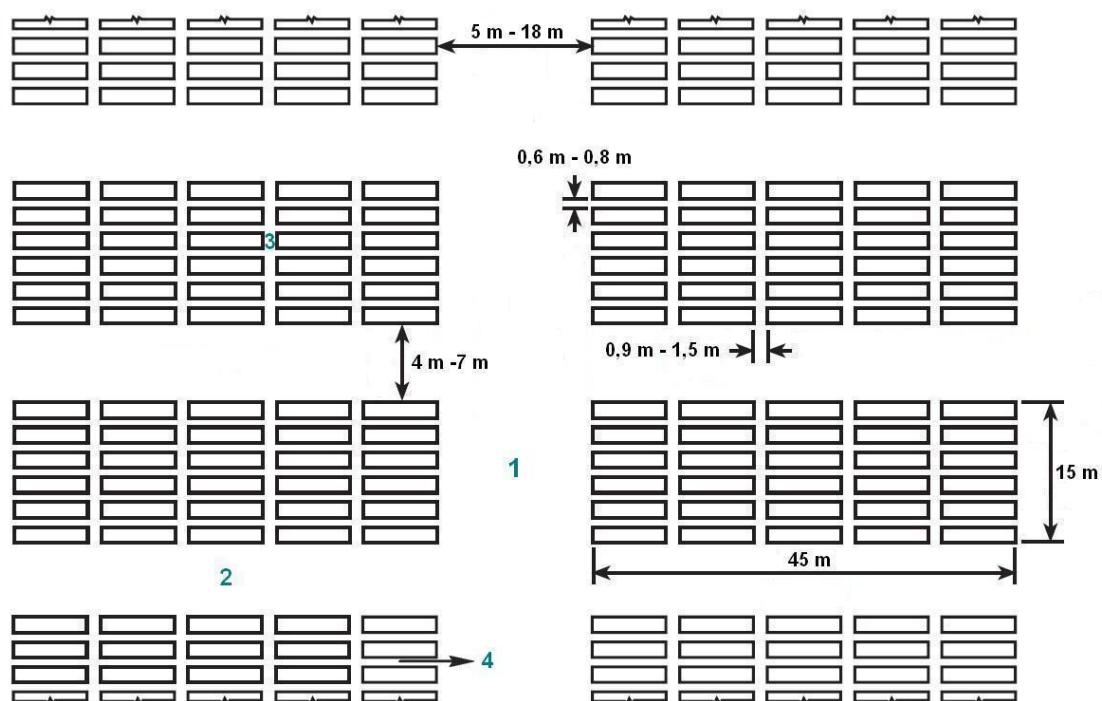
- a) Pravokotno postavljene skladovnice: Če so skladovnice postavljene pravokotno glede na glavno smer vetra, imamo učinek "spojlerja". Zrak dobro prepiha samo prve skladovnice, nato se hitrost vetra, ko gre preko ostalih skladovnic, vedno bolj zmanjšuje. Zato so skladovnice, ki so bolj v ozadju, slabše prepihanе. Tak način je priporočljiv za tiste vrste lesa, ki so nagnjene k pokanju.
- b) Skladovnice, postavljene v obliki črke V: Skladovnice so glede na smer glavnega vetra postavljene pod kotom  $60^\circ$ . Tako dosežemo maksimalno prezračevanje in zato je ta način najboljši.
- c) Skladovnice v obliki črke X: Ugotovljeno je, da je pri tej postavitvi odstotek vlage v lesu manjši in da zunanje skladovnice nimajo več dominantnega položaja, kot jih imajo skladovnice pri linijskem razporedu z enakimi medsebojnimi razdaljami.



**Slika 2.13:** Postavitev skladišča glede na smer stalnega vetra (Gorišek s sod., 1994)

Med posameznimi zložaji morajo biti vzpostavljenе poti oziroma prehodi, ki imajo različne funkcije:

1. Glavni prehodi ali aleje – služijo za transport in pripravo skladovnic, zračno cirkulacijo, dostop za redno kontrolo in nudijo dostop za protipožarno zaščito.
2. Prečni prehodi – transport, dostop za redno kontrolo in zračna cirkulacija.
3. Pomožni prehodi – dostop za redno kontrolo in cirkulacija.
4. Stranski prehodi – dostop za redno kontrolo in cirkulacija.



Slika 2.14: Poti med zložaji v skladišču (Gorišek, 2006)

Pri postavljanju skladišča so aleje lahko obrnjene v smeri sever–jug, da se tla po dežju hitreje sušijo in da se sneg hitreje stopi, saj so tako orientirane aleje bolj izpostavljene sončnemu obsevanju, kot če bi bile obrnjene v smeri vzhod–zahod, kjer bi jih skladovnice zasenčile. Taka orientacija alej je najboljša za tiste predele, kjer je veliko padavin in snega. Zaželeno je tudi, da so aleje postavljene čim bolj vzporedno s prevladujočo smerjo vetra, da lahko veter po alejah piha neovirano. Hitrost vetra ni v vseh alejah enaka, zato pride do razlike tlakov, ki povzroči tok zraka skozi zložaje med posameznimi alejami (Air drying of lumber, 1999).

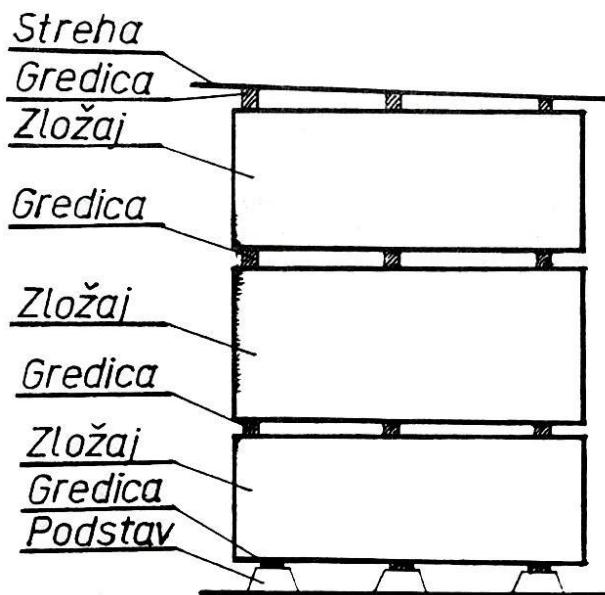
Dejanska velikost skladišča in poti med skladovnicami je odvisna od tega, koliko prostora in kakšen viličar imamo na razpolago.

### 2.5.7 Urejenost tal

Za optimalen postopek sušenja na prostem moramo poskrbeti, da so tla urejena. Skladišče naj bo postavljeno na suhih tleh, če pa niso dovolj suha, morajo biti drenažirana. Na urejenih, drenažiranih in asfaltiranih tleh bo sušenje na prostem zaradi odtekanja vode bolj efektivno. Zemljišče naj bo čim bolj ravno, nagnjeno le toliko, da voda odteka. Tla morajo biti utrjena in čista, brez plevela in lubja. Navadno so posuta z ugaski ali gramozom, še bolje pa je, če so asfaltirana ali betonirana.

### 2.5.8 Oblikovanje zložajev in skladovnic

Žaganice iste drevesne vrste in enakih debelin za sušenje na prostem zlagamo v skladovnice (kope). Zlagamo jih ročno ali strojno (za večje količine lesa), pri obeh načinih pa je princip zlaganja enak. Oblika in dimenzijske skladovnice so odvisne od oblik in dimenzijskih žaganega lesa. Tako je dolžina skladovnice (in tudi zložaja) odvisna od dolžine žaganega lesa, širina skladovnice pa od dolžine vilic viličarja. Višina skladovnice je odvisna od višine zložaja in ne sme biti previsoka. Dimitrov (2002) namreč navaja, da pride do razlik v vlažnosti tudi znotraj iste skladovnice. Ko je bila v zgornjem delu skladovnice izmerjena temperatura 10 °C in relativna zračna vlažnost 65 % (pri takih pogojih znaša ravnovesna vlažnost lesa 12,5 %), je bila v spodnjem delu skladovnice temperatura 6 °C, relativna zračna vlažnost pa 85 % (ravnovesna vlažnost lesa v takih pogojih znaša 18,6 %). Razlika v vlažnosti lesa znotraj iste skladovnice lahko potem takem znaša tudi do 6 %, zato skladovnice ne smejo biti previsoke. Oblika zložajev je najpogosteje prizmatična, zato imajo tudi skladovnice prizmatične oblike.



Slika 2.15: Skladovnica: podstavki, gredice, zložaji in streha (Gorišek s sod., 1994)

Skladovnica oziroma zložaj je lahko širok od 1 m (za nadaljnje sušenje v manjših komorah) do 2,4 m, najpogosteje pa od 1,4 m do 1,6 m. Višina zložaja je ponavadi od 1,2 m do 1,5 m in skladovnica najpogosteje sestoji iz treh, včasih tudi iz štirih zložajev. Skladovnice iglavcev so običajno visoke od 4 do 5 m, skladovnice listavcev pa so zaradi

večje teže nekoliko nižje. Dolžina skladovnice znaša od 3 m do 6 m. Pri oblikovanju skladovnice je pomembno, da je omogočen padec zraka skozi posamezne zložaje. Zato moramo žaganice horizontalno razmakniti in skladovnico dvigniti od tal za 41 do 61 cm, da se pri tleh deske ne vlažijo in da lahko horizontalni zračni tok odnese nasičen zrak, ki je prišel skozi zložaj. Da skladovnico dvignemo od tal, uporabimo podstavke (kamnit, betonski), na podstavke položimo morale in na morale naložimo skladovnico.

Ko je skladovnica sestavljena, jo moramo čim bolje zaščititi pred atmosferilijami, zato jo pokrijemo s streho (sl. 2.15), ki je najpogosteje iz pocinkane pločevine. Ta mora biti zaradi prostega dostopa zraka vsaj 10 cm oddaljena od površine žaganega lesa. Streho učvrstimo z moralom ali dvema letvicama, ki imata na vsakem koncu pritrjeno vzmet s kavljem, ali pa kar z gumenim trakom. Streha je lahko zaradi lažjega odtekanja vode tudi nagnjena.

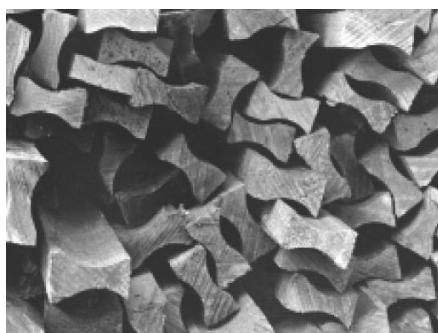
Pri lesnih vrstah, ki so nagnjene k pokanju (hrast, bukev), se pri sušenju na prostem v krajih, kjer prevladuje suha klima in močni vetrovi, kmalu pojavijo površinske razpoke, zato je za take lesne vrste priporočljivo sušenje v senci. Skladovnice zaščitimo z mrežami ali pa s sitastim blagom (najpogosteje iz umetnih mas), ki les zaščitijo pred soncem in padavinami, upočasnijo veter in s tem tudi zračni tok skozi zložaje (sl. 2.16). Tako se prepreči nastanek površinskih razpok, površina zaradi zaščite pred soncem ne potemni in kljub padavinam ne prihaja do zamakanja.



**Slika 2.16:** Primer zasenčenega sušenja v ZDA (Air drying of lumber, 1999)

Pri zlaganju žaganega lesa v zložaj moramo les naletvičiti, saj na ta način omogočimo dostop zraka do površine žaganega lesa (sl. 2.17 in sl. 2.18). Distančne letve (letvice) morajo biti:

- enakih dimenzij in prizmatične oblike (da se ne kotrljajo),
- 0,5–0,75 debeline sortimentov (za počasi in hitro sušeče se lesne vrste),
- v zložaju vertikalno poravnane,
- predhodno osušene,
- biološko neokužene in
- izdelane iz lesnih vrst, ki se ne zvijajo in ne puščajo madežev.



**Slika 2.17:** Žlebate letvice, ki jih uporabljajo v ZDA  
 (Air drying of lumber, 1999)

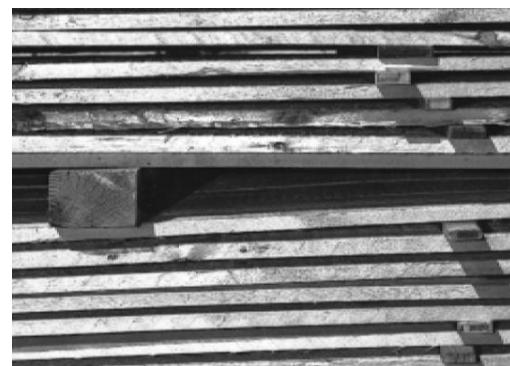


**Slika 2.18:** Perforirane letvice, ki jih uporabljajo na Nizozemskem (Foto A. Straže)

Pri letvičenju žaganega lesa moramo paziti še na dve pravili: letvice morajo biti zložene natančno druga nad drugo, če niso, se žaganice zaradi teže zvijejo (sl. 2.19 in 2.20). Čela žaganic morajo biti (vsaj na eni strani) poravnana in vertikalna.



**Slika 2.19:** Pravilno letvičen zložaj (Foto A. Straže)



**Slika 2.20:** Nepravilno letvičen in nepravilno podložen zložaj (Air drying of lumber, 1999)

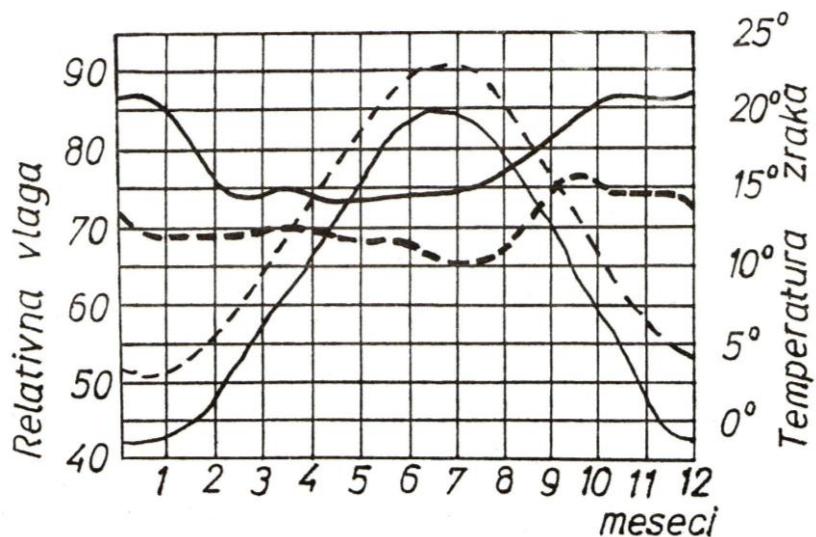
V slovenski lesni industriji se najpogosteje uporabljam jelove letvice, ker še najbolje ustrezajo zgoraj omenjenim zahtevam. Letvice so postavljene prečno na žaganice in ko se na površini žaganic nabira voda, jo letvice zadržujejo in preprečujejo njeno odtekanje. Zato ponekod (zlasti v Skandinaviji) uporabljam perforirane letvice. Nekateri pa namesto letvic uporabljam aluminijaste cik-cak distančnike, katerih naležna površina je nekajkrat manjša kot naležna površina letvic.

### 2.5.9 Lokacija

Poleg klimatskih pogojev v določeni regiji vplivajo na proces sušenja na prostem tudi pogoji, ki so značilni za posamezne lokacije v tej regiji. Za lokacije z nizko nadmorsko višino, zlasti za zamočvirjena območja, območja blizu stoečih voda in območja obdana hribi, gozdovi ali zgradbami, je značilno počasnejše sušenje na prostem. Les je v takih območjih bolj podvržen glivnim okužbam in raznim diskoloracijam. Za območja, ki se nahajajo na višjih nadmorskih višinah, in bolj odprta območja pa velja, da je sušenje na prostem hitro zaradi hitrejšega pretoka zraka, ki pa lahko predstavlja tudi veliko nevarnost nastanka raznih površinskih in čelnih razpok (Air drying of lumber, 1999).

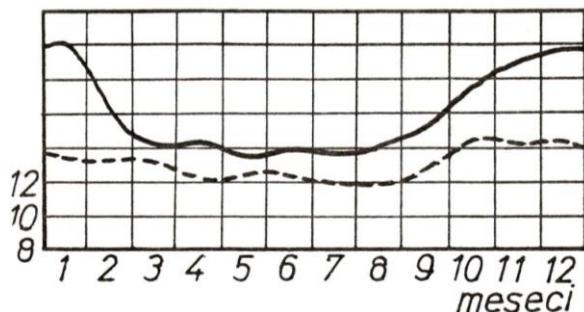
Pri izbiranju mesta sušenja moramo paziti tudi na pot gibanja sonca. Severna območja prejemajo manj topote kot južna območja. Vendar les ne bo dosegel minimalnih vlažnosti niti na južnih niti na severnih območjih. Najvišje temperature zraka in najnižje vlažnosti lesa bomo dosegli, če bomo les sušili na jugozahodnih območjih (Dimitrov, 2002).

Kako hitro se bo les sušil na prostem in do kakšne vlažnosti se bo posušil, je odvisno od klimatskih pogojev določenega kraja, kar je lepo razvidno iz spodnjega diagrama (Gorišek s sod., 1994) (sl. 2.21).



**Slika 2.21:** Letno gibanje relativne zračne vlažnosti in temperature zraka za področje Bleda in Nove Gorice (črtkana črta) (Higrometeorološki zavod Slovenije, 1994)

Na sliki 2.22 je z diagramom prikazano, do katerega odstotka vlažnosti lahko posušimo les na prostem v posameznih mesecih na področju Nove Gorice in Bleda.



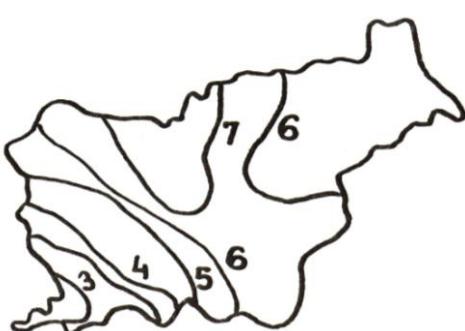
Slika 2.22: Odstotek vlage v lesu po sušenju na prostem, črtkana črta predstavlja ravnovesne vlažnosti za Novo Gorico (Gorišek s sod., 1994)

Razvidno je, da je aktivno sušenje mogoče od marca do oktobra. Najnižji odstotek vlage v lesu je mogoče doseči julija. Iz diagrama je tudi razvidno, kakšno veliko prednost (čas, energija) imajo tisti lesarski obrati, ki so locirani na območju Nove Gorice v primerjavi z lokacijo na Bledu. Posebno očitna je razlika v manj aktivnih mesecih sušenja. Kako bo potekalo sušenje lesa in koliko časa bo trajalo, je torej odvisno tudi od meseca, v katerem smo začeli s sušenjem lesa na prostem.

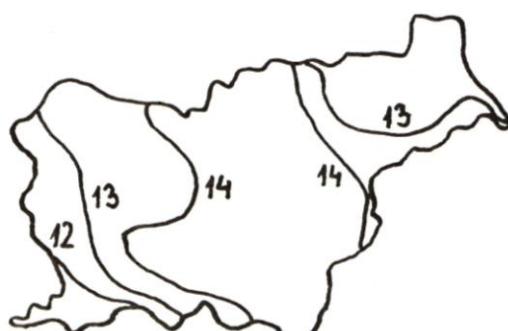
Iz diagrama lahko odčitamo, da lahko les na področju Bleda v juniju posušimo na 14 %, v januarju pa bo imel vlažnost 20 %. Zato tudi pojma "zračno suh les" ne navajamo z enim številom npr. 18 %, ampak v mejah od 14–20 %, kar velja za področje Bleda, oziroma 12–15 %, kar velja za področje Nove Gorice.

#### 2.5.9.1 Lignoizohigre

Pri sušenju na prostem so lignoizohigre zelo pomembne, saj z njimi lahko hitro odčitamo vlažnosti, do katerih lahko les posušimo na prostem, pri tem pa so odločilni naslednji dejavniki: vrsta lesa, debelina lesa in letni čas. Lignoizohigre so izdelane za vsak mesec posebej, in sicer na podlagi statističnih podatkov, zbranih v daljšem časovnem obdobju, na primer za 20 ali 25 let. Z njimi hitro dobimo vrednosti, do katerih se les posuši na prostem (Dimitrov, 2002) (sl. 2.23 in 2.24).



Slika 2.23: Povprečne ravnovesne vlažnosti lesa v Sloveniji za julij (Gorišek s sod., 1994)



Slika 2.24: Povprečne ravnovesne vlažnosti lesa v Sloveniji za januar (Gorišek s sod., 1994)

### 2.5.10 Vrsta lesa

Sušilne značilnosti lesa se od vrste do vrste razlikujejo. Lastnost, ki najbolj vpliva na sušenje, je gostota. Praviloma se redkejše lesne vrste sušijo hitreje od gostejših.

Običajno se les posuši na prostem le do točke nasičenosti celičnih sten, potem pa ga v sušilnici posušimo na želeni odstotek vlažnosti. Sušenje na prostem je kot dokončno sušenje primerno le za iglavce, ki se uporabljam kot gradbeni les.

### 2.5.11 Debelina

Obstaja več metod, ki obravnavajo zvezo med časom sušenja in debelino sušečih se sortimentov, vendar so vse nenatančne. Najbolj znana med njimi je Kessnerjeva formula:

$$t = K \cdot d$$

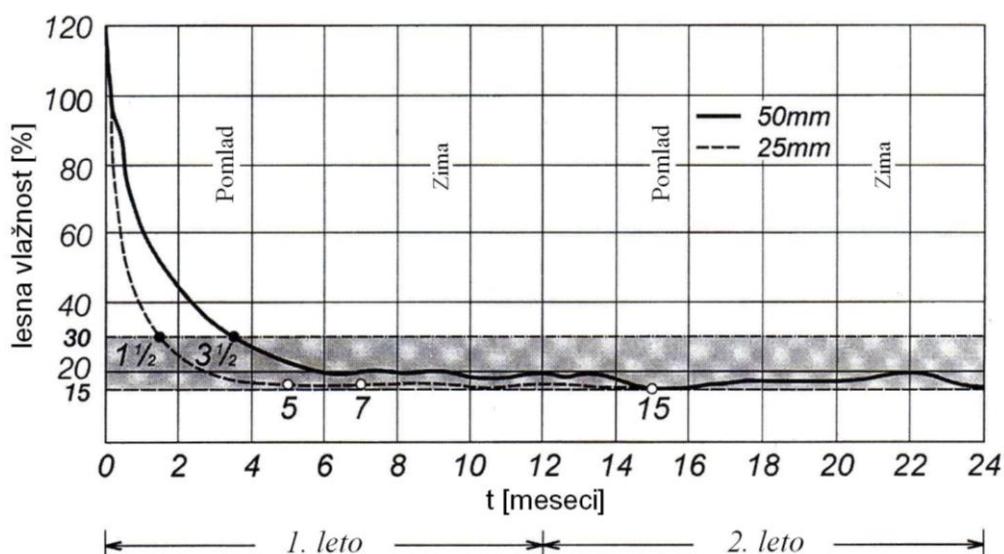
$t$  = čas v mesecih  
 $K$  = Kessnerjev koeficient  
 $d$  = debelina v centimetrih

Kessnerjevi koeficienti za nekatere evropske lesne vrste:

<i>smreka</i>	3,2	<i>hrast</i>	5,3
<i>macesen</i>	3,8	<i>javor</i>	5,0
<i>bukev</i>	5,3	<i>topol</i>	3,5

Poenostavljeni pravilo pravi, da se čas sušenja na prostem s povečanjem debeline poveča za toliko, kolikor se poveča debelina na 1,5 potenco. To v praksi pomeni, da se bodo 50 mm debeli plohi na prostem sušili približno trikrat dlje kot 25 mm deske (Air drying of lumber, 1999).

Na sliki 2.25 vidimo potek sušenja različno debelih sortimentov. Iz grafa opazimo, da se tanjši sortimenti sušijo nekajkrat hitreje od debelejših sortimentov.



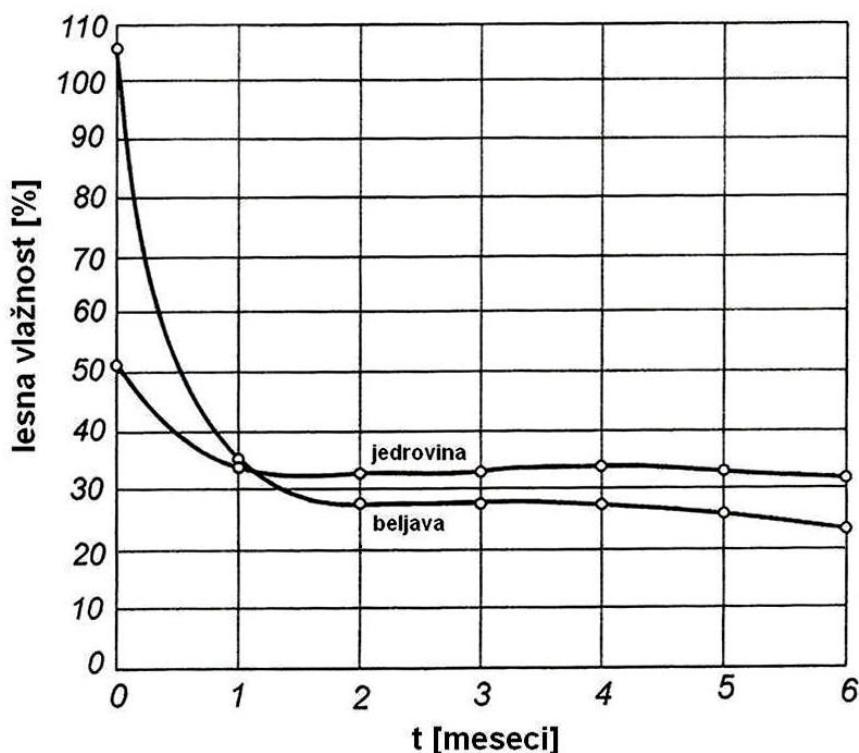
Slika 2.25: Sušenje borovega lesa debeline 25 mm in 50 mm (Kollmann in Cote, 1968)

### 2.5.12 Potek vlaken

Pri sušenju listavcev velja, da se radialne deske sušijo počasneje od tangencialnih. Trakovno tkivo pospešuje izhajanje vode iz lesa, vendar je na hrbtni površini radialnih desk manj trakov kot pri tangencialnih deskah. Pri sušenju iglavcev pa v hitrosti sušenja med radialnimi in tangencialnimi deskami ni razlik.

### 2.5.13 Jedrovina in beljava

Pri iglavcih ima beljava običajno veliko več vode kot jedrovina, vendar pa se beljava suši hitreje kot jedrovina. Na koncu sušenja ima beljava običajno enako vlažnost kot jedrovina, lahko pa tudi nižjo. Pri listavcih vlažnost beljave pogosto ni veliko višja od vlažnosti jedrovine, po koncu sušenja pa je vlažnost beljave nižja od vlažnosti jedrovine (Air drying of lumber, 1999).



Slika 2.26: Krivulji sušenja na prostem za bor (*Pinus tadea L.*) preseka 90 mm × 115 mm in dolžine 3 m v ZDA (Krpan, 1958)

Na sliki vidimo, da je sušenje jedrovine na vlažnosti pod higroskopnim področjem veliko bolj dolgotrajno kot sušenje beljave.

## 2.6 PREDNOSTI IN SLABOSTI SUŠENJA NA PROSTEM

Največja pomanjkljivost sušenja na prostem je ta, da je čas sušenja zaradi dolgotrajnega uravnovešanja lesa z zunanjim klimo zelo dolg. Sušenje na prostem je razen od relativne zračne vlažnosti in hitrosti zraka oziroma vetra odvisno tudi od temperature, ki pa je pri naravnih pogojih z izjemo poletja nizka. To je največja pomanjkljivost sušenja lesa na prostem, daljši čas sušenja pa povzroči še ostale težave:

- Čas skladiščenja se podaljša in s tem tudi čas vezave sredstev v les.
- Kvaliteta lesa se slabša, saj lahko pride do napak zaradi delovanja gliv, insektov, atmosferilij in sončnega sevanja; na lesu se pojavijo razpoke.
- Les izgubi na vrednosti.

Z vidika komorskega sušenja pa sta glavni slabosti naravnega sušenja nezmožnost vplivanja na postopek sušenja (ne moremo spremenjati sušilnih parametrov) in nezmožnost doseganja nizkih vlažnosti. Če ne zagotovimo ustreznih pogojev za sušenje na prostem, lahko pride do bioloških okužb. Pri komorskem sušenju, zlasti pri normalnotemperaturnem in visokotemperaturnem konvekcijskem postopku, so ličinke lesnih insektov, če so zarejene v lesnem tkivu, uničene.

Sušenje na prostem pa ima tudi svoje prednosti pred komorskim sušenjem. Ni porabe električne in topotne energije, ne potrebujemo dragih naprav in instrumentov, ki so pri komorskem sušenju del osnovne opreme, in ne potrebujemo sušilničarjev. Pri naravnem sušenju lahko na hitrost prepihovanja delno vplivamo z različnimi sistemi aksialnih ventilatorjev. Poleg tega je pri sušenju na prostem (ob zagotovljenih ustreznih pogojih za sušenje) manjša možnost za nastanek napak.

## 2.7 NAPAKE PRI SUŠENJU LESA NA PROSTEM

Pri sušenju na prostem lahko pride do napak, ki zmanjšajo kakovost posušenega lesa in s tem povečajo skupne stroške sušenja:

**Delovanje lesa – krčenje in nabrekanje.** Prične se takoj, ko svež žagan les naletvičimo in ga začnemo sušiti. Če sušilne napetosti prekoračijo trdnost lesnega tkiva, pride do raznih razpok. Delovanje lesa povzroči tudi razna veženja.

**Glivne okužbe.** Nastanejo v topli in vlažni klimi ob nezadostnem prepohovanju zložaja. Glivna okužba se lahko pojavi kot modrenje, pri čemer se lesobarva modro, sivo ali črno (biotsko obarvanje), vendar ne izgubi mehanske trdnosti, plesnenje, pri čemer pride do različnih površinskih obarvanj, ali pa kot trohnoba, ki poleg barvnih sprememb postopoma povzroči tudi izgubo mehanskih trdnosti lesa.

**Kemična reakcija – abiotika obarvanja.** Pri sušenju na prostem pride včasih do raznih diskoloracij, vzrok za katere so lahko poleg gliv tudi kemične reakcije znotraj samega lesa ali pa stik lesa s kakšno drugo snovjo (železo). Les se pri tem obarva sivo, sivo-rjav ali črno. Obarvanje kot rezultat kemične reakcije znotraj lesa so tudi sledi letvic.

**Napad insektov.** Insekti lahko načnejo tako svež kot tudi suh les. Legla insektov so najpogosteje kupi sveže žagovine, lubja in odpadnega lesa, od kjer se insekti lahko hitro naselijo na sušeči se les. Posledice napada insektov so črvje luknje, madeži in rovi v notranjosti lesa.

**Insolacija.** Zaradi izpostavitve UV svetlobi se površina lesa obarva sivo, vendar je taka diskoloracija samo površinska in jo lahko odstranimo s skobljanjem.

Če les sušimo na prostem dlje časa, se na površini nabirajo prašni delci in žagovina, kar dodatno poslabša kvaliteto lesa in poveča stroške, saj se rezila na obdelovalnih orodjih zaradi praha bolj krhajo.

### 3 MATERIAL IN METODE DELA

#### 3.1 MATERIAL

Pri eksperimentalnem delu smo uporabljali les bukve (*Fagus sylvatica L.*), ki izhaja iz mešanih jelovo-bukovih gozdov Notranjske. Material smo dobili v obliki žaganic dolžine 1 m. Žaganice so bile izžagane iz svežih, tangencialno orientiranih desk.

#### 3.2 METODE

##### 3.2.1 Vzorčenje

Iz svežih žaganic smo izžagali vzorce širine 10–16 cm in dolžine 80–90 cm. Iz žaganic smo vzorce izdelali tako, da smo jih najprej širinsko skrojili, nato smo jih, če je bila debelina žaganic večja od 38 mm, poskobljali in nazadnje še očelili na primerno dolžino. Tako smo iz žaganic dobili velike vzorce. Na očelenem delu sledilnega vzorca smo odžagali še tri vzporedne vzorce (majhni vzorci) debeline 20 mm za določanje vlažnosti in vlažnostnega gradiента po standardu SIST EN 13183-1: 2003 ter zaskorjenja po standardu ENV 14464: 2003.

Od decembra 2007 do junija 2008 smo v intervalih na vsake tri tedne izbrali nove sveže deske. Iz teh smo v osmih vzorčenjih skupno izdelali 88 elementov, po 10 na serijo, z izjemo šeste serije, ko smo sušenje spremljali na 18 elementih. Preglednica 3.1 prikazuje povprečno število in dimenzije vzorcev v posamezni seriji.

**Preglednica 3.1:** Povprečna dolžina ( $D_{pov}$ ), širina ( $s_{pov}$ ), debelina ( $d_{pov}$ ) površina ( $A_{pov}$ ), in število vzorcev ( $N_V$ ) v posamezni seriji (pri izračunu površine vzorcev površin čel nismo upoštevali)

	SERIJA							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$N_V$	10	10	10	10	10	18	10	10
$s_{pov}$ [mm]	113	160	142	144	117	111	113	119
$d_{pov}$ [mm]	35	27	35	38	37	35	35	37
$A_{pov}$ [ $\text{m}^2$ ]	0,266	0,337	0,318	0,297	0,276	0,264	0,266	0,250
$D_{pov}$ [mm]	900	901	900	820	900	901	901	800

##### 3.2.2 Določanje in spremljanje lesne vlažnosti

Vlažnosti posameznih vzorcev smo določali z gravimetrično metodo, zato smo vse vzorce (majhne in velike), takoj ko so bili izdelani in označeni, stehtali. Iz majhnih vzorcev smo po standardni metodi (SIST EN 13183-1) takoj določili tudi začetno vlažnost po definicijski formuli:

$$U_Z = \frac{m_z - m_0}{m_0}, \quad (3)$$

kjer je  $U_Z$  začetna vlažnost,  $m_z$  začetna masa in  $m_0$  končna masa vzorca.



**Slika 3.1:** Sušilnik, kjer smo sušili manjše vzorce (Laboratorij za sušenje lesa, Oddelek za lesarstvo)

Velike vzorce smo po tehtanju zaščitili s premazom stipol. S tem smo ustavili preveliko izhajanje vode iz čel in tako preprečili pokanje vzorcev. S stipolom zaščitene vzorce smo nato naletvičili v zložaj, ki smo ga postavili v pokrit in relativno dobro prezračen prostor. Zložaj je bil od tal odmaknjen približno 0,4 m (sl. 3.2). Za letvičenje smo uporabili zračno suhe smrekove letvice s prerezom 2,5 cm × 2,5 cm.



**Slika 3.2:** Zložaj z vzorci 1., 2., 3., 4., 5., 7., 8. serije (levo) in zložaj 6. serije (desno)

Vzorce smo nato tehtali dvakrat na teden s tridnevnim razmakom med posameznima meritvama. Ko je vlažnost vzorcev padla pod 25 %, smo jih tehtali samo enkrat na teden, ko so se vzorci uravnovesili, pa smo jih tehtali samo enkrat na dva tedna. Vse izmerjene podatke smo vnesli v tabele računalniškega programa MS Excel® in jih tam tudi obdelovali.

### 3.2.3 Spremljanje kinetike sušenja na prostem

Med procesom sušenja smo se osredotočili na proučevanje sprememb dveh sušilnih parametrov: spremembe vlažnosti v odvisnosti od časa in spremembe hitrosti sušenja v odvisnosti od lesne vlažnosti. Trenutno vlažnost vzorca smo izračunali po enačbi (4), kjer je  $U_t$  trenutna vlažnost vzorca in  $m_t$  trenutna masa vzorca.

$$U_t [\%] = \frac{m_t}{m_t \cdot (U_z + 100)} - 100 \quad (4)$$

Za izračun hitrosti sušenja smo uporabili naslednjo formulo:

$$H [\% / dan] = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}, \quad (5)$$

kjer je  $H$  hitrost sušenja,  $\Delta m$  izguba mase oziroma vode med prejšnjo in zadnjo meritvijo in  $\Delta t$  razlika v dnevih med prejšnjo in zadnjo meritvijo. Zgornja formula nam pove, za kakšen odstotek vlažnosti se je določen vzorec posušil v 1 dnev.

Eksperimentalno določeno hitrost sušenja smo ponazorili z modelom naravne rasti (6),

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{a}{1 + e^{(-k(u-u_c))}}, \quad (6)$$

kjer  $a$  predstavlja maksimalno sušilno hitrost, doseženo pri izločanju proste vode,  $u_c$  je vlažnost eksponentnega pojemanja sušilne hitrosti z znižanjem lesne vlažnosti,  $k$  pa določa pojemanje sušilne hitrosti pod vrednostjo  $u_c$ .

Ostrino sušenja  $O$  smo določili kot razmerje med povprečno trenutno vlažnostjo vzorcev  $U_t$  in ravnovesno vlažnostjo  $U_r$ , izračunano iz odčitanih klimatskih pogojev.

$$O = \frac{U_t}{U_r} \quad (7)$$

Med samim sušenjem smo preučevali tudi vpliv nihanja klimatskih pogojev na potek procesa sušenja. Od klimatskih pogojev smo preučevali le tiste, ki so v danem primeru najbolj vplivali na sam proces sušenja: temperatura, relativna zračna vlažnost in ravnovesna vlažnost, ki smo jo s pomočjo formule iz Hailwood-Horrobinovega modela (Wood Handbook, 1999) izračunali iz temperature in relativne zračne vlažnosti.

$$U_r = \frac{1,800}{W} \cdot \left( \frac{K \cdot \varphi}{1 - K \cdot \varphi} + \frac{K_1 \cdot K \cdot \varphi + 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2}{1 + K_1 \cdot K \cdot \varphi + K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2} \right) k, \quad (8)$$

kjer grška črka  $\varphi$  predstavlja relativno zračno vlažnost,  $T$  temperaturo v °C, ostale spremenljivke pa smo izračunali po naslednjih enačbah:

$$W = 349 + 1,29 \cdot T + 0,0135 \cdot T^2 \quad (9)$$

$$K = 0,805 + 0,000736 \cdot T - 0,00000273 \cdot T^2 \quad (10)$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938 \cdot T - 0,000303 \cdot T^2 \quad (11)$$

$$K_2 = 1,91 + 0,0407 \cdot T - 0,000293 \cdot T^2 \quad (12)$$

### 3.2.4 Spremljanje klimatskih nihanj

Klimatske podatke smo merili s pomočjo vremenske postaje Davis Vantage Pro, ki je bila nameščena v neposredni bližini izvajanja eksperimenta. Vremenska postaja je bila od tal oddaljena približno 4 m, od zložaja pa 20 m. Naprava za merjenje klimatskih podatkov ima možnosti merjenja temperature, relativne zračne vlažnosti, hitrosti vetra, količine padavin, določi lahko tudi smer vetra, ipd.



**Slika 3.3:** Vremenska postaja Davis Vantage Pro, fotografirana na električnem drogu 20 m od zložaja



**Slika 3.4:** Sprejemnik vremenske postaje Davis Vantage Pro z zaslonom

Zaradi oddaljenosti vremenske postaje od zložaja lesa sama hitrost vetra pri eksperimentu ni bila upoštevana. Izmerjeni podatki so se zapisovali vsako uro. Dobljene podatke smo obdelali tako, da smo izračunali povprečne dnevne vrednosti ravnovesne vlažnosti, temperature in relativne zračne vlažnosti ter odstopanje od povprečja za tiste dni, ko smo tehtali vzorce. Odstopanje od povprečja smo izračunali po enačbi (13). Deljenec predstavlja standardni odklon ( $\sigma$ ) od povprečja, delitelj pa povprečje ( $\bar{x}$ ).

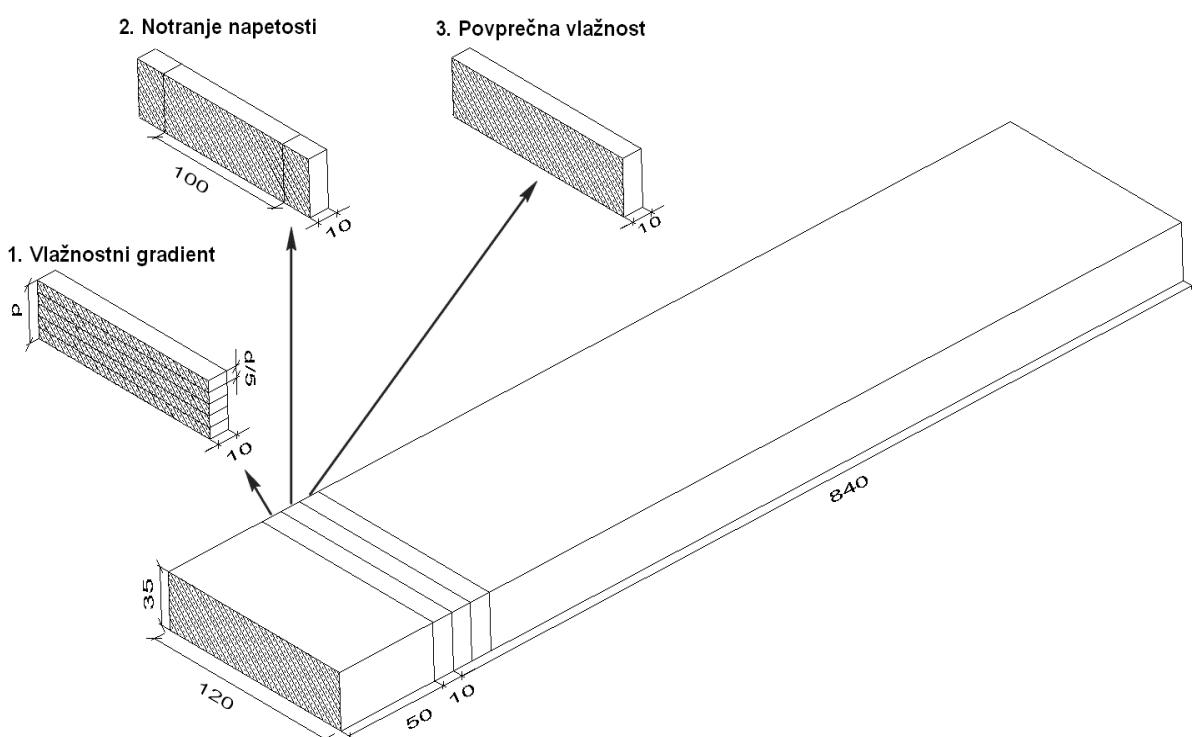
$$kv = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (13)$$

### 3.3 KONTROLA KAKOVOSTI

Kakovost sušenja smo ocenjevali v vseh fazah izvajanja eksperimenta. Kontrola kakovosti je potekala po naslednjem zaporedju: vizualna ocena vzorcev pred začetkom sušenja oziroma takoj po pripravi vzorcev in takoj po koncu sušenja, kontrola vlažnostnega gradiента, kontrola notranjih napetosti in kontrola povprečne končne vlažnosti po celotnem preseku vzorca.

#### 3.3.1 Vzorčenje

Ob koncu sušenja serije smo vse vzorce najprej stehtali, saj je bila končna masa vzorcev ključna pri izračunu končne vlažnosti. Nato smo iz vsakega vzorca posebej 5 cm od čela izžagali 3 manjše vzorce debeline 10 mm. Prvi vzorec je bil potreben za določitev povprečne končne vlažnosti vzorca.



Slika 3.5: Izdelava vzorcev za kontrolo kakovosti

Drugi vzorec smo potrebovali za določanje notranjih napetosti po koncu sušenja v vzorcu, pri čemer smo uporabili prežagovalno metodo. Vzorec smo najprej izžagali iz večjega vzorca, nato smo ga odžagali na širino 100 mm, na koncu pa še prežagali na pol po debelini.

Tretji vzorec pa smo potrebovali za določitev vlažnostnega gradiента. Izžagani vzorec smo najprej odžagali na širino 50 mm. Vsak vzorček smo razdelili na več režnjev, ki smo jih iz vzorca izsekali s pomočjo jeklenega rezila (sekač) in kladiva. Vzorce iz vseh serij smo razsekali na 5 režnjev z izjemo 2. serije, katere vzorce smo razsekali na 3 režnje.

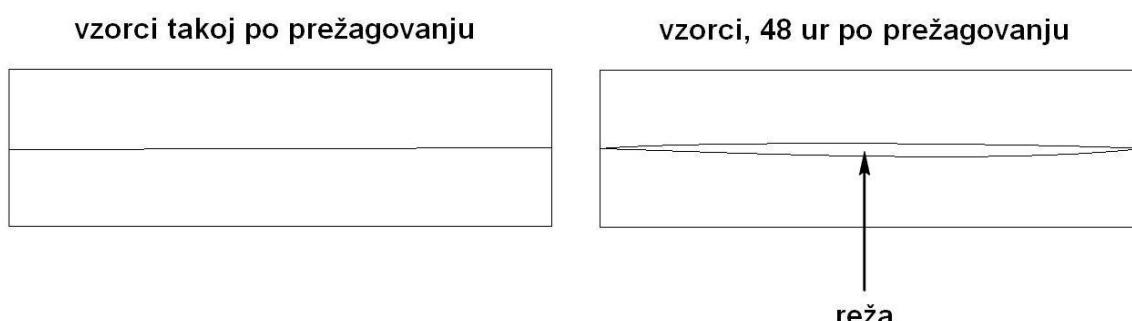
### 3.3.2 Izvedba kontrole kakovosti

#### 3.3.2.1 Povprečna vlažnost

Pri kontroli kakovosti smo povprečno končno vlažnost vzorcev določili po standardni metodi (SIST EN 13183-1). Povprečno končno vlažnost vzorcev smo izračunali po formuli (3).

#### 3.3.2.2 Notranje napetosti

Prežagovalna metoda je potekala tako, da smo vse vzorce, takoj ko smo jih prežagali na pol, zložili v vrečko tako, da se polovice med seboj niso premešale. V takem stanju smo jih pustili naslednjih 48 ur. Po 48 urah smo z digitalnim kljunastim merilom izmerili odstopanje v milimetrih. Odstopanje smo izmerili tako, da smo obe polovici vzorca stisnili skupaj in izmerili širino reže (sl. 3.6).



**Slika 3.6:** Nastanek reže, do katerega pride zaradi prisotnosti notranjih napetosti v lesnem tkivu po končanem sušenju

Kakovost sušenja na prostem z vidika notranjih napetosti smo ocenili na podlagi kriterijev v preglednici 3.2.

**Preglednica 3.2:** Kriteriji za ocenjevanje notranjih napetosti

<b>Kakovostni razred</b>	<b>Odstopanje mora biti po kondicioniranju manjše od:</b>
S	3 mm
Q	2 mm
E	1 mm

Kakovostni razredi za posušen les so naslednji:

- **S (standard), standardni razred:** končna uporaba lesa še ni natančno določena in se ne pričakuje posebnih zahtev;
- **Q (quality dried), kakovostni razred:** les višjih kakovostnih razredov;
- **E (exclusive), prvorstni razred:** posebne zahteve glede končne uporabe lesa (Gorišek, 2005).

### 3.3.2.3 Vlažnostni gradient

Vlažnosti posameznih koščkov smo določili na enak način kot smo določili povprečno končno vlažnost. Pri kontroli vlažnostnega gradiента smo ugotovili porazdelitev vlažnosti po prerezu vzorcev. Vlažnostni gradient smo izračunali po spodnji formuli:

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{u_s - u_z}{x}, \quad (14)$$

kjer je  $u_s$  vlažnost srednjega režnja,  $u_z$  vlažnost zunanjega režnja,  $x$  pa je razdalja med zunanjim in srednjim slojem.

## 4 REZULTATI

### 4.1 KINETIKA SUŠENJA LESA NA PROSTEM

Sušenje na prostem smo spremljali v osmih zaporednih serijah. Prvo smo pričeli spremljati v začetku decembra, zadnjo pa v maju. Eksperiment je tako potekal v glavnem obdobju sečnje in razžagovanja bukovine. Z meritvami na posameznih serijah smo zaključili, ko je masa sledilnih vzorcev pričela nihati in je bila dosežena »navidezna« ravnovesna vlažnost. Začetne vlažnosti posameznih vzorcev so nihale od 43,7 % do 109,0 %. Kot pričakovano so manj kot začetne nihale končne vlažnosti, ki so zavzemale vrednosti od 17,3 % do 21,7 %. Najvišje začetne vlažnosti so imeli vzorci 2. serije, najnižje pa vzorci 6. serije. Najnižje končne vlažnosti so dosegli vzorci 8. serije, najvišje pa vzorci 7. serije. Najhitreje so se sušili vzorci 8. serije, najpočasneje pa vzorci 2. serije (pregl. 4.1).

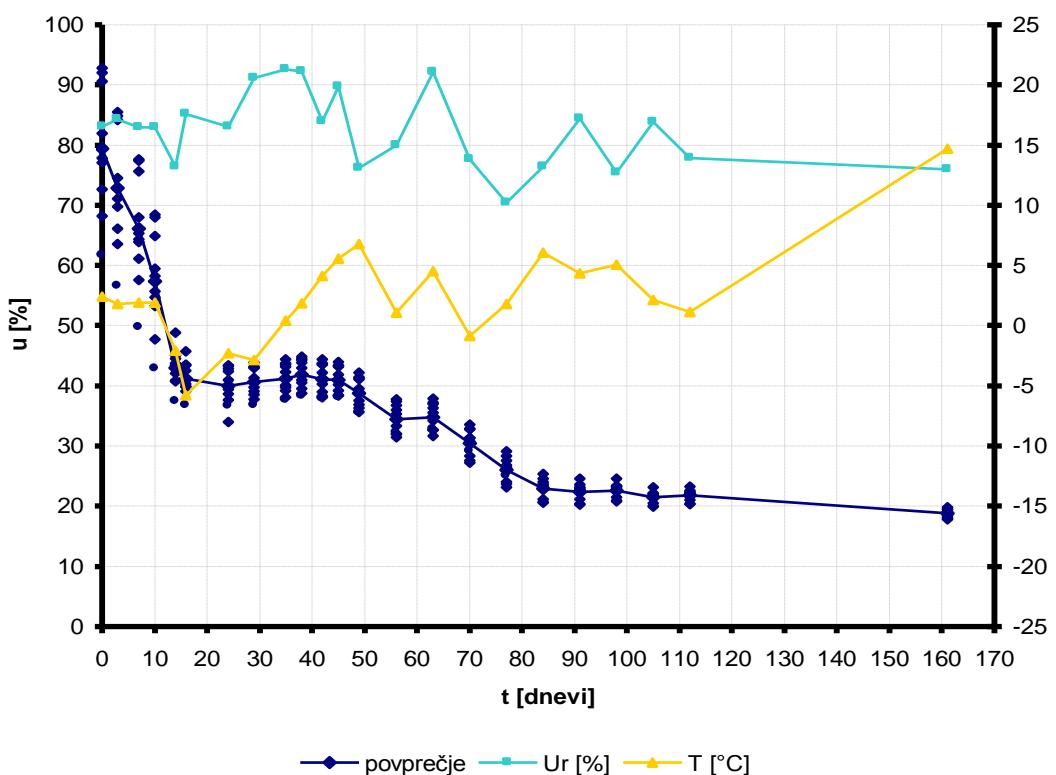
**Preglednica 4.1:** Obdobje spremjanja posamezne serije. Začetne vlažnosti ( $U_z$ ), končne vlažnosti ( $U_k$ ), maksimalna sušilna hitrost ( $\alpha$ ) in vlažnost eksponentnega pojemanja ( $U_c$ ) pri posamezni seriji

serija	Obdobje	$U_z$ [%]	$U_k$ [%]	$\alpha$ [%/dan]	$U_c$ [%]
1	dec. 07–maj 08	46,4–91,3	17,9–19,9	2,3	47,1
2	dec. 07–maj 08	65,0–109,0	17,3–18,4	1,4	37,0
3	jan. 08–maj 08	60,3–101,1	17,5–18,7	2,1	44,7
4	jan. 08–maj 08	56,5–92,3	17,7–20,0	2,4	40,1
5	feb. 08–maj 08	69,1–89,8	17,3–19,1	8,9	52,3
6	mar. 08–maj 08	43,7–69,1	15,9–21,7	5,6	45,9
7	apr. 08–maj 08	52,7–81,8	21,1–21,7	3,5	43,7
8	maj 08–jun. 08	71,0–88,5	17,4–18,4	14,0	53,6

#### 4.1.1 Potek sušenja 1. serije

Proces sušenja 1. serije smo spremljali 161 dni, od 4. 12. 2007 do 9. 5. 2008. Krivulja sušenja 1. serije je zelo razgibana (sl. 4.1). Prva 2 tedna so se vzorci 1. serije hitro sušili, nato pa se je sušilni proces zaradi strmega padca temperature in dviga ravnovesne vlažnosti (14. dan) močno upočasnil. Vlažnost vzorcev se je takrat gibala od 37,4 % do 48,9 %. Dodatno so k upočasnitvi sušenja pripomogli deževno in megleno vreme ter visoka relativna zračna vlažnost (83–90 %). Sušilni proces je bil zavrt do te mere, da je prišlo do navlaževanja vzorcev.

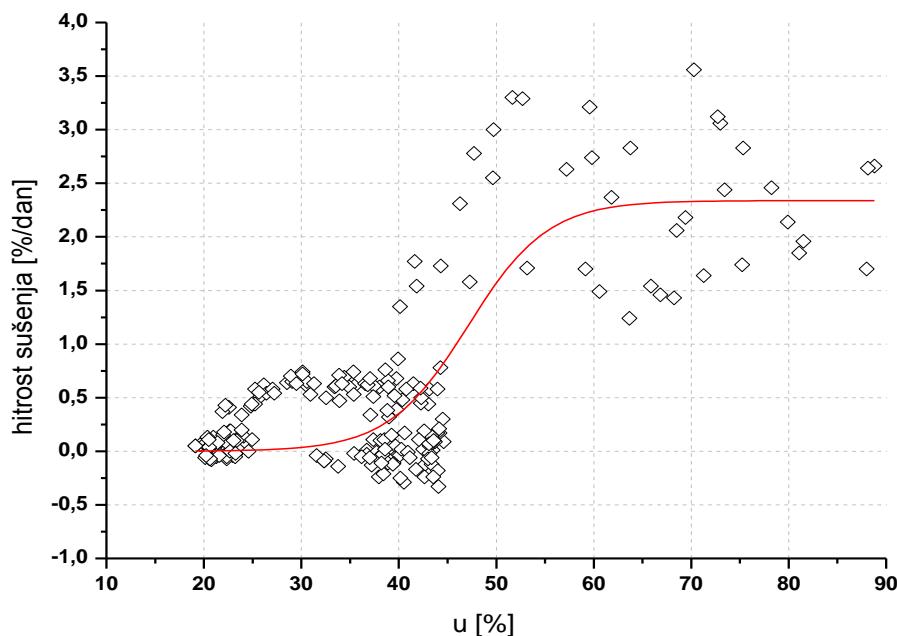
Po 14. dnevu je temperatura začela postopoma naraščati in ravnovesna vlažnost padati, vzorci pa so se začeli ponovno sušiti šele na 42. dan, vendar je bilo sušenje počasnejše od sušenja na začetku, saj je bila v neugodnem obdobju vlažnost vzorcev blizu območja nasičenja celičnih sten. Po 56. dnevu se je proces sušenja spet upočasnil. Vsi vzorci razen enega so se znova navlažili, vendar ne za več kot 0,97 %. Po 63. dnevu so se vzorci ponovno začeli sušiti, ker je temperatura okolice postopoma naraščala.



Slika 4.1: Sušilna krivulja 1. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja

Po 84. dnevu se je sušilna hitrost močno upočasnila, vlažnost vzorcev se je gibala od 20,6 do 25,3 %. Vlažnost vzorcev se od 84. dneva do konca sušenja (v naslednjih 77 dneh) ni spremenila za več kot 5,5 %. Končne vlažnosti vzorcev so po 161 dneh sušenja zavzemale vrednosti od 17,9 do 18,9 %.

Hitrost sušenja je bila pri izločanju proste vode v povprečju 2,3 %/dan in je bila do 65,0 % vlažnosti vzorcev konstantna (sl. 4.2). Ko so vzorci dosegli 65,0 % vlažnost, se je povprečna hitrost sušenja zaradi osušitve površine do nasičenja celičnih sten upočasnila in začela padati značilno nelinearno, ko pa je bila vlažnost vzorcev 60,0 %, je povprečna hitrost sušenja padala na videz linearne. Ko je vlažnost vzorcev dosegljala vrednost  $u_c$ , je bila hitrost sušenja 1 %/dan. Pri 42,0 % vlažnosti vzorcev je začela povprečna hitrost sušenja eksponentno padati. Ko je vlažnost vzorcev padla pod 25,0 %, so se vzorci uravnovešali glede na nihanje klime.



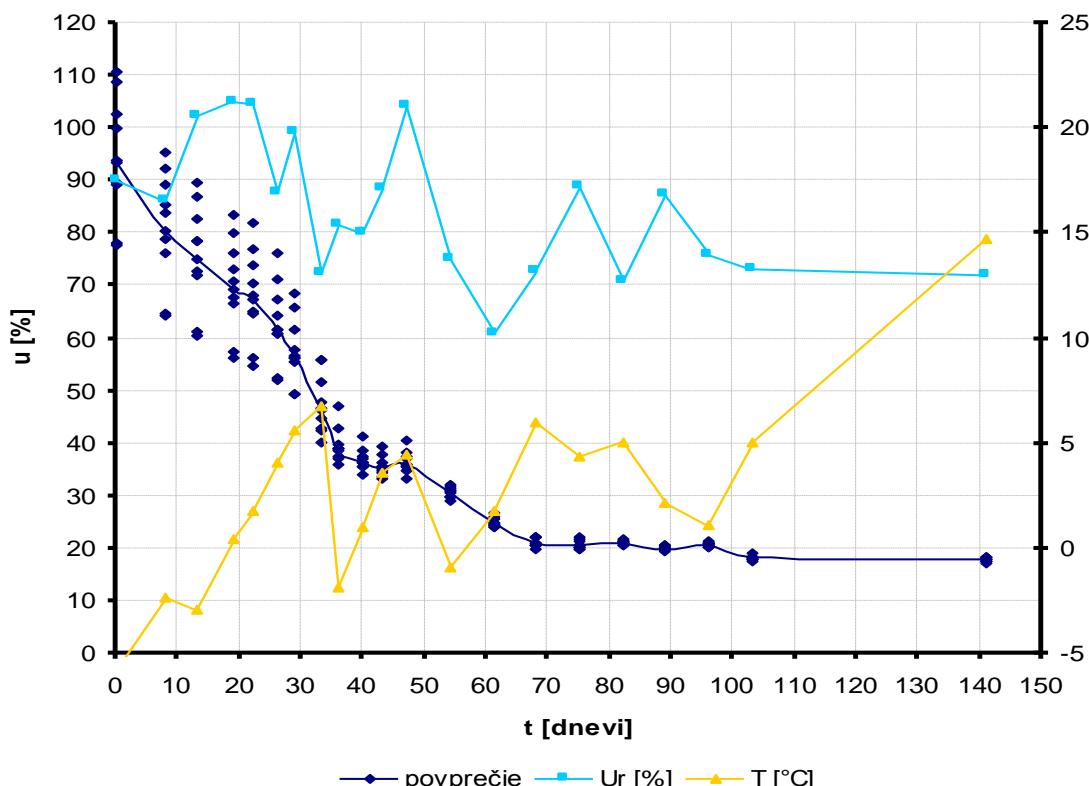
**Slika 4.2:** Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 1. seriji

#### 4.1.2 Potek sušenja 2. serije

Spremljanje procesa sušenja 2. serije bukovih vzorcev je trajalo 141 dnevi, začelo pa se je 16 dni po začetku sušenja 1. serije. Začetne vlažnosti 2. serije so v primerjavi z ostalimi serijami najvišje in so si med seboj zelo različne. Začetne vlažnosti vzorcev so nihale od 77,7 % do 110,6 %.

Vzorci 2. serije so se prvih 19 dnevi sušili normalno hitro, nato se je proces sušenja za čas od 19. do 22. dneva sušenja zaradi padca ravnovesne vlažnosti (kljub dviganju temperature okolice) zelo upočasnil (sl. 4.3). Nobeden od vzorcev iz te serije se v tem obdobju ni posušil za več kot 2,9 %. Padec hitrosti sušenja je bil pogojen s slabim vremenom (dež, meglja, brezvetrje) in visoko relativno zračno vlažnostjo (88 do 90 %). Po 22. dnevnu je ravnovesna vlažnost padla, temperatura je naraščala in vzorci so se spet hitro sušili. Zaradi višje temperature in nižje ravnovesne vlažnosti kot na začetku sušenja je bil po 22. dnevnu proces sušenja hitrejši.

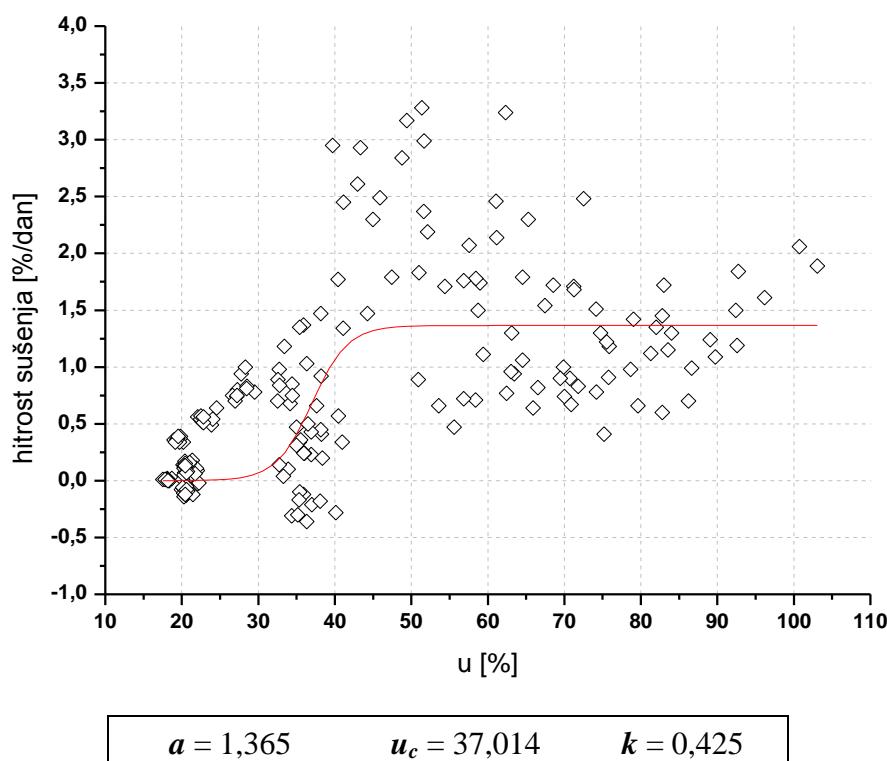
Ko je vlažnost vseh vzorcev v seriji padla pod 50 % (36. dan), je zopet prišlo do upočasnitve sušenja, kar je bila spet posledica nihanja klimatskih pogojev. Temperatura je takrat padla na -1,8 °C, ravnovesna vlažnost pa je bila 15,5 %. Nato so se vzorci zaradi naraščajoče ravnovesne vlažnosti zelo počasi sušili, kljub temu da je temperatura naraščala. Vzrok za tako počasno sušenje je bilo slabo vreme in visoka relativna zračna vlažnost (72 do 80 %) (padavine, brezvetrje, meglja). Po 47. dnevnu je sušenje potekalo približno enako hitro kot na začetku.



Slika 4.3: Sušilna krivulja 2. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja

Od 68. dneva dalje, ko je bila vlažnost vzorcev od 20,1 do 22,3 %, se je sušenje močno upočasnilo. Vzorci so dosegli končne vlažnosti (17,3 do 18,4 %), ki se med vzorci niso razlikovale za več kot 1,1 %.

Povprečna hitrost sušenja pri izločanju proste vode je bila približno 1,4 %/dan in je bila do 50,0 % vlažnosti vzorcev konstantna (sl. 4.4). Nato je povprečna hitrost sušenja padala najprej nelinearno, pod vlažnostjo 39,0 % pa je povprečna hitrost sušenja padala skoraj linearne. Ko je vlažnost vzorcev dosegla vrednost  $u_c$ , je začela povprečna hitrost sušenja približno 0,8 %/dan, pri 33,0 % vlažnosti je začela povprečna hitrost sušenja eksponentno padati, pri 25,0 % vlažnosti pa je bila hitrost sušenja že zelo upočasnjena.



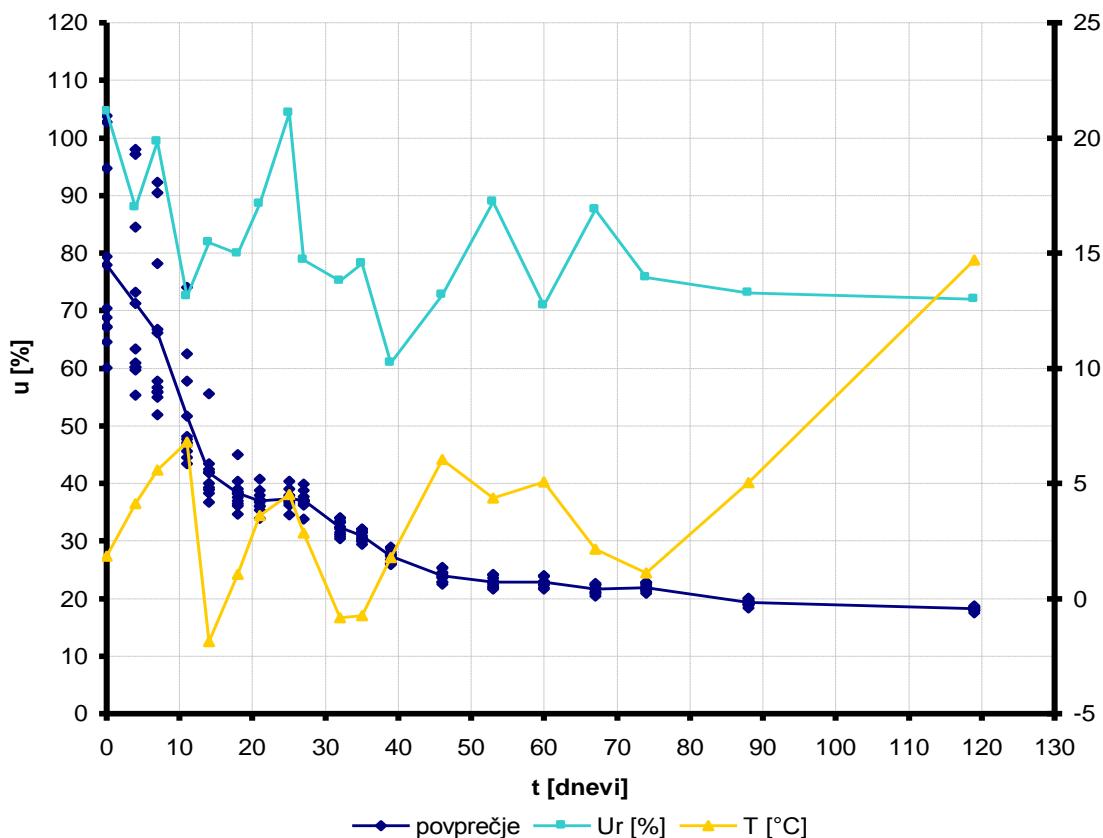
**Slika 4.4:** Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 2. seriji

#### 4.1.3 Potek sušenja 3. serije

Sušenje 3. serije bukovih vzorcev smo začeli spremljati 11. 1. 2008, trajalo pa je do 9. 5. 2008, vsega skupaj torej 119 dni. Kot lahko vidimo iz slike 4.5, so začetne vlažnosti nihale od 60,1 do 103,8 %.

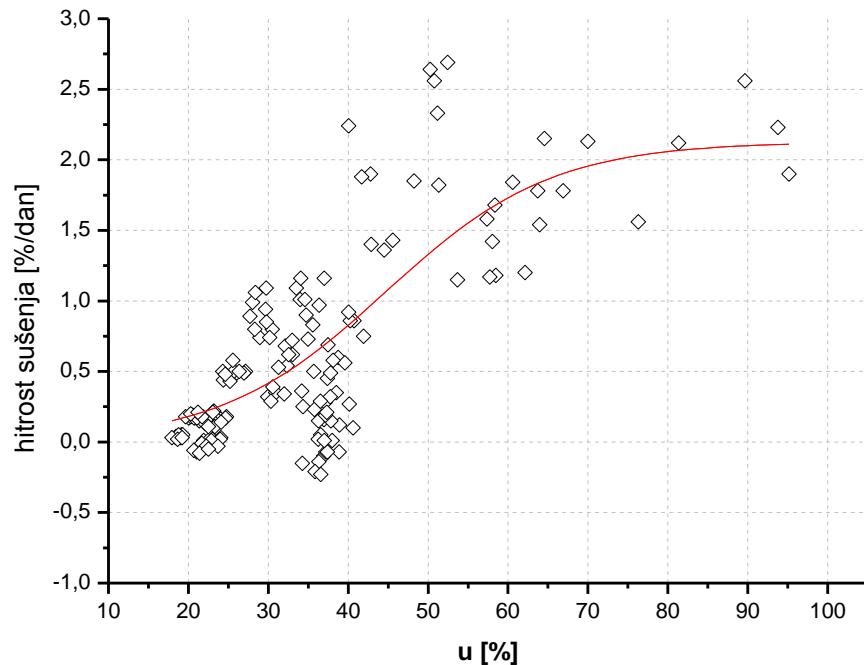
Do 14. dneva sušenja je temperatura zraka naraščala, ravnovesna vlažnost pa padala, zato so se vzorci precej hitro sušili. Skoraj vsi vzorci v seriji so se v dveh tednih posušili na vlažnost, nižjo od 50 %. Na 14. dan pa je temperatura zraka padla pod 0 °C in ravnovesna vlažnost je narasla čez 20 %. Sušenje se je upočasnilo do te mere, da v 13 dneh noben vzorec (razen šestega) ni izgubil več kot 4,8 % vlage. Na 32. dan je začela temperatura padati, vendar je zaradi nizke relativne zračne vlažnosti (51 %) začela padati tudi ravnovesna vlažnost. Vzorci so se začeli spet hitreje sušiti, vendar počasneje kot pred 14. dnevom, ker so že prehajali iz območja nasičenja celičnih sten v higroskopsko območje.

Po 46. dnevu se je hitrost sušenja močno zmanjšala, ker se je površinski difuzijski upor vzorcev močno povečal. Od 46. dneva do konca sušenja ni noben vzorec izgubil več kot 7,1 % vlažnosti. Do končnih vlažnosti, ki so obsegale vrednosti od 17,5 do 18,4 %, so se vzorci posušili v 119 dneh.



Slika 4.5: Sušilna krivulja 3. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja

Najvišja povprečna hitrost sušenja je bila 2,1 %/dan in je že od začetka sušenja počasi padala (sl. 4.6). Do približno 60,0 % vlažnosti je povprečna hitrost sušenja padala nelinearno, pod 60,0 % vlažnostjo vzorcev pa linearne. Ko je vlažnost vzorcev dosegla vrednost  $u_c$ , je bila hitrost sušenja približno 1,1 %/dan. Pri 38,0 % vlažnosti je povprečna hitrost sušenja začela eksponentno padati. Na koncu sušenja 3. serije je bila povprečna hitrost sušenja približno 0,1 %/dan.



$$a = 2,127 \quad u_c = 44,692 \quad k = 0,0962$$

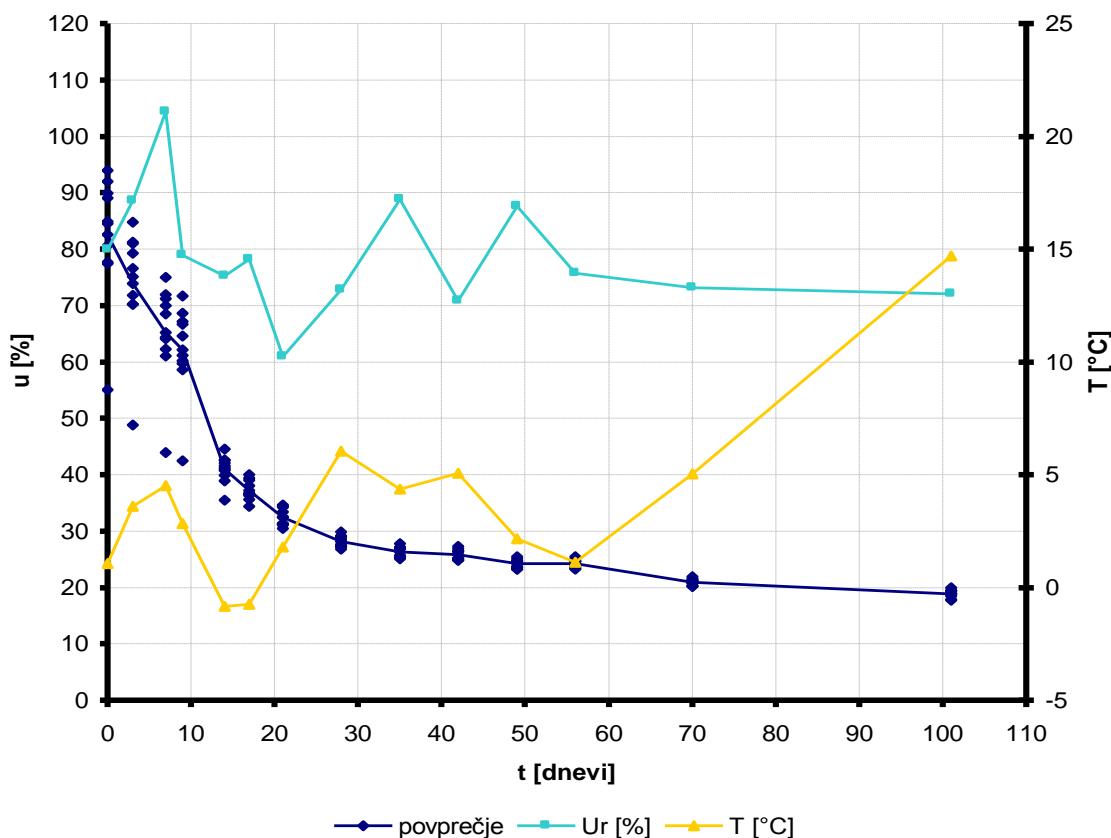
Slika 4.6: Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 3. seriji

#### 4.1.4 Potek sušenja 4. serije

S spremljanjem sušenja 4. serije bukovih vzorcev smo začeli 29. 1. 2008 in končali 9. 5. 2008 (sl. 4.7). Spremljanje je trajalo 101 dan. Začetne vlažnosti ne nihajo tako izrazito kot pri 1., 2. in 3. seriji. Izjema je le 2. vzorec, ki je imel v primerjavi z ostalimi vzorci zelo nizko začetno vlažnost (55,1 %).

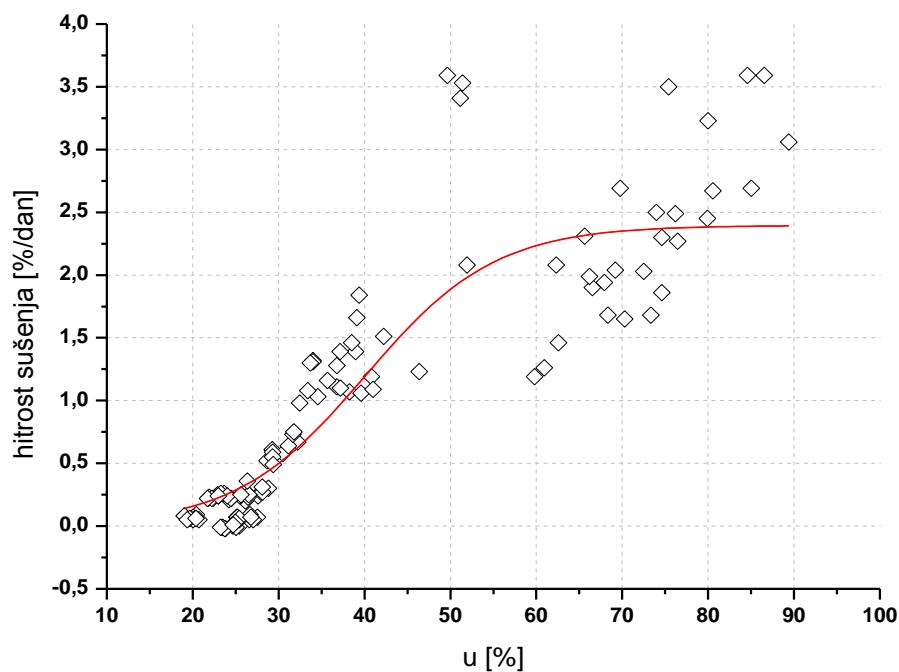
Vzorci so se na začetku precej hitro sušili, od 9. dneva dalje pa se je hitrost sušenja zaradi padca ravnovesne vlažnosti z 21,1 % na 14,7 % še dodatno povečala. Razlog za takšen padec ravnovesne vlažnosti (kljub temu, da je temperatura padla) je znižanje relativne zračne vlažnosti v času od 7. do 9. dneva sušenja iz 90 % na 66 %. Sušenje je tako potekalo bolj ali manj enakomerno do 14. dneva, ko se je sušilni proces zaradi prehoda vzorcev iz območja svežega stanja v območje nasičenja celičnih sten nekoliko upočasnil. Dodatno je k upočasnitvi sušenja prispevalo tudi zvišanje ravnovesne vlažnosti.

Ko je vlažnost vzorcev padla pod 30 %, se je sušenje močno upočasnilo. Nato pa je bila hitrost sušenja skoraj do konca spremljanja bolj ali manj enakomerna. Na 49. dan se je ravnovesna vlažnost (glede na 42. dan) zvišala za 4,2 %, temperatura pa znižala za 2,9 °C, zato se je večina vzorcev na 56. dan nekoliko navlažila, vendar ne za več kot 0,15 %.



Slika 4.7: Sušilna krivulja 4. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja

Najvišja povprečna hitrost sušenja pri izločanju proste vode je bila 2,4 %/dan in je bila do vlažnosti 77,0 % konstantna, nato je pa začela na videz nelinearno padati (sl. 4.8). Pri 50,0 % vlažnosti je začela povprečna hitrost sušenja linearno padati in je, ko je vlažnost vzorcev dosegla vrednost  $u_c$ , dosegla vrednost 1,1 %/dan. Ko je bila vlažnost vzorcev nižja od 32,0 %, je povprečna hitrost sušenja začela padati eksponentno, na koncu sušenja pa je dosegla vrednost 0,1 %/dan.



**Slika 4.8:** Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 4. seriji

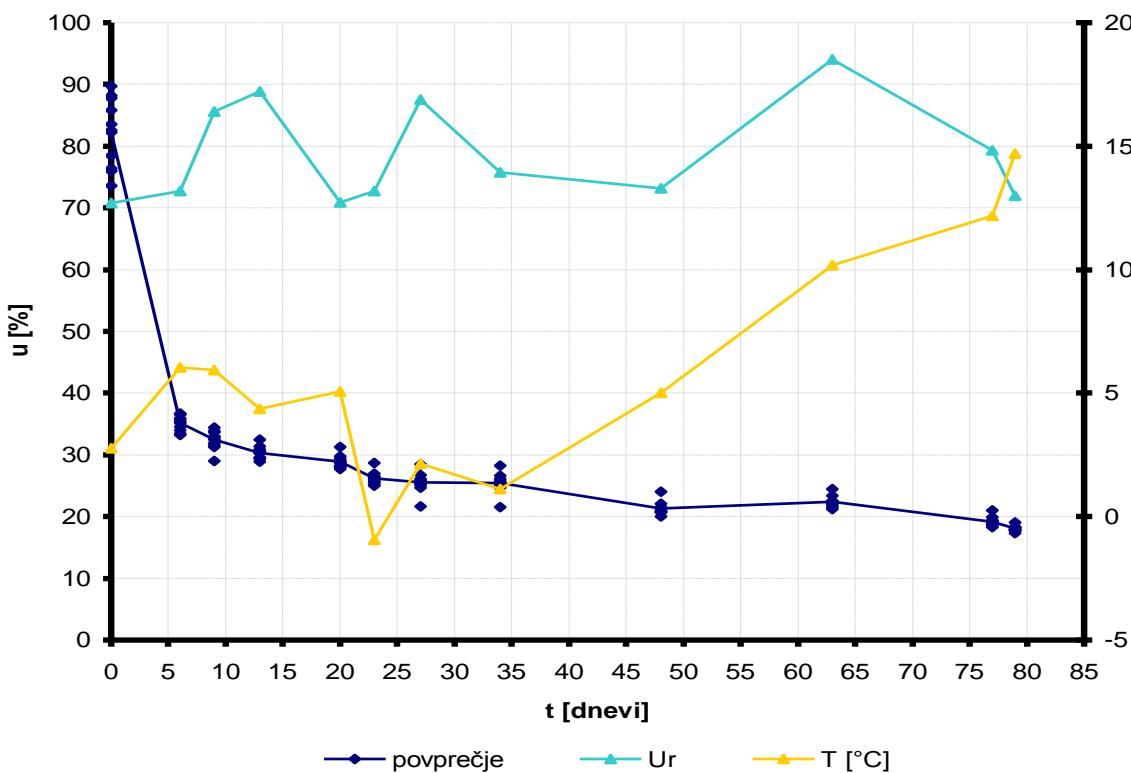
#### 4.1.5 Potek sušenja 5. serije

Sušenje 5. serije smo začeli spremljati 20. 2. 2008, 9. 5. 2008 pa smo s spremeljanjem sušenja zaključili (sl. 4.9). Pri tej seriji se začetne vlažnosti posameznih vzorcev med seboj ne razlikujejo za več kot 16,1 %.

Na sliki 4.9 lahko opazimo zelo hitro sušenje na začetku procesa, vzorci so se namreč v 6. dneh posušili na vlažnost, nižjo od 40 %. Od 6. dneva dalje pa se je sušenje precej upočasnilo zaradi prehoda iz območja svežega stanja v območje nasičenja celičnih sten, deloma tudi zaradi zvišanja ravnovesne vlažnosti in znižanja zračne temperature.

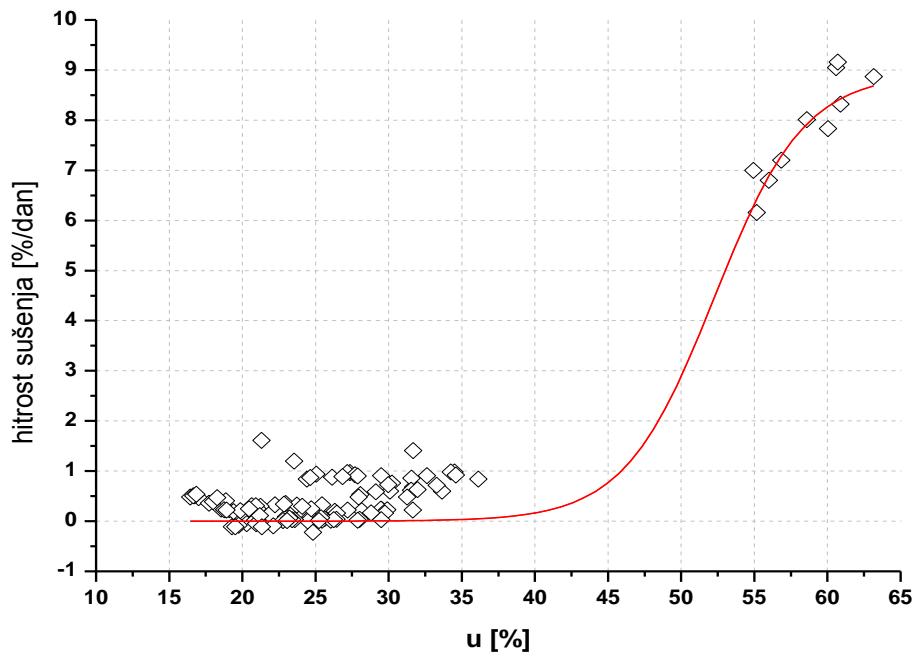
Po 20. dnevu so se vzorci zaradi zvišanja temperature in znižanja ravnovesne vlažnosti sušili malenkost hitreje kot pred tednom dni. Na 27. dan je ravnovesna vlažnost narasla, zato se vzorci v 1 tednu niso posušili za več kot 0,23 %. K tako počasnemu sušenju je pripomogel tudi povečan difuzijski upor. Zaradi zniževanja ravnovesne vlažnosti in naraščanja temperature je sušenje med 34. in 48. dnevom potekalo nekoliko pospešeno, nato pa je bilo med 48. in 63. dnevom zaradi naraščanja ravnovesne vlažnosti zavrtlo. Večina vzorcev (razen dveh) se ja navlažila, vendar ne za več kot 3,3 %.

Vzorci so se med 63. in 77. dnevom zaradi naraščajoče temperature in padajoče ravnovesne vlažnosti začeli ponovno hitreje sušiti. Spremljanje sušenja 5. serije bukovih vzorcev se je končalo na 79. dan. Končne vlažnosti vzorcev so se gibale od 17,3 do 19,1 %.



Slika 4.9: Sušilna krivulja 5. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja

Najvišja povprečna hitrost sušenja je bila 8,9 %/dan in je že od začetka sušenja nelinearno padala (sl. 4.10). Pri 57,0 % vlažnosti je začela povprečna hitrost sušenja linearno padati in ko so se vzorci posušili na vlažnost  $u_c$ , je dosegla vrednost 3,6 %/dan. Pri 46,0 % vlažnosti je povprečna hitrost sušenja padala nelinearno, pri 25,0 % vlažnosti pa je padla na 0,0 %/dan.



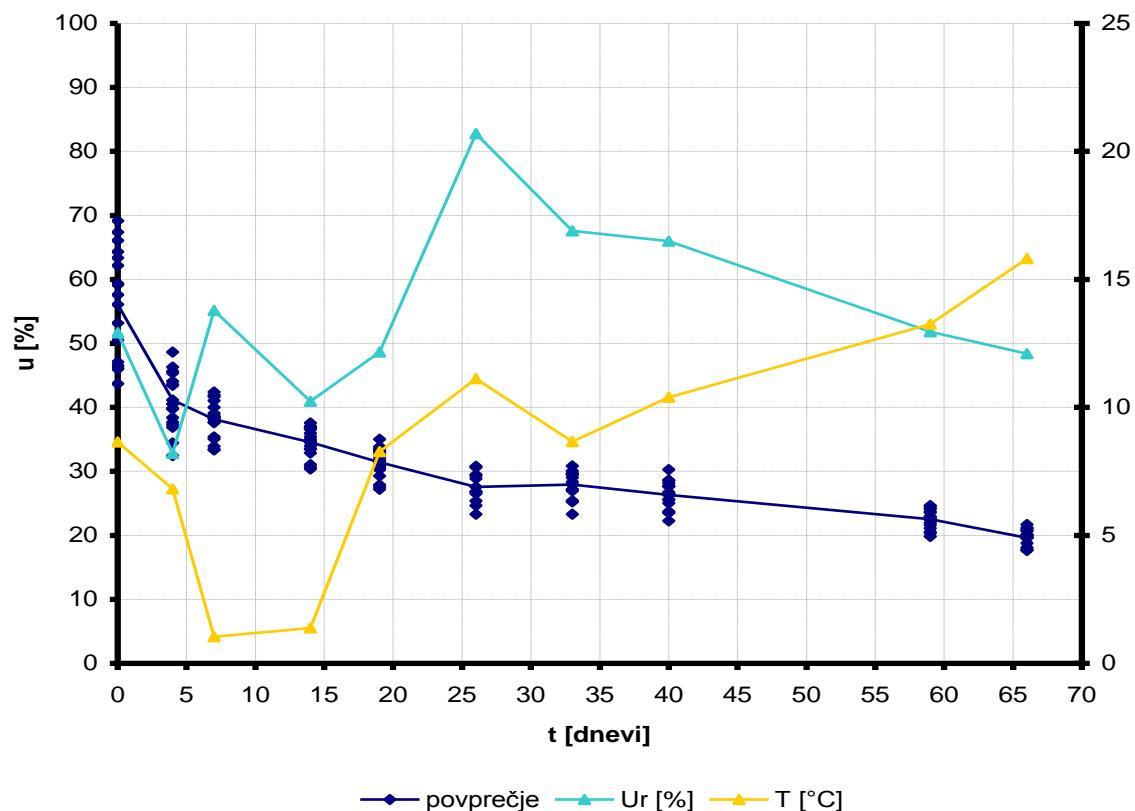
Slika 4.10: Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 5. seriji

#### 4.1.6 Potek sušenja 6. serije

Spremljane 6. serije se je začelo 13. 3. 2008 in končalo dne 15. 5. 2008 (sl. 4.11). Začetne vlažnosti so nihale od 43,7 do 69,1 %.

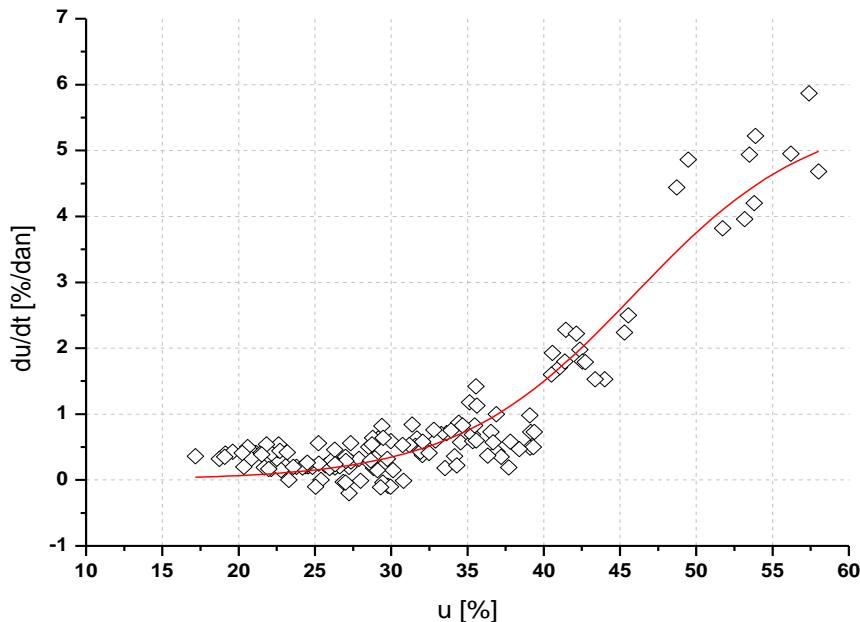
Sušenje je bilo najhitrejše prve 4 dni spremeljanja. Iz slike 4.11 vidimo, da se je do 4. dne malo več kot polovica vseh vzorcev posušila na vlažnosti, nižje od 40 %. Ti vzorci so se potem naslednje 3 dni sušili počasneje od vzorcev, katerih vlažnost je bila na 4. dan višja od 40 %. Naslednje 3 dni sta sušenje vzorcev ovirala tudi nižja temperatura in višja ravnovesna vlažnost. Po 7. dnevu so se vzorci naslednjih 19 dni sušili enakomerno. Na 26. dan se je ravnovesna vlažnost glede na prejšnjo meritev zvišala na 20,7 % in večina vzorcev je že bila v higroskopskem vlažnostnem območju, zato je bil proces sušenja naslednjih 7 dni zavrt. Večina vzorcev se je navlažila, vendar ne za več kot 1,4 %. Po 33. dnevu so se vzorci zaradi naraščanja temperature in zniževanja ravnovesne vlažnosti sušili precej hitro, vendar so se, kot vidimo na sliki 8, zaradi nizke vsebnosti vlage (difuzivni upor) sušili počasneje kot med 7. in 26. dnevom.

Na 59. dan so bili klimatski pogoji za sušenje še ugodnejši kot pred 19. dnevi, zato je bil proces sušenja naslednjih 7 dni hitrejši. Sušenje na prostem se je zaključilo na 61. dan spremeljanja. Končne vlažnosti vzorcev so obsegale vrednosti od 17,6 % do 21,6 %.



Slika 4.11: Sušilna krivulja 6. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja

Najvišja povprečna hitrost sušenja pri izločanju proste vode je bila 5,6 %/dan in je od začetka sušenja nelinearno padala do vlažnosti 55,0 %, ko je začela padati dokaj linearno (sl. 4.12). Ko je vlažnost vzorcev padla na vlažnost  $u_c$ , je bila hitrost sušenja 2 %/dan, pri vlažnosti 37 % je začela povprečna hitrost sušenja eksponentno padati in bila pri vlažnosti 17,0 % skoraj nična.



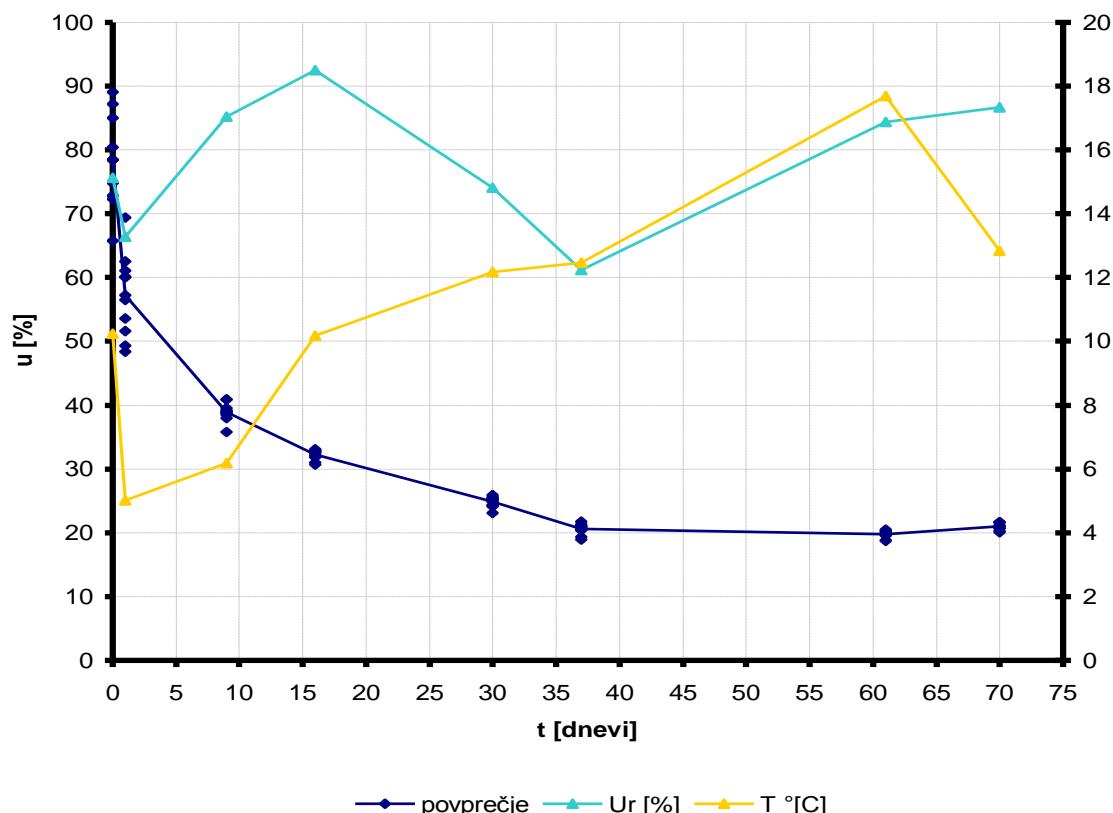
Slika 4.12: Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 6. seriji

#### 4.1.7 Potek sušenja 7. serije

Sedmo serijo bukovi vzorcev smo sušili od 7. 4. 2008 do 14. 6. 2008 (sl. 4.13). Začetne vlažnosti vzorcev v tej seriji so nihale od 65,7 % do 89,1 %.

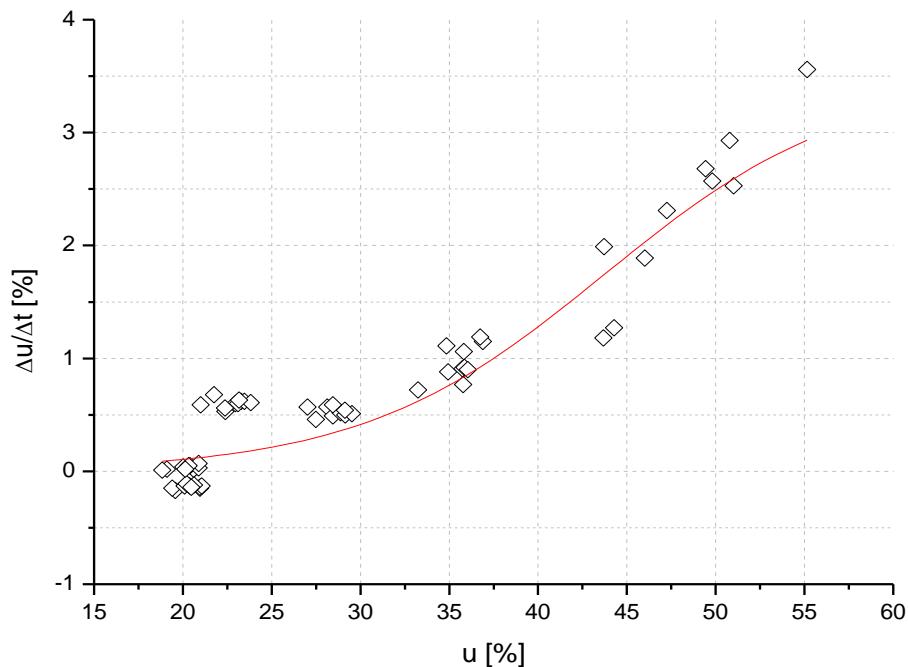
Vzorci so prvi dan sušenja izgubili povprečno 21,2 % lesne vlažnosti. Nato so se zaradi naraščajoče ravnovesne vlažnosti sušili nekoliko počasneje, vendar kljub temu precej hitro in v samo 9 dneh so dosegli vlažnost 40 % in manj. Od te točke naprej so se vzorci sušili nekoliko počasneje, ker so iz svežega stanja prešli v območje nasičenja celičnih sten, a kljub temu zaradi ugodnih klimatskih pogojev (naraščajoče temperature in padajoče ravnovesne vlažnosti) dokaj hitro. Od 37. dneva dalje so se vzorci zaradi dosežene nizke vlažnosti in naraščajoče ravnovesne vlažnosti sušili tako počasi, da v 24 dneh niso izgubili več kot 1,6 % lesne važnosti.

Od 61. dneva do konca spremeljanja (70. dan) se je ravnovesna vlažnost malenkostno zvišala (za 0,46 %), temperatura pa je z  $18,0^{\circ}\text{C}$  padla na  $12,9^{\circ}\text{C}$ , tako da se je vlažnost vzorcev na 70. dan povečala, vendar ne za več kot 1,38 %. Končne vlažnosti vzorcev so bile od 20,1 do 21,7 %.



Slika 4.13: Sušilna krivulja 7. serije in klimatska nihanja med procesom sušenja

Najvišja povprečna hitrost sušenja je bila 3,6 %/dan in je skoraj od začetka sušenja linearno padala (sl. 4.14). Ko so vzorci dosegli vlažnost  $u_c$ , je bila povprečna hitrost sušenja 1,3 %/dan. Pri vlažnosti vzorcev 37 % je začela povprečna hitrost sušenja eksponentno padati in dosegla najnižjo vrednost (0,130 %/dan) pri vlažnosti vzorcev 19 %.



$$a = 3,486$$

$$u_c = 43,726$$

$$k = 0,150$$

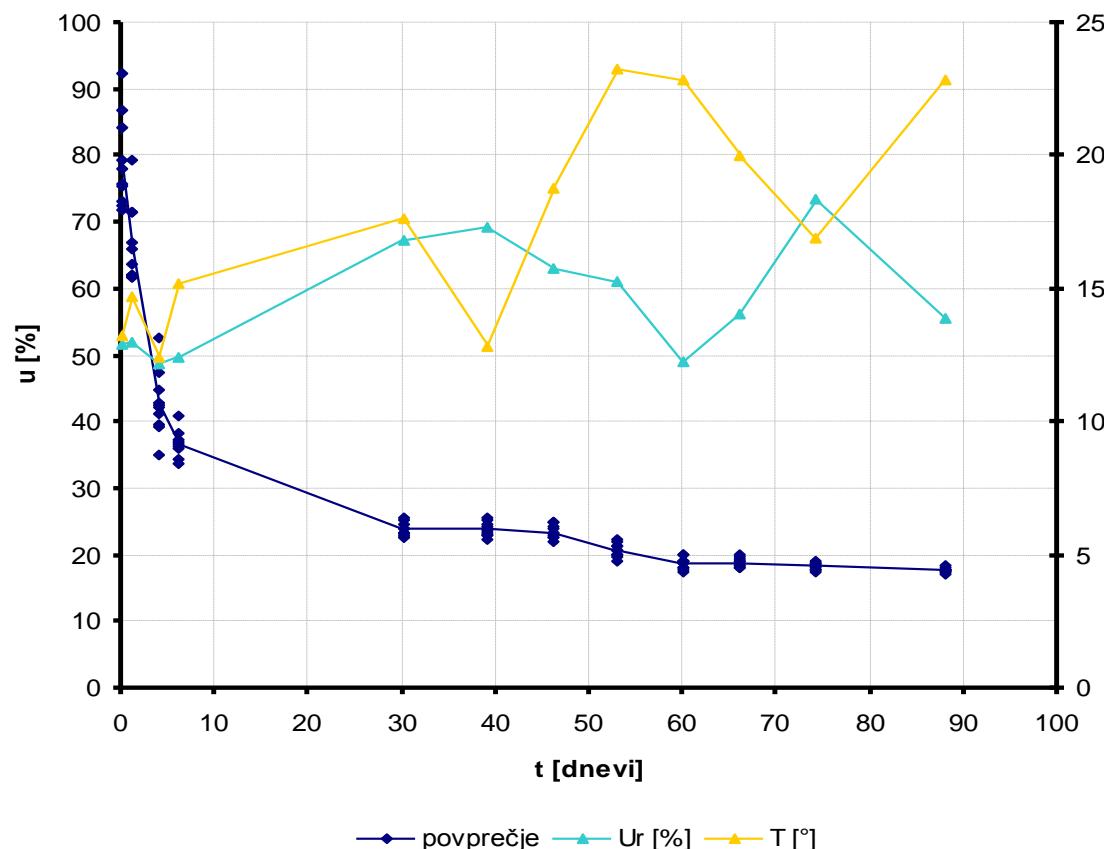
Slika 4.14: Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 7. seriji

#### 4.1.8 Potek sušenja 8. serije

S spremeljanjem sušenja 8. serije smo začeli 8. 5. 2008 in končali 1. 8. 2008 (sl. 4.15). Najnižja začetna vlažnost v seriji je bila 72,6 %, najvišja pa 92,5 %.

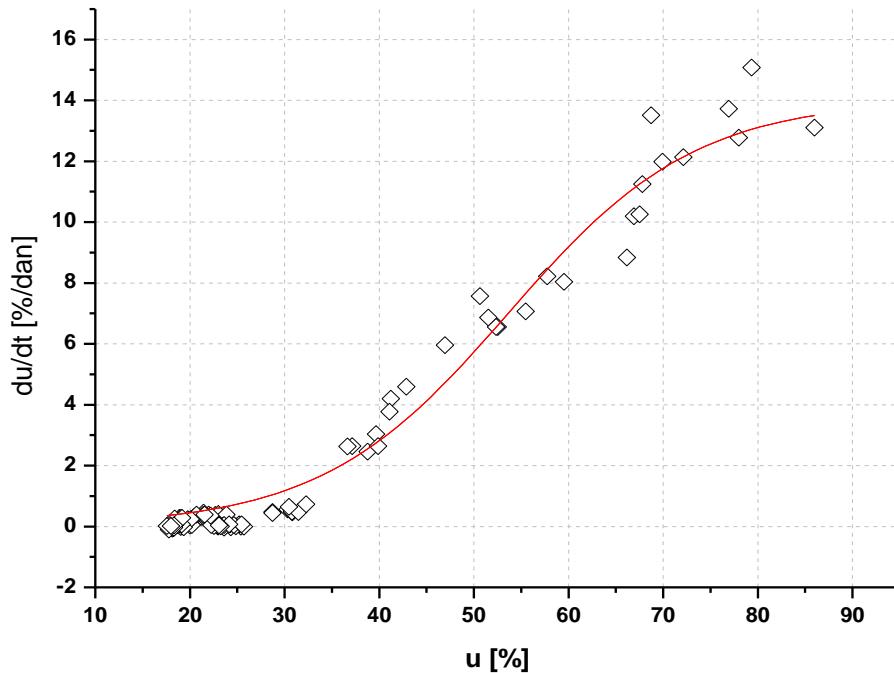
Po prvem dnevu sušenja so vzorci v povprečju izgubili 12,4 % vlažnosti, po 6 dneh sušenja pa so se že skoraj vsi vzorci zaradi ugodne temperature in nizke ravnovesne vlažnosti posušili na lesno vlažnost, nižjo od 40 %. Prvih 6 dni sušenja temperatura ni padla pod 12 °C, ravnovesna vlažnost pa je bila ves ta čas v povprečju 12,7 %. Po 30 dneh so se vsi vzorci posušili na vlažnost, nižjo od 30 %, nato pa se je sušenje zaradi nizke vlažnosti vzorcev in deloma zaradi nekoliko povišane ravnovesne vlažnosti močno upočasnilo. Od 39. dneva naprej se je ravnovesna vlažnost zniževala in temperatura je naraščala, zato so se vzorci sušili hitreje. Od 60. dneva naprej je začela temperatura padati in ravnovesna vlažnost naraščati, zato so se nekateri vzorci do 66. dneva nekoliko navlažili, a ne za več kot 0,6 %.

Spremljanje smo zaključili na 88. dan sušenja. Končne vlažnosti vzorcev so bile od 17,4 do 18,4 %.



Slika 4.15: Sušilna krivulja 8. serije in klimatska nihanja med spremeljanjem procesom sušenja

Najvišja povprečna hitrost sušenja pri izločanju proste vode je bila 14,0 %/dan in je od začetka sušenja nelinearno padala, na videz linearne pa je začela padati pri 66,0 % vlažnosti (sl. 4.16). Ko so se vzorci posušili na vlažnost  $u_c$ , je bila povprečna hitrost sušenja 7,0 %/dan. Pri vlažnosti 43,0 % je začela povprečna hitrost sušenja eksponentno padati in je pri vlažnosti 18 % dosegla vrednost 0,2 %/dan.



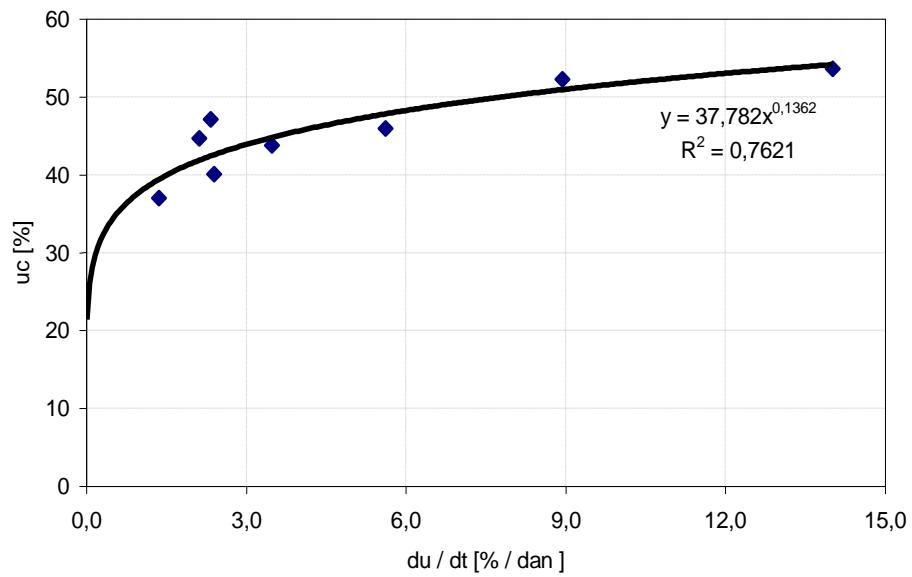
**Slika 4.16:** Zveza med sušilno hitrostjo in lesno vlažnostjo pri 8. seriji

#### 4.2 PREHOD V DIFUZIJSKI REŽIM IN HITROST SUŠENJA

Najvišja hitrost pri izločanju proste vode je bila dosežena pri 8. seriji (14,01 %/dan), najnižja pa pri 2. seriji (1,37 %/dan). Zvezo med vlažnostjo prehoda v difuzijski režim sušenja in hitrostjo izločanja proste vode predstavlja eksperimentalno določena enačba:

$$u_c = 37,782 \cdot a^{0,1362}, \quad (13)$$

kjer je  $u_c$  [%] vlažnost prehoda v difuzijski režim sušenja,  $a$  [%/dan] pa predstavlja hitrost izločanja proste vode med procesom sušenja.

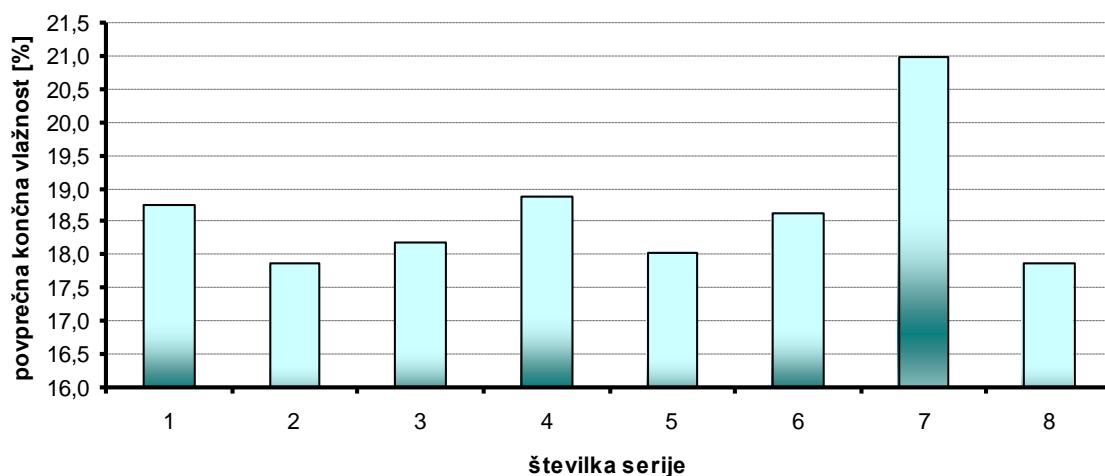


Slika 4.17: Vlažnost prehoda v difuzijski režim sušenja v odvisnosti od hitrosti izločanja proste vode

#### 4.3 KONTROLA KAKOVOSTI

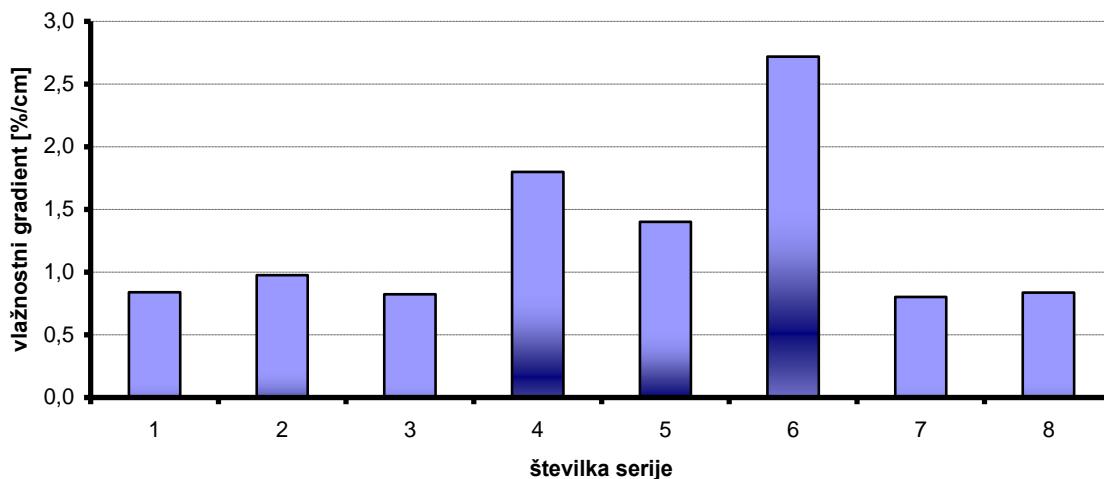
Kakovost sušenja smo ocenili z naslednjimi kriteriji: s povprečno končno vlažnostjo, z vlažnostnim gradientom, z oceno notranjih napetosti in z vizualno oceno mehanskih poškodb. Pred začetkom in po koncu sušenja smo vzorce vizualno ocenili in ugotovili, da so med sušenjem nastale razpoke in veženja zaradi strukture lesa in ne zaradi postopka sušenja (priloga A, B, C in D).

Po izvedbi kontrole kakovosti smo ugotovili, da so vzorci v povprečju večinoma kakovostno posušeni, vzorci 3. in 4. serije pa so bili glede na kvaliteto sušenja uvrščeni v prvi kakovostni razred. Najvišjo povprečno končno vlažnost so dosegli vzorci 7. serije (21 %), najnižjo pa vzorci 2. in 8. serije. Pri 7. seriji je povprečna končna vlažnost večja zaradi zniževanja temperature in zviševanja ravnovesne vlažnosti tik pred koncem sušenja 7. serije. Povprečne končne vlažnosti serij (razen 7.) se med seboj ne razlikujejo za več kot 1 % (sl. 4.18).



Slika 4.18: Povprečne končne vlažnosti vzorcev v posameznih serijah

Najvišji povprečni vlažnostni gradient je bil dosežen pri 6. seriji ( $2,7\text{ \%}/\text{cm}$ ), najnižji pa pri 7. seriji  $0,7\text{ \%}/\text{cm}$ . Od 2. do 6. serije opazimo trend naraščanja vlažnostnega gradienata, nato pa vlažnostni gradient pada (sl. 4.19).



**Slika 4.19:** Povprečni vlažnostni gradient vzorcev v posameznih serijah v  $\text{ \%}/\text{cm}$

## 5 RAZPRAVA

### 5.1 ODPISNOST SUŠENJA NA PROSTEM OD LETNEGA ČASA

#### 5.1.1 Potek sušenja na prostem

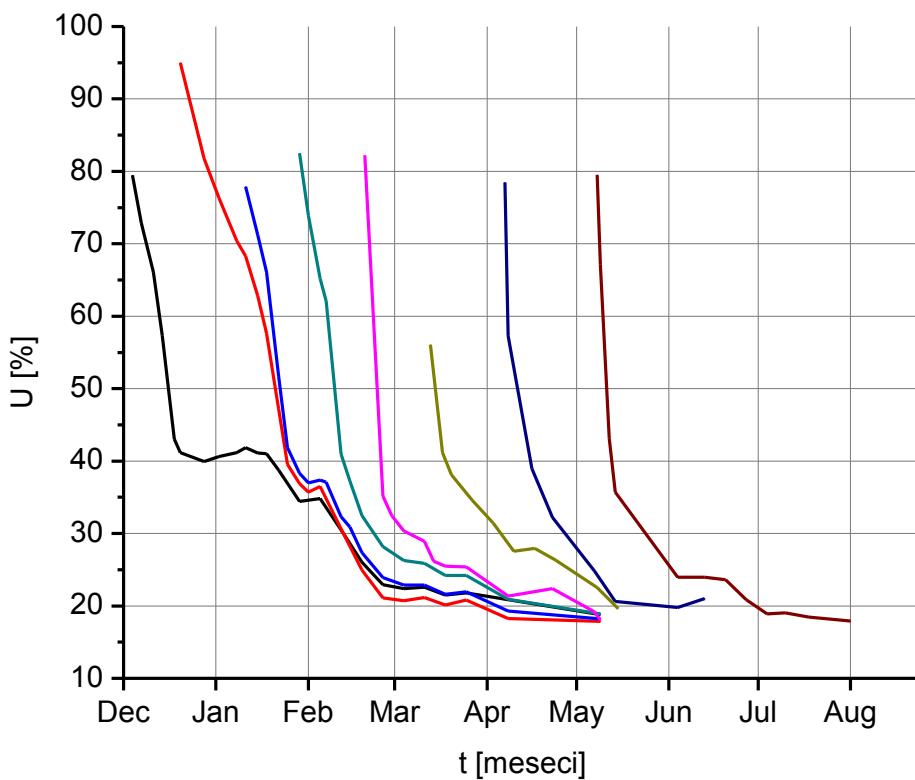
Spremljanje procesa sušenja na prostem je trajalo od 4. 12. 2007 do 1. 8. 2008. Iz slike 5.1 lahko vidimo nihanje začetnih vlažnosti pri posameznih serijah. Prišli smo do naslednjih ugotovitev.

Sušenje bukovine je potekalo zadovoljivo hitro, vendar je na potek sušenja na začetku postopka sušenja močno vplival letni čas. Ko se je iz vzorcev izločala prosta voda, nakazujejo krivulje sušenja linearno zmanjšanje lesne vlažnosti.

Najpočasneje so izgubljali vlažnost vzorci, ki so se sušili pozimi in sicer od decembra do januarja (1., 2. in 3. serija). Odmik od linearnosti se je pri prvih treh serijah pojavit po približno 3 tednih (nekje med 21. in 25. dnevom sušenja).

Ugotovili smo tudi, da je v času zimskega sušenja pri 1., 2. in 3. seriji zaradi nizkih temperatur in nizke ravnovesne vlažnosti prišlo do močne upočasnitve sušilnega procesa. Za take upočasnitve je krivo nihanje temperature in ravnovesne vlažnosti. Pri 1. seriji je do upočasnitve prišlo pri vlažnosti 40 %, upočasnitev je trajala 31 dni. Povzročilo jo je slabo vreme (dež, megla), ki je trajalo bolj ali manj ves december. Pri 2. in 3. seriji je upočasnitev sušenja nastopila pri vlažnosti pod 40 % in je pri 2. seriji trajala 7 dni, pri 3. seriji pa 6 dni. Pri ostalih serijah take upočasnitve ni bilo.

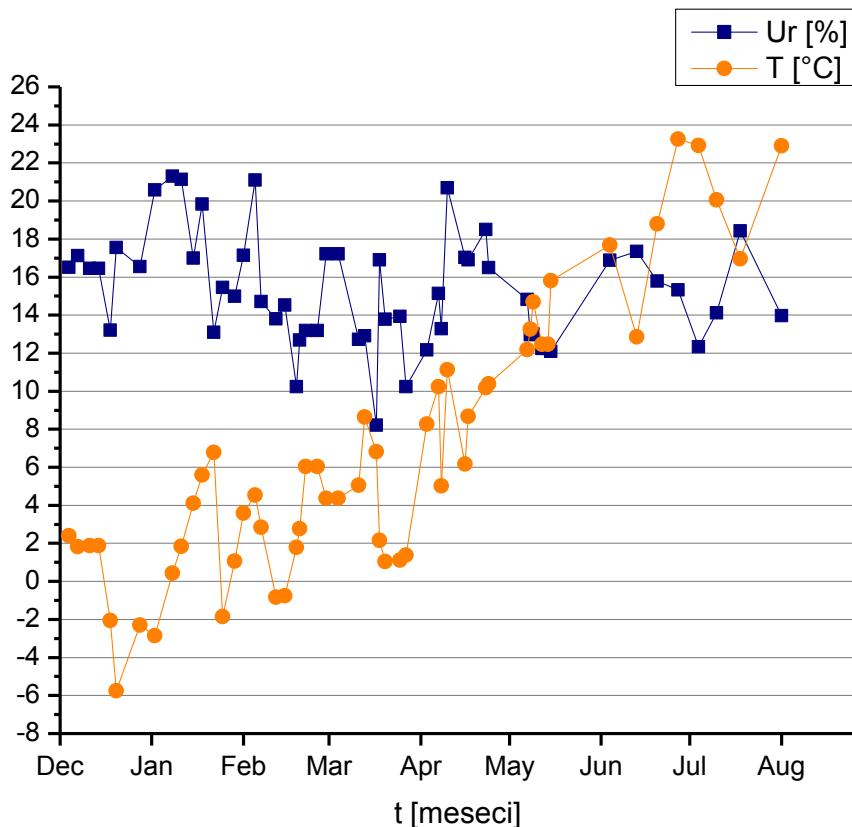
Od februarja dalje se je temperatura nekoliko dvignila in ravnovesna vlažnost pa je padla, zato se je 4. serija sušila nekoliko hitreje kot prve tri serije, tako da je do odmika od linearnosti pri tej krivulji prišlo že po 15 dneh. Krivulja 4. serije predstavlja nekakšno prehodno krivuljo med zimskim in spomladanskim sušenjem. Izjemno hitro se je (zlasti v svežem stanju) sušila 5. serija, kjer je povprečna vlažnost vzorcev je že v 6 dneh dosegla približne vrednosti TNCS ( $40 > u \geq 30$ ). Pri 6. seriji so imeli vzorci v primerjavi z vzorci iz ostalih serij najnižje začetne vlažnosti, ker je še pred začetkom sušenja pri manipulaciji z vzorci prišlo do nezaželenih izgub vlažnosti, na začetku sušenja pa so se zaradi močnega padca temperature (v 7 dneh se je temperatura znižala za približno  $7,5^{\circ}\text{C}$ ) in dviga ravnovesne vlažnosti nekoliko počasneje sušili. Zadnji dve seriji (7. in 8. serija) sta značilni krivulji sušenja za spomladanski čas, krivulja 8. serije pa ima že skoraj značilnosti poletnega sušenja. Pri 7. seriji se je odmik od linearnosti pojavit po 7 dneh, pri 8. seriji pa že po 5 dneh.



**Slika 5.1:** Krivulje sušenja na prostem v različnih letnih časih

Do izjemno hitrega sušenja pri 5. seriji je prišlo zaradi različnih vzrokov. Tako hitro sušenje lahko povzroči dvig temperature in padec ravnovesne vlažnosti na začetku sušenja serije (20. 2. 2008–26. 2. 2008). Drugi možen vzrok za tako hitro sušenje je veter, ki je v času začetka sušenja te serije pihal nekoliko močneje kot običajno. Tukaj je treba omeniti tudi to, da so bili vzorci 5. serije podvrženi glivni okužbi. To smo ugotovili na podlagi bele barve vzorcev. Iz slike 5.1 lahko razberemo, da je povprečna vlažnost pri 1. seriji dosegla vrednost 30 % po skoraj dveh mesecih, pri 2. seriji po dobrem mesecu in pol, pri 3. seriji po približno enemu mesecu, pri 4. seriji po približno 25 dneh, pri 6. in 7. seriji v približno 21 dneh, pri 8. seriji pa je lesna vlažnost padla na 30 % v 14 samo dneh.

S slik 5.1 in 5.2 lahko razberemo, da je čas sušenja pri posameznih serijah pogojen s temperaturo zraka in ravnovesno vlažnostjo. Na sliki 5.2 vidimo, da temperatura zraka od zime proti poletju vedno bolj narašča, ravnovesna vlažnost pa pada. Zaradi višjih temperatur in nižjih ravnovesnih vlažnosti je sušenje v poletnih mesecih hitrejše kot v zimskih mesecih. Na hitrost sušenja na prostem ugodno vpliva tudi hitrost vetra.



**Slika 5.2:** Spremembe klimatskih dejavnikov med procesom sušenja na prostem

### 5.1.2 Časi sušenja

Ugotovili smo močno odvisnost časa sušenja od klimatskih razmer tudi na krajša časovna obdobja. Ob močnih padavinah se je hitrost sušenja zelo upočasnila tako v zimskem kot tudi pomladnem obdobju in kot pričakovano so se hitrosti sušenja iz zimskega v pomladno obdobje povečevale. Ugotovili smo, da je tudi pri zelo ugodnih klimatskih pogojih sušenje na prostem pod 20 % vlažnosti časovno nesprejemljivo. Čeprav so vse serije, ki smo jih pričeli sušiti v marcu ali kasneje, relativno zelo hitro dosegle vlažnost pod točko nasičenja celičnih sten – pri serijah 5 in 8 v samo 16 oziroma 17 dneh (pregl. 5.1), se je nadaljevanje sušenja do nižjih vlažnosti tudi pri teh serijah pokazalo za neprimerno in predolgotrajno.

Vzorci, ki so se začeli sušiti pozimi (od decembra do februarja), so se do 20 % vlažnosti sušili od 140 do 74 dni. Vzorci, ki so se začeli sušiti poleti (od marca do maja), pa so se do 20 % vlažnosti sušili od 65 do 57 dni (pregl. 5.1). Do 40 % vlažnosti so se vzorci, ki so se sušili pozimi, sušili od 5 do 22 dni, vzorci, ki so se sušili spomladji, pa od 4 do 8 dni. V preglednici 5.1 vidimo, da so se vzorci v poletnem času sušili nekajkrat hitreje kot vzorci, ki so se sušili pozimi. Večje razlike v časih sušenja so opazne pri nižjih vlažnostih.

**Preglednica 5.1:** Povprečni časi sušenja (v dnevih) posameznih serij do različnih končnih vlažnosti

serija	končna vlažnost [%]					začetek sušenja
	40	35	30	25	20	
1	22	55	70	79	140	4. dec.
2	35	42	55	61	98	20. dec.
3	16	30	36	43	83	11. jan.
4	14	19	25	46	79	29. jan.
5	5	6	16	36	74	20. feb.
6	5	13	21	47	65	13. mar.
7	8	12	20	29	46	7. apr.
8	4	9	17	27	57	8. maj

## 5.2 HITROSTI SUŠENJA V ODVISNOSTI OD LETNEGA ČASA

Ugotovili smo, da je sušilna hitrost v toplejših mesecih višja od sušilne hitrosti v hladnejših mesecih. Hitrost sušenja se je pri vseh serijah upočasnila, ko je bila vlažnost vzorcev blizu območja nasičenja celičnih sten, v higroskopnem območju pa je hitrost sušenja ne glede na letno obdobje padala eksponentno.

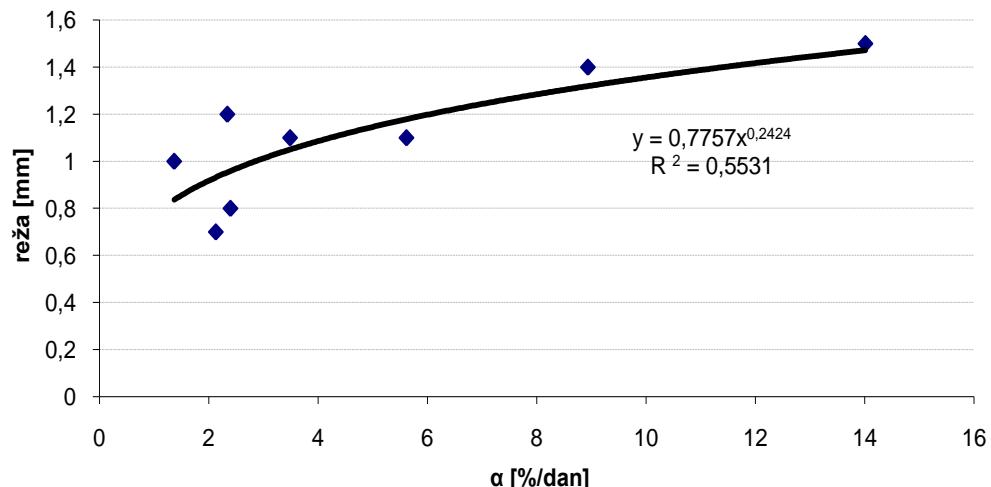
Povprečna sušilna hitrost je v zimskem obdobju (1.–5. serija) znašala 3,4 %/dan, v spomladanskem obdobju (6., 7. in 8. serija) pa 7,7 %/dan. Pri 7. seriji je bila hitrost izločanja proste vode na začetku sušenja (po 24 urah sušenja) nekoliko višja (tudi do 20,0 %/dan), vendar se je že v naslednjih 7 dneh močno zmanjšala, zato začetnih sušilnih hitrosti pri računanju povprečne sušilne hitrosti nismo upoštevali.

**Preglednica 5.2:** Maksimalna hitrost sušenja med izločanjem proste vode ( $a$ ), vlažnost eksponentnega pojemanja ( $u_c$ ) in pojemanje sušilne hitrosti pod točko  $u_c$  pri posamezni seriji

serija	<b>a</b> [%/dan]	<b>u<sub>c</sub></b> [%]	<b>k</b> [%]
<b>1</b>	2,3	47,0	0,245
<b>2</b>	1,3	37,0	0,425
<b>3</b>	2,1	44,6	0,0962
<b>4</b>	2,3	40,0	0,132
<b>5</b>	8,9	52,3	0,325
<b>6</b>	5,6	45,9	0,171
<b>7</b>	3,4	43,7	0,150
<b>8</b>	14,0	53,6	0,101

Najnižjo hitrost sušenja je pri izločanju proste vode dosegla 2. serija. Do tako nizke hitrosti je prišlo zaradi zelo nizkih temperatur in visoke ravnovesne vlažnosti. Prvih 20 dni sušenja je bila temperatura pod 0 °C (na začetku sušenja je dosegla -6 °C), ravnovesna vlažnost pa je bila nad 20 %.

Vzorec, ki je imel najvišjo sušilno hitrost ( $\alpha = 14,0 \text{ \% / dan}$ ), je imel najvišje notranje napetosti. Najnižje notranje napetosti pa je imel vzorec s sušilno hitrostjo  $\alpha = 2,1 \text{ \% / dan}$  (sl. 5.3). V grafu opazimo, da imajo podatki naraščajoč trend, iz česar sklepamo, da se velikost reže povečuje s hitrostjo izločanja proste vode, kar pomeni, da bodo imeli tisti vzorci, ki se bodo hitreje sušili, večje notranje napetosti.



Slika 5.3: Velikost reže v odvisnosti od hitrosti izločanja proste vode ( $\alpha$ )

## 6 SKLEPI

1. Temperaturna in vlažnostna nihanja okolice močno vplivajo na sam proces sušenja na prostem tudi pri nekoliko nižjih lesnih vlažnostih, še močnejši vpliv pa imajo temperaturna in vlažnostna nihanja v kombinaciji s slabim vremenom. Na hitrost sušenja najbolj ugodno vpliva dvig temperature. Temperaturnim nihanjem sorazmerno sledi tudi nihanje ravnovesne vlažnosti, vendar z določenim časovnim zamikom.
2. Proces sušenja na prostem je odvisen od časa sečnje oziroma letnega časa sušenja. V toplejših spomladanskih mesecih se bo les hitreje sušil kot v hladnejših zimskih mesecih. Največji in obenem najbolj neposreden vpliv na proces sušenja ima temperatura, sledita pa ji relativna zračna vlažnost in vremensko stanje – deževno in megleno vreme zaradi povišanja relativne zračne vlažnosti upočasnjuje proces sušenja na prostem.
3. Iz rezultatov eksperimenta smo ugotovili, da so se bukovi vzorci najhitreje sušili maja in junija, najpočasneje pa decembra. Najugodnejši čas za sušenje na prostem nastopi junija, najmanj ugoden mesec za sušenje na prostem pa je december.
4. S hitrostjo izločanja proste vode ( $a$ ) se povečuje tudi meja oziroma vlažnost prehoda v difuzijski režim sušenja ( $u_c$ ), kar zelo jasno nakazuje tudi eksperimentalno določena enačba:  $u_c = 37,782 \cdot a^{0.1362}$ .
5. Izkazalo se je, da je sušenje na prostem v glavnem smotrno le za sušenje do vlažnosti območja nasičenja celičnih sten. Če pa les sušimo decembra, je smotrno, da les osušimo na vlažnost, ki je nekoliko nad območjem nasičenja celičnih sten (40 %), preostanek sušenja pa se izvede s komorskim sušenjem. Če les sušimo v mesecu maju ali juniju, je sušenje smotrno tudi do vlažnosti, ki so nekoliko pod območjem nasičenja celičnih sten (25 %).
6. Močan veter pospeši proces sušenja. Veter, ki je pihal skozi zložaj, je bil še nekoliko močnejši od vetra, ki je dejansko pihal na prostem, ker se je zložaj nahajal na prepišnem mestu pod streho.
7. Pri vizualni oceni vzorcev smo ugotovili, da med samim procesom sušenja ni prišlo do nobenih napak. Vse napake, ki so se na vzorcih pojavile po sušenju, so bile posledica strukturnih napak lesa oziroma so bile prisotne že pred samim začetkom sušenja. Glede na oceno kakovosti sušenja smo ugotovili, da so bili vzorci kakovostno posušeni.
8. Kontrola kakovosti je pokazala, da so notranje napetosti višje pri serijah, ki so se sušile spomladi in poleti (5., 6., 7. in 8. serija) in nižje pri serijah, ki so se sušile pozimi. Ugotovljeno je bilo, da so notranje napetosti večje takrat, ko je hitrost sušenja večja. Vzorci iz 5. in 8. serije, ki so se najhitreje sušili, imajo tudi največje notranje napetosti.

## 7 POVZETEK

Sušenje na prostem je eden izmed ekonomičnih postopkov sušenja lesa. Sušilničar ima veliko možnosti in načinov, da izboljša kakovost sušenja lesa med postopkom, ne more pa bistveno vplivati na kinetiko sušenja. Kinetika sušenja je pri sušenju na prostem namreč odvisna od klimatskih pogojev, ti pa so odvisni od narave in človek nanje ne more vplivati. Klimatski pogoji med letom nihajo, zato se les v določenem letnem obdobju (letnem času) suši bolje kot v kakem drugem letnem obdobju.

Na prostem smo sušili bukov les (*Fagus sylvatica*) zaradi njegovih značilnih sušilnih lastnosti, problematike sušenja in razširjenosti drevesne vrste v lesni industriji. V eksperiment je bilo vključenih 8 serij bukovih vzorcev, ki so se sušili od 4. 12. 2008 do 1. 8. 2008. Spremembo vlažnosti smo pri vzorcih določali gravimetrično, med samim eksperimentom pa smo preučevali kinetiko sušenja v odvisnosti od klimatskih pogojev. Natančneje smo preučili potek sušenja (sušilna krivulja) in hitrost sušenja v odvisnosti od letnih klimatskih nihanj.

Rezultati so pokazali, da na kinetiko sušenja močno vplivajo temperaturna in vlažnostna nihanja in hitrost vetra. Od vseh klimatskih pogojev imajo na kinetiko sušenja največji vpliv temperaturna nihanja. Za sušenje na prostem so najbolj zavirajoči temperaturni padci v kombinaciji s slabim vremenom (dež, meglja in brezvetrje). Temperaturnemu padcu najpogosteje sledi zvišanje relativne zračne vlažnosti, kar še dodatno upočasni proces sušenja na prostem. Na kinetiko sušenja najbolj ugodno vpliva dvig temperature, zlasti v kombinaciji z lepim vremenom (sončno, jasno in vetrovno vreme). Vzorci so se najhitreje sušili na koncu pomladi (maja in junija), najslabše pa ob prehodu iz jeseni v zimo (decembra).

Na podlagi vizualne ocene vzorcev smo ugotovili, da med samim sušenjem na prostem ni prišlo do nobenih napak, ki bi bile posledice sušenja. Edine napake, ki so se pojavile med sušenjem, so bile posledica strukture lesa (razpoke), predhodnih poškodb na hlodovini ali kakršnihkoli drugih mehanskih poškodb terobarvanje vzorcev 5. serije zaradi glivne okužbe (bela trohnoba). Vsi vzorci so bili kakovostno posušeni (Q), dve seriji pa sta bili zelo kakovostno posušeni (E).

## 8 VIRI IN LITERATURA

- Air drying of lumber. 1999. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory:  
<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr117.pdf> (Prevzeto: 5. 2. 2008)
- Dimitrov T. 2002. Klima i prirodno sušenje drva. Zagreb, Leksikografski zavod Miroslav Krleža: 132 str.
- ENV 14464 (2002) Sawn timber – Method for assessment of case-hardening.
- Geršak M., Čop T., Gorišek Ž., Mrak C., Velušček V. 1986. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov gozdarstva in lesarstva Slovenije: 254 str.
- Geršak M., Velušček V. 2003. Sušenje lesa. Ljubljana, Lesarska založba: 194 str.
- Gorišek Ž. 1994. Točka nasičenja celičnih sten kot kritična točka v procesu sušenja lesa. Les, 46, 3: 53-58
- Gorišek Ž. 2004. Sušenje na prostem. Korak, 5, 5: 16–17
- Gorišek Ž. 2004a. Sušenje lesa. 1. del. Korak, 5, 1: 19
- Gorišek Ž. 2004b. Sušenje lesa. 2. del. Korak, 5, 2: 23
- Gorišek Ž. 2009. Les, zgradba in lastnosti, njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Gorišek Ž. 2006. Sušenje in termična obdelava lesa. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo (neobjavljen)
- Gorišek Ž., Geršak M., Velušček V., Čop T., Mrak C. 1994. Sušenje lesa. Lesarski priročnik 3. Ljubljana, Lesarska založba: 235 str.
- Guzenda R., Olek W., Golebiewska M. 2004. Computer-aided prediction of timber air pre-drying times and costs. V: Proceedings of the COST E15 Conference, 22–24 April 2004 Athens, Agricultural University of Poznan.
- Keey R. B., Langrish T. A. G., Walker J. C. F. 2000. Kiln drying of lumber. Berlin, Springer: 326 str.
- Kollmann F. P., Cote W. A. 1968. Principles of wood science and technology. Part 1: Solid wood. Berlin. Heidelberg, New York, Springer: 420–433
- Krpan J. 1958. Sušenje i parenje drva. Zagreb, Institut za drvnoindustrijsko istraživanje: 237 str.
- Peck E. C. 1956. Air drying of lumber. Madison, Wisconsin, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 69 str.

Siau J. F. 1995. Wood: Influence of moisture on physical properties. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University: 214 str.

Simpson W. T., Hart C. A. 2000. Estimates of air drying times for several hardwoods and softwoods. Madison, Wisconsin, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 70 str.

SIST EN 13183-1. Round and sawn timber – Method of measurement of moisture content. 2003.

Skaar C. 1988. Wood water relations. Berlin, Springer: 283 str.

Straže A., Gorišek Ž. 2007. CAE analiza in optimizacija porabe energije pri sušenju žaganega lesa z uvedbo predsušenja na prostem. Les, 59, 5: 5–6

Wood handbook: Wood as an engineering material. 1991. Madison, Wisconsin, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

## ZAHVALA

Za izvedbo diplomske naloge se lepo zahvaljujem svojemu mentorju, prof. dr. Željku Gorišku in asistentu dr. Alešu Stražetu, ki mi je vedno nudil pomoč pri eksperimentalnem delu diplomske naloge, ter recenzentu prof. dr. Primožu Ovnu.

Zahvaljujem se tudi podjetju LIKO Vrhnika in tehničnemu sodelavcu Luki Kržetu, ki mi je bil v veliko pomoč zlasti pri vzorčenju.

Najbolj sem hvaležen svoji punci Tanji, ki mi je pri oblikovanju in urejanju diplomskega dela nenehno pomagala in mi stala ob strani. Zahvala gre tudi vsej moji družini in sorodnikom in prijateljem, še posebej očetu in materi, ki sta mi med časom študija vedno nudila podporo.

Hvala tudi knjižničarkama Maji Cimerman in Darji Vranjek za vso pomoč pri iskanju literature v času študija.

## PRILOGE

### Priloga A: Vizualna ocena vzorcev 1. in 2. serije

vzorec	1. serija	2. serija
1	/	spiralna zvitost, polradialen element
2	razpoka na čelu, boku in površini zaradi prisotnosti stržena	blaga koritavost, tangencialen element
3	prisotna čelna razpoka ( $l = 240$ mm, $w = 1$ mm), prisotna že pred sušenjem	/
4	lokavost, prisotnost vraslih grč in tenzijskega lesa (bele črtaste lise) na 1 boku	močna lokavost, zmerna koritavost in spiralna zvitost, tengencialen element, tenzijski les na obeh bokih
5	blaga spiralna zvitost, tangencialen element	zmerna sabljavost, 2 vrasli grči
6	blaga koritavost, polradialen element	/
7	spiralna zvitost, prisotnost vrasle grče	/
8	/	/
9	/	zmerna lokavost, blaga koritavost, tangencialen element, tenzijski les na 1 boku (6 cm dolga lisa), čelna razpoka – nastala pred začetkom sušenja
10	/	izpadna grča, blaga koritavost, polradialna deska, polradialen element

**Priloga B:** Vizualna ocena vzorcev iz 3., 4. in 5. serije.

vzorec	3. serija	4. serija	5. serija
1	/	/	čelna razpoka po celotni debelni ( $w = 1 \text{ mm}$ , $l = 70 \text{ mm}$ ) – pojavi se pred začetkom sušenja
2	blaga koritavost, spiralna zvitost, tangencialen element	zmerna koritavost, 2 zdravi prebijajoči grči ( $d = 50 \text{ mm}$ ), čelne razpoke zaradi prisotnosti stržena, tangencialen element	razpoke na grčah
3	zmerna lokavost, blaga koritavost, tangencialna deska	velika čelna razpoka, kot posledica mehanske poškodbe in sataste razpoke, se pojavijo pred začetkom sušenja	/
4	izpadna prebijajoča grča ( $d = 25 \text{ mm}$ ), čelna razpoka po celotno debelini – nastala pred začetkom sušenja	/	/
5	zmerna koritavost, tangencialna deska	sabljavost, tangencialna deska, prisotnost vraslih grč	razpoke na grčah
6	zmerna koritavost, majhna izpadna grča, tangencialen element	sabljavost, tangencialna deska, prisotnost vraslih grč in blaga spiralna zavitost, tenzijski les	razpoke na grčah, blaga koritavost in spiralna zvitost, polradialen element
7	zmerna spiralna zvitost, močna sabljavost, koritavost, tenzijski les	/	razpoke na grčah, blaga koritavost, polradialen element
8	minimalna spiralna zvitost	razpoke na grčah	blaga koritavost, tangencialen element
9	/	razpoke na grčah	/
10	/	blaga koritavost, polradialen element	/

**Priloga C:** Vizualne ocene vzorcev iz 6. serije

vzorec	6. serija		vzorec
1	koritavost, tangencialen element	/	10
2	/	blaga sabljavost, tangencialen element, vrasle grče	11
3	/	/	12
4	vrasla grča, zmerna zvitost na območju grče	/	13
5	/	/	14
6	koritavost, tangencialen element	blaga koritavost, tangencialen element	15
7	/	blaga lokavost, polradialen element	16
8	blaga koritavost in lokavost, prisotnost tenzijskega lesa	/	17
9	bočne razpoke zaradi prisotnosti stržena	/	18

**Priloga D:** Vizualne ocene vzorcev iz 6. Serije

vzorec	7. serija	8. serija
1	/	/
2	spiralna zvitost in lokavost, tangencialen element	lokavost, prisotnost tenzijskega lesa, razpoke na površini zaradi stržena, polradialen element
3	čelna razpoka po celotno debelini ( $w = 2 \text{ mm}$ , $l = 20 \text{ cm}$ ) – nastala pred začetkom sušenja	blaga spiralna zvitost, močna sabljavost, 2 nagniti grči ( $d = 10 \text{ mm}$ ), tangencialen element
4	/	čelna razpoka ( $w = 1 \text{ mm}$ , $l = 8 \text{ cm}$ ), površinske razpoke zaradi stržena
5	blaga koritavost, polradialen element	lokavost, površinske in bočne razpoke zaradi stržena, polradialen element
6	blaga lokavost, prisotnost tenzijskega lesa, tangencialen element	blaga spiralna zvitost, lokavost, zdrava grča ( $d = 3 \text{ cm}$ ), tangencialen element
7	/	/
8	/	močna lokavost, prisotnost tenzijskega lesa, tangencialen element
9	/	blaga lokavost in spiralna zvitost, tangencialen element
10	/	blaga lokavost, tangencialen element

**Priloga E:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja (v) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 1. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

Datum	4.12.07	11.12.07	18.12.07	28.12.07	8.1.08	15.1.08	22.1.08	5.2.08	19.2.08	4.3.08	18.3.08	9.5.08	
<b>Dan</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>24</b>	<b>35</b>	<b>42</b>	<b>49</b>	<b>63</b>	<b>77</b>	<b>91</b>	<b>105</b>	<b>161</b>	
<b>Ur [%]</b>	16,5	16,4	13,2	16,5	21,2	16,9	13,1	21,1	10,2	17,2	16,9	13,0	
<b>Tp [°C]</b>	2,4	1,9	-2,1	-2,3	0,4	4,1	6,8	4,5	1,9	4,4	2,2	14,7	
<b><math>\phi</math> [%]</b>	0,80	0,80	0,68	0,80	0,90	0,80	0,66	0,90	0,51	0,78	0,77	0,59	
<b>1</b>	<b>Ut [%]</b>	79,6	65,4	45,0	43,4	44,4	44,4	42,2	37,9	27,5	23,1	22,0	19,0
	<b>v [%/dan]</b>		1,43	3,30	0,01	-0,09	0,09	0,44	-0,08	0,74	0,13	0,19	0,07
	<b>Uv [%]</b>		68,2	51,6	43,4	44,1	44,6	43,0	37,7	30,1	23,6	22,6	20,6
<b>2</b>	<b>Ut [%]</b>	68,2	57,6	40,8	39,5	40,1	40,3	37,6	34,3	26,3	22,8	22,1	19,9
	<b>v [%/dan]</b>		1,49	1,73	0,05	-0,05	0,17	0,66	-0,14	0,64	0,08	0,14	0,06
	<b>Uv [%]</b>		60,5	44,3	39,7	39,9	40,6	38,9	33,8	28,5	23,1	22,6	21,2
<b>3</b>	<b>Ut [%]</b>	81,9	68,0	40,8	34,0	39,8	39,0	36,8	32,6	24,0	21,1	20,5	18,2
	<b>v [%/dan]</b>		1,64	4,68	0,63	-0,11	0,39	0,60	-0,09	0,62	0,01	0,13	0,06
	<b>Uv [%]</b>		71,3	50,1	36,6	39,5	39,8	38,0	32,3	26,2	21,1	21,0	19,6
<b>4</b>	<b>Ut [%]</b>	77,1	63,9	43,7	42,4	43,7	43,6	41,4	37,0	28,3	23,6	22,2	18,7
	<b>v [%/dan]</b>		1,46	3,00	0,02	-0,12	0,17	0,45	0,11	0,65	0,14	0,18	0,07
	<b>Uv [%]</b>		66,8	49,7	42,5	43,4	43,9	42,3	37,4	30,6	24,1	22,9	20,4
<b>5</b>	<b>Ut [%]</b>	72,6	61,2	42,1	41,0	42,3	42,2	39,6	35,5	26,8	23,0	22,1	19,5
	<b>v [%/dan]</b>		1,24	2,78	-0,01	-0,17	0,19	0,58	-0,02	0,65	0,10	0,19	0,06
	<b>Uv [%]</b>		63,7	47,7	40,9	41,8	42,6	40,7	35,4	29,0	23,4	22,7	20,9
<b>6</b>	<b>Ut [%]</b>	61,7	49,7	37,4	36,6	37,6	37,9	35,6	32,8	25,0	22,2	21,5	18,7
	<b>v [%/dan]</b>		1,71	1,35	0,01	-0,13	0,10	0,62	-0,07	0,58	0,07	0,15	0,06
	<b>Uv [%]</b>		53,2	40,1	36,7	37,2	38,1	36,8	32,5	27,1	22,4	22,0	20,2
<b>7</b>	<b>Ut [%]</b>	90,5	77,6	48,9	43,3	43,2	43,5	41,3	36,3	26,5	22,7	21,4	18,5
	<b>v [%/dan]</b>		1,96	4,88	0,30	-0,02	0,09	0,50	-0,05	0,70	0,10	0,18	0,07
	<b>Uv [%]</b>		81,5	58,6	44,5	43,1	43,7	42,2	36,1	28,9	23,0	22,0	20,1
<b>8</b>	<b>Ut [%]</b>	92,8	77,4	43,4	37,7	38,1	38,3	35,7	31,7	23,2	20,3	19,9	17,9
	<b>v [%/dan]</b>		1,85	6,17	0,32	-0,06	0,11	0,68	-0,04	0,58	0,04	0,13	0,05
	<b>Uv [%]</b>		81,1	55,7	39,0	37,9	38,5	37,0	31,6	25,2	20,5	20,3	19,1
<b>9</b>	<b>Ut [%]</b>	77,9	64,4	44,5	42,8	43,5	43,7	41,0	37,2	29,1	24,6	23,2	19,5
	<b>v [%/dan]</b>		2,06	2,55	0,07	-0,06	0,21	0,59	-0,06	0,63	0,11	0,20	0,08
	<b>Uv [%]</b>		68,5	49,7	43,1	43,4	44,1	42,2	37,0	31,3	25,0	23,9	21,4
<b>10</b>	<b>Ut [%]</b>	92,1	75,6	43,4	38,6	39,2	38,1	36,4	32,6	23,7	20,4	20,1	17,9
	<b>v [%/dan]</b>		2,14	5,38	0,15	-0,11	0,38	0,51	-0,09	0,55	0,04	0,11	0,05
	<b>Uv [%]</b>		79,9	54,2	39,3	38,9	38,8	37,4	32,3	25,7	20,5	20,5	19,1

**Priloga F:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja (v) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 2. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

Datum	20.12.07	28.12.07	2.1.08	11.1.08	18.1.08	25.1.08	1.2.08	12.2.08	26.2.08	11.3.08	8.4.08	9.5.08
Dan	0	8	13	22	29	36	43	54	68	82	103	141
Ur [%]	17,6	16,6	20,6	21,1	19,8	15,5	17,1	13,8	13,2	12,7	13,3	13,0
Tpov [°C]	-5,8	-2,3	-2,9	1,8	5,6	-1,9	3,6	-0,8	6,0	5,1	5,0	14,7
φ [%]	0,83	0,80	0,88	0,90	0,88	0,75	0,80	0,68	0,63	0,57	0,66	0,59
1	Ut [%]	108,9	92,5	87,0	77,2	66,0	47,2	39,6	31,1	20,8	21,3	18,4
	v [%/dan]		2,06	1,09	0,98	1,72	2,99	0,57	1,37	0,52	-0,08	0,39
	Uv [%]		100,7	89,8	78,6	68,5	51,7	40,4	35,9	22,7	21,0	19,8
2	Ut [%]	78,1	64,4	60,5	54,9	49,6	35,9	33,8	30,1	20,6	20,6	17,7
	v [%/dan]		1,71	0,77	0,47	0,89	1,47	0,10	0,70	0,55	-0,07	0,36
	Uv [%]		71,2	62,5	55,6	50,9	38,2	33,9	32,5	22,5	20,4	19,0
3	Ut [%]	89,9	76,1	72,3	65,3	56,4	39,0	33,4	32,2	22,3	22,0	19,0
	v [%/dan]		1,72	0,78	0,82	1,74	2,61	1,35	0,14	0,64	-0,04	0,34
	Uv [%]		83,0	74,2	66,6	59,0	43,0	35,4	32,7	24,6	21,9	20,2
4	Ut [%]	89,2	78,8	72,9	64,9	55,8	39,1	36,6	31,4	22,2	21,5	18,5
	v [%/dan]		1,30	1,18	0,64	1,78	1,34	0,23	0,85	0,49	0,11	0,37
	Uv [%]		84,0	75,8	65,9	58,4	41,1	36,9	34,4	23,9	21,9	19,8
5	Ut [%]	110,6	95,5	89,6	81,9	68,8	40,1	35,7	29,3	20,1	21,0	18,2
	v [%/dan]		1,89	1,19	0,60	2,48	5,26	0,24	0,98	0,56	-0,13	0,37
	Uv [%]		103,1	92,6	82,8	72,5	47,9	36,0	32,7	22,1	20,5	19,5
6	Ut [%]	77,7	64,9	61,4	56,2	49,4	37,0	35,1	31,1	22,2	21,6	18,4
	v [%/dan]		1,68	1,30	0,72	1,83	2,95	0,34	1,18	0,54	-0,12	0,34
	Uv [%]		71,3	63,1	56,8	51,0	39,7	35,4	33,4	24,0	21,4	19,7
7	Ut [%]	102,9	89,5	83,0	74,1	61,8	43,0	37,9	30,0	20,6	21,0	18,2
	v [%/dan]		1,61	0,70	0,41	1,06	1,79	0,20	0,68	0,54	-0,04	0,37
	Uv [%]		96,2	86,2	75,2	64,5	47,4	38,4	34,2	22,5	20,6	19,4
8	Ut [%]	98,4	86,4	79,2	69,9	54,5	37,8	35,0	29,4	20,5	20,7	18,1
	v [%/dan]		1,50	1,45	0,67	2,07	1,77	0,36	0,89	0,57	-0,08	0,36
	Uv [%]		92,4	82,8	70,9	57,6	40,4	35,5	32,5	22,5	20,4	19,4
9	Ut [%]	94,0	84,1	78,5	70,5	58,0	37,5	34,5	29,8	21,0	20,8	17,9
	v [%/dan]		1,24	1,12	0,83	2,14	2,45	0,31	0,84	0,51	-0,05	0,34
	Uv [%]		89,1	81,3	71,8	61,2	41,1	35,0	32,8	22,8	20,6	19,1
10	Ut [%]	100,1	85,4	78,6	68,1	56,5	38,9	35,6	31,8	20,9	20,9	18,2
	v [%/dan]		1,84	1,35	0,90	1,50	2,93	0,24	0,75	0,56	-0,08	0,39
	Uv [%]		92,8	82,0	69,5	58,7	43,3	36,0	34,4	22,8	20,6	19,5

**Priloga G:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja (v) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 3. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\varphi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

	Datum	11.1.08	18.1.08	25.1.08	1.2.08	7.2.08	15.2.08	26.2.08	11.3.08	18.3.08	25.3.08	8.4.08	9.5.08
	Dan	0	7	14	21	27	35	46	60	67	74	88	119
	Ur [%]	21,1	19,8	15,5	17,1	14,7	14,5	13,2	12,7	16,9	13,9	13,3	13,0
	Tp [°C]	1,8	5,6	-1,9	3,6	2,8	-0,8	6,0	5,1	2,2	1,1	5,0	14,7
	φ [%]	0,90	0,88	0,75	0,80	0,66	0,72	0,63	0,57	0,77	0,66	0,66	0,59
1	Ut [%]	68,9	56,7	36,7	33,9	33,8	29,5	22,8	21,9	20,8	21,3	18,8	18,0
	v [%/dan]		1,18	2,24	0,25	0,36	0,32	0,44	0,01	0,15	-0,07	0,17	0,03
	Uv [%]		58,5	40,1	34,3	34,2	29,9	24,4	21,9	21,3	21,0	20,1	18,4
2	Ut [%]	67,3	55,9	40,0	36,7	36,8	31,5	24,3	23,0	21,8	22,1	19,5	18,6
	v [%/dan]		1,42	1,90	0,28	0,16	0,54	0,49	0,02	0,16	-0,03	0,18	0,03
	Uv [%]		58,0	42,8	37,1	37,0	32,3	26,1	23,0	22,4	21,9	20,8	19,0
3	Ut [%]	70,4	57,8	38,3	36,0	36,5	30,4	23,9	22,9	21,6	21,9	19,2	18,0
	v [%/dan]		1,84	2,92	0,15	0,05	0,35	0,50	0,00	0,17	-0,04	0,19	0,04
	Uv [%]		60,6	42,7	36,3	36,5	30,9	25,7	22,9	22,2	21,8	20,5	18,6
4	Ut [%]	64,5	55,0	43,4	38,7	38,8	32,1	25,4	23,9	22,4	22,5	19,9	18,4
	v [%/dan]		1,58	1,43	0,56	0,12	0,62	0,50	0,03	0,22	-0,02	0,19	0,05
	Uv [%]		57,4	45,6	39,6	38,9	33,0	27,2	24,0	23,2	22,5	21,2	19,1
5	Ut [%]	67,1	55,8	42,4	38,0	37,7	31,6	25,2	23,9	22,6	22,8	20,1	18,5
	v [%/dan]		1,68	1,36	0,35	0,15	0,62	0,49	0,02	0,18	-0,03	0,19	0,05
	Uv [%]		58,4	44,5	38,5	37,8	32,6	27,0	24,0	23,3	22,7	21,5	19,3
6	Ut [%]	102,8	92,3	55,6	40,8	39,9	31,9	23,5	22,4	21,2	21,6	19,0	17,9
	v [%/dan]		1,90	6,16	1,40	0,27	0,72	0,58	0,01	0,18	-0,05	0,18	0,04
	Uv [%]		95,2	64,8	42,9	40,1	33,0	25,6	22,5	21,8	21,4	20,3	18,4
7	Ut [%]	60,1	51,9	38,9	35,4	36,2	29,9	23,7	22,8	21,7	21,9	19,5	18,0
	v [%/dan]		1,15	1,88	0,23	0,02	0,29	0,43	0,01	0,16	-0,04	0,17	0,05
	Uv [%]		53,6	41,7	35,8	36,2	30,3	25,2	22,9	22,2	21,8	20,7	18,8
8	Ut [%]	94,8	78,2	42,0	37,0	37,0	30,0	22,6	21,7	20,5	20,9	18,4	17,5
	v [%/dan]		2,12	5,27	0,49	0,19	0,39	0,50	-0,01	0,17	-0,06	0,18	0,03
	Uv [%]		81,4	49,9	37,8	37,1	30,6	24,3	21,7	21,1	20,7	19,6	18,0
9	Ut [%]	103,8	90,4	41,9	37,3	37,1	30,5	22,9	22,3	21,1	21,7	18,9	18,4
	v [%/dan]		2,23	6,87	0,32	0,21	0,53	0,48	-0,03	0,18	-0,08	0,20	0,02
	Uv [%]		93,8	52,2	37,7	37,3	31,3	24,6	22,2	21,7	21,4	20,3	18,7
10	Ut [%]	79,4	66,8	39,3	36,1	37,0	31,5	24,6	23,8	22,4	22,7	19,7	18,7
	v [%/dan]		2,13	2,95	0,29	0,01	0,34	0,50	-0,03	0,21	-0,05	0,21	0,03
	Uv [%]		70,0	43,7	36,5	37,0	32,0	26,3	23,7	23,1	22,5	21,2	19,2

**Priloga H:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja (v) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 4. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

Datum	29.1.06	5.2.08	12.2.08	15.2.08	19.2.08	26.2.08	4.3.08	11.3.08	18.3.08	25.3.08	8.4.08	9.5.08
Dan	0	7	14	17	21	28	35	42	49	56	70	101
Ur [%]	15,0	21,1	13,8	14,5	10,2	13,2	17,2	12,7	16,9	13,9	13,3	13,0
Tp [°C]	1,1	4,5	-0,8	-0,8	1,8	6,0	4,4	5,1	2,2	1,1	5,0	14,7
φ [%]	0,72	0,90	0,68	0,72	0,51	0,63	0,78	0,57	0,77	0,66	0,66	0,59
1 Ut [%]	90,0	70,0	41,6	36,6	31,4	27,1	25,4	24,9	23,3	23,3	20,2	17,9
v [%/dan]		2,30	5,01	1,66	1,32	0,61	0,25	0,07	0,23	-0,01	0,22	0,08
Uv [%]		74,6	54,1	39,1	34,0	29,2	26,2	25,1	24,1	23,3	21,8	19,0
2 Ut [%]	55,1	43,9	35,5	34,4	30,5	26,8	25,4	25,0	23,5	23,5	20,3	17,7
v [%/dan]		1,23	1,39	0,36	0,98	0,52	0,20	0,07	0,21	-0,01	0,23	0,08
Uv [%]		46,4	39,0	35,0	32,5	28,7	26,1	25,2	24,2	23,5	21,9	19,0
3 Ut [%]	84,8	64,4	42,6	39,0	34,6	29,9	27,8	27,3	25,4	25,4	21,8	19,0
v [%/dan]		2,69	3,53	1,19	1,11	0,67	0,30	0,07	0,26	0,00	0,26	0,09
Uv [%]		69,8	51,4	40,8	36,8	32,2	28,8	27,5	26,3	25,4	23,6	20,4
4 Ut [%]	77,4	64,0	39,8	36,6	32,5	28,5	26,8	26,4	24,7	24,6	21,2	18,9
v [%/dan]		1,94	4,26	1,07	1,03	0,58	0,24	0,05	0,24	0,01	0,25	0,07
Uv [%]		67,9	50,5	38,2	34,6	30,5	27,6	26,6	25,6	24,7	22,9	20,1
5 Ut [%]	84,6	68,4	41,2	38,0	33,4	28,9	27,0	26,3	24,6	24,7	21,3	19,4
v [%/dan]		2,03	4,69	1,06	1,16	0,64	0,27	0,09	0,24	0,00	0,24	0,06
Uv [%]		72,5	52,9	39,6	35,7	31,1	27,9	26,7	25,5	24,6	23,0	20,4
6 Ut [%]	80,7	62,2	42,6	39,3	34,2	29,1	27,2	26,9	25,0	25,1	21,5	20,0
v [%/dan]		1,99	3,41	1,09	1,28	0,73	0,27	0,05	0,26	-0,01	0,26	0,05
Uv [%]		66,2	51,1	41,0	36,8	31,6	28,1	27,0	25,9	25,1	23,3	20,7
7 Ut [%]	94,0	75,0	42,1	36,6	31,4	27,2	25,6	25,2	23,7	23,9	20,8	19,3
v [%/dan]		2,45	5,91	1,84	1,31	0,59	0,23	0,05	0,22	-0,02	0,22	0,05
Uv [%]		79,9	56,9	39,4	34,0	29,3	26,4	25,4	24,5	23,8	22,3	20,0
8 Ut [%]	89,1	71,9	38,9	35,6	31,2	27,4	25,6	25,2	23,7	23,8	20,7	18,7
v [%/dan]		2,27	5,95	1,10	1,08	0,55	0,25	0,06	0,22	-0,02	0,22	0,06
Uv [%]		76,5	53,7	37,2	33,4	29,3	26,5	25,4	24,4	23,7	22,2	19,7
9 Ut [%]	77,7	61,0	40,7	36,3	31,1	27,6	25,1	24,9	23,2	23,2	20,2	18,5
v [%/dan]		2,31	3,59	1,46	1,30	0,49	0,36	0,03	0,24	-0,01	0,22	0,05
Uv [%]		65,6	49,7	38,5	33,7	29,4	26,4	25,0	24,0	23,2	21,7	19,4
10 Ut [%]	91,9	71,2	44,5	39,9	34,4	29,1	27,0	26,5	24,7	24,7	21,3	19,5
v [%/dan]		2,49	4,53	1,51	1,39	0,75	0,31	0,07	0,25	0,01	0,24	0,06
Uv [%]		76,2	55,8	42,2	37,2	31,8	28,1	26,8	25,6	24,7	23,0	20,4

**Priloga I:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja (v) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 5. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\varphi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

Datum	20.2.08	22.2.08	26.2.08	29.2.2007	4.3.08	11.3.08	18.3.08	25.3.08	8.4.08	23.4.08	7.5.08	9.5.08
Dan	0	6	9	13	20	23	27	34	48	63	77	79
Ur [%]	12,7	13,2	16,4	17,2	12,7	13,2	16,9	13,9	13,3	18,5	14,8	13,0
T <sub>pov</sub> [°C]	2,8	6,0	5,9	4,4	5,1	-0,9	2,2	1,1	5,0	10,2	12,2	14,7
φ [%]	0,65	0,63	0,78	0,78	0,57	0,64	0,77	0,66	0,66	0,80	0,65	0,59
1 Ut [%]	75,9	33,9	31,6	29,5	28,1	25,6	25,2	25,2	20,8	22,5	19,2	18,3
v [%/dan]		7,00	0,76	0,53	0,20	0,84	0,09	0,01	0,31	-0,11	0,24	0,48
U <sub>v</sub> [%]		54,9	30,2	28,1	26,3	24,4	23,0	22,8	20,6	19,3	18,6	16,4
2 Ut [%]	76,4	35,6	32,9	30,5	29,0	26,4	26,0	26,0	21,4	22,2	18,9	18,0
v [%/dan]		6,80	0,91	0,60	0,21	0,88	0,08	0,00	0,33	-0,05	0,23	0,47
U <sub>v</sub> [%]		56,0	32,6	30,1	28,2	26,1	24,7	24,5	22,2	20,3	19,1	17,0
3 Ut [%]	83,5	36,6	33,6	30,9	29,4	26,5	21,7	21,6	21,5	21,2	18,6	17,9
v [%/dan]		7,83	0,98	0,68	0,22	0,97	1,20	0,01	0,00	0,02	0,19	0,36
U <sub>v</sub> [%]		60,0	34,5	31,7	29,6	27,4	23,5	21,1	21,0	20,9	19,4	17,7
4 Ut [%]	82,6	34,5	32,0	29,6	28,1	25,2	25,1	24,9	20,7	21,9	18,8	17,7
v [%/dan]		8,01	0,86	0,59	0,22	0,94	0,03	0,03	0,30	-0,08	0,23	0,51
U <sub>v</sub> [%]		58,6	31,6	29,1	27,2	25,1	23,6	23,4	21,2	19,7	18,8	16,7
5 Ut [%]	85,8	35,9	33,0	30,5	28,8	25,9	25,7	25,6	20,7	21,5	18,6	17,8
v [%/dan]		8,32	0,98	0,62	0,24	0,97	0,05	0,02	0,35	-0,05	0,21	0,39
U <sub>v</sub> [%]		60,9	34,2	31,5	29,5	27,2	25,6	25,4	23,0	20,9	19,9	18,0
6 Ut [%]	78,5	35,3	32,7	30,3	28,8	26,1	25,9	25,8	21,2	24,5	21,0	17,8
v [%/dan]		7,20	0,84	0,60	0,22	0,91	0,04	0,02	0,33	-0,22	0,25	1,61
U <sub>v</sub> [%]		56,9	36,1	33,6	31,7	29,5	28,0	27,9	25,4	24,8	24,7	21,3
7 Ut [%]	73,6	36,7	33,9	31,4	29,8	27,0	26,8	26,6	22,1	23,4	19,9	19,1
v [%/dan]		6,16	0,92	0,63	0,23	0,93	0,05	0,02	0,32	-0,09	0,25	0,41
U <sub>v</sub> [%]		55,2	34,6	32,0	29,9	27,7	26,2	26,0	23,7	22,1	21,0	18,9
8 Ut [%]	87,7	33,4	31,3	29,3	28,2	25,6	25,4	25,3	20,9	22,5	19,3	18,3
v [%/dan]		9,05	0,73	0,48	0,16	0,87	0,06	0,01	0,31	-0,11	0,23	0,51
U <sub>v</sub> [%]		60,6	30,0	28,0	26,5	24,6	23,2	23,1	20,9	19,5	18,8	16,6
9 Ut [%]	89,7	36,5	34,4	32,5	31,3	28,6	28,5	28,2	24,0	22,4	19,3	18,2
v [%/dan]		8,87	0,72	0,48	0,16	0,90	0,04	0,03	0,30	0,11	0,22	0,54
U <sub>v</sub> [%]		63,1	33,3	31,3	29,7	27,9	26,4	26,2	24,1	21,2	18,9	16,9
10 Ut [%]	88,2	33,2	29,0	28,9	27,7	25,0	24,7	24,7	20,0	21,7	18,2	17,3
v [%/dan]		9,16	1,41	0,03	0,17	0,89	0,07	0,01	0,34	-0,11	0,25	0,47
U <sub>v</sub> [%]		60,7	31,7	29,5	28,8	26,9	25,4	25,2	22,8	21,3	20,5	18,3

**Priloga J:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja (v) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 6. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

Datum	13.3.08	17.3.08	20.3.08	27.3.08	3.4.08	10.4.08	17.4.08	24.4.08	8.5.08	15.5.08
Dan	0	4	7	14	19	26	33	40	59	66
Ur [%]	12,91	8,21	13,79	10,23	12,16	20,69	16,89	16,49	12,96	12,09
T <sub>pov</sub> [°C]	8,65	6,82	1,04	1,38	8,28	11,12	8,67	10,39	13,25	15,81
φ [%]	0,61	0,41	0,67	0,46	0,59	0,88	0,75	0,70	0,59	0,58
1	Ut [%]	66,10	46,28	41,69	36,60	32,26	26,54	27,92	26,55	22,59
	v [%/dan]		4,95	1,53	0,73	0,87	0,82	-0,20	0,20	0,21
	Uv [%]		56,19	43,99	39,14	34,43	29,40	27,23	27,23	24,57
2	Ut [%]	63,36	43,61	38,46	35,42	31,86	22,18	28,34	26,39	22,41
	v [%/dan]		4,94	1,71	0,43	0,71	1,38	-0,88	0,28	0,21
	Uv [%]		53,48	41,03	36,94	33,64	27,02	25,26	27,37	24,40
3	Ut [%]	46,07	32,48	38,43	35,98	33,13	11,55	29,48	28,21	24,14
	v [%/dan]		3,40	-1,98	0,35	0,57	3,08	-2,56	0,18	0,21
	Uv [%]		39,28	35,46	37,20	34,55	22,34	20,52	28,84	26,17
4	Ut [%]	50,54	40,56	37,62	35,03	31,51	-2,78	29,01	26,75	22,93
	v [%/dan]		2,50	0,98	0,37	0,70	4,90	-4,54	0,32	0,20
	Uv [%]		45,55	39,09	36,33	33,27	14,36	13,11	27,88	24,84
5	Ut [%]	67,37	48,66	41,94	36,80	33,87	29,49	30,09	27,80	23,59
	v [%/dan]		4,68	2,24	0,73	0,59	0,63	-0,09	0,33	0,22
	Uv [%]		58,01	45,30	39,37	35,34	31,68	29,79	28,94	25,69
6	Ut [%]	57,60	39,85	38,37	37,06	33,58	30,66	29,61	28,59	24,49
	v [%/dan]		4,44	0,49	0,19	0,69	0,42	0,15	0,15	0,22
	Uv [%]		48,72	39,11	37,71	35,32	32,12	30,13	29,10	26,54
7	Ut [%]	46,32	38,40	35,40	32,90	30,28	26,78	26,97	25,65	21,95
	v [%/dan]		1,98	1,00	0,36	0,52	0,50	-0,03	0,19	0,20
	Uv [%]		42,36	36,90	34,15	31,59	28,53	26,87	26,31	23,80
8	Ut [%]	69,13	45,65	41,07	37,54	33,39	12,57	29,47	27,67	24,24
	v [%/dan]		5,87	1,53	0,50	0,83	2,98	-2,41	0,26	0,18
	Uv [%]		57,39	43,36	39,31	35,47	22,98	21,02	28,57	25,96
9	Ut [%]	53,18	34,47	39,10	33,97	33,06	29,32	29,60	30,30	23,71
	v [%/dan]		4,68	-1,54	0,73	0,18	0,53	-0,04	-0,10	0,35
	Uv [%]		43,83	36,78	36,54	33,52	31,19	29,46	29,95	27,00

- se nadaljuje

- nadaljevanje

Datum	13.3.08	17.3.08	20.3.08	27.3.08	3.4.08	10.4.08	17.4.08	24.4.08	8.5.08	15.5.08
Dan	0	4	7	14	19	26	33	40	59	66
Ur [%]	12,91	8,21	13,79	10,23	12,16	20,69	16,89	16,49	12,96	12,09
Tpov [°C]	8,65	6,82	1,04	1,38	8,28	11,12	8,67	10,39	13,25	15,81
φ [%]	0,61	0,41	0,67	0,46	0,59	0,88	0,75	0,70	0,59	0,58
10	Ut [%]	64,31	43,45	37,67	33,48	29,28	25,39	25,40	23,73	20,53
	v [%/dan]		5,22	1,93	0,60	0,84	0,56	0,00	0,24	0,17
	Uv [%]		53,88	40,56	35,57	31,38	27,34	25,40	24,56	22,13
11	Ut [%]	45,99	36,89	33,37	30,72	27,58	19,65	25,24	23,54	24,65
	v [%/dan]		2,28	1,18	0,38	0,63	1,13	-0,80	0,24	0,21
	Uv [%]		41,44	35,13	32,04	29,15	23,62	22,45	24,39	26,64
12	Ut [%]	59,18	39,75	42,40	22,62	35,01	30,80	30,85	28,64	22,34
	v [%/dan]		4,86	-0,88	2,83	-2,48	0,60	-0,01	0,32	0,19
	Uv [%]		49,47	41,08	32,51	28,82	32,91	30,82	29,74	24,18
13	Ut [%]	61,07	45,25	39,84	35,80	32,04	27,93	28,02	26,02	21,12
	v [%/dan]		3,96	1,80	0,58	0,75	0,59	-0,01	0,29	0,21
	Uv [%]		53,16	42,54	37,82	33,92	29,98	27,98	27,02	23,07
14	Ut [%]	59,37	44,08	38,68	34,69	30,88	13,01	27,14	25,02	18,41
	v [%/dan]		3,82	1,80	0,57	0,76	2,55	-2,02	0,30	0,20
	Uv [%]		51,73	41,38	36,69	32,79	21,95	20,07	26,08	20,34
15	Ut [%]	46,56	37,69	33,44	30,40	27,19	23,29	23,30	22,28	22,89
	v [%/dan]		2,22	1,42	0,43	0,64	0,56	0,00	0,15	0,25
	Uv [%]		42,13	35,56	31,92	28,79	25,24	23,29	22,79	25,26
16	Ut [%]	62,19	45,39	40,03	36,75	32,61	28,90	29,70	27,63	20,32
	v [%/dan]		4,20	1,79	0,47	0,83	0,53	-0,11	0,30	0,17
	Uv [%]		53,79	42,71	38,39	34,68	30,75	29,30	28,66	21,97
17	Ut [%]	43,72	37,31	33,92	31,07	27,89	24,69	25,40	23,62	21,66
	v [%/dan]		1,60	1,13	0,41	0,64	0,46	-0,10	0,26	0,20
	Uv [%]		40,51	35,62	32,49	29,48	26,29	25,04	24,51	23,58
18	Ut [%]	47,09	26,36	35,07	33,50	30,61	26,86	27,15	25,50	19,84
	v [%/dan]		5,18	-2,90	0,22	0,58	0,54	-0,04	0,24	0,19
	Uv [%]		36,73	30,72	34,29	32,06	28,74	27,01	26,32	21,69

**Priloga K:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja ( $v$ ) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 7. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

Datum	7.4.08	8.4.08	16.4.08	23.4.08	7.5.08	14.5.08	4.6.08	13.6.08
Dan	0	1	9	16	30	37	61	70
Ur [%]	15,1	13,3	17,0	18,5	14,8	12,2	16,9	17,3
Tpov [°C]	10,2	5,0	6,2	10,2	12,2	12,5	17,7	12,9
φ [%]	0,68	0,66	0,77	0,80	0,65	0,57	0,77	0,80
1	Ut [%]	78,5	60,1	39,5	32,1	24,1	19,4	18,8
	v [%/dan]		18,4	2,6	1,1	0,6	0,7	0,0
	Uv [%]		69,3	49,8	35,8	28,1	21,8	19,1
2	Ut [%]	87,3	61,1	40,9	32,9	25,4	21,1	20,3
	v [%/dan]		26,1	2,5	1,1	0,5	0,6	0,0
	Uv [%]		74,2	51,0	36,9	29,2	23,3	20,7
3	Ut [%]	74,8	56,5	38,0	31,9	25,1	20,9	20,3
	v [%/dan]		18,3	2,3	0,9	0,5	0,6	0,0
	Uv [%]		65,7	47,3	34,9	28,5	23,0	20,6
4	Ut [%]	72,8	48,4	38,9	32,6	25,2	21,0	19,8
	v [%/dan]		24,4	1,2	0,9	0,5	0,6	0,1
	Uv [%]		60,6	43,7	35,7	28,9	23,1	20,4
5	Ut [%]	80,5	60,2	38,7	31,0	23,1	18,9	18,7
	v [%/dan]		20,3	2,7	1,1	0,6	0,6	0,0
	Uv [%]		70,3	49,4	34,8	27,0	21,0	18,8
6	Ut [%]	78,5	51,6	35,8	30,7	24,2	20,5	19,5
	v [%/dan]		26,8	2,0	0,7	0,5	0,5	0,0
	Uv [%]		65,1	43,7	33,2	27,5	22,4	20,0
7	Ut [%]	85,0	62,5	39,1	32,6	25,6	21,3	20,5
	v [%/dan]		22,5	2,9	0,9	0,5	0,6	0,0
	Uv [%]		73,7	50,8	35,9	29,1	23,5	20,9
8	Ut [%]	72,4	53,6	38,5	33,1	25,9	21,7	20,1
	v [%/dan]		18,8	1,9	0,8	0,5	0,6	0,1
	Uv [%]		63,0	46,0	35,8	29,5	23,8	20,9
9	Ut [%]	65,7	49,3	39,2	32,9	25,4	20,9	19,7
	v [%/dan]		16,4	1,3	0,9	0,5	0,6	0,1
	Uv [%]		57,5	44,3	36,0	29,1	23,2	20,3
10	Ut [%]	89,1	69,4	40,9	32,6	24,3	20,4	19,9
	v [%/dan]		19,7	3,6	1,2	0,6	0,6	0,0
	Uv [%]		79,3	55,2	36,7	28,5	22,4	20,1

**Priloga L:** Spremljanje trenutne vlažnosti ( $U_t$ ), hitrosti sušenja (v) in vmesne vlažnosti ( $U_v$ ) desetih vzorcev 8. serije ter klimatskih pogojev: povprečne dnevne temperature ( $T_p$ ), relativne zračne vlažnosti ( $\phi$ ) in ravnovesne vlažnosti ( $U_r$ )

Datum	8.5.08	9.5.08	12.5.08	14.5.08	4.6.08	13.6.08	20.6.08	27.6.08	4.7.08	10.7.08	18.7.08	1.8.08
Dan	0	1	4	6	30	39	46	53	60	66	74	88
Ur [%]	13,0	13,0	12,2	12,4	16,9	17,3	15,8	15,3	12,3	14,1	18,4	14,0
T <sub>pov</sub> [°C]	13,3	14,7	12,5	15,3	17,7	12,9	18,8	23,3	22,9	20,1	17,0	22,9
φ [%]	0,59	0,59	0,57	0,57	0,77	0,80	0,71	0,69	0,63	0,68	0,83	0,68
1	U <sub>t</sub> [%]	83,8	70,1	45,4	37,0	23,6	23,6	23,3	20,6	19,0	19,1	18,6
	v [%/dan]		13,73	8,22	4,20	0,56	0,00	0,05	0,39	0,24	-0,02	0,06
	U <sub>v</sub> [%]		76,9	57,7	41,2	30,3	23,6	23,5	22,0	19,8	19,0	18,9
2	U <sub>t</sub> [%]	72,0	61,8	41,2	36,3	25,3	25,4	25,0	22,3	20,1	19,9	19,0
	v [%/dan]		10,19	6,86	2,46	0,46	-0,01	0,07	0,39	0,31	0,04	0,11
	U <sub>v</sub> [%]		66,9	51,5	38,8	30,8	25,4	25,2	23,6	21,2	20,0	19,4
3	U <sub>t</sub> [%]	78,2	66,1	44,9	37,3	24,2	24,5	24,0	21,3	19,4	19,2	18,5
	v [%/dan]		12,14	7,07	3,77	0,55	-0,03	0,07	0,38	0,28	0,02	0,09
	U <sub>v</sub> [%]		72,1	55,5	41,1	30,7	24,3	24,2	22,7	20,4	19,3	18,9
4	U <sub>t</sub> [%]	72,6	62,4	42,7	36,6	24,9	24,8	24,4	21,5	19,3	19,3	18,6
	v [%/dan]		10,26	6,56	3,04	0,49	0,01	0,05	0,41	0,32	0,00	0,08
	U <sub>v</sub> [%]		67,5	52,5	39,7	30,8	24,9	24,6	23,0	20,4	19,3	19,0
5	U <sub>t</sub> [%]	73,4	62,2	42,5	37,2	25,7	25,7	25,2	22,5	20,3	20,1	19,2
	v [%/dan]		11,25	6,56	2,64	0,48	0,00	0,07	0,39	0,31	0,05	0,11
	U <sub>v</sub> [%]		67,8	52,3	39,9	31,5	25,7	25,4	23,9	21,4	20,2	19,6
6	U <sub>t</sub> [%]	92,5	79,4	52,9	41,0	23,6	23,3	23,0	19,9	17,9	18,3	18,0
	v [%/dan]		13,11	8,84	5,96	0,73	0,02	0,05	0,45	0,28	-0,07	0,05
	U <sub>v</sub> [%]		86,0	66,2	46,9	32,3	23,5	23,2	21,4	18,9	18,1	18,1
7	U <sub>t</sub> [%]	86,9	71,8	39,8	34,5	23,0	23,0	22,7	20,1	18,1	18,4	18,0
	v [%/dan]		15,08	10,67	2,64	0,48	0,00	0,04	0,38	0,28	-0,06	0,05
	U <sub>v</sub> [%]		79,3	55,8	37,1	28,7	23,0	22,9	21,4	19,1	18,3	18,2
8	U <sub>t</sub> [%]	84,4	71,6	47,5	38,3	22,6	22,4	22,1	19,3	17,5	18,1	17,7
	v [%/dan]		12,78	8,04	4,59	0,65	0,02	0,05	0,39	0,26	-0,10	0,05
	U <sub>v</sub> [%]		78,0	59,5	42,9	30,5	22,5	22,3	20,7	18,4	17,8	17,6
9	U <sub>t</sub> [%]	75,5	62,0	39,3	34,0	23,4	23,8	23,4	20,9	19,3	19,4	18,8
	v [%/dan]		13,51	7,57	2,63	0,44	-0,04	0,05	0,36	0,24	-0,03	0,07
	U <sub>v</sub> [%]		68,7	50,6	36,6	28,7	23,6	23,6	22,2	20,1	19,4	19,1
10	U <sub>t</sub> [%]	75,9	63,9	35,1	25,0	23,3	23,2	22,9	20,1	18,2	18,5	18,1
	v [%/dan]		11,99	9,63	5,02	0,07	0,01	0,04	0,39	0,28	-0,04	0,04
	U <sub>v</sub> [%]		69,9	49,5	30,0	24,1	23,2	23,1	21,5	19,2	18,3	18,0