

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ŠTUDIJ MIKROBIOLOGIJE

Barbara KOZJEK

**MIKROBIOLOŠKA RAZGRADNJA ARHEOLOŠKEGA
MOKREGA LESA**

MAGISTRSKO DELO

Magistrski študij – 2. stopnja Mikrobiologija

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ŠTUDIJ MIKROBIOLOGIJE

Barbara KOZJEK

**MIKROBIOLOŠKA RAZGRADNJA ARHEOLOŠKEGA MOKREGA
LESA**

MAGISTRSKO DELO
Magistrski študij – 2. stopnja Mikrobiologija

**MICROBIOLOGICAL DECAY OF WATERLOGGED
ARCHAEOLOGICAL WOOD**

M.S.c THESIS
Master Study Programmes: Field Microbiology

Ljubljana, 2015

Magistrsko delo je zaključek univerzitetnega študija 2. stopnje Mikrobiologija na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani. Opravljeno je bilo na Katedri za mikrobiologijo, Oddelka za živilstvo na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani in na Naravoslovnem oddelku Restavratorskega centra Zavoda za Varstvo Kulturne Dediščine Slovenije.

Komisija za študij 1. in 2. stopnje je za mentorja magistrskega dela predlagala prof. dr. Davida Stoparja, za somentorico doc. dr. Tjašo Danevčič in za recenzentko prof. dr. Romano Marinšek Logar.

Mentor: prof. dr. David Stopar

Somentorica: doc. dr. Tjaša Danevčič

Recenzentka: prof. dr. Romana Marinšek Logar

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Miha HUMAR
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Članica: prof. dr. Romana MARINŠEK LOGAR
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za zootehniko

Član: prof. dr. David STOPAR
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo

Članica: doc. dr. Tjaša DANEVČIČ
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo

Datum zagovora:

Podpisana izjavljam, da je naloga rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Barbara KOZJEK

KLJUČNA INFORMACIJSKA DOKUMENTACIJA

ŠD	Du2
DK	UDK 903.2+902.034:579.68:57.087(043)=163.6
KG	arheološki mokri les/mikrobiološka razgradnja/fizikalno-kemijski parametri/mikrobiološki parametri/opuščeni glinokop na Ljubljanskem barju/depozitorij/okoljski monitoring
AV	KOZJEK, Barbara, dipl. mikrobiol. (UN)
SA	STOPAR, David (mentor)/DANEVČIČ, Tjaša (somentorica)/MARINŠEK LOGAR, Romana (recenzentka)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Študij mikrobiologije
LI	2015
IN	MIKROBIOLOŠKA RAZGRADNJA ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA
TD	Magistrsko delo (Magistrski študij – 2. stopnja Mikrobiologija)
OP	XIV, 69 str., 8 pregl., 28 sl., 7 pril., 55 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AB	Arheološki mokri les (les) je delno razgrajen ostanek prvotnega lesenega objekta s pomembno arheološko vrednostjo. Večinska sestavina je lignin, medtem ko sta celuloza in hemiceluloza delno ali popolnoma razgrajeni. V magistrskem delu smo ovrednostili okoljske dejavnike, ki vplivajo na dolgoročno shranjevanje mokrega lesa. S plinsko kromatografijo smo spremljali hitrost mikrobne razgradnje lesa pri različnih pogojih – spremljali smo vpliv kisika, temperature, pH in okolja. Na hitrost mikrobne razgradnje lesa najbolj vpliva prisotnost kisika, vendar so pomembni tudi drugi dejavniki. Da bi ovrednotili spremembe, ki nastanejo med razgradnjo lesa smo uporabljali FT-IR spektroskopijo. Metoda je omogočila vpogled v strukturne spremembe lesa med razgradnjo. Po razgradnji je bil les večinsko sestavljen iz lignina, katerega delež se je med razgradnjo zmanjšal. Celuloze in hemiceluloze večinoma nismo zasledili. Ker je konzervacija večjih kosov arheološkega mokrega lesa zelo zahtevna, se iščejo drugačni načini shranjevanja. Kot eden od možnih načinov je shranjevanje v naravnem okolju, ki je različno od okolja v katerem je bil predmet najden. Arheologi so kot primerno okolje za shranjevanje arheološkega lesa izbrali ribnik Divjak na Ljubljanskem barju, za katerega niso bili poznani fizikalno – kemijski in mikrobiološki parametri vode in sedimenta. Vzorčenja v ribniku so potekala od marca do novembra 2013. Vrednotili smo 17 različnih parametrov. Ribnik smo po večmesečnem monitoringu glede na hranila opredelili kot oligotrofen. Po koncentraciji klorofila- <i>a</i> pa kot mezotrofen ekosistem. Razgradnja arheološkega mokrega lesa v tem okolju je možna, vendar je hitrost razgradnje majhna, omejena z nizko vsebnostjo hranil.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN	Du2
DC	UDC 903.2+902.034:579.68:57.087(043)=163.6
CX	waterlogged archaeological wood/microbiological decay/physico-chemical parameters/microbiological parameters/abandoned clay pits on Ljubljana marsh/depository/environmental monitoring
AU	KOZJEK, Barbara, dipl. mikrobiol. (UN)
AA	STOPAR, David (supervisor)/DANEVČIČ, Tjaša (co-advisor)/MARINŠEK LOGAR, Romana (reviewer)
PP	SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Academic Study in Microbiology
PY	2015
TI	MICROBIOLOGICAL DECAY OF WATERLOGGED ARCHAEOLOGICAL WOOD
DT	M.Sc. Thesis (Master Study Programmes: Field Microbiology)
NO	XIV, 69 p., 8 tab., 28 fig., 7 ann., 55 ref.
LA	sl
AL	sl/en
AB	Waterlogged archaeological wood is partially degraded remnant of the original wooden object with important archaeological value. Lignin is a major component while the cellulose and hemicellulose are partially or completely disintegrated. For long-term storage the environmental conditions are essential. In the Master thesis we have evaluated several environmental parameters such as oxygen, temperature, pH and different environments and their impact on the rate of wood degradation by gas chromatography. The result indicate that oxygen is the most important environmental factor. To evaluate changes that occurred on wood during the degradation FT-IR spectroscopy was used. The results suggest that degraded wood consists of lignin which concentration decline over time of decomposition. Cellulose and hemicellulose components were mostly undetected. Since preservation of large pieces of wood is difficult and expensive, alternative methods for archaeological wet wood preservation are looked for. It has been suggested by archaeologists that abandoned clay pit Divjak on the Ljubljana marsh could be an appropriate underwater storage place for large archaeological artefacts. Because physico - chemical and microbiological parameters for water and sediment were available samples were regularly collected throughout the year 2013. The results indicate an oligotrophic nutrient poor environment. In regard to chlorophyll-a concentration the system could possibly be classified as a mezotrophic ecosystem. Degradation of archaeological wood is possible in such environment, however, the rate of degradation is slow due to nutrient limitation.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA INFORMACIJSKA DOKUMENTACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
KAZALO PRILOG	XI
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XIII
SLOVARČEK.....	XIV
1 UVOD	1
1.1 NAMEN DELA IN OPREDELITEV PROBLEMA.....	2
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	3
2 PREGLED OBJAV	4
2.1 ARHEOLOŠKI MOKRI LES.....	4
2.1.1 Splošne značilnosti in nastanek.....	4
2.1.2 Predstavitev okolij, iz katerih je bil pridobljeni arheološki mokri les preučevan v magistrski nalogi.....	7
2.1.3.1 Aktivne metode konzervacije	10
2.1.3.2 Pasivne metode konzervacije	10
2.1.4 Poskus shranjevanja arheološkega mokrega lesa <i>in vivo</i> – depozitorij v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju	11
2.2 MONITORING IZBRANEGA OKOLJA	13
2.2.1 Okoljski dejavniki	13
2.2.2 Pregled povprečnih mesečnih temperatur, višine padavin in trajanja sončnega obsevanja za področje Ljubljane v letu 2013	15
2.2.3. Pregled okoljskih dejavnikov jezer v Sloveniji.....	17
3 MATERIALI IN METODE	20
3.1 MATERIALI	20
3.1.1 Kemikalije	20
3.1.2 Gojišča in raztopine	21
3.1.3 Vzorci arheološkega mokrega lesa, sedimenta in vode.....	22
3.2 METODE	23
3.2.1 Spremljanje hitrosti razgradnje arheološkega mokrega lesa	23
3.2.1.1 Priprava vzorcev	23
3.2.1.1.1 Ugotavljanje biološke in kemijske razgradnje arheološkega mokrega lesa	23

3.2.1.1.2 Testiranje vpliva okoljskih dejavnikov na razgradnjo arheološkega mokrega lesa.....	23
3.2.1.1.2.1 Vpliv temperature.....	23
3.2.1.1.2.2 Vpliv kisika	24
3.2.1.1.2.3 Vpliv mikrohranil.....	24
3.2.1.1.2.4 Vpliv pH.....	24
3.2.1.1.3 Vpliv vodnega okolja na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa ..	25
3.2.1.1.4 Ugotavljanje/preverjanje potenciala za mikrobiološko razgradnjo različnih tipov lesa v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju.....	25
3.2.1.2 Merjenje CO ₂ s plinsko kromatografijo in izračun prostornine CO ₂	26
3.2.2 Monitoring opuščenih glinokopov	27
3.2.2.1 Opis lokacije in razporeditve opuščenih glinokopov na Ljubljanskem barju ..	27
3.2.2.2 Termini vzorčenj	27
3.2.2.3 Ugotavljanje skupnega števila heterotrofnih mikroorganizmov z metodo štetja na razliti plošči	28
3.2.2.4 Določanje skupnega števila koliformnih mikroorganizmov in bakterije <i>Escherichia coli</i>	28
3.2.2.5 Merjenje klorofila- <i>a</i>	29
3.2.2.6 Merjenje biološke potrebe po kisiku BOD ₄ preko potenciala za respiracijo ...	29
3.2.2.7 Merjenje raztopljenega kisika	30
3.2.2.8 Merjenje pH.....	30
3.2.2.9 Merjenje redoks potenciala	30
3.2.2.10 Merjenje prevodnosti.....	30
3.2.2.11 Merjenje raztopljenega fosforja v fosfatu	31
3.2.2.12 Merjenje nitratnega dušika	31
3.2.2.13 Merjenje nitritnega dušika.....	31
3.2.2.14 Merjenje amonijskega dušika.....	32
3.2.2.15 Merjenje skupnega organskega ogljika (Total Organic Carbon - TOC).....	32
3.2.2.16 Merjenje skupne sušine	33
3.2.2.17 Določanje suspendiranega in raztopljenega deleža sušine	33
3.2.2.18 Merjenje temperature	34
3.2.3 Korelacijska analiza fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov....	34
3.2.4 FT-IR (Fourier Transform Infrared) analiza.....	34
3.2.4.1 Osnovne lastnosti FT-IR spektroskopije	34
3.2.4.2 Priprava vzorcev in obdelava spektrov	34
3.2.4.2.1 Toplotna obdelava arheološkega mokrega lesa bukve pri 180 °C	34
3.2.4.2.2 Prikaz spremljanja strukturnih razlik različnih tipov lesa.....	35
3.2.4.2.3 Spremljanje/sledenje dejanskih sprememb na arheološkem mokrem lesu hrasta po 10 mesečni hrambi v opuščenem glinokopu.....	35
4 REZULTATI	36
4.1 BIOLOŠKA IN KEMIJSKA RAZGRADNJA ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA	36

4.2 VPLIV OKOLJSKIH DEJAVNIKOV NA RAZGRADNJO ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA	37
4.2.1 Vpliv temperature	37
4.2.2 Vpliv atmosfere.....	40
4.2.3 Vpliv mikrohranil.....	41
4.2.4 Vpliv pH	41
4.3 VPLIV VODNEGA OKOLJA NA MIKROBNO RAZGRADNJO ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA	42
4.4 RAZGRADNJA RAZLIČNIH TIPOV SVEŽEGA IN ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA	43
4.4.1 Potencial za mikrobnno razgradnjo različnih tipov lesa v vodi opuščenega glinokopa na Verdu pri Vrhniku	43
4.4.2 Prikaz strukturnih razlik različnih tipov lesa z FT-IR spektroskopijo	44
4.5 OKOLJSKI DEJAVNIKI TRANSEKTA BAZENOV OPUŠČENEGA GLINOKOPA NA VERDU PRI VRHNIKI	45
4.6 OKOLJSKI DEJAVNIKI V OPUŠČENEM GLINOKOPU NA LJUBLJANSKEM BARJU NA VERDU PRI VRHNIKI	46
4.6.1 Korelacijska analiza med posameznimi fizikalno-kemijskimi in mikrobiološkimi parametri monitoringa	53
4.7 OCENA USTREZNOSTI SHRANJEVANJA ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA V DEPOZITORIJU NA LJUBLJANSKEM BARJU	56
4.7.1 Prikaz dejanskih sprememb na arheološkem mokrem lesu hrasta z FT-IR spektroskopijo.....	56
5 RAZPRAVA IN SKLEPI	58
5.1 RAZPRAVA.....	58
5.1.1 Razgradnja arheološkega mokrega lesa.....	58
5.1.2 Porazdelitev fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov preko horizontalnega transekta treh ribnikov v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju	60
5.1.3 Celoletno spremljanje fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju	60
5.1.4 Shranjevanje arheološkega mokrega lesa v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju	63
5.2 SKLEPI.....	63
6 POVZETEK.....	64
7 VIRI.....	65
ZAHVALA	
PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: OECD kriteriji za uvrstitev jezer v trofično kategorijo (Remec-Rekar, 2012)	15
Preglednica 2: Splošni fizikalno – kemijski parametri in klorofil- <i>a</i> za nekatera slovenska jezera in zbiralnike v obdobju med leti 2007 in 2012 (Remec-Rekar, 2007; Remec-Rekar, 2008; Remec-Rekar, 2009; Remec-Rekar, 2010; Remec-Rekar, 2011; Remec-Rekar, 2012).	18
Preglednica 3: Povprečna vsebnost fosforjevih in dušikovih spojin, prevodnost in koncentracija klorofila- <i>a</i> v gorskih jezerih v Triglavskem narodnem parku v obdobju med 1994 in 1998 (Brancelj, 1999).....	19
Preglednica 4: Zbrane vrednosti Bunsenovega koeficienta topnosti (α) za CO ₂ pri različnih temperaturah (Stopar in sod., 2009)	26
Preglednica 5: Pregled stabilnosti puferskih raztopin in spremljanje pH vrednosti po dodatku lesa, po predinkubaciji in inkubaciji	42
Preglednica 6: Porazdelitev hranil in ostalih fizikalno – kemijskih ter mikrobioloških parametrov preko transekta treh ribnikov opuščenega glinokopa iz dne 8.7.2013.	45
Preglednica 7: Zbrani rezultati različnih fizikalno - kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju med letom 2013 na površini platforme depozitorija	50
Preglednica 8: Korelacijska analiza za izmerjene fizikalno-kemijske in mikrobiološke parametre	544

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz bakterijske razgradnje mokrega lesa (Blanchette, 2000).	6
Slika 2: Fotoskica odkritega dela ladijske razbitine (Gaspari in Erič, 2012)	8
Slika 3: Virtualna rekonstrukcija zgodnjerimske tovarne ladje (Gaspari in Erič, 2012).....	8
Slika 4: Prikaz obrambnih kolov (Vojaković in sod., 2011).	9
Slika 5: Prikaz razporeditve posameznih ribnikov v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju (Google earth, 2013)	12
Slika 6: Izgled podvodnega depozitorija (Šinkovec in sod., 2014)	13
Slika 7: Odklon povprečne mesečne temperature zraka za Ljubljano v letu 2013 (ARSO-Arhiv, 2015).	16
Slika 8: Prikaz mesečne višine padavin za Ljubljano v letu 2013 (ARSO-Arhiv, 2015).....	16
Slika 9: Prikaz mesečnega trajanja sončnega obsevanja za Ljubljano v letu 2013 (ARSO-Arhiv, 2015).	17
Slika 10: Prikaz razporeditve ribnikov s pripadajočimi lokacijami posameznih vzorčnih točk transeka (T1, T2, T3, T4 in T5) (Google earth, 2013).	27
Slika 11: Vpliv biološke in kemijske oksidacije pri razgradnji arheološkega mokrega lesa bukve v aerobnih pogojih.....	36
Slika 12: Vpliv temperature na biološko razgradnjo arheološkega mokrega lesa hrasta.	37
Slika 13: Odvisnost kemijske razgradnje arheološkega mokrega lesa od temperature	38
Slika 14: FTIR spekter posameznega vzorca arheološkega mokrega lesa bukve pred termično obdelavo in po 2, 4 in 6 urah termične obdelave pri 180 °C.....	39
Slika 15: Pospešena kemijska razgradnja lignina v arheološkem mokrem lesu bukve s termično obdelavo pri 180 °C.	40
Slika 16: Vpliv ekosistema in atmosfere na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa bukve	40
Slika 17: Vpliv mikrohranil na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa hrasta	41
Slika 18: Vpliv pH vrednosti na biološko razgradnjo arheološkega mokrega lesa hrasta	42
Slika 19: Primerjava mikrobne razgradnje arheološkega mokrega lesa hrasta v vodi iz reke Ljubljanici in vodi iz opuščenega glinokopa na Verdu pri Vrhniki.	43
Slika 20: Primerjava mikrobne razgradnje svežega lesa bukve in hrasta ter razgradnje arheološkega mokrega lesa bukve in hrasta v vodi iz opuščenega glinokopa	44
Slika 21: Primerjava strukturnih razlik svežega in arheološkega mokrega lesa bukve in hrasta.	44

Slika 22: Nihanje koncentracije klorofila- <i>a</i> v letu 2013 na površini platforme depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju na Verdu pri Vrhniku	52
Slika 23: Nihanje števila heterotrofnih mikroorganizmov pri temperaturi 28 °C v letu 2013 na površini platforme depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju na Verdu pri Vrhniku	52
Slika 24: Nihanje števila heterotrofnih mikroorganizmov pri temperaturi 37°C v letu 2013 na površini platforme depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju na Verdu pri Vrhniku.	53
Slika 25: Primerjava dveh parametrov – temperature vode in koncentracije raztopljenega kisika	55
Slika 26: Primerjava dveh parametrov – temperatura vode in skupnega števila heterotrofnih mikroorganizmov pri 37 °C.....	55
Slika 27: FT-IR spekter arheološkega mokrega lesa hrasta pred shranitvijo (0 mesecev) v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju in po 10. mesecih shranjevanja.	56
Slika 28: Prikaz upada intenzitete vibracijskih vrhov po času shranjevanja arheološkega mokrega lesa hrasta v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju.....	57

KAZALO PRILOG

PRILOGA A

Priloga A1: Količina nastalega CO₂ v mL pri biološki in kemijski oksidaciji arheološkega mokrega lesa bukve v aerobnem okolju.

Priloga A2: Količina nastalega CO₂ v mL pri biološki in kemijski oksidaciji arheološkega mokrega lesa bukve v anaerobnem okolju.

Priloga A3: Vpliv biološke in kemijske oksidacije pri razgradnji arheološkega mokrega lesa bukve v anaerobnih pogojih.

PRILOGA B

Priloga B1: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri 5 kratni koncentraciji mikrohranil in različnih temperaturah inkubacije.

Priloga B2: Deleži biološke in kemijske razgradnje arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih temperaturah.

Priloga B3: Spreminjanje deležev biološke in kemijske razgradnje pri različnih temperaturah za arheološki mokri les hrasta v vodnem okolju s 5 kratno koncentracijo

Priloga B4: Količina nastalega CO₂ v mL pri kemijski razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih temperaturah po času.
mikrohranil.

Priloga B5: Vpliv kemijske oksidacije na razgradnjo arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih temperaturah.

Priloga B6: Intenziteta vibracijskih vrhov v odstotkih transmisije za tri najbolj karakteristične vibracije lignina po času termične obdelave.

Priloga B7: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji arheološkega mokrega lesa bukve v različnih ekosistemih in atmosferah po različnih časovnih intervalih.

Priloga B8: Količina nastalega CO₂ v mL v različnih ekosistemih in atmosferah z in brez dodatka lesa po različnih časovnih intervalih.

Priloga B9: Vpliv dodatka arheološkega mokrega lesa bukve sedimentu v prisotnosti in odsotnosti kisika.

Priloga B10: Vpliv dodatka arheološkega mokrega lesa bukve vodi v prisotnosti in odsotnosti kisika.

Priloga B11: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih koncentracijah hranil.

Priloga B12: Količina nastalega CO₂ v mL pri biološki razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri 5 kratni koncentraciji mikrohranil in različnih pH vrednostih.

Priloga B13: Količina nastalega CO₂ v mL pri kemijski razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri 5 kratni koncentraciji mikrohranil in različnih pH vrednostih.

Priloga B14: Vpliv kemijske oksidacije na razgradnjo arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih pH vrednostih.

PRILOGA C

Priloga C1: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta v reki Ljubljanici in vodi opuščenega glinokopa na Verdu.

PRILOGA D

Priloga D1: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji svežega lesa bukve in hrasta in arheološkega mokrega lesa bukve in hrasta v vodi opuščenega glinokopa na Verdu pri Vrhniki.

Priloga D2: Primerjava strukturnih razlik lesa sveže bukve in arheološkega mokrega lesa bukve.

Priloga D3: Primerjava strukturnih razlik svežega lesa hrasta in arheološkega mokrega lesa hrasta.

PRILOGA E

Priloga E1: Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 na 0,5 m globine neposredno nad platformo depozitorija.

Priloga E2: Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 na obrežju omenjenega glinokopa.

Priloga E3: Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 in sicer na globini 1, 2, 3 in 4 metrov neposredno nad platformo depozitorija.

Priloga E4: Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v sedimentu opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 in sicer na obrežju in pod platformo depozitorija.

Priloga E5: Rezultati povprečne koncentracije klorofila-*a* (v µg/L) s pripadajočimi normiranimi dolžinami osi po posameznih mesecih v letu 2013.

Priloga E6: Rezultati povprečnega št. heterotrofnih mikroorganizmov pri 28 °C po 7. dneh (v CFU/mL) s pripadajočimi normiranimi dolžinami osi po posameznih mesecih v letu 2013.

Priloga E7: Rezultati povprečnega št. heterotrofnih mikroorganizmov pri 37 °C po 48. urah (v CFU/mL) s pripadajočimi normiranimi dolžinami osi po posameznih mesecih v letu 2013.

PRILOGA F

Priloga F1: Rezultati vzorčenja posameznih parov parametrov na površini platforme depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju in njihov korelacijski koeficient.

PRILOGA G

Priloga G1: Intenziteta vibracijskih vrhov v odstotkih transmisije za dve najbolj karakteristične vibracije lignina (1505 in 1460 cm⁻¹) po času shranjevanja v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju.

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

IUCN	organizacija, ki se zavzema za ohranjanje narave (ang. International Union for Conservation of Nature)
OECD	Organizacija za ekonomsko sodelovanje in razvoj (ang. Organisation for Economic Co-operation and Development)
PEG	polietilen glikol
PPG	polipropilen glikol
UNESCO	organizacija Združenih narodov za izobraževanje, znanost in kulturno dediščino (ang. The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)

SLOVARČEK

Arheološki mokri les	delno razgrajen ostanek prvotnega lesenega objekta s pomembno arheološko vrednostjo, katerega večinska komponenta je lignin, medtem ko sta celuloza in hemiceluloza delno ali popolnoma razgrajena
Biološka razgradnja lesa	razgradnja s strani biološkega povzročitelja, najpogosteje gliv in bakterij
Depozitorij	izbrano mesto za dolgoročne hrambe različnih kosov arheološkega mokrega lesa
Konzervacija mokrega lesa	ohranjanje oblike in teksture mokrega lesa na različne načine
Monitoring okolja	periodično spremljanje nekega okolja z merjenjem različnih okoljskih parametrov

1 UVOD

Ljubljansko barje je zemljepisno ime za območje veliko 163 km², ki leži med Ljubljano, Krimom, Vrhniko in Škofljico. Nastalo je s tektonskim pogrezanjem pri prehodu pliocena v pleistocen. V kotlino so se tekom tisočletij zlivale kraške podzemne vode in potoki, ki so kotlino počasi polnili s prodrom in drugimi usedlinami. Tako se je jezero počasi polnilo, voda je odtekala in koliščarska naselja, ki so pred približno 6,000 leti obstajala na Ljubljanskem barju, so se osušila in nastalo je veliko močvirje, kasneje še nizko in visoko barje. Za nastanek, ohranjanje in dinamiko Ljubljanskega barja ima veliko vlogo voda. Barjanska voda, ki je rdeče rjava zastojna voda iz površine barja, druga je voda kraškega izvora. Visoka talna voda in pogoste poplave nekaterih območij onemogočajo intenzivnejše kmetovanje kar je osnova za razvoj raznolike vegetacije in velikega števila različnih živali, predvsem ptic. Velik del Ljubljanskega barja, kar 135 km², je zaščiten tudi kot krajinski park V. kategorije po IUCN (organizaciji, ki se zavzema za ohranjanje narave) (O Ljubljanskem barju, 2014).

Zaradi osnovnih značilnosti barjanskih tal (vlaga, odsotnost kisika, tekstura tal) so se na tem območju zelo dobro ohranili arheološki artefakti iz različnih obdobij človeške zgodovine. V primerjavi z ostalimi arheološkimi okolji so dobro ohranjeni predmeti organskega izvora (med njimi tudi leseni predmeti), ki so se ohranili tudi več tisoč let. Najbolj znano izmed odkritij je najdba ostankov lesenega kolesa, ki je do sedaj najstarejše najdeno leseno kolo z osjo datirano v obdobje od 3360 do 3080 p.n.š. (Šinkovec in sod., 2014).

Zaradi edinstvenih pogojev in ugodne lege so na območju Ljubljanskega barja že v obdobju neolitika, bakrene in bronaste dobe, ko je to območje še prekrivalo jezero (čas od 4600 do 1500 p.n.š.) živeli koliščarji. Arheološka izkopavanja so odkrila kar 40 prazgodovinskih koliščarskih naselbin na 150 km² barjanskih površin. Najdeni so bili različni predmeti od vertikalnih kolov, ostankov lončenine, sekir in kosti. Od septembra 2011 je del prazgodovinskih kolišč vpisan na UNESCO Seznam svetovne dediščine (Kolišča kot del svetovne dediščine, 2014). Na Ljubljanskem barju so zanimive tudi druge arheološke najdbe predvsem iz rimskega obdobja. Pogoste so najdbe glinenih posod, okrasja in orožja. Tudi območje reke Ljubljanice je bogato z arheološkimi najdbami, saj je reka takrat predstavljala pomembno prometno povezavo med Neupotusom (Vrhniko) in Emono (Ljubljana). Pogoste so najdbe različnih plovil med katerimi je najpomembnejša najdba razbitine rimske tovarne ladje stare približno 2000 let. Našli so jo med podvodnim terenskim pregledom reke Ljubljanice pri Sinji Gorici leta 2008. Posebnost te ladje je uporaba novega načina izgradnje in sicer spajanje platic z železnimi spojkami. Ladja je najverjetneje služila prevozu različnega tovora za vojaške potrebe (Gaspari in Erič, 2012).

Les je organski material, ki je v osnovi sestavljen iz celuloze, hemiceluloze in lignina v različnih deležih, ki se spreminjajo z vrsto lesa. Nastaja v procesu olesenitve pri golosemenkah in nekaterih kritosemenkah. Različne vrste se med seboj ločijo po sestavi, trdoti, vsebnosti vode, gostoti, vonju in izgledu. Ločijo se tudi po količini prosojnih dodatnih snovi kot so pektin, tanin, eterična olja, alkaloidi, barvila, ... (Polanc in Leban, 2004). Les je

prvi gradbeni material s katerim so si ljudje v zgodovini in prazgodovini pomagali pri vsakodnevnih opravilih, iz njega izdelovali različna orodja in orožja. Pri normalnih pogojih na Zemlji les razpade razmeroma hitro, ko je okolje primerno se lahko ohrani tudi več tisoč let. Na območju Slovenije je najpogostejši les, ki se je ohranil v anaerobnih okoljih npr. barjanskih tleh, v morskem sedimentu, ... Arheološki mokri les je delno razgrajen ostanek prvotnega lesa, pri katerem je večinsko ohranjena komponenta lignin, medtem ko sta celuloza in hemiceluloza delno ali popolnoma razgrajena. Zaradi večinske ligninske sestave ima takšen les nižjo gostoto, je porozen in nagnjen k poškodbam. Oblika je zaradi vode, ki je nadomestila manjkajočo celulozo in hemicelulozo ohranjena, vendar se z izsuševanjem spreminja in prihaja do krčenja in razpokanja (Capretti in sod., 2008).

Razgradnja lesa je lahko kemijska in biološka. Pospešujejo jo tudi različne mehanske poškodbe, ki so lahko nastale naravno ali jih je povzročil človek. V splošnem je razgradnja hitra v okoljih, kjer je primerna vlaga in temperatura, prisoten kisik in različni organizmi (insekti, glive, bakterije). V anaerobnih okoljih so glavni povzročitelji razgradnje bakterije, razgradnja je bistveno počasnejša in omogoča nastanek arheološkega mokrega lesa (Kavkler in sod., 2014). Razgradnja arheološkega mokrega lesa je ob neprimernem shranjevanju in konzerviranju, kljub težje razgradljivi strukturi, hitra, pospešujejo jo tudi mehanske poškodbe, ki so posledica drobljivosti in izsuševanja, zato je izrednega pomena ustrezna konzervacija takšnega materiala (Curci, 2006).

1.1 NAMEN DELA IN OPREDELITEV PROBLEMA

Zaradi velike količine mokrega arheološkega mokrega lesa, ki ga arheologi najdejo na različnih lokacijah po Sloveniji, prihaja do problema hrambe le-tega. Hramba takšnih predmetov je pogosto neustrezna in povzroči hiter razpad, ki je posledica kemijske in biološke oksidacije. Razpad se pospeši v primeru hrambe takšnega lesa na zraku, kjer ima kisik neposreden dostop do lesa. V želji po ohranjanju takšnih najdb so arheologi v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju izgradili vodni depozitorij. Fizikalno – kemijski in biološki dejavniki, ki vplivajo na razgradnjo lesa v depozitoriju niso poznani. V ta namen so arheologi izrazili željo po spremljanju različnih fizikalno – kemijskih in bioloških parametrov vode in sedimenta v depozitoriju med letom. Poleg spremljanja omenjenih parametrov v depozitoriju smo v magistrski nalogi v laboratorijskih pogojih preverili kinetiko razpada arheološkega mokrega lesa pri različnih okoljskih pogojih.

Namen magistrske naloge je ugotoviti, kako okolje in različni fizikalno – kemijski dejavniki vplivajo na hitrost razpada različnih tipov arheološkega mokrega lesa. Primerjali smo arheološki les bukve (rimska tovorna ladja) in hrasta (kol rimske tribune). Ovrednotenje dejavnikov, ki vplivajo na razgradnjo arheološkega mokrega lesa, bo služilo za oceno ustreznosti različnih okolij za hrambo takšnih kosov lesa. Primernost depozitorija, kot okolja za shranjevanje arheološkega mokrega lesa smo preverjali z meritvijo fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov vode in sedimenta v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju (Verd pri Vrhniki) med marcem in novembrom leta 2013.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

V magistrski nalogi smo postavili sledeče delovne hipoteze:

- Višje temperature in koncentracija hranil pospešujejo hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa.
- Prisotnost kisika pospešuje hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa.
- Biološka oksidacija ima večji vpliv na razgradnjo arheološkega mokrega lesa kot kemijska oksidacija.
- Spremljanje fizikalno – kemijskih in bioloških parametrov omogoča oceno ustreznosti opuščene glinokopa na Ljubljanskem barju za namene daljše hrambe arheološkega mokrega lesa iz različnih zgodovinskih obdobj.

2 PREGLED OBJAV

2.1 ARHEOLOŠKI MOKRI LES

2.1.1 Splošne značilnosti in nastanek

Les je bil tekom zgodovine in je še sedaj pomemben energetski vir in surov material za izdelavo različnih lesenih objektov (ladje, hiše, pomoli, pohištvo, ...). Posledično bi lahko pričakovali, da je večina arheoloških najdb lesenih, vendar temu ni tako. Posledica je popolna razgradnja lesenih objektov, ki je ob primernih pogojih (stalna pristnost kisika, zmerna temperaturna okolja in vlažnost) razmeroma hitra. Tako za različnimi arheološkimi objekti ostaja le plast ali lokalne zaplate črnega humusa na arheoloških izkopališčih (Björdal in sod., 1999). Ob primernih pogojih, ki jih označuje pomanjkanje kisika in prisotnost vode, se lahko leseni objekti obranijo več tisoč let. Takšen les je po izgledu podoben svežemu lesu, vendar se strukturno in kemijsko od njega razlikuje. Dolgo shranjevanje vodi k večji zasičenosti lesa z vodo in signifikantnemu znižanju gostote lesa. Kemijsko se spremenijo predvsem deleži celuloze, hemiceluloze in lignina, kar je posledica mikrobne razgradnje s celulozo bogatih regij. Ostanek lesa, ki je večinsko sestavljen iz lignina, izgubi na elastičnosti in moči (Björdal in Nilsson, 2001).

Razgradnja lesa je kompleksen proces, ki je lahko kemijske ali biološke narave. Biološko so najpogostejši razgrajevalci lesa glive in bakterije. V okoljih, kjer je kisika dovolj, so najpogostejše bazidiomicetne glive, predvsem glive bele in rjave trohnobe. Razgradnja je v tem primeru hitra. V okoljih, kjer prihaja do pomanjkanja oz. odsotnosti kisika imajo najpomembnejšo vlogo glive mehke trohnobe, ki spadajo med aktinomicetne glive in različne bakterije. Razgradnja ob pomanjkanju oz. odsotnosti kisika je bistveno počasnejša (Björdal in Nilsson, 2001).

Glive bele in rjave trohnobe spadajo med prostotrosnice (*Basidiomycetes*) in so pogoste v naravi. Najpogostejše povzročajo trohnjenje ostankov požaganih dreves v gozdovih. Glive rjave trohnobe najdemo poleg gozdov, tudi v drugih ekosistemih in so sposobne razgradnje tako svežega kot tudi zaščitene lesa. Glive bele trohnobe so sposobne razgrajevati vse lesne komponente, tudi lignin. Nekatere vrste so specializirane za razgradnjo samo lignina in hemiceluloze, medtem ko celuloze ne razgrajujejo. Te glive povzročajo značilno bledenje lesa. Razgradnja značilno poteka z nastankom erozijskih kanalov preko celične stene. Glive rjave trohnobe niso sposobne popolne razgradnje lignina, značilna je hitra razgradnja celuloze in hemiceluloze. Ime so dobile po značilni rjavi obarvanosti lesa, ki je posledica nerazgrajenih ligninskih ostankov. Prizadeti les izgleda skoraj nepoškodovan, kar je posledica ohranjanja oblike celic, kljub močno poroznim celičnim stenam, ki jih povzroči gliva (Schwarze, 2007).

Glive mehke trohnobe spadajo med zaprtotrosnice (*Ascomycetes*) ali med nepopolne glive (*Fungi imperfecti* oz. *Deuteromycetes*). Najpogostejše so v zemlji, lahko jih najdemo tudi v drugih okoljih. Aktivne so v okoljih, kjer bazidiomicete niso – v okoljih z visoko vlago,

nižjimi koncentracijami kisika in visokim deležem konzervansov. Pri lesu golosemenk preferenčno napadajo sekundarno steno tako, da tvorijo votline, ki so paralelno orientirane na celulozne mikrofibrile. Votline se z napredovanjem razpada povečujejo. Pri kritosemenkah za razgradnjo uporabljajo erozijo celične stene, pri čemer se razgradijo celuloza in hemiceluloza, medtem ko se lignin le delno modificira. Tak način razgradnje lesa je značilen za to vrsto gliv in jih ločuje od drugih gliv in bakterij (Schwarze, 2007; Kim in Singh, 2000).

V okoljih, kjer je les saturiran z vodo, imajo najpomembnejšo vlogo pri razgradnji lesa **bakterije**. Do kolonizacije mokrega lesa prihaja izjemno hitro in sicer v nekaj dneh. Prve bakterije, ki kolonizirajo les razgradijo enostavne neolesenele dele in jih ne prištevamo v skupino bakterij, ki razgrajujejo les. Do kolonizacije in razgradnje s pravimi bakterijskimi razgrajevalci lesa pride v nekaj mesecih. V naravi najdemo tri različne načine bakterijske razgradnje lesa:

- tvorba tunelov
- tvorba votlin
- erozija celične stene (Kim in Singh, 2000).

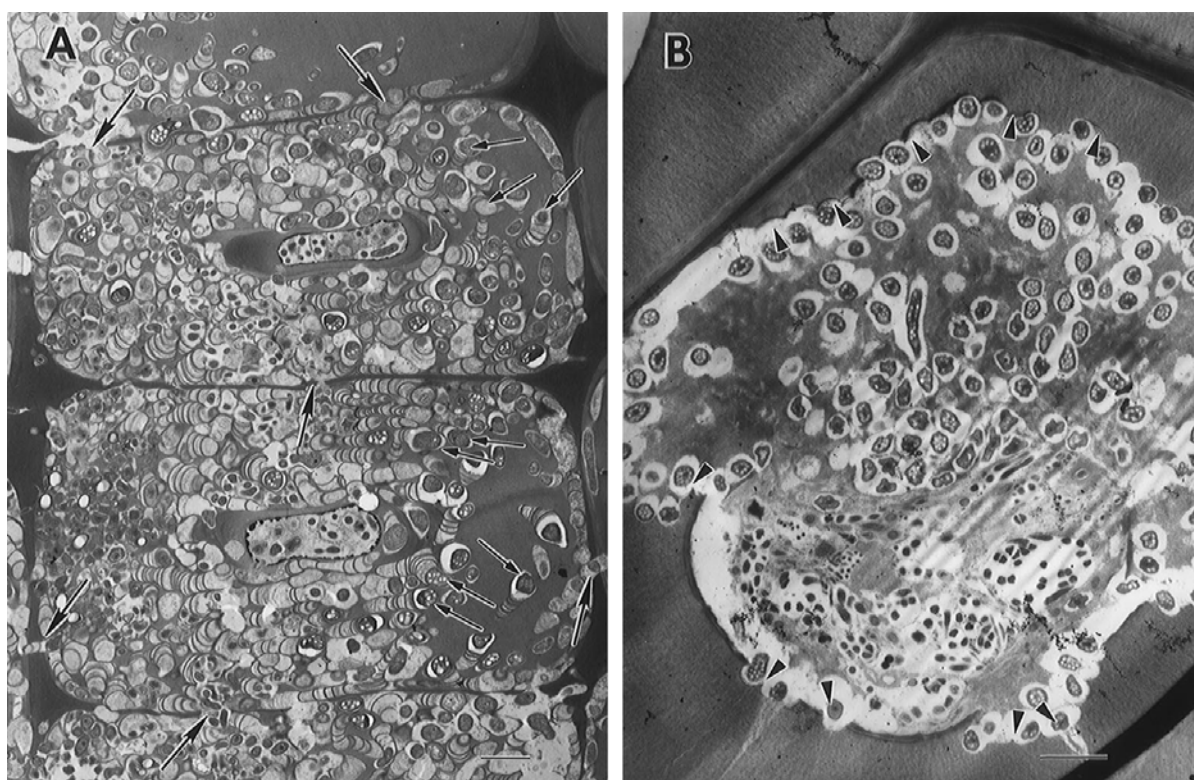
Bakterije, ki uporabljajo način tvorbe tunelov, razgrajujejo notranjost lesnih celičnih sten in pri tem ustvarjajo strukture podobne tunelom. Razgradnja ni vezana na smer poteka celuloznih mikrofibril, saj lahko tuneli potekajo v vse smeri, tudi v lignificirane sredinske lamele. Te bakterije so sposobne popolne razgradnje vseh delov celične stene, kar potrjuje odsotnost ostankov celične stene v omenjenih tunelih. V večini gre za premikajoče se po Gramu negativne palčke brez flagelov. Imajo visoko plastično celično ovojnico, ki lahko tvori vezikle. Posebnost, ki loči ta tip razgradnje od ostalih tipov, je ravno tvorba konkavnih tunelov, ki imajo značilne trakasto oblikovane stene. Te so oblikovane v obliki polmeseca in označujejo smer gibanja bakterij ob razgradnji (Daniel in sod., 1987).

Drugi način razgradnje je razgradnja z erozijo. Poznamo dva tipa bakterij, ki razgrajujejo les na omenjen način. Prvi tip erodira celično steno v obliki koritom podobnih erozijskih odsekov, ki so paralelni s celuloznimi mikrofibrilami. Ker ima les progast izgled, se tej metodi razgradnje reče progasta erozija. V progah se pogosto nalagajo različni ostanki celične stene, predvsem ligninski ostanki. Osrednja lamela (sestavljena iz lignina) ostaja pri tem tipu razgradnje nerazgrajena ne glede na stopnjo razgradnje ostalih delov lesa. Drugi tip bakterij, ki razgrajujejo les uporablja stožčasto erozijo. Kot pri progasti eroziji, tudi pri tej bakterije ustvarjajo koritom podobne erozijske odseke, ki so v obliki stožca. Ta oblika erozijske razgradnje ni pogosta (Kim in Singh, 2000).

Najmanj je raziskan način razgradnje lesa s tvorbo votlin. Nastanek podobno kot pri razgradnji s tvorbo tunelastih struktur poteka iz notranje strani celične stene in poteka v smeri pravokotno vzdolž osi posameznih lesnih celic. Z rastjo števila bakterij oz. razgradnjo lesa se votline povečujejo in povezujejo. Zaradi redke prisotnosti tega tipa razgradnje v naravi se domneva, da je prisotna le v omejenih situacijah (Kim in Singh, 2000).

V naravnih okoljih je navadno prisoten več kot en tip mikrobne razgradnje naenkrat. Pogosta je kombinacija razgradnje mokrega lesa z glivami mehke gnilobe in bakterijami. Med bakterijskimi je najpogostejša razgradnja z erozijo, kar kaže na to, da imajo bakterije, ki uporabljajo ta tip razgradnje najvišjo toleranco na pomanjkanje/odsotnost kisika. Kako pomanjkanje kisika vpliva na bakterije drugih tipov ni poznano (Kim in Singh, 2000).

Izolacija in klasifikacija bakterij različnih tipov razgradnje mokrega lesa je problematična iz vidika pridobivanja čistih kultur. Zato se za identifikacijo bakterij, ki so pomembne pri razgradnji mokrega lesa uporablja molekularne metode, ki so pokazale, da erozijske bakterije, ki so najbolj pogosti razgrajevalci mokrega lesa spadajo v skupino imenovano CFB kompleks (*Cytophaga* – *Flavobacterium* – *Bacteroides*) (Nilsson in sod., 2008; Landy in sod., 2008). Pogosta je tudi skupina *Pseudomonas*, nekaj predstavnikov je tudi iz skupin *Cellvibrio* in *Brevundimonas* (Landy in sod., 2008).



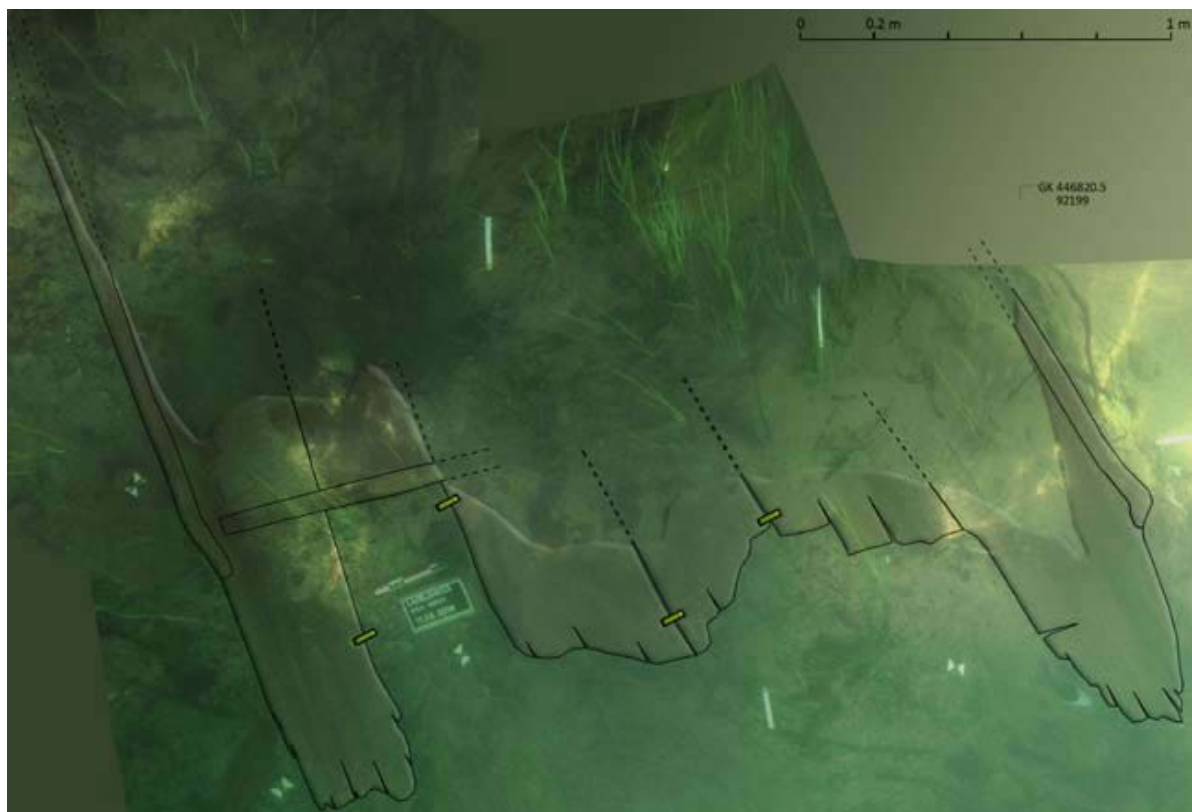
Slika 1: Prikaz bakterijske razgradnje mokrega lesa s tvobo tunelov (slika A) in erozijo (slika B) (Blanchette, 2000: 195). Puščice na sliki A prikazujejo mesta tunelom podobnih struktur in na sliki B mesta erozij.

2.1.2 Predstavitev okolij, iz katerih je bil pridobljeni arheološki mokri les preučevan v magistrski nalogi

Ljubljansko barje poleg svoje naravne pestrosti in raznolikosti predstavlja tudi velik arheološki potencial, saj so bili tam najdeni ostanki iz vseh arheoloških obdobj, od paleolitika do rimskega časa. To območje opredeljuje izreden geostrateški potencial, saj se v Ljubljanski kotlini srečajo tri geografske enote – alpski, predalpski in dinarsko – kraški svet, spodnji del kotline je po sredini razdeljen z zaključki Posavskega in Polhograjskega hribovja. Lega je pripomogla k razvoju pomembnih prazgodovinskih poti; iz severovzhoda se je jantarna pot priključila na povezano med Karpatsko kotlino in Caput Adriae, do Vrhnike je segala plovna pot iz Podonavja po Savi in Ljubljanici (Vojaković in sod., 2011). Vse to je pripomoglo k nastanku različnih naselbin na območju današnje Ljubljane in Vrhnike.

Na območju Vrhnike je znana velika prazgodovinska naselbina na hribu Tičnica nad Vrhniko, iz bronaste dobe so najdeni tudi naselbinski ostanki v strugi Ljubije pri Verdu (13. do 11. st. p.n.š.) ter v strugi Ljubljanice na Vrhniki. V mlajši železni dobi (2. do 1. st. p.n.š.), naj bi na Tičnici ležalo naselje keltskega plemena Tavriskov, ki so ga Rimljani kasneje poimenovali Navport (Nauportus). Po poročanju grškega geografa Strabona so prevažali tovor iz Ogleja (Aquileia) v Italijo v Navport, kjer naj bi stala mitninska postaja, dalje z ladjami po rekah do Donove. V prvi polovici 1. stoletja pr.n.š. so območje prevzeli Rimljani in na Dolgih njivah zgradili naselje z obzidjem in rečnim pristaniščem. Postojanka je ohranila izreden pomen pri prevozu tovara med Italijo in srednjim Podonavjem, pomembno vlogo je imela tudi pri prodiranju legije v osrednje Podonavje in severni Balkan (Plestenjak in sod., 2013).

Zaradi plovne poti med Navportom in Emono na tem območju najdemo različne razbitine rimskih tovornih ladij, ki so služile oskrbi enot s surovinami, gradbenim materialom, orožjem in hrano. Tako so leta 2008 med podvodnim terenskim pregledom struge Ljubljanice na Vrhniki odkrili razbitine zgodnjorimske tovorne ladje, ki je bila vrezana v rečni sediment in so jo v večjem delu prekrivale naplavine. Ladja je po ocenah dolga najmanj 16 m. Osrednji del sestavljajo talne platice, ki so spete z železnimi trakastimi spojkami. Prehod v boke tvorita t.i. čolnici, ki sta postavljeni na talni del pod skoraj pravim kotom. Glede na radiokarbonsko analizo je ladja stara približno 2000 let (zadnja desetletja p.n.š. ali prva desetletja n.š.). Zgrajena je iz bukovega lesa kar je precej nenavadno, saj je bil večinski gradbeni material tovornih ladij tistega časa smreka ali hrast. Iz vidika arheologije je zanimiva zaradi gradnje, pri kateri so uporabljali železne spojke in ne zamudno šivanje ladijskih trupov kot je bilo takrat v praksi tistega časa. Najdba je prikaz uvajanja novejših tehnologij gradenj celinskih tovornih ladij iz galskih in germanskih provinc (Gaspari in Erič, 2012).



Slika 2: Fotoskica odkritega dela ladijske razbitine (Gaspari in Erič, 2012: 2).



Slika 3: Virtualna rekonstrukcija značilne zgodnjerske tovarne ladje (Gaspari in Erič, 2012: 4).

Na območju današnje Ljubljane so že na prehodu iz kamene v bronasto dobo obstajali materialni dokazi, da so na tem območju živeli ljudje, kasnejši dokazi naselbin segajo v starejšo železno dobo, v kateri so ljudje živeli ob reki Ljubljanici in na Grajskem griču. Prve pisne vire in omembe o Ljubljani najdemo v rimskem obdobje s formiranjem Emone. Na parceli nekdanje livarne, kasneje tovarne koles in otroških vozičkov Tribuna (Karlovska cesta, Prule, Ljubljana) lahko zasledimo dokaze prvih naselbin v času 10 stoletja p.n.š. (pozna bronasta in začetek železne dobe). Na omenjeni lokaciji so locirali tudi del vojaškega tabora iz obdobja cesarja Avgusta (okrog 0 n.š.), ki je bil v uporabi daljše časovno obdobje. Na najdišču so našli različne ostanke zgodnje naselbine (hiše, tlakovane ceste, ognjišča in posode). Iz obdobja antike so našli vojaško opremo, usnje, zgodnjeantično keramiko, novce ... Poleg manjših predmetov so našli večje količine lesenih objektov – vodnjak, kole obrambnega jarka, kline, posodice, ... (Vojaković in sod. 2011). V obrambnih jarkih je bila najdena serija

140 kolov, zabitih v steno jarka v štirih linijah. Služili so kot dodatna obramba. Navpični koli so bili pravokotnega preseka (6-10 x 12 m) in na dnu obtesani s treh ali štirih strani v špico. Koli v najnižji vrsti so bili zapičeni najgloblje, tudi do 1 m pod negativ jarka, medtem ko so bile višje vrste zapičene tudi le do 0,5 m globine. Koli so zaradi močvirnatega terena (glinena tla in bližina reka Ljubljanice) izjemno dobro ohranjeni (Vojaković in sod., 2011).



Slika 4: Prikaz obrambnih kolov, ki služijo za okrepitev obrambnih jaškov (Vojaković in sod., 2011: 91).

2.1.3 Shranjevanje arheološkega mokrega lesa in najpogostejši načini konzervacije

Arheološki mokri les pogosto v svojem naravnem okolju obdrži svojo prvotno velikost in obliko, kar je posledica popolne nasičenosti vseh lesnih por z vodo. Zato je pri shranjevanju takšnih najdb pogosto največji problem izsuševanje, ki je lahko naključno zaradi neustreznega shranjevanja ali namensko za potrebe konzervacije. Neustrezno shranjevanje ali neustrezna konzervacija lahko privede do krčenja, nastanka razpok, spremembe oblike in celo sesutja lesnega materiala (Giachi in sod., 2010).

Poznamo dva tipa konzervacije – aktivno in pasivno. Med aktivne načine konzervacije prištevamo uporabo različnih impregnacijskih materialov (polietilen glikol, polipropilen glikol, različni sladkorji, voski, ...) v kombinaciji s sušenjem (kontrolirano počasno sušenje na zraku in pogostejše sušenje z zamrzovanjem v vakuumu). Med pasivne načine konzervacije prištevamo kontroliran ponoven zakop arheoloških lesenih najdb z *in situ* spremljanjem okoljskih parametrov. Zaradi velikega izbora načinov konzervacije moramo za izbor

ustreznega načina upoštevati nekatere zakonitosti in sicer mora biti način konzervacije prijazen do okolja, ekonomsko izvedljiv in revezibilen (Giachi in sod., 2010).

2.1.3.1 Aktivne metode konzervacije

Izmed vseh impregnacijskih materialov je najpogostejše uporabljen polietilen glikol (PEG), ki se uporablja praktično po celem svetu. Uporablja se lahko na dva načina. Lesen objekto se lahko prši z ogreto raztopino PEG s postopnim zviševanjem koncentracije tekočine med daljšega časovnega obdobja brez posebnega načina sušenja (sušenje na zraku). Drugi način je namakanje lesenih objektov v bazene s PEG in sušenje z zamrzovanjem (Brown, 1991). PEG je vodotopen polimer, ki je pri nižji molekularni masi v tekoči obliki (PEG400), pri višjih molekularnih masah v trdnih oblikah. V trdni obliki ga najdemo v obliki voska (PEG6000). V tekoči obliki se uporablja za impregnacijo bolj ohranjenih kosov arheološkega mokrega lesa, medtem ko se trše različice uporabljajo za impregnacijo materiala, ki je že precej razgrajen. Pogosto les ni razgrajen enakomerno, zato se uporablja kombinacija obeh tipov (Brown, 1991). Pogosto se metodi impregnacije s PEG dodajajo še biocidi, ki preprečujejo rast mikroorganizmov na interfazi voda – zrak, preprečujejo neprijeten vonj in preprečijo nadaljno razgradnjo lesa med impregnacijo. Postopek impregnacije poteka v velikih zabojnikih več mesecev, tudi let. Čas je odvisen od metode sušenja, velikosti objekta, tipa lesa in ohranjenosti. Kot dodatni biocidni agensi se pogosto dodajajo pentaklorofenat, borova kislina in borat (Giachi in sod., 2010). PEG ni toksični polimer, deluje po principu zniževanja deleža proste vode. Posledično pride do tolikšnega znižanja, da rast gliv in bakterij zaradi osmolarnosti ni več mogoča. Inhibicija rasti ciljnih mikroorganizmov s PEG je uspešna, vendar pogosto povzroči kolonizacijo in razrast drugih vrst mikroorganizmov, ki za samo razgradnjo niso nevarne, medtem ko so nevarne za zdravje ljudi (Björdal in Nilsson, 2001).

Poleg PEG se uporabljajo tudi drugi impregnacijski materiali npr. polipropilen glikol (PPG), različni sladkorji npr. α - α -trehaloza, hidroksipropilceluloza, različni voski, silikati in silikatni materiali (Giachi in sod., 2010). Med novejšje tehnologije, ki so uporabne za konzervacijo arheološkega mokrega lesa, prištevamo tudi uporabo nanodelcev kalcijevega in magnezijevega hidroksida in karbonata (Baglioni in Giorgi, 2006). PPG se od PEG razlikuje po nižji higroskopnosti in viskoznosti ter ima tudi protibakterijski učinek. α - α -trehaloza je modificiran disaharid glukoze, ki ne vsebuje notranjih vodikovih vezi, kar omogoča večjo fleksibilnost okoli glukozidne vezi. V vodnih raztopinah ruši vodikove vezi med molekulami vode in s tem znižuje urejenost molekul in pospešuje odstranjevanje molekul vode med sušenjem (Giachi in sod., 2010).

2.1.3.2 Pasivne metode konzervacije

Med pasivne načine konzervacije spada metoda ponovnega zakopa različnih arheoloških mokrih kosov lesa. Primerna je predvsem za večje kose lesa (npr. razbitine različnih plovil – ladje, deblaki), saj je cenovno ugodnejša in sprejemljivejša iz vidika omejenega ustreznega shranjevalnega prostora (preprečevanje izsuševanja, konzervacija) kakor konzervacija s

klasičnimi konzervacijskimi metodami. Pri izvedbi zakopa je potrebna ustrezna predpriprava, ki obsega spremljanje okoljskih dejavnikov, predvsem temperature, pH, koncentracije raztopljenega kisika, redoks potenciala in električne prevodnosti. Predvsem je pomembno spremljanje parametrov neposredno ob shranjenem lesu. Pri samem načrtovanju je potrebno preveriti še variiranje okoljskih dejavnikov po globini izbranega materiala. Na primer pri primerjavi ustreznosti različnih globin za hrambo arheološkega lesa v morskem sedimentu (na površini morskega dna, pod površjem in na globini 50 cm) se izkaže, da koncentracija raztopljenega kisika pada z globino, redoks potencial kmalu postane negativen in pride do vzpostavitve anaerobnega okolja. pH vrednost z globino ne variira, koncentracija amonija se stabilizira neposredno pod površjem. Koncentracija nitrata se poveča na površini in pod površjem vendar pade na globini 50 cm (Gregory, 1995). Primerna globina zakopa je torej vsaj 50 cm, pomembna je tudi izbira materiala, ki naj vsebuje višji delež manjših teksturnih delcev. Primerna je glina, mulj in pesek, saj se v takšnih materialih anaerobni pogoji zagotovijo hitreje. Primerna je tudi uporaba različnih sintetičnih vlaken, ki preprečujejo erozijo sedimenta (Curci, 2006).

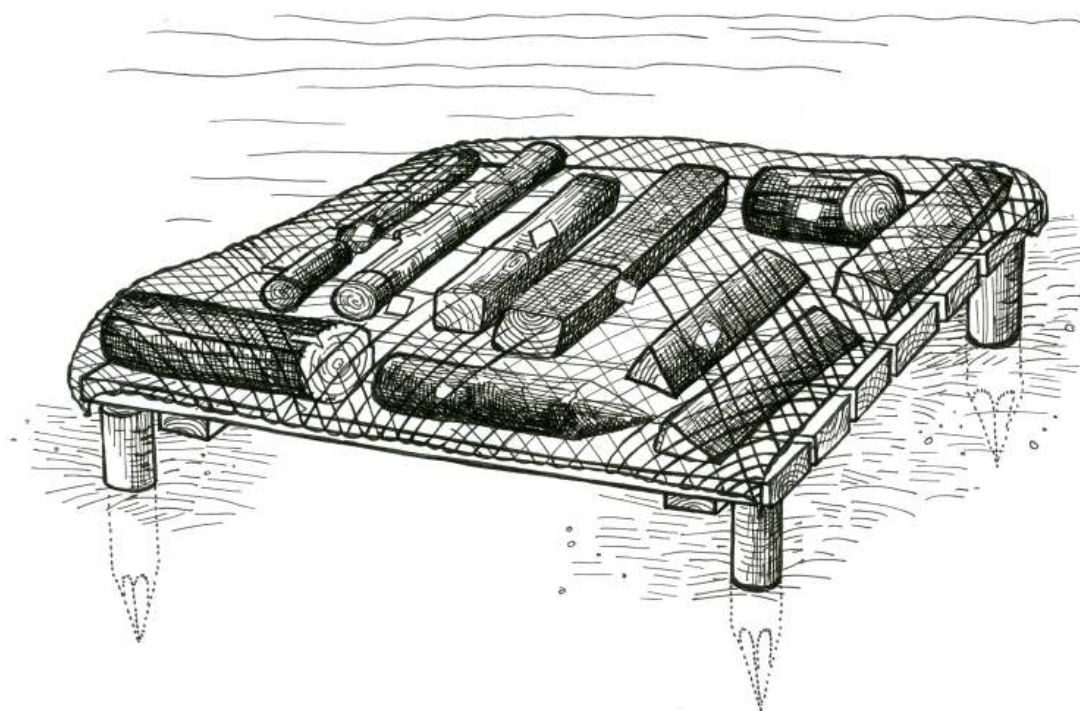
2.1.4 Poskus shranjevanja arheološkega mokrega lesa *in vivo* – depozitorij v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju

Na Ljubljanskem barju, točneje na Verdu pri Vrhniki najdemo 6 ribnikov, ki so ostanek nekoč delujoče opekarne. Objekti opekarne še vedno stojijo ob avtocesti Vrhnika-Ljubljana. Opekarna je delovala od sredine 19. stoletja do okoli 1965 (Opis enote nepremične kulturne dediščine, 2014). Po kopanju gline na omenjeni lokaciji je ostalo 6 glinenih jam, ki so se sčasoma napolnile z vodo. Štiri jame oz. ribniki so manjši in plitvejši, medtem ko sta dva ribnika globlja in sicer je največja izmerjena globina 7 metrov. Ribniki so brez pritoka, na višino vode vplivajo predvsem padavine in višina podtalnice. Trije bazeni so med seboj povezani s prekopi, prvi služi kot gojitveni ribnik, druga dva sta namenjena ljubiteljskemu ribištvu in potapljanju. Tri manjše mlake, ki ležijo neposredno do brežine reke Ljubljanice nimajo očitnejše funkcije. Okoli opuščenih glinokopov vodi sprehajalna pot (Vidmar, 2013).



Slika 5: Prikaz razporeditve posameznih ribnikov v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju (Google Earth, 2013). Na sliki je označeno nahajališče platforme depozitorija in nahajališče razbitin rimske tovorne ladje.

Zaradi velike količine arheološkega mokrega lesa, ki ga arheologi najdejo pri izkopavanjih na Ljubljanskem barju, se je pokazala potreba po postavitvi depozitorija, ki bi čim ustrezneje hranil arheološke najdbe, ki so na najdiščih pogosto ogrožene zaradi gradnje, onesnaženja tal ali vode, preusmerjanja vodnih tokov in rekonstrukcij brežin. Tako so arheologi v severovzhodnem delu ribnika Divjak (zadnji od treh povezanih ribnikov) oktobra leta 2012 postavili podvodni depozitorij. Postavljen je na relativno ravnem dnu, ki polagoma pada od severa proti jugu. Globina depozitorija sezonsko niha in sicer je platforma depozitorija poleti na globini med 3,5 – 4, pozimi med 5 – 5,5 metrov. Lesene ploščadi so postavljene druga ob drugi vzporedno z daljšimi stranicami in sestavljajo približno vodoravno površino v velikosti 4 m x 16 m. Sidrane so 0,5 m – 1 m nad sedimentom. Med poskusnim obdobjem petih let se bodo spremljali različni okoljski dejavniki, iz katerih bo možno oceniti primernost okolja za dogoročno shranjevanje lesenih arheoloških najdb (Kavkler in sod., 2014).



Slika 6: Shematski prikaz podvodnega depozitorija za hrambo lesenih arheoloških najdb na dnu ribnika Divjak (Kavkler in sod., 2014: 6).

2.2 MONITORING IZBRANEGA OKOLJA

Voda je najpomembnejša sestavina, ki je potrebna za življenje na Zemlji. Na kvaliteto vodnega okolja vplivajo naravni procesi predvsem vreme in erozija tal ter antropogeni vnosi, ki so predvsem posledica vnosov različnih odpadnih voda iz gospodinjstev in industrijskih obratov. Med okoljskimi onesnaževali so najbolj problematične kovine (toksični vpliv, bioakumulativnost v jezerskem ekosistemu) (Balal Arain in sod., 2008). V magistrski nalogi smo izvajali monitoring v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju, na Verdu pri Vrhniki in sicer od marca do novembra 2013 povprečno dvakrat mesečno. V osem mesečnem obdobju smo vzorčili štirinajstkrat.

2.2.1 Okoljski dejavniki

Spremljanje različnih okoljskih dejavnikov jezer in drugih površinskih vodnih teles je pomembno predvsem iz vidika zagotavljanja javnega zdravja ljudi in funkcioniranja ekosistema. S spremljanjem fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov vodnih teles spremljamo in posledično ustrezno odreagiramo ob morebitni neustreznosti. Preko vode se lahko prenašajo različni bolezenski povzročitelji, toksične in rakotvorne snovi (Balal Arain in sod., 2008). Fizikalno kemijski parametri, ki se najpogosteje spremljajo za oceno kvalitete vode, so: temperatura, pH, elektroprevodnost, raztopljen kisik, skupna sušina, suspendirana

sušina, raztopljena sušina, alkalnost, trdota vode, amonij, nitrat, fosfor, fluorid, klorid, sulfid in železo (Wankhade in sod., 2012).

Med biološke parametre, ki se spremljajo pri monitoringu vodnih teles, spada koncentracija fitoplanktona v enotah na liter oz. koncentracijo klorofila-*a*. Pri mikrobioloških parametrih se najpogosteje spremlja celokupno število koliformnih mikroorganizmov in število fekalnih koliformov (Karafistan in sod., 2005).

Temperatura je eden od najpogosteje izmerjenih okoljskih parametrov, saj je merjenje izredno enostavno. Je pomemben parameter, saj nadzoruje hitrost vseh kemijskih in biokemijskih reakcij. S spremljanjem temperature po globini vodnega stolpca lahko ocenimo tudi dogajanje v jezeru. Predvsem je pomembna porazdelitev temperature po globini vodnega stolpca. Vzpostavitev stratifikacije v jezeru omejuje prenos hranil in kisika med plastmi vode, ki se zaradi razlike v gostoti med seboj ne mešajo (Patil in sod., 2012).

Vrednost pH je pomemben parameter, saj določa korozivno naravo vode (nižji kot je, višja je korozivnost). Vrednost pH pozitivno korelira z električno prevodnostjo in celokupno alkalnostjo. Do zvišanja vrednosti pH pogosto pride v poletnih mesecih kot posledica znižane stopnje fotosintetske aktivnosti, asimilacije ogljikovega dioksida in ogljikovodikov in nizke (oz. nižje) koncentracije raztopljenega kisika. Opažene višje vrednosti pH kažejo na spremembe v ravnotežju med ogljikovim dioksidom in karbonatom ter ogljikovodikov (Patil in sod., 2012).

Prevodnost signifikantno korelira z različnimi parametri in sicer s temperaturo, pH vrednostjo, alkalnostjo, trdoto vode, kalcijem, skupno sušino, suspendirano sušino, raztopljeno sušino, kemijsko potrebo po kisiku, ... Je parameter, ki se uveljavlja tudi pri analizi podzemnih pitnih voda (Patil in sod., 2012).

Koncentracija **raztopljenega kisika** je najpomembnejši parameter pri monitoringu jezer, drugih stoječih voda in tudi pitne vode. Korelira z različnimi parametri in sicer se koncentracija raztopljenega kisika znižuje z višanjem temperature in povečevanjem mikrobne aktivnosti. Med poletnimi meseci lahko ostaja koncentracija, kljub temu visoka zaradi povečane fotosintezne aktivnosti, ki je posledica daljšega dneva in daljše sončne obsevanosti (Patil in sod., 2012).

OECD diagram verjetnostne porazdelitve ali Vollenweider-jev izrek razvršča stoječe vode v različne trofične nivoje glede na koncentracijo hranil in sicer v 5 skupin:

- ultraoligotrofno okolje (zelo revno s hranili)
- oligotrofno okolje (revno s hranili)
- mezotrofno okolje (zmerno bogato s hranili)
- evtrofno okolje (bogato s hranili)
- hiperevtrofno (izredno bogato s hranili) (Vollenweider, 1968, cit. po Skubic, 2006).

V različne razrede jezera lahko uvrščamo na podlagi koncentracije celokupnega fosforja in dušika ali na podlagi indikatorjev kakovosti jezerske vode, ki so:

- Celokupni fosfor
- Koncentracija klorofila-*a*
- Globina določena s Seccijevim diskom
- Koncentracija kisika v hipolimniju (Vollenweider, 1968, cit. po Skubic, 2006).

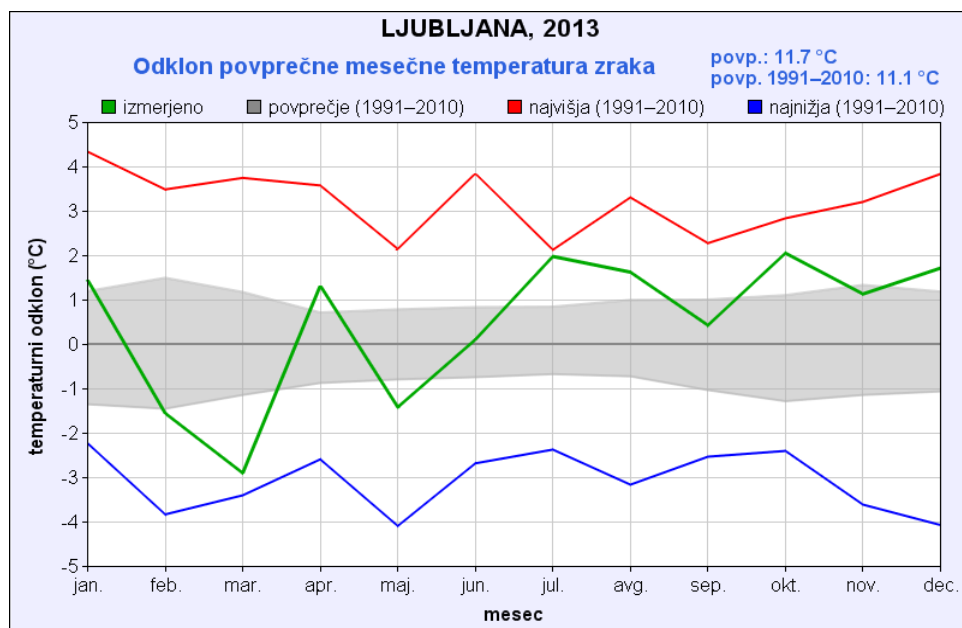
Preglednica 1: OECD kriteriji za uvrstitev jezer v trofično kategorijo (Remec-Rekar, 2012).

	Fosfor celotni (povprečje) [µg P/L]	Dušik anorg. (povprečje) [µg N/L]	Prosojnost (povprečje) [m]	Prosojnost (minimum) [m]	Klorofil-<i>a</i> (povprečje) [µg/L]	Klorofil-<i>a</i> (maksimum) [µg/L]
u-oligotrofno	< 4	< 200	>12	>6	< 1	< 2,5
oligotrofno	< 10	200 – 400	>6	>3	< 2,5	< 8
mezotrofno	10 – 35	300 – 650	6 – 3	3 – 1,5	2,5 – 8	8 – 25
evtrofno	35 – 100	500 – 1500	3 -1,5	1,5 – 0,7	8 – 25	25 – 75
hiperevtrofno	>100	>1500	< 1,5	< 0,7	>25	> 75

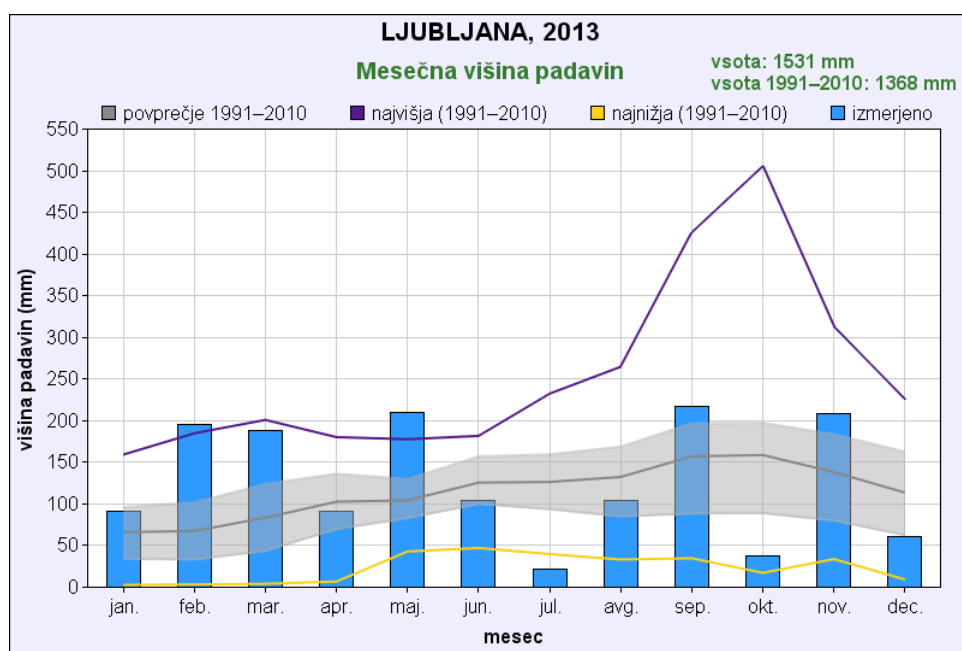
2.2.2 Pregled povprečnih mesečnih temperatur, višine padavin in trajanja sončnega obsevanja za področje Ljubljane v letu 2013

Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) je organ v sestavi Ministrstva za okolje in prostor. Prvotno se je imenoval Hidrometeorološki zavod, ustanovljen 15. aprila 1947. Z dnem ustanovitve so se združile takratne hidrološke in meteorološke postaje in ustanove na ozemlju republike Slovenije (Manohim, 1968). Hidrometeorološki zavod Slovenije se je v letu 2001 preoblikoval v Agencijo Republike Slovenije za okolje. Ukvarja se s spremljanjem, analizo in napovedovanjem naravnih pojavov in procesov v okolju ter zmanjševanjem naravne ogroženosti ljudi in njihovega premoženja. V njihov sklop nalog sodijo nacionalne službe za meteorologijo, hidrologijo in seizmologijo (Knez, 2015).

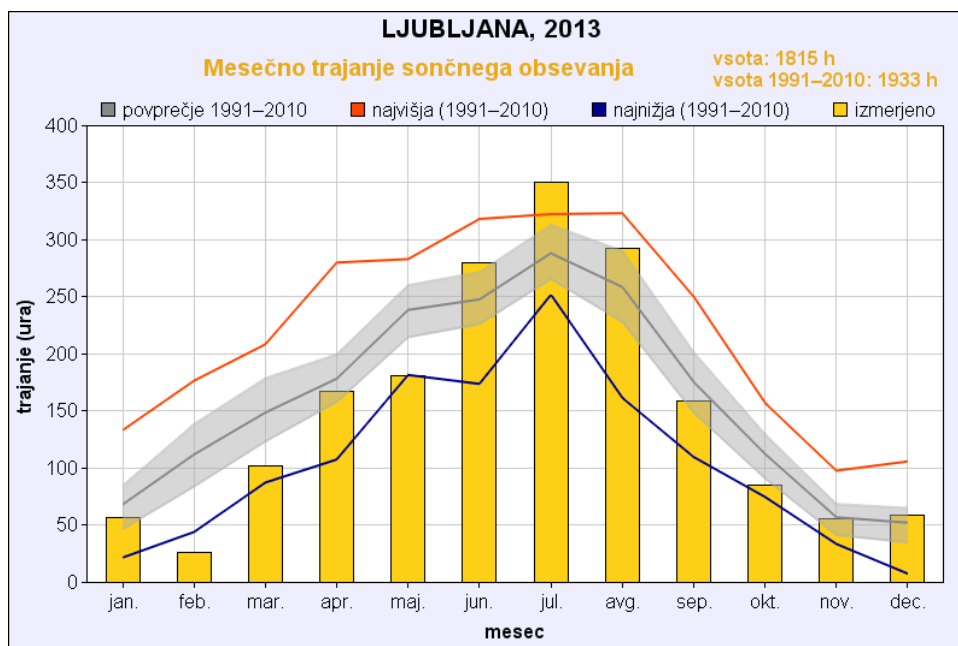
Mesečno pripravljajo Bilten z opisom vremenskih razmer v preteklem mesecu, spremljajo izredne vremenske dogodke in o njih pripravljajo podrobna poročila. Pripravljajo pregled vremenskih rekordov, spremljajo in dokumentirajo različne okoljske parametre npr. povprečne mesečne in letne temperature, količine padavin in trajanje sončnega obsevanja po posameznih krajih. Pripravljajo tudi različne zanimive primerjave tekočih vremenskih pojavov s povprečnimi vrednostmi (Vreme in podnebje, 2015).



Slika 7: Prikaz odklona povprečne mesečne temperature zraka za Ljubljano v letu 2013. Agencija Republike Slovenije za okolje spremlja in beleži temperaturo zraka za vsako posamezno leto in za posamezen kraj po Sloveniji. Povprečno mesečno temperaturo primerja s temperaturnim povprečjem zadnjih 20. let. Slika prikazuje odstopanja izmerjene temperature od povprečnih vrednosti ter prikaže tudi najvišje in najnižje povprečne vrednosti za zadnjih 20 let (ARSO, 2015a).



Slika 8: Prikaz mesečne višine padavin za Ljubljano v letu 2013. Agencija Republike Slovenije za okolje spremlja in beleži mesečno višino padavin za posamezno leto in posamezen kraj v Sloveniji. Mesečno višino padavin primerja s povprečno višino padavin za zadnjih 20. let. Slika prikazuje odstopanja izmerjene višine padavin od povprečnih vrednosti ter prikaže tudi najvišje in najnižje povprečne vrednosti za zadnjih 20 let (ARSO, 2015b).



Slika 9: Prikaz mesečnega trajanja sončnega obsevanja za Ljubljano v letu 2013. Agencija Republike Slovenije za okolje dnevno spremlja in beleži trajanje sončnega obsevanja v posameznih krajih po Sloveniji in v posameznem letu. Slika prikazuje mesečno trajanje sončnega obsevanja napram 20 letni povprečni mesečni sončni obsevanosti ter prikazuje tudi najvišje in najnižje povprečne vrednosti za zadnjih 20 let (ARSO, 2015c).

2.2.3. Pregled okoljskih dejavnikov jezer v Sloveniji

Slovenija je bogata z različnimi jezери, ki so najrazličnejših velikosti, globin, načinov nastanka, ... Najbolj znani sta Blejsko in Bohinjsko jezero ter jezera Triglavskega narodnega parka. Jezera v Triglavskem narodnem parku, spadajo med gorska jezera. Zaradi geološke podlage jih je razmeroma malo (napram sosednjim državam Italiji in Avstriji) ter so precej plitva in različno velika (Brancelj, 1999). Blejsko in Bohinjsko jezero spadata v kategorijo globokih alpskih jezer. Ker sta vključeni v interkalibracijsko mrežo, tam poteka nadzorno spremljanje okoljskega stanja. To pomeni, da se v skladu z Metodologijami določanja ekološkega stanja v 6 letnem obdobju načrta spremlja vse biološke elemente kakovosti vode (Remec-Rekar, 2010). V program monitoringa kakovosti jezer so vključeni še zadrževalniki Šmartinsko, Slivniško, Perniško, Gajševsko in Ledavsko jezero, Klivnik, Molja in Vogršček ter rečni akumulaciji Ptujsko in Ormoško jezero (Preglednica 2).

Preglednica 2: Splošni fizikalno – kemijski parametri in koncentracija klorofil-*a* za nekatera slovenska jezera in zbiralnike v obdobju med leti 2007 in 2012 (Remec-Rekar, 2007; Remec-Rekar, 2008; Remec-Rekar, 2009; Remec-Rekar, 2010; Remec-Rekar, 2011; Remec-Rekar, 2012).

	Fosfor celotni (povprečje) [µg P/L]	Dušik anorg.(povprečje) [µg N/L]	Prosojnost (povprečje) [m]	Prosojnost (minimum) [m]	Klorofil-<i>a</i> (povprečje) [µg/L]	Klorofil-<i>a</i> (maksimum) [µg/L]
Bohinjsko jezero – oligotrofno jezero*						
2007	5,2	512	9,2	/	1,0	/
2008	3,6	454	9,0	/	1,0	/
2009	3,5	394	8,3	/	1,2	/
2010	4	369	8,5	6	1,2	3,9
2011	5	334	10	9,5	1,0	5,7
2012	5	395	9,9	8,1	1,0	1,3
Povprečje	4,4	409,7	9,15	7,9	1,1	3,6
Blejsko jezero – mezotrofno jezero*						
2007	12,7	350	8,3	/	2,7	/
2008	11,0	350	6,6	/	3,9	/
2009	13,2	422	5,0	/	3,7	/
2010	12,0	299	4,5	2,5	7,3	19,4
2011	10,0	284	6,0	3,9	3,9	6,0
2012	13	283	6,7	3,9	4,2	5,5
Povprečje	12	331,3	6,2	3,4	4,3	10,3
Velenjsko jezero – mezotrofno do evtrofno jezero*						
2007	94	2711	4,75	3,5	3,9	7,4
2008	30,4	765,7	4,6	/	3,3	6,63
2009	24,5	1433	6,8	/	2,6	2,38
2010	55	1315	6,1	2,5	3,5	5,1
2011	53	1668	6	3	3	4,3
2012	49	1170	6,7	6,5	20,3	26,0
Povprečje	51,0	1510,5	5,8	4	6,1	8,6
Šmartinsko jezero – evtrofno jezero*						
2007	95	811	0,76	0,6	9,4	76,2
2008	48,7	706,5	1,1	/	10,5	/
2009	39	494	/	/	9,5	/
2010	46	681	1	0,6	27,6	75,1
2011	29	522	1	0,5	4,6	8,3
2012	30	609	1,4	0,9	4,5	7,7
Povprečje	48,0	637,3	1,1	0,7	11,34	30,1
Perniško jezero – hiperevtrofno jezero						
2007	192	1401	0,22	0,1 51,9		77,2
2008	126,2	893,0	0,5	/	41,01	/
2009	252	470	/	/	45,0	/
2010	180	760	0,4	0,2	64,8	118,0
2011	224	798	0,3	0,1	30,9	57,8
2012	307	635	0,3	0,2	76,1	177,7
Povprečje	213,5	826,2	0,3	0,15	51,6	107,7

/ - ni podatka

Povprečje je izračun 5-letnega povprečja (2007-2012)

*ocena trofične kategorije glede na 5-letno povprečje

Preglednica 3: Povprečna vsebnost fosforjevih in dušikovih spojin, prevodnost in koncentracija klorofila-*a* v gorskih jezerih v Triglavskem narodnem parku v obdobju med 1994 in 1998 (Brancelj, 1999). Vzorci so odvzeti na najgloblji točki jezera ob koncu turistične sezone (konec avgusta ali začetek septembra).

Jezero	Celokupni dušik [mg/L]	Celokupni fosfor [µg/L]	Električna prevodnost [µS/cm]	Klorofil-<i>a</i> [µg/L]
Zgornje Kriško jezero	0,69	23,61	123,68	0,77
Rjavo jezero	1,10	18,08	151,00	0,20
Jezero pod Vršakom	1,13	21,34	135,24	1,50
Zeleno jezero	0,95	19,51	147,38	0,57
Srednje Kriško jezero	0,76	24,48	132,62	0,64
Spodnje Kriško jezero	0,83	23,45	150,87	2,32
Jezero v Ledvicah	1,20	29,53	167,85	0,69
Jezero v Lužnici	1,41	40,73	199,15	3,52
Jezero na Planini pri Jezeru	2,21	181,17	258,73	11,52
Krnsko jezero	0,96	27,63	179,02	5,43
Dupeljsko jezero	1,19	29,60	177,40	3,82
Črno jezero	1,12	15,21	158,53	1,00

3 MATERIALI IN METODE

3.1 MATERIALI

3.1.1 Kemikalije

- absolutni etanol $\geq 99,8$ % (v/v) C_2H_5OH $M_w = 46,07$ g/mol (Sigma Aldrich, ZDA)
- amonijev heptamolibdat $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ $M_w = 1235,86$ g/mol (Merck, Nemčija)
- amonijev nitrat NH_4NO_3 $M_w = 80,04$ g/mol (Riedel-de Haën, Nemčija)
- destilirana voda
- dikalijski fosfat K_2HPO_4 $M_w = 174,18$ g/mol (Sigma Aldrich, ZDA)
- fosforna kislina 85 % (v/v) $M_w = 98,0$ g/mol (Merck, Nemčija)
- kalcijev klorid $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ $M_w = 147,01$ g/mol (Sigma Aldrich, ZDA)
- kalijev dihidrogen fosfat KH_2PO_4 $M_w = 136,09$ g/mol (Sigma Aldrich, ZDA)
- kalijev klorid KCl $M_w = 74,55$ g/mol (Acros Organics, Nemčija)
- karbinol melahit zeleno $C_{23}H_{26}N_2O \cdot HCl$ $M_w = 383$ g/mol (Sigma Aldrich, ZDA)
- laktoza (Torlak, Srbija)
- magnezijev sulfat heptahidrat $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ $M_w = 246,48$ g/mol (Merck, Nemčija)
- MUG (4-methylumbelliferyl- β -D-glucuronide) (Biolife, Italija)
- N-10 naftiletilendiamin dihidroklorid $C_{12}H_{14}N_2 \cdot 2HCl$ $M_w = 259,18$ g/mol (Fluka, ZDA)
- natrijev dikromat $Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$ $M_w = 298,0$ g/mol (Sigma-Aldrich, ZDA)
- natrijev klorid $NaCl$ $M_w = 58,44$ g/mol (Merck, Nemčija)
- polivinil alkohol $[CH_2CH(OH)]_n$ $M_w = 30,000-70,000$ g/mol (Sigma-Aldrich, ZDA)
- sulfanilamid $C_6H_8N_2O_2S$ $M_w = 172,2$ g/mol (Sigma Aldrich, ZDA)
- triptofan (Biolife, Italija)
- trizma base $C_4H_{11}NO_3$ $M_w = 121,11$ g/mol (Sigma Aldrich, ZDA)
- trizma hidroklorid $C_4H_{11}NO_3 \cdot HCl$ $M_w = 157,62$ g/mol (Sigma Aldrich, ZDA)
- žolčne soli No. 3 (Biolife, Italija)
- žveplova kislina H_2SO_4 95-98 % (v/v) $M_w = 98,08$ g/mol (Sigma-Aldrich, ZDA)

3.1.2 Gojišča in raztopine

- Fiziološka raztopina
 - 9 g NaCl
 - 1000 mL destilirane vode
- Gojišče LTB (lauryl tryptose broth) (Biolife, Italija)
 - 35,6 g Lauryl tryptose broth
 - 1000 mL destilirane vode
- Gojišče EC (*E. coli*) z MUG (4-methylumbelliferyl- β -D-glucoronide)
 - 20 g triptoze
 - 5 g laktoze
 - 1,5 g žolčnih soli No.3
 - 4 g K₂HPO₄
 - 1,5 g KH₂PO₄
 - 50 mg MUG
 - 1000 mL destilirane vode
- Gojišče L-EMB (Levine eosin-methylene blue agar) (Sigma-Aldrich, ZDA)
 - 37,5 g Levine EMB agar
 - 1000 mL destilirane vode
- Gojišče R2A-agar (Sigma Aldrich, ZDA)
 - 18,12 g R2A agar
 - 1000 mL destilirane vode
- Raztopina soli za heterotrofe (10x koncentracija)
 - 1 g MgSO₄·7H₂O
 - 0,19 g NH₄NO₃
 - 0,14 g K₂HPO₄
 - 0,02 g KH₂PO₄
 - 0,05 g CaCl₂
 - destilirane vode do 100 mL
- Raztopina SA + NEDA
 - 10 g sulfanilamida C₆H₈N₂O₂S
 - 100 mL koncentrirane H₃PO₄ 85 % (v/v)
 - 0,5 g N – 10 naftiletildiamin dihidroklorida
 - destilirane vode do 1000 mL

- Reagent 1 (raztopina AMP)
10,6 mL koncentrirane žveplove kisline H_2SO_4 98 % (v/v)
1,755 g amonijevega heptamolibdata $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
destilirane vode do 100 mL
- Reagent 2 (raztopina melanhit zelenega)
0,35 g polivinil alkohola $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})]_n$
35 mg karbinol melahit zeleno $\text{C}_{23}\text{H}_{26}\text{N}_2\text{O} \cdot \text{HCl}$
destilirane vode do 100 mL

3.1.3 Vzorci arheološkega mokrega lesa, sedimenta in vode

- Arheološki mokri les – bukev (rimska tovorna ladja) – najdišče SI – 80, datum 13.10.2012, najdba VZ 36, sek/kv SIG 12
- Arheološki mokri les – bukev (rimska tovorna ladja) – najdišče SI – 80, datum 13.10.2012, najdba VZ 39, sek/kv SIG 12
- Arheološki mokri les – bukev (rimska tovorna ladja) – najdišče SI-80, datum 12.10.2012, najdba: vzorec 1012 les, sek/kv SIG 12
- Arheološki mokri les – hrast (kol rimske tribune) – najdišče EŠD 329 (Karlovska cesta, Ljubljana), datum 16.7.2008, vzorec delovno/02
- Sediment iz obrežja opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju
- Sediment neposredno izpod platforme depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju
- Sediment iz reke Ljubljanice – najdišče SI – 80, datum 12.10.2012, najdba: vzorec 1008 sediment, sek/kv SIG 12
- Voda iz obrežja opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju
- Voda iz globine 0,5 m neposredno nad platformo depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju
- Voda iz globine 1 m neposredno nad platformo depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju
- Voda iz globine 2 m neposredno nad platformo depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju
- Voda iz globine 3 m neposredno nad platformo depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju
- Voda iz globine 4 m neposredno nad platformo depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju
- Voda odvzeta neposredno na platformi depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju
- Voda odvzeta na globini 0,5 m na različnih vzorčnih točkah transekta (T1, T2, T3, T4 in T5) v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju, datum vzorčenja 8. junij 2013 (Slika 7)
- Voda odvzeta na obrežju reke Ljubljanice, datum vzorčenja 19. 08. 2013

- Voda odvzeta neposredno nad najdiščem rimske tovarne ladje v reki Ljubljanici, datum vzorčenja 12.10.2012

3.2 METODE

3.2.1 Spremljanje hitrosti razgradnje arheološkega mokrega lesa

3.2.1.1 Priprava vzorcev

3.2.1.1.1 Ugotavljanje biološke in kemijske razgradnje arheološkega mokrega lesa

Za testiranje biološke in kemijske razgradnje arheološkega mokrega lesa smo pripravili različne vzorce. Eksperiment smo izvajali v 125 mL serumskih stekleničkah. Pomembnost posameznega tipa razgradnje smo preverjali v sedimentu iz reke Ljubljanice in vodi iz reke Ljubljanice. Za ovrednotenje biološke razgradnje mokrega lesa v sedimentu smo v 125 mL serumske stekleničke v treh ponovitvah zatehtali 5 g arheološkega mokrega lesa bukve (najdišče SI – 80, datum 13.10.2012, najdba VZ 36, sek/kv SIG 12) narezanega na približno 2-4 mm velike koščke. Les smo prekrižali z 10 g sedimenta iz reke Ljubljanice (najdišče SI – 80, datum 12.10.2012, najdba: vzorec 1008 sediment, sek/kv SIG 12). Enak postopek smo ponovili tudi pri pripravi vzorcev za testiranje kemijske razgradnje. Te smo avtoklavirali 60 minut pri 121 °C dvakrat v razmaku 24 ur, da bi uničili prisotne mikroorganizme. Vzorcev za prikaz biološke razgradnje nismo avtoklavirali. Stekleničke smo plinotesno zaprli s sterilnimi gumijastimi zamaški in pokrovčki. Za ovrednotenje biološke razgradnje mokrega lesa v vodi smo sediment zamenjali z 20 mL vode iz reke Ljubljanice (datum vzorčenja 12.10.2012), ostalo je pri pripravi vzorcev ostalo enako.

Inkubacija je potekala 191 ur pri 28 °C. Med inkubacijo smo spremljali količino nastalega CO₂, ki posredno predstavlja hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa. Merjenja smo izvajali s plinskim kromatografom pri sobni temperaturi in sicer takoj po zaprtju serumskih stekleničk (čas 0), po 24, 47, 93 in 191 urah inkubacije.

3.2.1.1.2 Testiranje vpliva okoljskih dejavnikov na razgradnjo arheološkega mokrega lesa

3.2.1.1.2.1 Vpliv temperature

Vpliv temperature na razgradnjo arheološkega mokrega lesa smo spremljali preko nastajanja CO₂ v 125 mL serumskih stekleničkah. Izbrali smo različne temperature – 4, 15, 28 in 37 °C. Za posamezno temperaturo inkubacije smo v treh ponovitvah zatehtali 5 g arheološkega mokrega lesa hrasta (najdišče Karlovska cesta, Ljubljana, datum 16.7.2008, vzorec delovno/02) narezanega na približno 2 – 4 mm velike koščke in ga prelili z 20 mL sterilne destilirane vode. Negativno kontrolo posameznim vzorcem smo pripravili na enak način kot vzorec, s to razliko, da smo jih avtoklavirali 60 minut pri 121 °C dvakrat v razmaku 24 ur. Stekleničke smo plinotesno zaprli s sterilnimi gumijastimi zamaški in pokrovčki ter predinkubirali 3 dni na sobni temperaturi (termostatiranje). Po predinkubaciji smo serumske

stekleničke prezračili in dodali 100 μL sterilne 10 kratne raztopine soli za heterotrofe (končna koncentracija soli v serumski steklenički je bila 5 krat višja od priporočene koncentracije v hranilnih gojiščih (optimalna koncentracija mikrohranil). Inkubacija je potekala 193 ur na izbrani temperaturi. Med inkubacijo smo spremljali količino nastalega CO_2 . Merjenja smo izvajali s plinskim kromatografom pri sobni temperaturi in sicer takoj po ponovnem zaprtju serumskih stekleničk (čas 0), po 24, 48, 96 in 193 urah inkubacije.

3.2.1.1.2.2 Vpliv kisika

Vpliv kisika na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa smo spremljali preko količine nastalega CO_2 v 125 mL serumskih stekleničkah. Vpliv kisika smo preverjali za hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa bukve (najdišče SI – 80, datum 13.10.2012, najdba VZ 36, sek/kv SIG 12) v sedimentu in vodi iz reke Ljubljanice. Vzorci so bili enaki kot so opisani v poglavju 3.2.1.1.1 V oksičnih razmerah smo imeli v serumskih stekleničkah atmosfero s kisikom, v anoksičnih razmerah smo v stekleničkah po zaprtju atmosfero zamenjali z dušikom. Za negativno kontrolo smo uporabljali avtoklaviran vzorec pripravljen kot je opisano v poglavju 3.2.1.1.1. Inkubacijski pogoji in način merjenja količine CO_2 s plinskim kromatografom so bili opisani v istem poglavju.

3.2.1.1.2.3 Vpliv mikrohranil

Vpliv mikrohranil na razgradnjo arheološkega mokrega lesa smo spremljali z merjenjem količine nastalega CO_2 s plinskim kromatografom. Eksperiment je potekal v 125 mL serumskih stekleničkah pri treh različnih koncentracijah mikrohranil – brez dodatka mikrohranil, enkratna koncentracija mikrohranil (priporočena koncentracija v hranilnih gojiščih) in petkratna koncentracija mikrohranil (5 krat višja koncentracija od priporočene). Za posamezno koncentracijo mikrohranil smo v treh ponovitvah zatehtali 5 g arheološkega mokrega lesa hrasta (najdišče Karlovška cesta, Ljubljana, datum 16.7.2008, vzorec delovno/02) narezanega na približno 2 – 4 mm velike koščke in ga prelili z 20 mL sterilne destilirane vode. Serumske stekleničke smo plinotesno zaprli s sterilnimi gumijastimi zamaški in pokrovčki ter predinkubirali 3 dni na sobni temperaturi. Po predinkubaciji smo serumske stekleničke prezračili in dodali ustrezen volumen sterilne desetkratne raztopine soli za heterotrofe. Za ničkratno koncentracijo nismo dodali raztopine soli za heterotrofe, za enkratno koncentracije smo dodali 20 μL in za petkratno koncentracijo 100 μL raztopine soli za heterotrofe. Negativne kontrole smo pripravili na enak način kot je opisano v poglavju 3.2.1.1.2.1. Prav tako smo na enak način izvedli inkubacijo in merjenje CO_2 .

3.2.1.1.2.4 Vpliv pH

Vpliv pH na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa smo spremljali s plinskim kromatografom kot je opisano v poglavju 3.2.1.1.2.1. Eksperiment se je začel pri treh izbranih pH vrednostih in sicer pri pH vrednosti 5, 7 in 9. Za pripravo posameznih raztopin smo za pH vrednosti 5 in 7 uporabili na izbrano pH vrednost umerjeno raztopino 1 M Tris-HCl, za pH

vrednost 9 umerjeno raztopino 1 M Tris-Base. Poleg puferskih sistemov smo uporabili še na pH 7 umerjeno destilirano vodo. Vsem raztopinam in vodi umerjeni na pH vrednost 7 smo pH vrednosti merili pred in po dodatku lesa, po predinkubaciji in po zaključeni 193 urni inkubaciji pri 28°C. pH vrednost se je spremenila med predinkubacijo in se po njej ni bistveno spreminjala več, tako da je eksperiment dejansko potekal pri konstantnih pH vrednostih (2,4; 2,8; 3,8 in 8,8).

3.2.1.1.3 Vpliv vodnega okolja na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa

Vpliv vodnega okolja na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa smo spremljali z merjenjem količine nastalega CO₂ s plinskim kromatografom. Eksperiment je potekal v 125 mL serumskih stekleničkah za dve vodni okolji – za reko Ljubljanico in opuščeni glinokop na Ljubljanskem barju. Za oba vodna vira smo v treh ponovitvah zatehtali 5 g arheološkega mokrega lesa hrasta (najdišče Karlovška cesta, Ljubljana, datum 16.7.2008, vzorec delovno/02) narezanega na približno 2 – 4 mm velike koščke in ga prelili enkrat z 20 mL vode odvzete iz obrežja reke Ljubljanice (datum vzorčenja 19.8.2013) in drugič z 20 mL vode iz obrežja opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju (datum vzorčenja 19.8.2013). Negativno kontrolo posameznim vzorcem smo pripravili na enak način kot vzorec s to razliko, da smo jih avtoklavirali 60 minut pri 121°C dvakrat v razmaku 24 ur. Stekleničko smo plinotesno zaprli s sterilnimi gumijastimi zamaški in pokrovčki ter predinkubirali 3 dni na sobni temperaturi. Po predinkubaciji smo serumske stekleničke prezračili, ponovno zaprli in začeli z merjenjem CO₂ v plinski fazi (čas 0).

Inkubacija je potekala 193 ur pri 28 °C. Merjenja smo izvajali s plinskim kromatografom pri sobni temperaturi in sicer takoj po zaprtju serumskih stekleničk, po 24, 47, 93 in 193 urah inkubacije.

3.2.1.1.4 Ugotavljanje/preverjanje potenciala za mikrobiološko razgradnjo različnih tipov lesa v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju

Kakšen je potencial za razgradnjo različnih tipov svežega (bukev in hrast) in arheološkega mokrega lesa (bukev in hrast) v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju smo preverjali z merjenjem CO₂ s plinskim kromatografom. Za primerjavo štirih različnih tipov lesa smo uporabili 125 mL serumske stekleničke v katere smo zatehtali 5 g posameznega lesa – bukovo oz. hrastovo žaganje kot primer svežega lesa in arheološki mokri les bukve (najdišče SI-80, datum 12.10.2012, najdba: vzorec 1012 les, sek/kv SIG 12) in hrasta (najdišče Karlovška cesta, Ljubljana, datum 16.7.2008, vzorec delovno/02) narezan na 2 – 4 mm velike koščke. Izbrani les smo prelili z 20 mL vode odvzete neposredno iz platforme depozitorija v opuščenem glinokopu (datum vzorčenja 19.8.2013). Nadaljevanje eksperimenta je sledilo postopku opisanemu v poglavju 3.2.1.1.2.1.

3.2.1.2 Merjenje CO₂ s plinsko kromatografijo in izračun prostornine CO₂

Merjenje CO₂ smo izvajali na plinskem kromatografu HP 5890A (Hewlett Packard, ZDA) pri sobni temperaturi. Pogoji, pri katerih je deloval plinski kromatograf med merjenjem so bili:

- temperatura injektorja 100 °C,
- temperatura pečice in kolone 50 °C,
- temperatura detektorja na toplotno prevodnost (TCD - Thermal Conductivity Detector) 100 °C, pretok nosilnega plina helija (He) preko kolone je bil 180 mL min⁻¹.

Uporabili smo 180 cm dolgo kolono s premerom 1/8" in polnilom Porapak R mesh 100/120 (Millipore Corporation, Miliford, ZDA).

Za vsako posamezno meritev smo v injektor vbrizgali 250 µL plinske faze. Po končani zadnji meritvi smo serumske stekleničke odprli ter določili volumen plinske faze. Volumen nastalega CO₂ smo izračunali z enačbo 1:

$$\text{Volumen CO}_2 = \Delta\text{CO}_2 * (\text{V plinske faze} + \text{V tekoče faze} * \alpha) \quad \dots (1)$$

Pri čemer je ΔCO_2 sprememba v deležu CO₂ v določenem času, ki jo dobimo, če odštejemo delež CO₂ izmerjen v dveh časovnih točkah (npr. od deleža CO₂ po 24 urah inkubacije odštejemo delež CO₂ pred pričetkom inkubacije – dobimo delež CO₂, ki je nastal v 24 urah), α je koeficient topnosti CO₂ v vodi. Z višanjem temperature se le-ta niža. Volumen plinske faze predstavlja razlika med volumnom stekleničke in volumnom tekoče faze v steklenički.

Preglednica 4: Zbrane vrednosti Bunsenovega koeficienta topnosti (α) za CO₂ pri različnih temperaturah (Stopar in sod., 2009). Iz vrednosti smo izračunali umeritveno krivuljo $y = 1,394 * \exp(-x/21,086) + 0,329$, kjer x predstavlja temperaturo v °C in y Bunsenov koeficient topnosti za CO₂. Krivuljo smo uporabili za izračun koeficienta topnosti za netabelirane temperature.

Temperatura [°C]	Bunsenov koeficient CO ₂
0	1,727
5	1,423
10	1,194
15	1,015
20	0,873
25	0,758
30	0,666
35	0,590

Iz izračunanih volumnov CO₂ za vsako od treh neodvisnih ponovitev vzorca smo izračunali povprečja in standardno deviacijo ter tako dobili povprečen volumen nastalega CO₂ na posamezen vzorec in njemu pripadajočo napako. Tako smo storili tudi za tri neodvisne ponovitve negativne kontrole posameznega vzorca. Negativna kontrola podaja prispevek CO₂, ki je nastal izključno kemijsko in ni rezultat delovanja živih organizmov.

Končni rezultat oz. volumen CO₂, ki je nastal kot posledica biološke/mikrobiološke aktivnosti smo izračunali kot razliko med volumnom CO₂, ki je nastal pri inkubaciji vzorca in volumnom CO₂, ki je nastal v avtoklaviranih vzorcih ob različnih časih inkubacije.

3.2.2 Monitoring opuščanih glinokopov

3.2.2.1 Opis lokacije in razporeditve opuščanih glinokopov na Ljubljanskem barju

Depozitorij za shranjevanje arheoloških lesenih najdb je postavljen v zadnjem ribniku imenovanem Divjak (desno ob sprehajalni poti) (Slika 10: točka T5). Globina ribnika se spreminja glede na sezonsko količino padavin, saj ribniki nimajo znanega vtoka in iztoka – napaja jih deževnica in ob večji količini padavin narasla podtalnica. Globina se tako giblje med 4,5 in 6,5 metri. Vzorčenje vode je tekom izbranega obdobja potekalo na različnih vzorčnih mestih in sicer na obrežju ribnika, na globini 0,5 m neposredno nad platformo depozitorija in neposredno na platformi depozitorija (Slika 10: točka T5). Za nekatere analize smo vzorčili tudi vodo po celotnem vodnem stolpcu. Poleg vode se je vzorčilo tudi sediment in sicer sediment na obrežju in ob platformi depozitorija.



Slika 10: Prikaz razporeditve ribnikov v opuščanem glinokopu na Ljubljanskem barju s pripadajočimi lokacijami posameznih vzorčnih točk transekta (T1, T2, T3, T4 in T5) iz vzorčenja dne 8.6.2013 (Google earth, 2013). Pri vzorčenju transekta smo preverjali porazdelitev hranil preko treh med seboj povezanih ribnikov opuščanega glinokopa na Ljubljanskem barju.

3.2.2.2 Termini vzorčenj

Vzorčenje se je izvajalo v letu 2013 in sicer se je med marcem in novembrom zvrstilo 14 posameznih vzorčenj. Povprečno se je vzorčilo dvakrat mesečno z izjemo poletnih mesecev in

mesecev, ko je vzorčenje onemogočalo slabo vreme. Takrat je vzorčenje potekalo enkrat mesečno.

Datumi vzorčenj: 4. marec, 3. in 22. april, 13. in 29. maj, 10. junij, 1. in 8. julij, 19. avgust, 7. in 18. september, 4. in 23. oktober ter 4. november 2013

3.2.2.3 Ugotavljanje skupnega števila heterotrofnih mikroorganizmov z metodo štetja na razliti plošči

Skupno število heterotrofov smo določali z aerobnim gojenjem heterotrofnih mikroorganizmov na agarskih ploščah z gojiščem R2A (Sigma-Aldrich, ZDA) v temi pri 28 in 37 °C po metodi povzeti po Clescerl in sod., 1999. Skupno število heterotrofnih mikroorganizmov smo želeli določiti v različnih vzorcih vode in sedimenta. Od vzorcev vode smo izbrali vodo odvzeto iz obrežja glinokopa, vodo iz 0,5 m globine neposredno nad platformo depozitorija in vodo iz površine same platforme. Od vzorcev sedimenta smo uporabili sediment odvzet pod platformo in na obrežju. Pred nacepljanjem na plošče smo za vodne vzorce pripravili redčitveno vrsto in posamezne redčitve nacepili na plošče (do redčitve 10^{-4}). Vsako redčitev smo nacepili v duplikatih tako, da smo eno ploščo posamezne redčitve inkubirali pri 28, drugo pri 37 °C. Inkubacija pri 28 °C je potekala 7 dni, pri 37 °C 48 ur. Za vzorce sedimenta smo najprej v 90 mL sterilne fiziološke raztopine zatehtali 10 g sedimenta in inkubirali na stresalniku pri 200 rpm 1 uro pri 28 °C. Po inkubaciji smo pripravili redčitveno vrsto (do 10^{-4}) in nadaljevali postopek kot pri vzorcih vode. Po končani inkubaciji pri 28 in 37 °C smo prešteli zrasle kolonije in izračunali število heterotrofnih mikroorganizmov na mL vode oziroma na gram sedimenta.

3.2.2.4 Določanje skupnega števila koliformnih mikroorganizmov in bakterije *Escherichia coli*

Skupno število koliformnih mikroorganizmov in fekalnega koliforma bakterije *Escherichia coli* smo določali z aerobnim gojenjem v/na različnih gojiščih pri temperaturi 37 °C po metodi povzeti po Clescerl in sod., 1999. Število koliformnih mikroorganizmov in bakterijo *Escherichia coli* smo želeli določiti v različnih vodnih vzorcih (voda odvzeta na obrežju, na 0,5 m globine in na platformi) in različnih vzorcih sedimentov (sediment na obrežju in pod platformo). Za vodne vzorce smo za prvi korak pri določanju skupnega števila koliformnih mikroorganizmov uporabili direktno vzorec vode, medtem ko smo pri vzorcih sedimenta naredili predhodno inkubacijo mešanice 10 g sedimenta in 90 mL sterilne fiziološke raztopine na stresalniku pri 200 rpm, 1 uro pri 28 °C. Sama metoda je sestavljena iz treh korakov. Pri prvem koraku smo nacepili vzorce različnih volumnov v gojišče LTB (Biolife, Italija) z Durhamovo cevko. Vodne vzorce smo nacepili v 5 mL 2 krat koncentriranega gojišča LTB po 5 mL vzorca in v 10 mL 1x koncentriranega gojišča LTB po 1 mL in 0,1 mL v petih ponovitvah, vzorce sedimenta smo nacepili v 10 mL 1 krat koncentriranega gojišča LTB po 1 mL, 0,1 mL in 0,01 mL v petih ponovitvah. Sledila je inkubacija pri 37 °C za 24 ur. Pozitivne vzorce (pozitiven rezultat je motnost gojišča in prisotnost plina v Durhamovi cevki) smo s cepilno zanko precepili v sveže gojišče EC+MUG, medtem ko smo negativnim vzorcem podaljšali inkubacijo še za 24 ur pri 37 °C. Po precepljanju v gojišče EC+MUG je sledila

inkubacija pri 37 °C za 24 ur. Pozitivni rezultat je predstavljala motnost gojišča in prisotnost plina v Durhamovi cevki, pozitivne vzorce smo naknadno še izpostavili UV svetlobi pri 366 nm. Ob prisotnosti modre fluorescence vzorca je bil to dokaz bakterije *Escherichia coli* v vzorcu. Pozitivne vzorce smo s cepilno zanko precepili še na trdo gojišče L-EMB (Sigma-Aldrich, ZDA), medtem ko smo negativnim vzorcem podaljšali inkubacijo pri 37 °C za 24 ur. Po 24 urni inkubaciji na gojišču L-EMB smo pregledali plošče, pozitiven rezultat oz. prisotnost bakterije *Escherichia coli* v vzorcu so predstavljale modro-vijolične kolonije z zelenim kovinskim sijajem. Rezultat smo podali kot število največjega verjetja (MPN-Most Probable Number) in sicer za vodne vzorce v obliki MPN/100 mL vode in za vzorce sedimenta MPN/ g sedimenta.

3.2.2.5 Merjenje klorofila-*a*

Koncentracijo klorofila-*a* smo določali z ekstrakcijo z 90 % etanolom po ISO standardni metodi 10260: 2001. Koncentracijo klorofila-*a* smo določali za vzorec vode iz obrežja opuščene glinokopa na Ljubljanskem barju, vode iz 0,5 m globine neposredno nad platformo depozitorija in vode neposredno iz površine platforme. Metodo smo izvajali v dveh ponovitvah in sicer smo za posamično ponovitev prefiltrirali 1 liter vodnega vzorca skozi filter iz steklenih vlaken s porami premera 1,2 µm GC/F (Whatman, Velika Britanija). Filter smo prelili z 10 mL 90 % etanola in vzorce inkubirali v vodni kopeli pri 75 °C 5 minut. Med inkubacijo je potekala ekstrakcija klorofila-*a* iz filtra v etanol. Vzorce smo prenesli iz vodne kopeli na delovni pult in pustili, da se ohladijo na sobno temperaturo. Po 300 µL ohlajenih vzorcev smo odpipetirali v mikrotitrsko ploščico in spektrofotometrično izmerili absorbanco pri valovnih dolžinah 665 in 750 nm z optičnim čitalcem Multiskan Spectrum (THERMO, Finska). Po prvi meritvi smo ekstrahirane vzorce zakisali. Dodali smo jim 3 M HCl (v 2 mL etanola smo dodali 2 µL 3 M HCl) in inkubirali 10 minut pri sobni temperaturi. Tako zakisane vzorce smo ponovno odpipetirali v mikrotitrsko ploščico in izmerili absorbanco pri valovnih dolžinah 665 in 750 nm. Končno koncentracijo klorofila-*a* smo izračunali po enačbi:

sedimenta obrežja smo prelili z vodo odvzeto na obrežju). Kontrole smo pripravili na enak način kot vzorce s to izjemo, da smo jih avtoklavirali dvakrat pri temperaturi 121 °C 60 minut v razmaku 24 ur. Za vsak vzorec in kontrolo smo naredili tri neodvisne ponovitve. Ob zaprtju serumskih stekleničk smo na plinskem kromatografu HP 5890A izmerili količino CO₂ v plinski fazi. Stekleničke smo nato inkubirali 4 dni pri 28 °C in po inkubaciji ponovno izmerili količino CO₂ v plinski fazi. Volumen nastalega ogljikovega dioksida smo izračunali kot je opisano v poglavju 3.2.1.2.

3.2.2.7 Merjenje raztopljenega kisika

Količino raztopljenega kisika smo določali na samem mestu vzorčenja s prenosno napravo OAKTON PCD650 Waterproof Portable Meter Kit (Oakton Instruments, ZDA).

Količino raztopljenega kisika smo določili različnim vodnim vzorcem in sicer vodi odvzeti na obrežju in vodi po globini vodnega stolpca (na 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m globine in na platformi). Meritev smo izvajali v sterilnih plastičnih 50 mL centrifugirkah v katerih je bil vzorec vode odvzet in sicer tako, da smo sondo potopili v z vodo napolnjeno centrifugirko ter počakali, da se je vrednost ustalila.

3.2.2.8 Merjenje pH

Določanje pH smo izvedli v laboratoriju pri temperaturi vzorcev približno 23 °C s pH elektrodo (elektroda SenTix81, WTW series inoLab, Nemčija) in sicer različnim vodnim vzorcem istim kot v poglavju 3.2.2.5 in vzorcem sedimenta odvzetem na obrežju in pod platformo. Merjenje vodnih vzorcev smo izvajali neposredno v 50 mL centrifugirkah v katerih je bil vzorec vode odvzet na terenu, vzorca sedimenta smo izmerili v čaši kamor smo predhodno zatehtali 10 g sedimenta in ga prelili z 20 mL destilirane vode ter inkubirali 1 uro na sobni temperaturi.

3.2.2.9 Merjenje redoks potenciala

Redoks potencial smo določali v laboratoriju z ORP elektrodo (elektroda SenTix ORP, WTW series inoLab, Nemčija). Za določanje redoks potenciala smo vodnim vzorcem izmerili redoks potencial v 50 mL centrifugirkah v katerih je bil vzorec vode odvzet na terenu, vzorcem sedimenta v čašah (priprava vzorca enako kot za določanje pH v poglavju 3.2.2.8).

3.2.2.10 Merjenje prevodnosti

Prevodnost smo določali na terenu s prenosno napravo OAKTON PCD650 Waterproof Portable Meter Kit (Oakton Instruments, ZDA). Prevodnost smo določili različnim vodnim vzorcem in sicer vodi odvzeti na obrežju in vodi po globini vodnega stolpca (na 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m globine in na platformi). Meritev smo izvajali v sterilnih plastičnih 50 mL centrifugirkah v katerih je bil vzorec vode odvzet in sicer tako, da smo sondo potopili v z vodo napolnjeno centrifugirko ter počakali, da se je vrednost ustalila.

3.2.2.11 Merjenje raztopljenega fosforja v fosfatu

Fosfor v fosfatu smo določali spektrofotometrično z metodo povzeto po D'Angela in sod., 2001. Fosfor v fosfatu smo določali vzorcem vode iz obrežja glinokopa, iz globine 0,5 m neposredno nad platformo depozitorija in na sami platformi depozitorija. Poskus smo izvajali v mikrotitrski ploščici v katero smo odpipetirali 200 μL posameznega vodnega vzorca. Dodali smo 40 μL reagenta 1 (amonijev heptamolibdat raztopljen v 3,1 M žveplovni kislini). Mikrotitrsko ploščico smo stresali 10 minut na orbitalnem stresalniku na 200 rpm pri 28 °C. Po stresanju smo dodali 40 μL reagenta 2 (raztopina polivinil alkohola in karbinol melahit zelenega v destilirani vodi). Mikrotitrsko ploščico smo ponovno stresali 20 minut na orbitalnem stresalniku pri istih pogojih. Po končani inkubaciji smo izmerili absorbanco pri 600 nm na optičnem čitalcu Multiskan Spectrum (THERMO, Finska).

Za izračun koncentracije fosforja v fosfatu smo pripravili umeritveno krivuljo in sicer tako, da smo izmerili absorbance pri 600 nm za znane koncentracije fosforja v fosfatu in sicer za 0, 0,5, 2, 3, 4 in 5 mg/L. Količino fosforja v fosfatu za posamezen vzorec smo izračunali iz umeritvene krivulje $y = 1,73 \cdot x - 0,03$; kjer je y absorbanca izmerjena pri 600 nm in x koncentracija fosforja v fosfatu v mg/L. Koncentracijo fosforja v fosfatu smo izrazili v enotah mg na liter.

3.2.2.12 Merjenje nitratnega dušika

Nitratni dušik smo določali s pretočnim analizatorjem FLOW SYS (Alliance Instruments, Avstrija) po ISO standardu 13395:1996. Nitratni dušik smo določali vzorcem vode in vzorcem sedimenta. Za kolorimetrično analizo smo uporabili vzorec vode odvzete na obrežju opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju, na globini 0,5 m neposredno nad platformo depozitorija in na sami platformi. Za določanje nitratnega dušika predpriprava vodnih vzorcev ni bila potrebna, pomembno je bilo le, da smo vodne vzorce (cca. 10 mL vodnega vzorca v 15-mL centrifugirkah) čimhitreje po vzorčenju zamrznili pri -20 °C do merjenja s pretočnim analizatorjem, če merjenja nismo izvajali na isti dan kot je potekalo vzorčenje na terenu. Za vzorce sedimenta je bila potrebna predpriprava in sicer ekstrakcija nitratnega dušika z 2 M raztopino KCl. V primerno veliko stekleničko smo zatehtali 10 g sedimenta in ga prelili z 90 mL 2 M raztopine KCl ter jo stresali 1 uro na sobni temperaturi. Po končanem stresanju smo prenesli stekleničko pri 4 °C, kjer smo jo pustili preko noči, da so se večji delci posedli. Naslednji dan smo približno 10 mL bistrega supernatanta prenesli v 15 mL centrifugirko. Sledilo je merjenje s pretočnim analizatorjem. Če se merjenje ni izvajalo isti dan, smo centrifugirke shranili v zamrzovalniku pri -20 °C do merjenja.

3.2.2.13 Merjenje nitritnega dušika

Nitritni dušik smo določali spektrofotometrično po ISO standardu 13395: 1996. Nitritni dušik smo določali tako vodnim vzorcem kot tudi vzorcem sedimenta in sicer vodi odvzeti na obrežju opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju, na globini 0,5 m neposredno nad

platformo depozitorija in na sami platformi. Za vzorce sedimenta smo uporabili sediment odvzet na obrežju glinokopa in neposredno pod platformo depozitorija, ki smo ga pripravili kot je opisano v poglavju 3.2.2.12. Za spektrofotometrično merjenje nitritnega dušika smo v mikrotitrsko ploščico odpipetirali 50 μL vzorca, 150 μL destilirane vode in 50 μL reagenta sulfonilamid naftiletilendiamin (SA + NEDA). Za ničlitev smo vzorec nadomestili z destilirano vodo, za pripravo umeritvene krivulje s 50 μL raztopine nitritnega dušika z znano koncentracijo (NO_2^- - N je 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2 mg/L). Sledila je 20 minutna inkubacija na sobni temperaturi. Po inkubaciji smo izmerili absorbanco raztopin pri 540 nm na optičnem čitalcu Multiskan Spectrum (THERMO, Finska). Koncentracijo smo preračunali na podlagi umeritvene krivulje in koncentracijo nitritnega dušika v posameznem vzorcu izrazili v enoti mg/L.

3.2.2.14 Merjenje amonijskega dušika

Amonijski dušik smo določali s pretočnim analizatorjem FLOW SYS (Alliance Instruments, Avstrija) po ISO standardu 11732:1997. Amonijski dušik smo določali vzorcem vode odvzetim na obrežju opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju, na globini 0,5 m neposredno nad platformo depozitorija in neposredno na platformi. Poleg tega smo amonijski dušik določali tudi v sedimentu in sicer sedimentu odvzetemu na obrežju glinokopa in pod platformo depozitorija. Vzorce vode in sedimenta smo pripravili kot je opisano v poglavju 3.2.2.12.

3.2.2.15 Merjenje skupnega organskega ogljika (Total Organic Carbon - TOC)

Skupni organski ogljik smo določali spektrofotometrično po metodi povzeti po Sims in Haby, 1971. TOC smo določali različnim vzorcem vode (na obrežju opuščenega glinokopa, na globini 0,5 m in na platformi depozitorija) in sedimenta (odvzet na obrežju glinokopa in neposredno pod platformo depozitorija). Za vodne vzorce smo v dveh ponovitvah v prazne 250 mL elenmajerice odmerili 200 mL vzorca in jih postavili v pečico pri 105 °C za toliko časa, da je vsa tekočina izhlapela. Za vzorec sedimenta smo v dveh ponovitvah zatehtali 1 g izbranega vzorca v prazne 250 mL elenmajerice. Posušenim vzorcem vode in vzorcem sedimenta smo dodali 10 mL 0,5 M $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ in 10 mL koncentrirane H_2SO_4 . Mešanico smo premešali in inkubirali 30 minut pri sobni temperaturi. Po inkubaciji smo v vsako erlenmajerico dodali še 15 mL destilirane vode in inkubirali čez noč pri sobni temperaturi. Naslednji dan smo previdno odpipetirali 300 μL mešanice v mikrotitrsko ploščico in izmerili absorbanco pri 645 nm na optičnem čitalcu Multiskan Spectrum (THERMO, Finska). Koncentracijo skupnega organskega ogljika v vzorcu smo izračunali na podlagi enačbe umeritvene krivulje $y = 0,3392 \cdot x$. V enačbi predstavlja y absorbanco pri 645 nm in x koncentracijo ogljika v enotah mg C/L.

3.2.2.16 Merjenje skupne sušine

Skupno sušino v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju smo določali s tehtanjem posušenega ostanka vseh trdnih snovi v izbranem vzorcu vode po standardni metodi povzeti po Clescerl in sod., 1999. Skupno sušinoi smo določali vzorcem vode iz obrežja glinokopa, iz globine 0,5 m neposredno nad platformo depozitorija in na sami platformi depozitorija. Centrifugirke v katerih smo izvajali metodo smo predhodno termostatirali oz. sušili do konstantne teže za najmanj eno uro pri 105 °C. Po termostatiranju smo jih vzeli iz pečice, ohladili na sobno temperaturo ter stehali na štiri decimalke natančno na analitski tehtnici (Mettler Toledo, ZDA). V tako predpripravljene centrifugirke smo natočili 50 mL vodnega vzorca v štirih neodvisnih ponovitvah med katerimi smo steklenico z vodnim vzorcem dobro premešali. Centrifugirke smo ponovno postavili v pečico na 105 °C in pustili toliko časa, da je voda popolnoma izhlapela ter se teža usedline, ki je ostala na dnu centrifugirke ni spreminjala več. Kot prej prazne centrifugirke smo na isti način ponovno stehali centrifugirke z usedlino, ki je ostala po sušenju. Količino skupnih trdnih snovi smo izračunali iz razlike med posušeno centrifugirko z usedlino in prazno posušeno centrifugirko (v mg). Upoštevali smo še volumen vodnega vzorca in izrazili rezultat v enotah mg skupnih trdnih snovi na liter.

3.2.2.17 Določanje suspendiranega in raztopljenega deleža sušine

Suspendiran delež sušine v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju smo določali s tehtanjem posušenega ostanka snovi na filtru po filtriranju izbranega vodnega vzorca, raztopljen delež sušine smo določali s tehtanjem posušenega ostanka filtrata izbranega vodnega vzorca. Obe standardni metodi sta povzeti po Clescerl in sod., 1999. Suspendiran in raztopljen delež sušine smo določali vzorcem vode iz obrežja glinokopa, iz globine 0,5 m neposredno nad platformo depozitorija in na sami platformi depozitorija. Metodo smo izvajali v dveh ponovitvah. Za določanje suspendirane sušine smo uporabljali filtre iz steklenih vlaken z zadrževanjem delcev velikosti 1,5 µm MG 550 HA (Santorius Stedim Biotech, Nemčija). Za določanje raztopljene sušine 50 mL centrifugirke. Vsak posamezen filter (zaradi lažjega tehtanja smo ga namestili v stekleno čašo) in posamezno centrifugirko smo sušili v pečici pri 105 °C do konstantne teže (približno 1 uro). Po sušenju in ohlajanju smo jih stehali na štiri decimalke natančno na analitski tehtnici (Mettler Toledo, ZDA). Po tehtanju smo preko vsakega filtra prefiltrirali 100 mL izbranega vodnega vzorca. Filtre smo uporabili za določanje suspendirane sušine, filtrat za določanje raztopljene sušine. Filtre smo po filtriranju sušili pri 105 °C do konstantne teže. Po sušenju smo čaše s filtri ponovno stehali na štiri decimalke natančno. Filtrat smo nalili v ustrezno označene centrifugirke in jih tako kot filtre posušili pri 105 °C do konstantne teže. Po sušenju smo ohlajene centrifugirke ponovno stehali na štiri decimalke natančno.

Količino suspendirane sušine smo izračunali iz razlike med težo posušenega filtra po filtriranju in težo čistega posušenega filtra (v mg). Pri izračunu smo upoštevali volumen vodnega vzorca, ki smo ga prefiltrirali in podali rezultat v enotah mg suspendirane sušine na liter. Količino raztopljene sušine smo izračunali iz razlike med težo posušenega ostanka

filtrata izbranega vodnega vzorca in težo prazne centrifugirke (v mg). Pri izračunu smo upoštevali volumen filtrata v posamezni centrifugirki. Rezultat smo podali v enotah mg raztopljene sušine na liter.

3.2.2.18 Merjenje temperature

Ob vsakem vzorčenju opuščenega glinokopa na Verdu pri Vrhniku smo določili temperaturo zraka in temperaturo vode. Temperaturo vode smo izmerili na 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m globine, na platformi in na obrežju. Temperaturo po globini vodnega stolpca in na obrežju so izmerili specializirani potapljači z ustrezno profesionalno merilno napravo namenjeno potapljanju – ročnim računalnikom OSTC₂ (Heinrichs Weikamp, Nemčija).

Temperaturo zraka smo izmerili vedno na istem mestu in ob istem času, ob 11:00 dopoldan, s termometrom Digi-Sense, Thermo LogR RTD THERMOMETER (Cole Palmer, ZDA).

3.2.3 Korelacijska analiza fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov

Za lažje ovrednotenje pomembnosti in soodvisnosti posameznih fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov smo naredili korelacijsko analizo v programu Microsoft Office Excel 2007. Uporabili smo funkcijo CORREL. Predpostavili smo, da gre za pomembno soodvisnost med parametri, če je koeficient korelacije višji od 0,4 oz. nižji kot -0,4 in za signifikantno soodvisnost, ko je koeficient višji od 0,7 in nižji kot -0,7.

3.2.4 FT-IR (Fourier Transform Infrared) analiza

3.2.4.1 Osnovne lastnosti FT-IR spektroskopije

FT-IR analiza je potekala na FT-IR ATR (Attenuated Total Reflectance) spektrometru Spectrum 100 (PerkinElmer, ZDA). Za analizo smo uporabljali kristal germanija (Ge), območje snemanja je bilo med 4000 – 675 cm⁻¹ z resolucijo 4 cm⁻¹.

3.2.4.2 Priprava vzorcev in obdelava spektrov

3.2.4.2.1 Toplotna obdelava arheološkega mokrega lesa bukve pri 180 °C

Hitrost razgradnje je možno pospešiti s toplotno obdelavo lesa pri visokih temperaturah. Z FT-IR spektroskopijo lahko prikažemo in analiziramo spremembe, ki nastanejo med toplotno obdelavo. Takšne spremembe se dogajajo tudi pri razgradnji pri temperaturah v naravi kot posledica kemijske in biološke razgradnje, vendar mnogo počasneje.

Arheološki mokri les bukve (najdišče SI – 80, datum 13.10.2012, najdba VZ 39, sek/kv SIG 12) smo razrezali na koščke velikosti 2 – 5 mm in ga posušili pri 28 °C preko noči. Po sušenju smo ga izpostavili toplotni obdelavi pri 180 °C za 0 (toplotno neobdelan vzorec), 2, 4 in 6 ur. Po sušenju smo ga zdrobili v prah v terilnici in izmerili spekter med 4000 in 675 cm⁻¹ z FT-IR spektrometrom. Za posamezen vzorec smo posneli od 3-5 spektrov (neodvisne ponovitve).

Podatke smo obdelali tako, da smo poravnali bazne linije (na točko 1800 cm^{-1}). Iz vseh ponovitev smo izračunali povprečje in standardno deviacijo. Povprečja smo grafično prikazali. Ker nas zanimajo le karakteristične vibracije lignina v lesu, ki jih najdemo okrog 1510 in 1600 cm^{-1} (nihanje aromatskega obroča) ter med 1470 in 1460 cm^{-1} (C-H deformacija in nihanje aromatskega obroča) (Fengel in Wegener, 1989; Faix, 1991; Beaza in Freer, 2001; Sakakibara in Sano, 2001) smo izbrali vibracijske vrhove pri 1595 , 1505 in 1460 cm^{-1} in jim izmerili višino v odstotkih transmisije (%T). Višine vibracijskih vrhov smo grafično prikazali v odvisnosti od časa toplotne obdelave.

3.2.4.2.2 Prikaz spremljanja strukturnih razlik različnih tipov lesa

Za spremljanje strukturnih razlik pri različnih tipih lesa z FT-IR spektrometrom smo izbrali 4 različne vrste lesa in sicer arheološki mokri les bukve (najdišče SI – 80, datum 13.10.2012, najdba VZ 39, sek/kv SIG 12) in hrasta (najdišče Karlovška cesta, Ljubljana, datum 16.7.2008, vzorec delovno/02) ter svež les bukve in hrasta (žaganje). Arheološki mokri les smo razrezali na koščke velikosti $2 - 5\text{ mm}$ in ga posušili pri 28 °C preko noči. Posušili smo tudi žaganje svežega lesa. Po sušenju smo vzorce zdrobili v prah v ročni terilnici in izmerili spekter med 4000 in 675 cm^{-1} z FT-IR spektrometrom. Za posamezen vzorec smo posneli od 3-5 spektrov (neodvisne ponovitve). Podatke smo obdelali tako kot je opisano v poglavju 3.2.4.2.1. Povprečja in standardno deviacijo smo grafično prikazali na več grafikonih – primerjali smo dva tipa arheološkega mokrega lesa med seboj, dva tipa svežega lesa in še kombinacijo arheološkega in svežega lesa tako bukve kot tudi hrasta. Tako smo najlažje prikazali razlike v komponentah posameznega tipa lesa.

3.2.4.2.3 Spremljanje/sledenje dejanskih sprememb na arheološkem mokrem lesu hrasta po 10 mesečni hrambi v opuščenem glinokopu

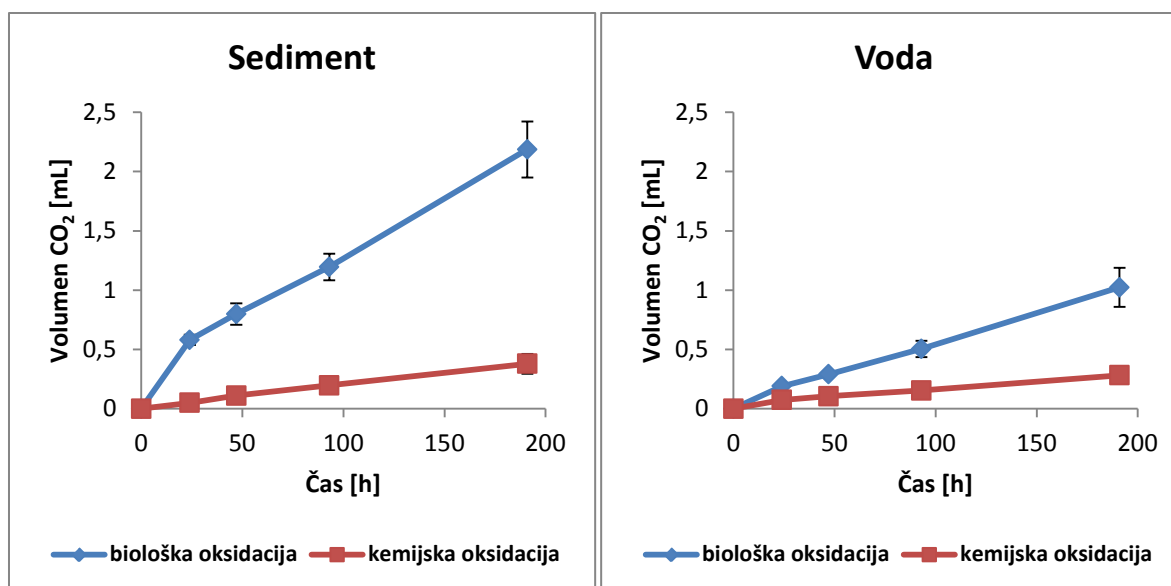
Z FT-IR spektroskopijo smo želeli ovrednotiti spremembe, ki so nastale med 10 mesečno hrambo arheološkega mokrega lesa hrasta (najdišče Karlovška cesta, Ljubljana, datum 16.7.2008, vzorec delovno/02). Les smo razrezali na koščke velikosti $2 - 5\text{ mm}$ in ga posušili pri 28 °C preko noči. Po sušenju smo vzorce zdrobili v prah v terilnici in izmerili spekter med 4000 in 675 cm^{-1} z FT-IR spektrometrom. Za posamezen vzorec smo posneli od 3-5 spektrov (neodvisne ponovitve). Podatke smo obdelali tako kot je opisano v poglavju 3.2.4.2.1. Višine vibracijskih vrhov smo grafično prikazali v odvisnosti od časa shranjevanja v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju.

4 REZULTATI

V magistrski nalogi smo ugotavljali vpliv okoljskih dejavnikov na hitrost razgradnje različnih tipov arheološkega mokrega lesa. V laboratorijskih pogojih smo razgradnjo lesa merili s spremljanjem hitrosti respiracije s plinsko kromatografijo v aerobni in anaerobni atmosferi. Predpostavili smo, da je hitrost respiracije premosorazmerna s hitrostjo razpada. Spremembe v kemijski strukturi lesa smo spremljali z FT-IR spektroskopijo. Preverili smo vpliv vodnega okolja iz reke Ljubljanice in opuščenega glinokopa, kjer so arheologi uredili depozitorij za arheološki moker les, na hitrost razgradnje. Poleg tega smo z rednim spremljanjem okoljskih dejavnikov in lesa v opuščenem glinokopu na Verdu preverili ustreznost okolja za hrambo najdenih arheoloških lesenih predmetov.

4.1 BIOLOŠKA IN KEMIJSKA RAZGRADNJA ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA

Tako v vodi kot v sedimentu predstavlja biološka oksidacija večinski del razgradnje arheološkega mokrega lesa, kar je prikazano na sliki 11. Kemijska oksidacija arheološkega mokrega lesa je bila v sedimentu in vodi primerljiva. V sedimentu prispeva biološka oksidacija 98 % celotnega CO₂, medtem ko je v vodnem sistemu prispevek 78 %. Razgradnja arheološkega mokrega lesa v sedimentu je približno 2 krat večja kot v vodnem sistemu. Tudi pri anaerobni razgradnji arheološkega mokrega lesa bukve predstavlja biološka oksidacija večinski del razgradnje (Priloga A3). Anaerobna razgradnja je bila značilno počasnejša kot aerobna. Iz rezultatov izhaja, da lahko razgradnjo arheološkega mokrega lesa večinsko pripišemo mikroorganizmom.

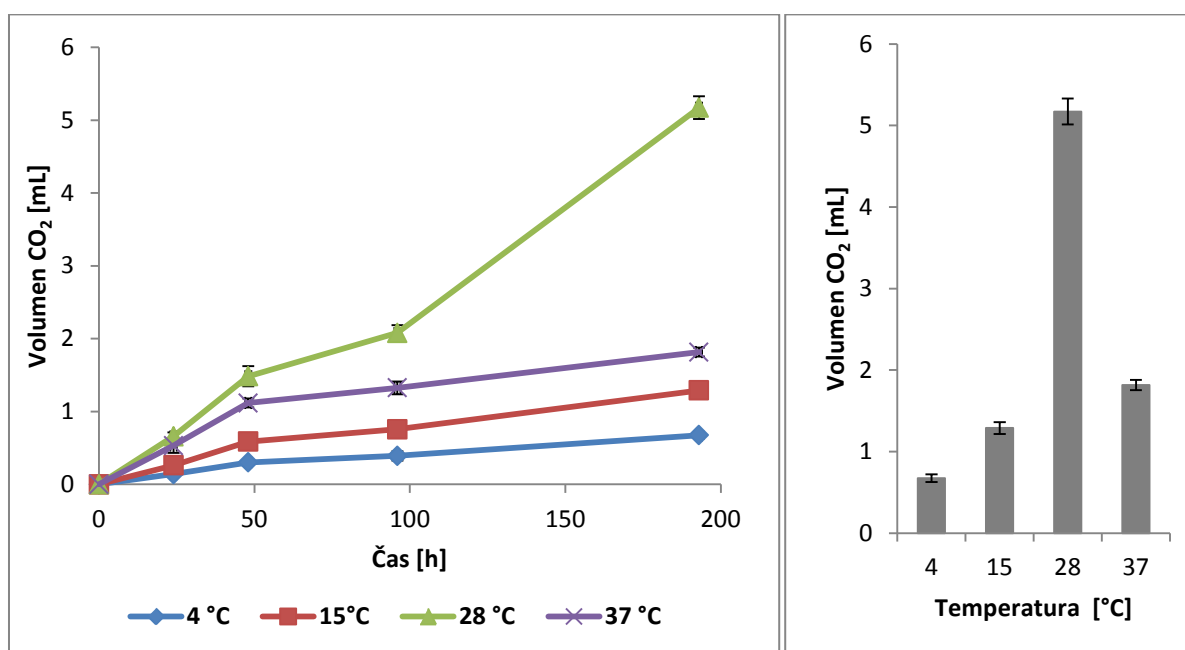


Slika 11: Biološka in kemijska oksidacija pri razgradnji arheološkega mokrega lesa bukve v aerobnih pogojih. Arheološki mokri les bukve smo (v treh ponovitvah) zmešali s sedimentom in vodo ter inkubirali v aerobnih razmerah 191 ur pri 28 °C. Hitrost respiracije smo merili na sobni temperaturi s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih. Vrednost kemijske oksidacije predstavlja količina nastalega CO₂ pri avtoklaviranem vzorcu sedimenta in vode. Vrednosti biološke oksidacije predstavlja razlika v količini nastalega CO₂ med neavtoklaviranim in avtoklaviranim vzorcem sedimenta in vode.

4.2 VPLIV OKOLJSKIH DEJAVNIKOV NA RAZGRADNJO ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA

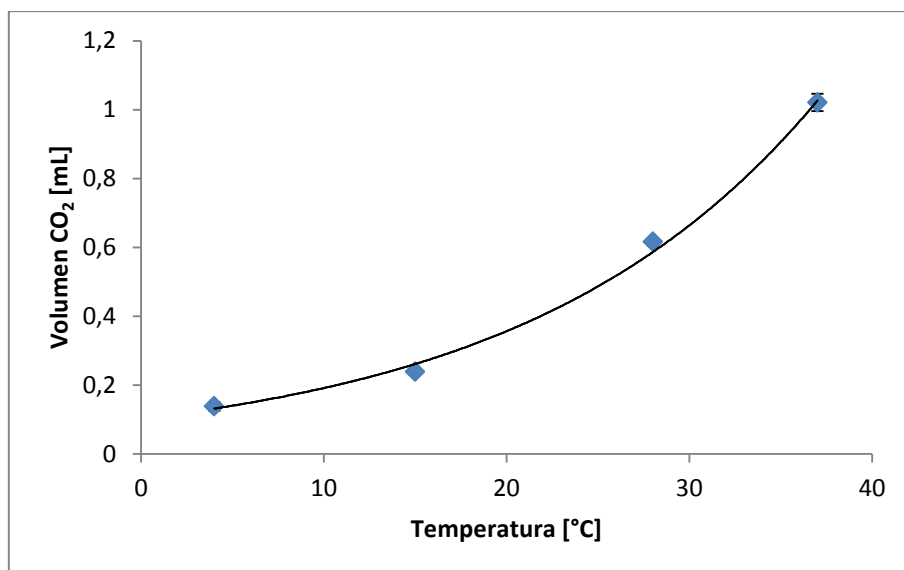
4.2.1 Vpliv temperature

S temperaturo hitrost razgradnje narašča in doseže maksimum okrog 28 °C, kar je prikazano na sliki 12. Z nadaljnjim naraščanjem temperature hitrost mikrobne razgradnje arheološkega mokrega lesa pada. Ob koncu eksperimenta je bilo pri temperaturi 4 °C približno 5 krat manj sproščenega CO₂ kot pri 28 °C.



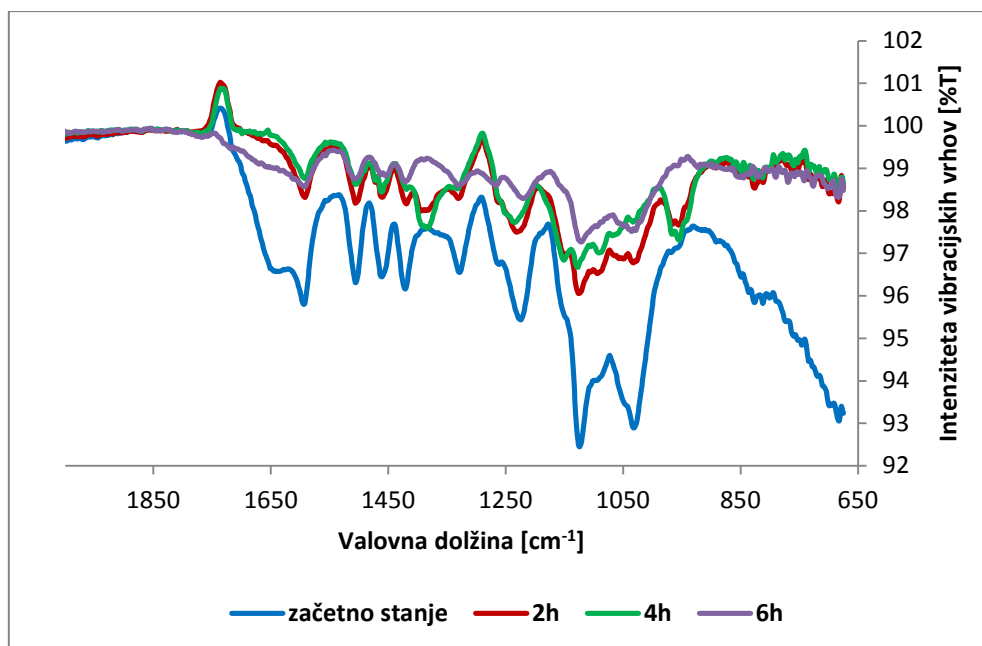
Slika 12: Vpliv temperature na biološko razgradnjo arheološkega mokrega lesa hrasta. Arheološkemu mokremu lesu hrasta smo dodali vodo z mikrohranili (5 kratna koncentracija mikrohranil) in inkubirali posamezne serumske stekleničke na različnih temperaturah (v treh ponovitvah) in sicer pri 4, 15, 28 in 37 °C. Negativna kontrola nam predstavlja avtoklaviran vzorec. Predinkubacija je potekala tri dni na sobni temperaturi. Po prepihanju smo količino sproščenega CO₂ merili s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih. Desna slika predstavlja količino sproščenega CO₂ pri biološki razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta po 193 urni inkubaciji pri posamezni temperaturi.

Kemijska oksidacija arheološkega mokrega lesa se z naraščanjem temperature eksponentno povečuje, kar je prikazano na sliki 13. Povečanje kemijske razgradnje s temperaturo lahko dobro opišemo z Arrheniusovo enačbo $y = 0,103 \cdot e^{0,062 \cdot x \cdot T}$ ($R^2=0.99$).



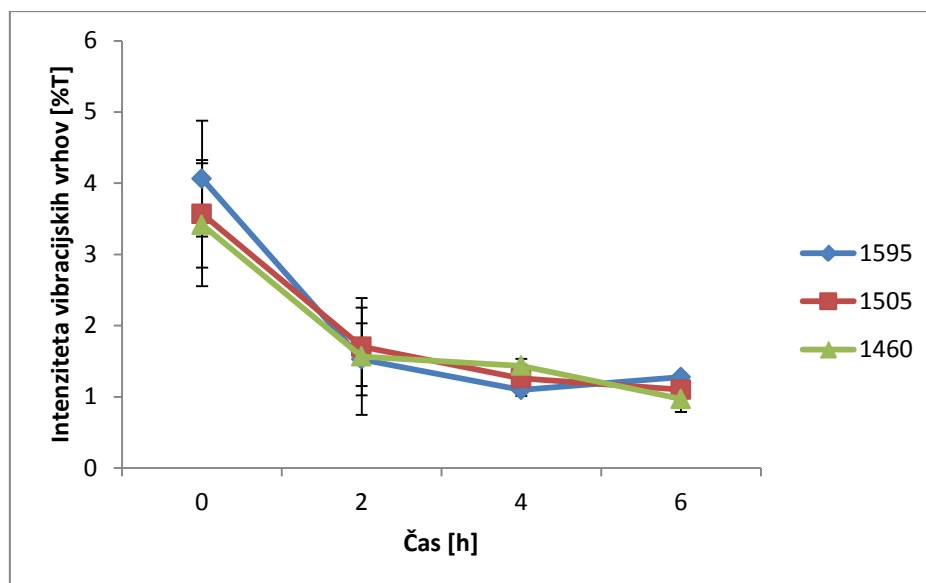
Slika 13: Odvisnost kemijske razgradnje arheološkega mokrega lesa od temperature. Kemijsko oksidacijo smo preverjali pri vzorcu arheološkega mokrega lesa hrasta v vodni raztopini s 5 kratno koncentracijo mikrohranil pri različnih temperaturah in sicer pri temperaturi 4, 15, 28 in 37 °C po 193 urah inkubacije v aerobnem okolju v treh ponovitvah smo merili količino sproščenega CO₂ s plinskim kromatografom.

Pri sobni temperaturi kemijska razgradnja predstavlja manjšinski delež razgradnje arheološkega mokrega lesa. Z višanjem temperature se delež kemijsko razgrajenega arheološkega lesa povečuje (Priloga B5). Pri temperaturi 37 °C lahko kemijski oksidaciji pripišemo že okrog 35 % celotne razgradnje. Pri temperaturah nad 100 °C postane kemijska oksidacija arheološkega lesa dominanten proces. Vpliv pospešene razgradnje arheološkega mokrega lesa ($T = 180\text{ °C}$) na strukturo in sestavo lesa smo preverili z FT-IR spektroskopijo. Vibracijski spekter za arheološki mokri les je prikazan na sliki 14. Iz slike je razvidno, da se s podaljšanim časom inkubacije na višji temperaturi intenziteta in oblika signala izrazito spremeni. Po 6 urah inkubacije lesa na povišani temperaturi se zmanjša vsebnost vseh glavnih komponent lesa: celuloze, hemiceluloze in lignina.



Slika 14: FT-IR spekter posameznega vzorca arheološkega mokrega lesa bukve pred termično obdelavo in po 2, 4 in 6 urah termične obdelave pri 180 °C. Prikazan je del spektra valovnih dolžin med 2000 in 650 cm^{-1} .

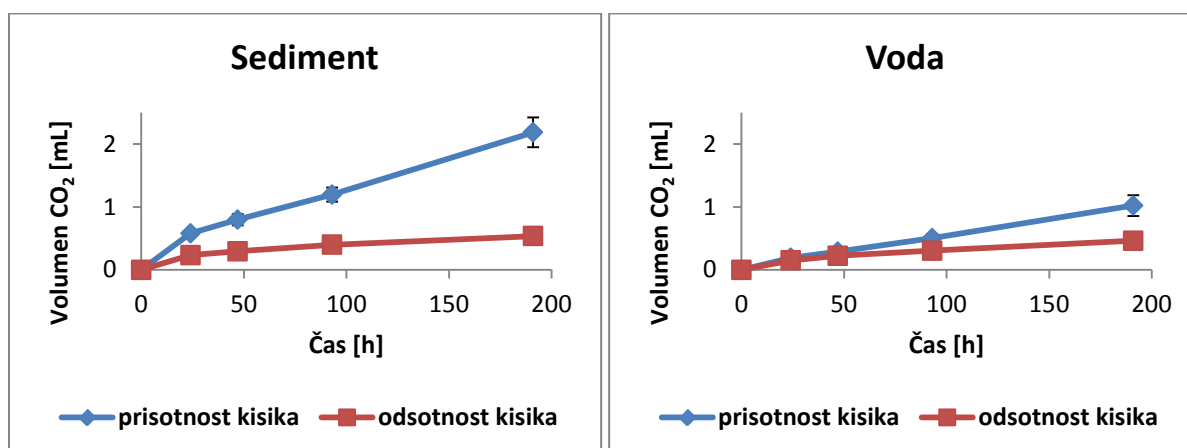
Spremembe vsebnosti lignina so prikazane na sliki 15. Spremembe vsebnosti lignina pri pospešeni kemijski razgradnji arheološkega mokrega lesa smo določili preko spremljanja intenzitete karakterističnih vibracijskih vrhov za lignin pri 1595, 1505 (značilne vibracije aromatskega obroča) in 1460 cm^{-1} (C-H deformacije). Iz slike je razvidno, da je intenziteta vseh treh karakterističnih frekvenc za lignin eksponentno upadla s podaljšanim časom termične obdelave, kar kaže na termično razgradnjo lignina v arheološkem mokrem lesu pri povišanih temperaturah. Opazimo tudi, da ni statistično značilnih razlik v intenziteti karakterističnih vrhov ob določenem času termične obdelave.



Slika 15: Pospešena kemijska razgradnja lignina v arheološkem mokrem lesu bukve s termično obdelavo pri temperaturi 180 °C. Arheološki mokri les bukve smo razrezali na delčke velikost 2-5 mm in jih posušili pri temperaturi 28 °C preko noči. Po sušenju smo jih izpostavili termični obdelavi pri 180 °C. Po termični obdelavi smo jih zdrobili v prah in z FT-IR spektrometrom izmerili spekter med 4000 in 650 cm^{-1} . Intenziteto posameznega vibracijskega vrha smo izračunali iz razdalje med bazno linijo in najnižjo točko posameznega vibracijskega vrha. Prikazani vrhovi predstavljajo karakteristične vibracije lignina v lesu pri 1595, 1505 in 1460 cm^{-1} .

4.2.2 Vpliv atmosfere

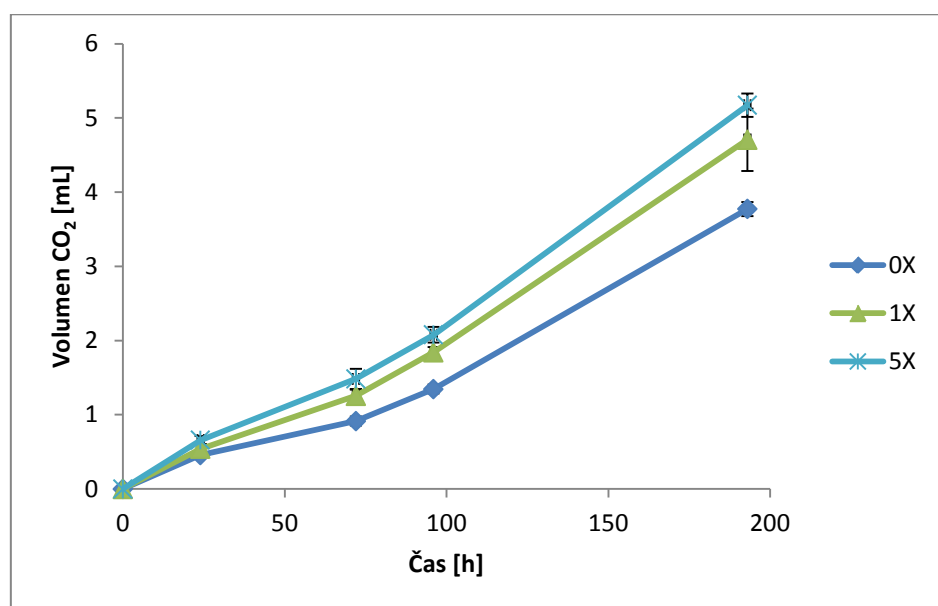
Hitrost razgradnje je višja v aerobnem kot anaerobnem okolju tako v sedimentu kot v vodnem sistemu, kar je prikazano na sliki 16. Po končani inkubaciji je bila v aerobno inkubiranem sedimentu koncentracija CO_2 štirikrat večja kot v anaerobno inkubiranem sedimentu. V vodi je med aerobno inkubacijo koncentracija CO_2 narasla za dvakrat v primerjavi z anaerobnim okoljem. Kot je razvidno iz priloge B9 in B10 je večina nastalega CO_2 posledica razgradnje arheološkega mokrega lesa bukve in ne razgradnje organske snovi v sedimentu ali vodi.



Slika 16: Vpliv ekosistema in atmosfere na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa bukve. Vzorcem sedimenta in vode smo dodali 5 g arheološkega mokrega lesa bukve in inkubirali v aerobnem (zračna atmosfera) in anaerobnem (N_2 atmosfera) okolju 191 ur pri temperaturi 28 °C v treh ponovitvah. Količino nastalega CO_2 smo merili s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih.

4.2.3 Vpliv mikrohranil

Dodatek mikrohranil je povečal mikrobnio razgradnjo arheološkega mokrega lesa, kar je prikazano na sliki 17. Koncentracija sproščenega CO₂ pri razgradnji se je povečala za največ 30 % glede na kontrolo brez dodanih mikrohranil. Po dodatku 5 kratne koncentracije mikrohranil glede na enkratne ni prišlo do značilno povečane biorazgradnje. Rezultati kažejo, da pomanjkanje mikrohranil v arheološkem lesu delno omejuje mikrobnio razgradnjo.



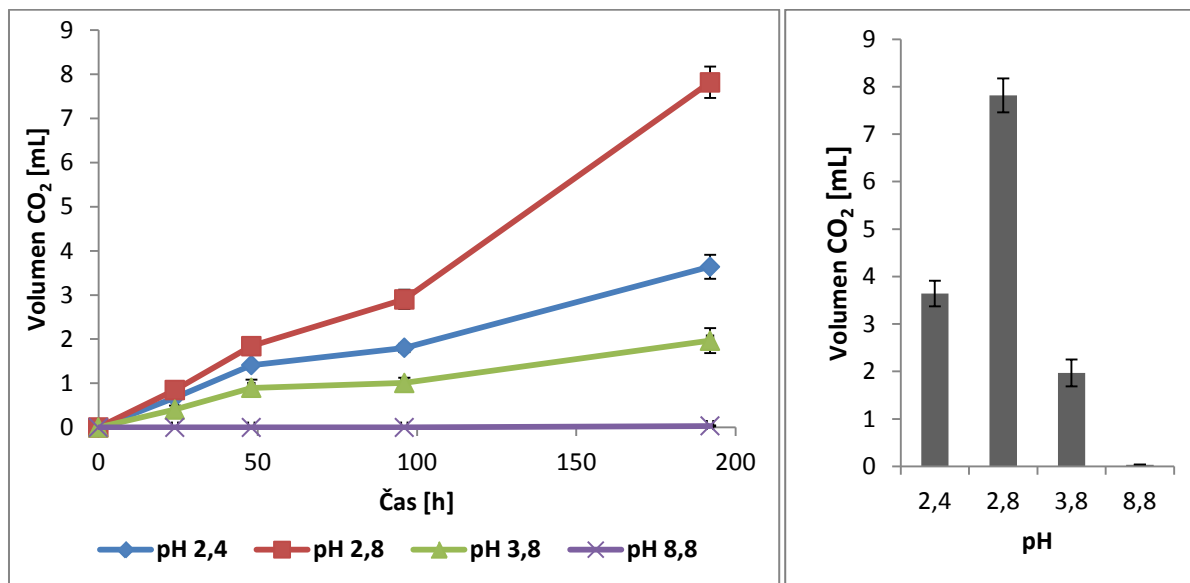
Slika 17: Vpliv mikrohranil na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa hrasta. Arheološkemu mokremu lesu hrasta smo dodali mikrohranila v različnih koncentracijah in sicer 0 kratna koncentracija pomeni brez dodatka mikrohranil, enkratna koncentracija pomeni dodatek 20 µL, petkratna koncentracija dodatek 100 µL 10 kratne založne raztopine soli za heterotrofe v treh ponovitvah. Vzorce smo predinkubirali tri dni pri sobni temperaturi. Po predinkubaciji smo vzorce prepicali in merili količino sproščenega CO₂ s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih 193 ur pri temperaturi 28 °C.

4.2.4 Vpliv pH

Spreminjanje pH vrednosti raztopin v katerih je bil prisoten arheološki mokri les je bilo zelo težavno. Kot je razvidno iz preglednice 5 uporabljene puferske raztopine niso uspele obdržati željeno pH vrednost, kljub temu, da so bile uporabljene visoke koncentracije puferskih raztopin. Po predinkubaciji se pH vrednost ni več bistveno spreminjala, kar nam je omogočalo določiti oceno vpliva pH na razgradnjo. Vpliv pH na biološko razgradnjo arheološkega mokrega lesa je prikazan na sliki 18. Biološka razgradnja lesa je bila najvišja pri pH vrednosti 2,8 v vodni raztopini. Pri nižji ali višji pH vrednosti je bila biološka razgradnja zmanjšana. Pri najvišji uporabljeni pH vrednosti 8,8 biološke razgradnje arheološkega mokrega lesa nismo zaznali.

Preglednica 5: Pregled stabilnosti puferskih raztopin in spremljanje pH vrednosti po dodatku lesa, po predinkubaciji in inkubaciji. Pri pripravi puferskih raztopin smo uporabili 1M puferske sisteme, ki kljub visoki molarnosti niso zagotavljali stabilnega pH in s tem stabilnih eksperimentalnih pogojev.

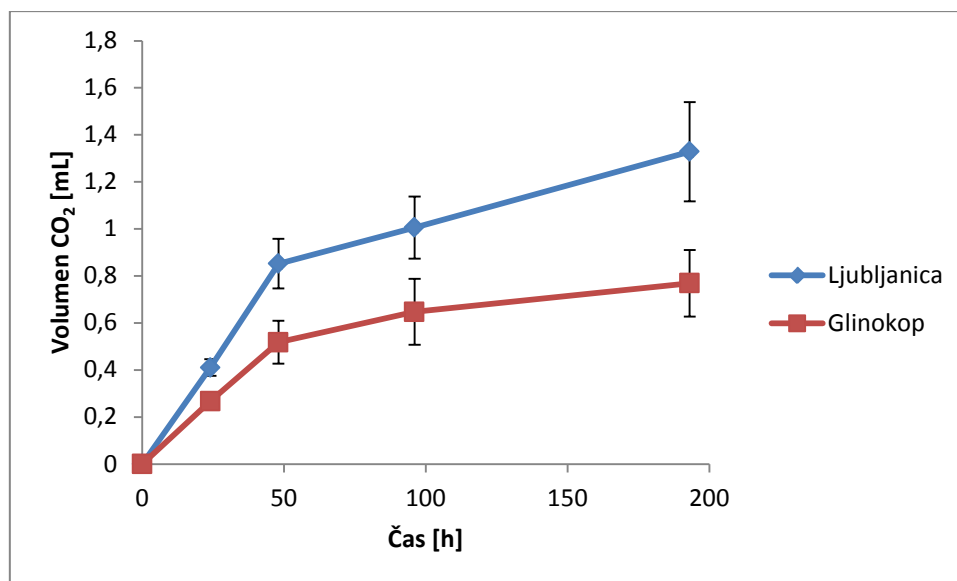
vzorec	puferski sistem	začetni pH	pH po dodatku lesa	pH po predinkubaciji	pH po inkubaciji
pH 2,4	1 M Tris-HCl	5	2,5	2,4	2,4
pH 2,8	dH ₂ O	7	2,4	2,6	2,8
pH 3,8	1 M Tris-HCl	7	4,5	4,1	3,8
pH 8,8	1 M Tris-base	9	8,9	8,8	8,8



Slika 18: Vpliv pH vrednosti na biološko razgradnjo arheološkega mokrega lesa hrasta. Arheološkemu mokremu lesu hrasta smo dodali umerjene puferske raztopine s 5 kratno koncentracijo mikrohranil (v treh ponovitvah) in predinkubirali tri dni pri sobni temperaturi. Po končanem merjenju (po 193 urni inkubaciji pri 28 °C) smo izmerili pH vrednosti 2,4, 2,8, 3,8 in 8,8. Količino sproščenega CO₂ smo merili s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih. Desna slika prikazuje količino nastalega CO₂ v odvisnosti od naraščajočega pH po 193 urah inkubacije.

4.3 VPLIV VODNEGA OKOLJA NA MIKROBNO RAZGRADNJO ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA

Potencial za mikrobno razgradnjo arheološkega mokrega lesa smo primerjali v vodnem sistemu pripravljenem iz vode reke Ljubljanice in vode opuščenega glinokopa. V obeh primerih je prišlo do mikrobne razgradnje. Hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa je bila značilno različna kot kažejo rezultati na sliki 19. V vodi iz reke Ljubljanice je hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa hrasta večja kot v vodi iz opuščenega glinokopa na Verdu pri Vrhniki. Koncentracija sproščenega CO₂ po koncu eksperimenta je bila v vodi iz Ljubljanice približno dvakrat višja kot v vodi iz opuščenega glinokopa.

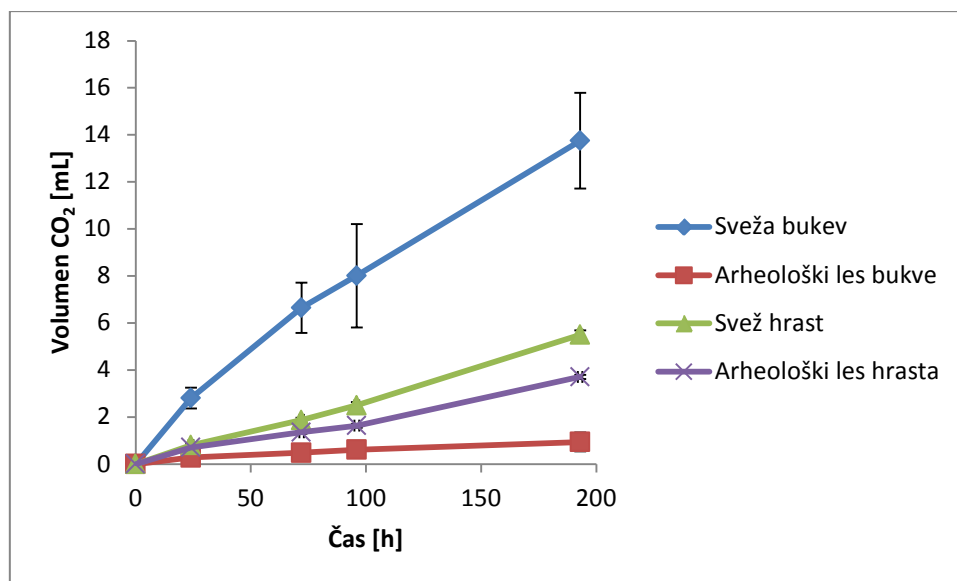


Slika 19: Primerjava mikrobne razgradnje arheološkega mokrega lesa hrasta v vodi iz reke Ljubljanici in vodi iz opuščenega glinokopa na Verdu pri Vrhniki. Arheološkemu mokremu lesu hrasta smo (v treh ponovitvah) dodali vodo iz obeh lokacij. Po tridnevni predinkubaciji pri sobni temperaturi smo inkubirali vzorce v aerobni atmosferi pri 28 °C, 193 ur. Količino sproščenega CO₂ smo merili s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih.

4.4 RAZGRADNJA RAZLIČNIH TIPOV SVEŽEGA IN ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA

4.4.1 Potencial za mikrobno razgradnjo različnih tipov lesa v vodi opuščenega glinokopa na Verdu pri Vrhniki

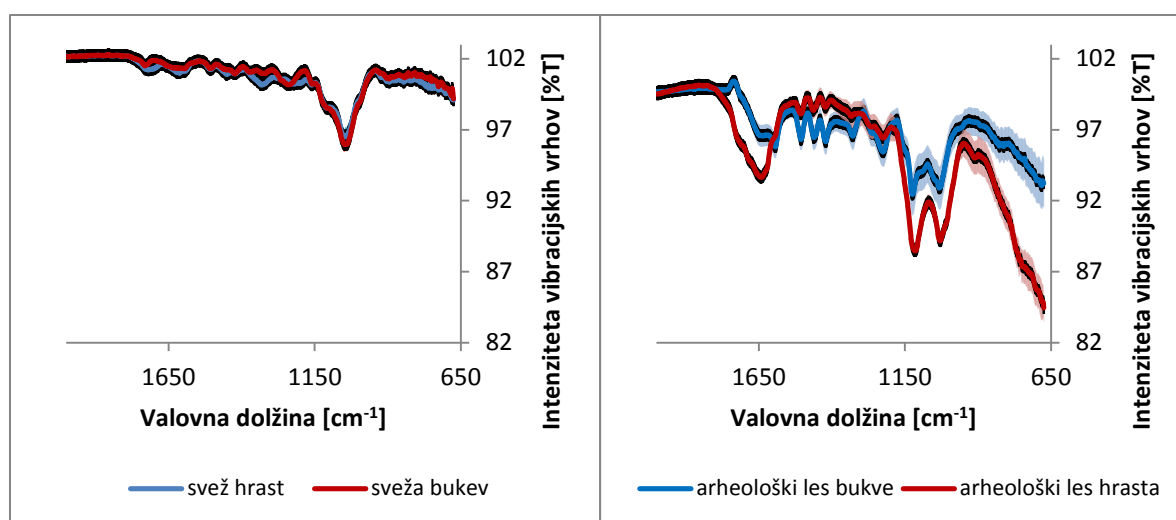
Potencial okolja za razgradnjo različnih tipov lesa v opuščenem glinokopu je prikazan na sliki 20. Najvišji potencial okolja za razgradnjo smo določili pri lesu sveže bukve. Hitrost razgradnje svežega hrasta je bila za več kot polovico manjša. V primerjavi s svežim lesom se je arheološki mokri les bistveno počasneje razgrajeval. Arheološki les bukve se je med eksperimentom zelo malo razgradil, saj nismo zaznali signifikantnega povečanja CO₂ v času inkubacije. Po drugi strani je bila hitrost razgradnje arheološkega lesa hrasta večja, vendar ni dosegla hitrosti razgradnje svežega lesa hrasta. Produkcija CO₂ med razgradnjo arheološkega mokrega lesa hrasta je bila štirikrat večja kot pri razgradnji arheološkega mokrega lesa bukve.



Slika 20: Primerjava mikrobne razgradnje svežega lesa bukke in hrasta ter razgradnje arheološkega mokrega lesa bukke in hrasta v vodi iz opuščenega glinokopa. Omenjenim tipom lesa smo dodali vodo iz opuščenega glinokopa ter predinkubirali tri dni na sobni temperaturi v treh ponovitvah. Inkubacija je potekala pri 28 °C, 193 ur. Količino sproščenega CO₂ smo merili s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih.

4.4.2 Prikaz strukturnih razlik različnih tipov lesa z FT-IR spektroskopijo

Vsebnost različnih komponent lesa pri svežem lesu bukke in hrasta se razlikuje kot kaže FT-IR spekter prikazan na sliki 21. Razlike med arheološkim lesom bukke in hrasta so bistveno večje. Arheološki les bukke ima manj celuloznih in hemiceluloznih ter več ligninskih komponent kot arheološki les hrasta.



Slika 21: Primerjava strukturnih razlik svežega in arheološkega mokrega lesa bukke in hrasta. Posamezna vzorca arheološkega mokrega lesa smo razrezali na koščke velike 2-5 mm, posušili pri 28 °C čez noč in razdrobili v prah. Na FT-IR spektrometru smo posneli spekter 4000-650 cm⁻¹ v vsaj treh ponovitvah. Slika je prikaz povprečnih vrednosti in standardne napake za posamezen vzorec lesa.

4.5 OKOLJSKI DEJAVNIKI TRANSEKTA BAZENOV OPUŠČENEGA GLINOKOPA NA VERDU PRI VRHNIKI

Depozitorij za namen shranjevanja arheološkega mokrega lesa je lociran v zadnjem od treh bazenov. Porazdelitev hranil na različnih vzorčnih točkah v sistemu treh ribnikov je podana v preglednici 6 in vzorčna mesta na sliki 10. Kjub temu, da gre za enovit vodni sistem hranila kot npr. fosfor v fosfatu in skupni organski ogljik niso enakomerno porazdeljena po celotnem transektu. V višjih koncentracijah se nahajajo v prvem bazenu, medtem ko so v ostalih dveh koncentracije nižje. Tako je tudi s številom heterotrofnih in koliformnih organizmov. V nasprotju s temperaturo so koncentracija raztopljenega kisika, pH in redoks potencial v prvem bazenu nižje kot v drugih dveh bazenih. Iz rezultatov lahko povzamemo, da je prvi bazen razmeroma samosvoja enota, ki predstavlja vir hranil in mikroorganizmov, vendar v času vzorčenja ni bilo izrazitejšega mešanja, ki bi zmanjšal izrazit gradient med prvim in drugim bazenom.

Preglednica 6: Porazdelitev hranil in ostalih fizikalno – kemijskih ter mikrobioloških parametrov preko transeкта treh ribnikov opuščenega glinokopa iz dne 8.7.2013. Preko vseh treh ribnikov je postavljenih 5 vzorčnih točk (T1 do T5) na katerih smo vzorčili vodo in naredili meritve za spodaj navedene parametre.

Vzorčna mesta	T1	T2	T3	T4	T5
Temperatura [°C]	24,9	25,1	25,1	25,1	25,1
Raztopljen kisik [mg/L]	4,48	7,06	6,9	7,43	7,51
pH	7,59	8,17	8,2	8,29	8,3
Eh [mV]	328	344	342	356	361
Prevodnost [μS/cm]	370	339	336	338	337
Skupna sušina [mg/L]	158,7 ± 1,7	153,3 ± 4,2	210,9 ± 5,8	216,1 ± 1,7	217,2 ± 4,7
Suspendirana sušina [mg/L]	9,8 ± 0,6	5,3 ± 1,3	5,6 ± 0,8	3,5 ± 0,4	5,0 ± 0,7
Raztopljena sušina [mg/L]	140,7 ± 1,5	137,5 ± 4,4	213,8 ± 1,7	207,3 ± 1,7	207,7 ± 2,4
Koncentracija fosforja v fosfatu [mg/L]	0,034 ± 0,003	0,021 ± 0,008	0,023 ± 0,007	PMD	0,022 ± 0,005
Koncentracija skupnega organskega ogljika [mgC/L]	0,054 ± 0,004	0,042 ± 0,006	0,042 ± 0,006	0,045 ± 0,005	0,042 ± 0,006
Koncentracija klorofila- <i>a</i> [μg/L]	1,2 ± 0,6	1,8 ± 0,4	PMD	1,0 ± 0,4	1,24 ± 0,4
Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	0	0	0	0	0
Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	0	0	0	0	0
Biološka potreba po kisiku po 4 dneh (BOD ₄)	0,123 ± 0,006	0,065 ± 0,009	0,050 ± 0,009	0,050 ± 0,008	0,56 ± 0,005
Skupno št. heterotrofnih mikroorganizmov na 37 °C po 48. urah [CFU/mL]	7,2*10 ⁵	9,9*10 ²	1,05*10 ⁴	6,2*10 ²	1,5*10 ³
Skupno št. heterotrofnih mikroorganizmov na 28 °C po 7. dneh [CFU/mL]	1,6*10 ⁶	1,9*10 ⁴	1,4*10 ⁴	6,0*10 ³	8,5*10 ³
Skupno št. koliformnih mikroorganizmov [MPN/100 mL]	220	<4	4	4	<4

*PMD – pod mejo detekcije

4.6 OKOLJSKI DEJAVNIKI V OPUŠČENEM GLINOKOPU NA LJUBLJANSKEM BARJU NA VERDU PRI VRHNIKI

V letu 2013 smo od marca do novembra povprečno dvakrat mesečno spremljali izbrane fizikalno – kemijske in mikrobiološke parametre na področju depozitorija arheološkega mokrega lesa. Rutinsko spremljanje koncentracije hranil, kisika, mikroorganizmov in drugih parametrov nam pokaže stanje nekega okolja in spreminjanje le-tega tekom izbranega leta.

Leto 2013 je bilo vremensko pestro in glede na temperaturo, količino padavin in ur sončnega obsevanja izven povprečja (slike 7, 8 in 9). Začelo se je z dolgo zimo, sledila je zelo vlažna pomlad, ekstremno vroče in suho poletje ter topla, sončna in suha jesen. Za potrebe sledenja okoljskega dogajanja ni najbolj reprezentativno, vendar pridobljeni podatki lahko služijo za oceno ekstremnih stanj proučevanega okolja. Podatki o fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrih izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju med vzorčenjem v letu 2013 na površini platforme depozitorija so podani v preglednici 7.

Temperatura vode na površini platforme depozitorija je od marca do novembra 2013 nihala in se gibala v razponu od 6,5 do 24 °C. Najnižjo temperaturo smo izmerili v marcu in začetku aprila, najvišjo v avgustu. Od začetka maja je bila temperatura na globini platforme za arheološki mokri les višja od 10 °C, kar predstavlja ugodno okolje za rast mezofilnih mikroorganizmov. Temperatura skozi celoten vodni stolpec opuščenega depozitorija na Ljubljanskem barju se je spreminjala z letnimi časi. Ob začetku vzorčenj (marec) je bila temperatura skozi celoten vodni stolpec enaka. Nato je prišlo do stratifikacije vodnega stolpca, segrevanja vrhnjih plasti vode in vzpostavljanja termokline, ki je izrazito opazna ob prvem majskem vzorčenju. Stratifikacija se je porušila ob ohladitvi konec maja. V nadaljevanju se je temperaturna razlika znotraj vodnega stolpca manjšala. Od avgusta dalje temperaturne razlike znotraj vodnega stolpca ni bilo več. Temperaturni maksimum je dosegla voda po celotni globini vodnega stolpca avgusta, kasneje se je temperatura postopoma nižala enakomerno po celotni globini. Stratifikacija vodnega stolpca zaradi ohlajanja v jesenskih mesecih ni nastala.

Koncentracije raztopljenega kisika na površini platforme depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju se gibljejo v razponu med 4,7 – 9,7 mg/L. Najvišje koncentracije kisika smo na površini platforme izmerili v marcu in začetku aprila, nato je koncentracija postopoma padala in dosegla minimalno koncentracijo v začetku septembra, kasneje je koncentracija nihala, vendar s trendom naraščanja. Glede na celoten vodni stolpec so bila nihanja v koncentraciji kisika tekom leta relativno majhna, le v novembru so se pokazale večje razlike v koncentraciji kisika v vodnem stolpcu. Koncentracija kisika po celotnem vodnem stolpcu je dovolj velika, da je aerobna razgradnja organskega materiala možna skozi celo leto.

pH vrednosti na površini platforme opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju so se gibale v razponu med 7,5 – 8. Tudi po globini vodnega stolpca spremembe pH vrednosti niso bile

izrazito velike. V marcu in aprilu so bile pH vrednosti najnižje, sledilo je postopno zviševanje pH, ki je doseglo maksimalno vrednost v poletnih mesecih. Po septembru je pH začel ponovno padati. Pojav je bil opaznejši v zgornjih plasteh vode, medtem ko v globljih delih vodnega stolca pojav ni bil tako izrazit, ravno tako so bile pH vrednosti v globljih delih nekoliko nižje skozi celotno obdobje.

Redoks potencial je mera za skupni potencial reducentov in oksidantov nekega okolja in kaže kateri tip kemijskih in biokemijskih reakcij prevladuje v nekem okolju. Redoks potencial je bil ves čas izrazito oksidativen. Na površini platforme depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju se je redoks potencial gibal v razponu med 320 in 420 mV in sicer je narasel v začetku aprila, do avgusta padal in v jesenskih mesecih ponovno narasel. Podoben trend naraščanja, padanja in ponovnega naraščanja smo opazili tudi pri drugih globinah v vodnem stolpcu. Na površini platforme je bil redoks potencial, kljub globini, ves čas relativno visok.

Prevodnosti vodne raztopine na površini platforme depozitorija so nihala med 340 in 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Na površini platforme je prevodnost v prvi polovici leta naraščala (do julija), v drugi polovici padala. Podoben učinek smo zaznali tudi pri drugih globinah v vodnem stolcu, vendar manj izrazit. Po globini vodnega stolpca smo v prvi polovici leta opazili velika nihanja v prevodnosti, v drugi polovici leta je bila prevodnost enakomerna po celotnem vodnem stolpcu.

Sušino lahko razdelimo v tri skupine in sicer na skupno sušino, na suspendirano in raztopljeno sušino. Količina skupne sušine na površini platforme depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju je nihala med 130 in 225 mg/L. Nihanje v količini skupne sušine na površini platforme tekom leta ni bilo izrazito, vendar je bilo večje kot nihanje na gladini ribnika ali na obrežju. Večja je bila tudi količina skupne sušine, vendar razlike v količini niso bile velike. Količina suspendirane sušine je na površini platforme nihala med 3 in 81, količina raztopljene sušine med 130 in 210 mg/L. Količina suspendirane sušine je bila na površini platforme najvišja v marcu, nato je drastično padla, kar opazimo tudi pri vzorcu odvzetem iz površine ribnika in obrežja. Nihanja tekom naslednjih vzorčenj niso bila tako velika, le ob koncu maja in začetku oktobra je količina suspendirane sušine na platformi narasla. Količina suspendirane sušine na gladini ribnika in na obrežju je bila nižja kot na površini platforme, vendar razlike niso signifikantne. Količina raztopljene sušine na površini platforme depozitorija je v aprilu narasla, nato preko celega leta nihala. Do večjih padcev v količini raztopljene sušine je prišlo konec maja in v začetku septembra. Podoben trend smo opazili tudi pri vzorcih odvzetih na površini ribnika in na obrežju. Opazili smo, da je bila količina raztopljenih trdnih snovi na površini platforme tekom poletnih mesecev višja kot v jesenskih, kar ni bilo tako izrazito pri vzorcu odvzetem na obrežju ribnika.

Koncentracije raztopljenega fosforja v fosfatu na površini platforme depozitorija so bile nizke skozi celotno opazovano obdobje in sicer v območju meje detekcije metode. Na površini platforme je koncentracija fosforja v fosfatu precej nihala, nekoliko višje koncentracije

fosforja v fosfatu so bile le v spomladanskem času. Podoben trend smo opazili tudi pri vzorcih odvzetih na površini ribnika in na obrežju.

Koncentracije nitrata, nitrita in amonija so bile v vodi opuščenega glinokopa preko celotnega opazovanega obdobja zelo nizke in sicer koncentracija nitratnega dušika je nihala med 0 in 0,7 mg/L, koncentracija amonijskega dušika med 0 in 0,3 mg/L, medtem ko nitritnega dušika preko celotnega obdobja vzorčenja nismo zaznali. Opazili smo, da ko je prisoten amonij ni prisotnega nitrata ter obratno. V prvi polovici opazovanega obdobja (do junija 2013) je bil prisoten nitratni dušik, v drugi polovici leta ta v vodi opuščenega glinokopa ni bil več prisoten. Od avgusta dalje se je v vodi pojavi amonijski dušik, medtem ko ga v prvi polovici opazovanega obdobja nismo zaznali. Podobno dinamiko smo zaznali tudi v vodi odvzeti na obrežju in na površini ribnika.

Koncentracija skupnega organskega ogljika na površini platforme se je gibala med 0,03 in 0,08 mg/L. Maksimalno koncentracijo smo izmerili v juniju, minimalno v oktobru. Koncentracija na površini platforme tekom opazovanega obdobja je nihala brez izrazitega vzorca, koncentracije so bile primerljive koncentracijam izmerjenim na obrežju ribnika, medtem ko so bile koncentracije na površju ribnika nižje. Koncentracija nitratno - nitritnega dušika na površini platforme depozitorija je tekom leta nihala v območju med 0 in 0,7 mg/L in sicer tako, da je koncentracija nitratno - nitritnega dušika padala do začetka junija, ko je padla na 0 mg/L in ostala tako do konca vzorčenja, medtem ko je koncentracija amonijskega dušika nihala v območju med 0 in 0,3 mg/L in sicer tako, da amonij ni bil prisoten do avgusta, nato se je povečal na 0,2 do 0,3 mg/L. Podoben trend se je kazal tudi pri vzorcih odvzetih na površini ribnika in na obrežju, koncentracije nitratno - nitritnega in amonijskega dušika so se gibale v podobnem koncentracijskem rangju.

Koncentracija klorofila-*a* na površini platforme depozitorija opuščenega glinokopa se je gibala med 2 in 9 µg/L. Marca je bila vrednost klorofila-*a* tako nizka, da rezultat ni bil signifikantno višji od napake meritve. Tekom opazovanega obdobja smo opazili dve povišanji klorofila-*a* in sicer prvi vrh spomladi z maksimumom v drugi polovici aprila in drugi jesenski vrh z maksimumom v sredini septembra. Med obema vrhoma se je koncentracija klorofila-*a* signifikantno znižala. Letno dinamiko naraščanja in padanja koncentracije klorofila-*a* na površini platforme prikazuje tudi slika 22, kjer krog z dvanajstimi razdelki predstavlja leto, razdeljeno na 12 mesecev in 4 različne barve 4 letne čase. Podobno dinamiko opazimo tudi na površini ribnika in na obrežju. Koncentracija klorofila-*a* je bila na površju ribnika konzistentno nižja kot na nivoju platforme depozitorija.

Biološka potreba po kisiku je parameter, ki pove kako dostopen je organski ogljik za mikrobní metabolizem (BOD_4 – biološka potreba po kisiku po 4 dneh). Na površini platforme depozitorija se je le-ta gibala v območju med 0,05 do 0,2 mL CO_2 na 20 mL vodnega vzorca. Signifikantne spremembe v dinamiki BOD_4 v opazovanem obdobju nismo zaznali, prišlo je le do povišanja porabe kisika ob koncu maja in v začetku septembra, kar kaže na višjo mikrobnó aktivnost v teh obdobjih. Podobno dinamiko smo našli tudi pri vzorcu odvzetem na gladini

ribnika, medtem ko je pri vzorcu odvzetem na obrežju biološka potreba po kisiku nihala v celotnem opazovanem obdobju brez večjih povišanj.

Skupno število heterotrofnih mikroorganizmov je bilo ocenjeno pri dveh temperaturah, pri 28 in 37 °C. Pri temperaturi 28 °C dobimo oceno za število mikroorganizmov, ki predstavljajo avtohtono mikrobno populacijo. Pri temperaturi 37 °C število mikroorganizmov, ki lahko predstavljajo patogeno ali alohtono mikrobno populacijo. Na površini platforme depozitorija je bilo pri 28 °C število heterotrofov v splošnem večje kot pri 37 °C, kar kaže, da je večina mikrobne populacije dobro prilagojena na razmere v okolju, kjer temperatura lahko doseže do 28 °C. Pri 28 °C so se števila heterotrofnih mikroorganizmov gibala v rangi med 10^3 in 10^4 na ml, pri 37 °C v rangi od 10^1 do 10^3 . Število heterotrofnih mikroorganizmov, ki optimalno rastejo pri 37 °C se je povečalo v poletnem času in doseglo maksimalno število v juliju (slika 24), število heterotrofnih mikroorganizmov pri 28 °C je doseglo maksimalno število v začetku maja (slika 23). Število heterotrofov pri 28 °C na površini ribnika in na obrežju je bilo nižje kot na površini platforme depozitorija arheološkega mokrega lesa.

Prisotnost koliformnih mikroorganizmov in sicer bakterije *Escherichia coli* na površini platforme depozitorija je nihalo tekom celotnega obdobja opazovanja. Pojavljanje koliformnih mikroorganizmov na površini platforme depozitorija in tudi na površini in obrežju ribnika je bilo večinoma naključno in brez izrazitega vzorca, le v toplejših mesecih (julij, avgust in začetek septembra) se jih je v povprečju pojavilo večje število kot običajno.

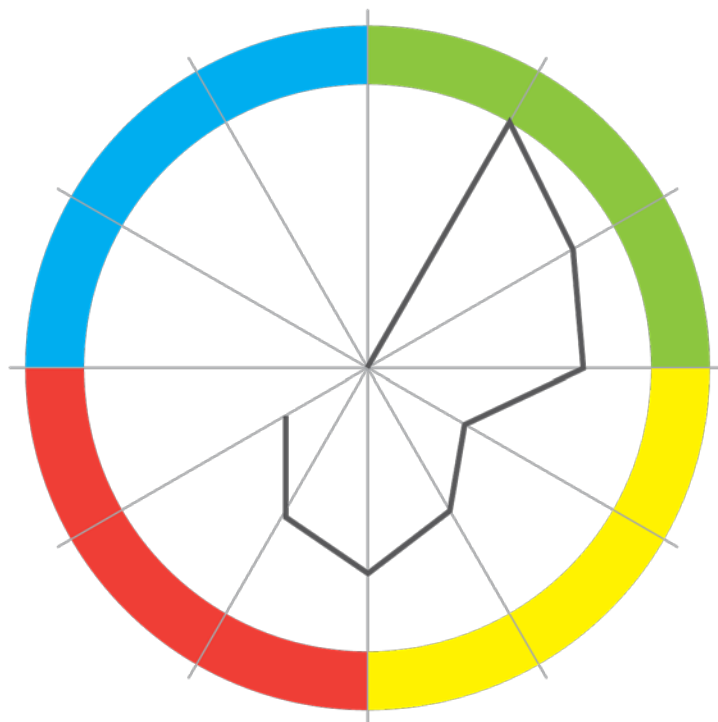
Preglednica 7: Zbrani rezultati različnih fizikalno - kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju med letom 2013 na površini platforme depozitorija. Voda odvzeta za merjenje navedenih parametrov je bila odvzeta na površini platforme, katere globina je nihala med 3,6 in 4,8 m. Vodo so odvzeli potapljači v sterilne steklenice, analize so bile opravljene v najkrajšem možnem času po vzočenju.

Datumi vzorčenj	4.marec	3.april	22.april	13.maj	29.maj	10.junij	1.julij
Temperatura [°C]	6,5	6,5	7,9	10,3	15,1	15,8	20,1
Raztopljeni kisik [mg/L]	9,37	9,73	9,30	8,64	8,11	8,18	7,26
pH	7,61	7,53	7,54	7,83	7,74	7,67	7,79
Eh[mV]	321	385	371	346	364	371	357
Prevodnost [μ S/cm]	341	374	391	389	369	364	379
Skupna sušina [mg/L]	134 $\pm$ 8	224 $\pm$ 7	191 $\pm$ 4	219 $\pm$ 6	251 $\pm$ 1	208 $\pm$ 1	226 $\pm$ 6
Suspendirana sušina [mg/L]	81 $\pm$ 12	28 $\pm$ 4	8,75 $\pm$ 0,25	20 $\pm$ 1	45 $\pm$ 1	12 $\pm$ 1	6 $\pm$ 1
Raztopljena sušina [mg/L]	128 $\pm$ 4	174 $\pm$ 5	194 $\pm$ 5	208 $\pm$ 5	189 $\pm$ 3	192 $\pm$ 2	210 $\pm$ 2
Koncentracija fosforja v fosfatu [mg/L]	PMD	0,023 $\pm$ 0,007	0,023 $\pm$ 0,01	0,021 $\pm$ 0,001	PMD	PMD	0,021 $\pm$ 0,003
Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,045 $\pm$ 0,007	0,07 $\pm$ 0,004	0,069 $\pm$ 0,007	0,05 $\pm$ 0,008	0,059 $\pm$ 0,003	0,080 $\pm$ 0,005	0,062 $\pm$ 0,006
Koncentracija klorofila-a [μ g/L]	PMD	6,6 $\pm$ 0,9	8,7 $\pm$ 1,1	6,4 $\pm$ 1,2	6,5 $\pm$ 0,4	6 $\pm$ 1	3,0 $\pm$ 0,6
Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0
Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	0	0	0	0	0	0	0
Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD ₄ [mL CO ₂]	0,05 $\pm$ 0,08	0,07 $\pm$ 0,02	0,050 $\pm$ 0,009	0,09 $\pm$ 0,02	0,19 $\pm$ 0,08	0,09 $\pm$ 0,2	0,11 $\pm$ 0,02
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28 °C po 7. dneh [CFU/mL]	5,6 * 10 ³	1,4 * 10 ⁴	2,4 * 10 ⁴	5,6 * 10 ⁴	1,4 * 10 ⁴	5,9 * 10 ³	9,2 * 10 ³
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37 °C po 48. urah [CFU/mL]	1	2,5 * 10 ²	4,8 * 10 ²	3,5 * 10 ³	4,7 * 10 ³	3,1 * 10 ³	5,3 * 10 ³
Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/100 mL]	<4	22	<4	16	<4	<4	8

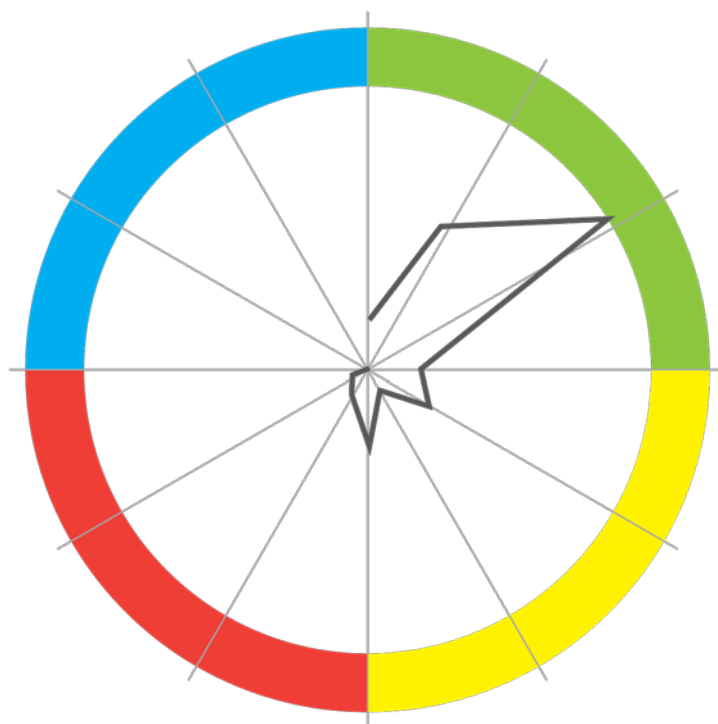
*PMD – pod mejo detekcije

»se nadaljuje«

Datumi vzorčenj	19.avgust	7.september	18.september	4.oktober	23.oktober	4.november
Temperatura [°C]	24,2	23,1	20,1	17,3	15,2	14,5
Raztopljeni kisik [mg/L]	5,96	4,72	4,73	6,95	5,64	6,16
pH	8,09	7,51	7,67	7,72	7,61	7,91
Eh [mV]	342	382	364	413	367	365
Prevodnost [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	332	351	330	332	334	333
Skupna sušina [mg/L]	195 $\pm$ 4	225 $\pm$ 3	190 $\pm$ 3	204 $\pm$ 4	216 $\pm$ 9	176 $\pm$ 2,3
Suspendirana sušina [mg/L]	3,2 $\pm$ 0	5,2 $\pm$ 0,4	6 $\pm$ 1	21,5 $\pm$ 0,7	10,70 $\pm$ 0,02	4,6 $\pm$ 0,1
Raztopljena sušina [mg/L]	189 $\pm$ 2	172 $\pm$ 2	184 $\pm$ 4	182 $\pm$ 4	191 $\pm$ 2	163 $\pm$ 3
Koncentracija fosforja v fosfatu [mg/L]	0,022 $\pm$ 0,002	PMD	PMD	PMD	PMD	0,025 $\pm$ 0,006
Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,063 $\pm$ 0,008	0,043 $\pm$ 0,008	0,05 $\pm$ 0,007	0,053 $\pm$ 0,006	0,032 $\pm$ 0,006	0,041 $\pm$ 0,006
Koncentracija klorofila- <i>a</i> [$\mu\text{g}/\text{L}$]	4,5 $\pm$ 1,5	2 $\pm$ 1	8,06 $\pm$ 1	6,2 $\pm$ 2	3,0 $\pm$ 0,6	2,6 $\pm$ 0,7
Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	0	0	0	0	0	0
Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2
Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD ₄ [mL CO ₂]	0,066 $\pm$ 0,008	0,16 $\pm$ 0,03	0,06 $\pm$ 0,01	0,075 $\pm$ 0,007	0,07 $\pm$ 0,03	0,055 $\pm$ 0,007
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28 °C po 7. dneh [CFU/mL]	2,5 * 10 ³	1,6 * 10 ⁴	1,3 * 10 ³	3,2 * 10 ³	3,7 * 10 ³	1,8 * 10 ³
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37 °C po 48. urah [CFU/mL]	4,3 * 10 ³	2,9 * 10 ³	3,9 * 10 ²	8,6 * 10 ²	3,8 * 10 ²	2,3 * 10 ²
Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/100 mL]	4	12	<4	<4	14	28
*PMD – pod mejo detekcije						

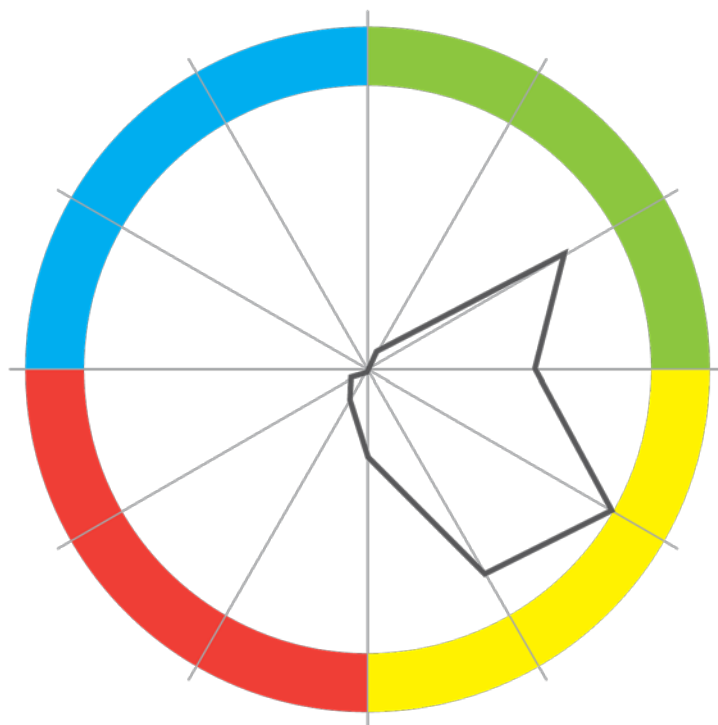


Slika 22: Nihanje koncentracije klorofila-*a* v letu 2013 na površini platforme depozitorija v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju na Verdu pri Vrhniki po posameznih mesecih. Slika prikazuje 12 mesecev razdeljenih na 4 letne čase; zelena predstavlja pomlad (marec, april, maj), rumena poletje (junij, julij, avgust), rdeča jesen (september, oktober, november) in modra predstavlja zimo (december, januar in februar). Vrednosti so normirane na najvišjo vrednost (april).



Slika 23: Nihanje števila heterotrofnih mikroorganizmov pri temperaturi 28 °C v letu 2013 na površini platforme depozitorija v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju na Verdu pri Vrhniki po posameznih mesecih. Slika prikazuje 12 mesecev razdeljenih na 4 letne čase; zelena predstavlja pomlad (marec, april, maj), rumena poletje

(junij, julij, avgust), rdeča jesen (september, oktober, november) in modra predstavlja zimo (december, januar in februar). Vrednosti so normirane na najvišjo vrednost (maj).



Slika 24: Nihanje števila heterotrofnih mikroorganizmov pri temperaturi 37 °C v letu 2013 na površini platforme depozitorija v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju na Verdu pri Vrhniki po posameznih mesecih. Slika prikazuje 12 mesecev razdeljenih na 4 letne čase; zelena predstavlja pomlad (marec, april, maj), rumena poletje (junij, julij, avgust), rdeča jesen (september, oktober, november) in modra predstavlja zimo (december, januar in februar). Vrednosti so normirane na najvišjo vrednost (julij).

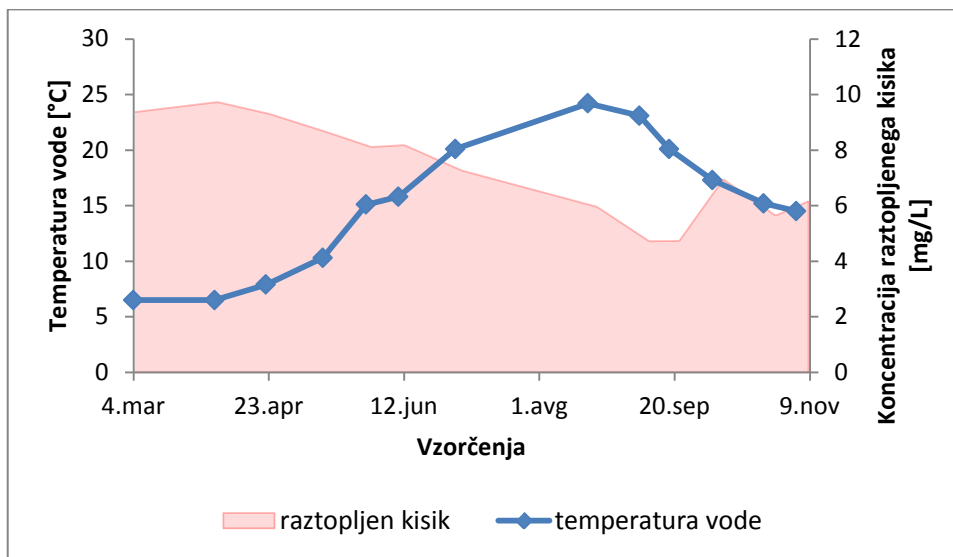
4.6.1 Korelacijska analiza med posameznimi fizikalno-kemijskimi in mikrobiološkimi parametri monitoringa

Da bi lažje ovrednotili pomembnost povezave med različnimi parametri smo naredili korelacijsko analizo med pari parametrov. Za vse pare parametrov, kjer je bil koeficient korelacije višji od 0,4 oz. nižji kot -0,4 smo predpostavili, da gre za pomembno soodvisnost med parametri. Kjer je bil korelacijski koeficient višji od 0,7 in nižji kot -0,7, je prišlo do signifikantne korelacije med izbranimi parametri. Rezultati korelacijske analize so predstavljeni v preglednici 8.

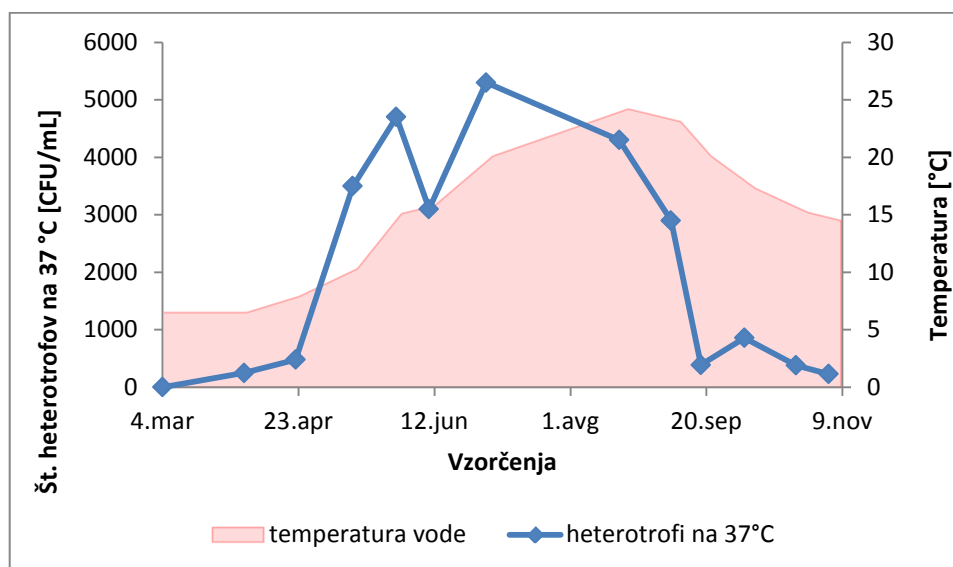
Preglednica 8: Korelacijska analiza za izmerjene fizikalno-kemijske in mikrobiološke parametre. Parametri so bili izmerjeni v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 na površini platforme depozitorija. Korelacijski koeficienti nad 0,4 in pod -0,4 so odebeljeni, nad 0,7 in pod -0,7 pa obarvani z rdečo.

	Temperatura zraka [°C]	Temperatura vode [°C]	Raztopljeni kisik [mg/L]	pH	Eh [mV]	Prevodnost [μS/cm]	Skupna sušina [mg/L]	Suspendirana sušina [mg/L]	Raztopljena sušina [mg/L]	Konc. fosforja v fosfatu [mg/L]	Konc. skupnega org. ogljika [mg/L]	Konc. klorofila -a [μg/L]	Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD ₄ [mL CO ₂]	Skupno št. heterotrofnih mikroorganizmov na 28 °C po 7. dneh [CFU/mL]	Skupno št. heterotrofnih mikroorganizmov na 37 °C po 48. urah [CFU/mL]	Skupno št. koliformnih mikroorganizmov [MPN/100 mL]
Temperatura zraka [°C]	1															
Temperatura vode [°C]	0,71	1														
Raztopljeni kisik [mg/L]	-0,42	-0,84	1													
pH	0,38	0,44	-0,25	1												
Eh [mV]	-0,29	0,13	-0,15	-0,35	1											
Prevodnost [μS/cm]	0,04	-0,45	0,67	-0,25	-0,03	1										
Skupna sušina [mg/L]	0,31	0,29	-0,09	-0,06	0,46	0,43	1									
Suspendirana sušina [mg/L]	-0,39	-0,58	0,58	-0,26	-0,38	0,03	-0,36	1								
Raztopljena sušina [mg/L]	0,45	0,31	-0,09	0,25	0,23	0,48	0,71	-0,64	1							
Konc. fosforja v fosfatu [mg/L]	-0,15	-0,16	0,25	0,35	-0,07	0,35	-0,05	-0,35	0,19	1						
Konc. skupnega org. ogljika [mg/L]	0,12	-0,12	0,53	-0,01	0,15	0,54	0,22	-0,09	0,34	0,32	1					
Konc. klorofila-a [μg/L]	-0,39	-0,50	0,53	-0,22	0,10	0,35	-0,09	0,39	0,23	-0,04	0,52	1				
Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD ₄ [mL CO ₂]	0,41	0,34	-0,13	-0,06	0,16	0,28	0,75	0,04	0,27	-0,34	0,04	-0,21	1			
Skupno št. heterotrofnih mikroorganizmov na 28 °C po 7. dneh [CFU/mL]	0,09	-0,38	0,42	-0,06	-0,14	0,73	0,29	0,03	0,39	0,23	0,07	0,26	0,20	1		
Skupno št. heterotrofnih mikroorganizmov na 37 °C po 48. urah [CFU/mL]	0,78	0,51	-0,06	0,47	-0,20	0,37	0,59	-0,18	0,58	0,04	0,33	-0,23	0,68	0,24	1	
Skupno št. koliformnih mikroorganizmov [MPN/100 mL]	-0,24	-0,16	-0,08	0,09	0,10	0,02	0,12	-0,27	-0,05	0,50	-0,34	-0,51	-0,10	0,20	-0,19	1

Izrazito negativno korelirata temperatura vode in koncentracija raztopljenega kisika. Kot je prikazano na sliki 25 je bila koncentracija kisika znižana v pozno poletnem in zgodanje jesenskem času. Vendar tudi v tem obdobju koncentracija kisika ni padla pod 4 mg/L. S povišano temperaturo se običajno v okolju poveča aktivnost in število mikroorganizmov. Kot je razvidno iz slike 26 se z višanjem temperature vode ustvarjajo ugodnejše razmere za rast mikroorganizmov zlasti tistih, ki za svojo rast potrebujejo višje temperature. Gre za mikroroganizme, ki lahko predstavljajo patogeno ali alohtono mikrobno populacijo.



Slika 25: Primerjava dveh parametrov – temperature vode in koncentracije raztopljenega kisika. Analiza posameznih parametrov je bila narejena z vodo odvzeto na platformi depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju na Verdu pri Vrhniki v letu 2013.



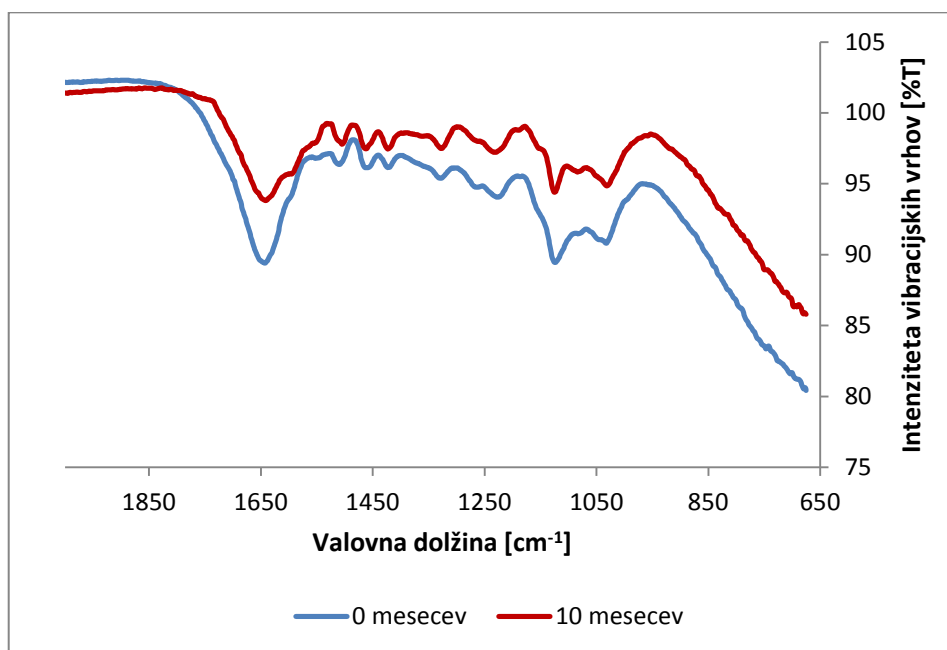
Slika 26: Primerjava dveh parametrov – temperatura vode in skupnega števila heterotrofnih mikroorganizmov pri 37°C. Analiza posameznih parametrov je bila narejena z vodo odvzeto na platformi depozitorija v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju na Verdu pri Vrhniki v letu 2013.

Parametri, ki med seboj signifikantneje korelirajo imajo korelacijski koeficient večji od 0,7 in manjši od -0,7. Med takšne spadajo temperatura zraka in skupno število heterotrofnih mikroorganizmov pri 37 °C, ki pozitivno korelirata, pozitivno korelirajo tudi naslednji parametri in sicer prevodnost in skupno število heterotrofnih mikroorganizmov pri 28 °C, skupne trdne snovi in skupne raztopljene trdne snovi ter skupne trdne snovi in biološka potreba po kisiku po 4. dneh (BOD₄). Negativno korelirata parametra skupne raztopljene trdne snovi in skupne suspendirane trdne snovi.

4.7 OCENA USTREZNOSTI SHRANJEVANJA ARHEOLOŠKEGA MOKREGA LESA V DEPOZITORIJU NA LJUBLJANSKEM BARJU

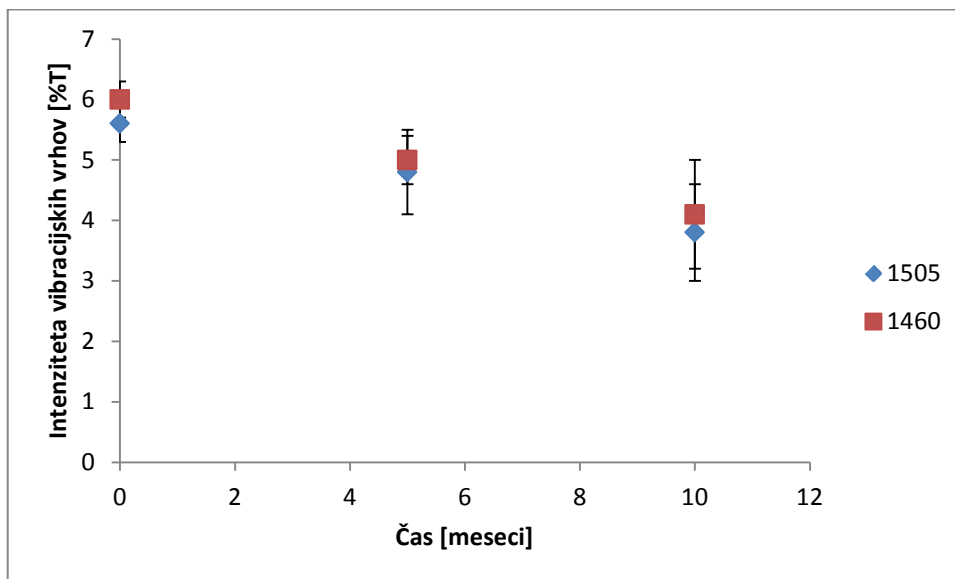
4.7.1 Prikaz dejanskih sprememb na arheološkem mokrem lesu hrasta z FT-IR spektroskopijo

Dejanske spremembe na arheološkem mokrem lesu smo spremljali z FT-IR spektroskopijo, kar je prikazano na sliki 27. FT-IR spekter lesa smo posneli preden smo ga potopili v opuščenih glinokop na Ljubljanskem barju in po 10. mesecih inkubacije v omenjenem glinokopu. Razlike med spektroma so majhne, kar nakazuje, da v času shranjevanja ni prišlo do znatnih strukturnih spremembe lesa.



Slika 27: FT-IR spekter arheološkega mokrega lesa hrasta pred shranitvijo (0 mesecev) v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju in po 10. mesecih shranjevanja. Posnet je spekter od 4000 do 650 cm⁻¹ v treh ponovitvah, bazne linije so poravnane. Na sliki so prikazana povprečja vseh ponovitev od 2000 do 650 cm⁻¹.

Spremembe v vsebnosti lignina, ki so nastale zaradi shranjevanja arheološkega mokrega lesa hrasta v opuščnem glinokopu so prikazane na sliki 28. Spremembe v vsebnosti celuloze nismo mogli ovrednotiti, saj v vibracijskih spektrih nismo zaznali značilnih vibracijskih vrhov za celulozo. Količino lignina v času smo določali preko spremljanja intenzitete karakterističnih vibracijskih vrhov za lignin pri 1505 (značilne vibracije aromatskega obroča) in 1460 cm^{-1} (C-H deformacije). Iz slike 28 je razvidno, da intenziteta obeh karakterističnih vrhov za lignin pada s podobno hitrostjo.



Slika 28: Prikaz upada intenzitete vibracijskih vrhov v času shranjevanja arheološkega mokrega lesa hrasta v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju. Arheološkemu mokremu lesu hrasta smo z FT-IR spektrometrom v treh ponovitvah izmerili spekter med 4000 in 650 cm^{-1} in sicer preden smo jih odložili v vodo, po 5. mesecih in po 10. mesecih shranjevanja v podvodnem depozitoriju. Posamezne ponovitve smo povprečili, jim izračunali standardne odklone, poravnali bazne linije in izračunali intenziteto vibracijskega vrha pri 1505 in 1460 cm^{-1} . Intenziteto posameznega vibracijskega vrha smo izračunali iz razdalje med bazno linijo in najnižjo točko posameznega vibracijskega vrha. Vrha pri 1505 in 1460 cm^{-1} predstavljata karakteristične vibracije lignina v lesu.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Cilj magistrskega dela je ovrednotiti potencial za razgradnjo arheološkega mokrega lesa v različnih okoljih in pri različnih okoljskih pogojih. Tako lahko okvirno predvidimo kakšna bo hitrost razgradnje v nekem okolju in ustreznost le-tega za shranjevanje takšnih kosov lesa. Strukturne spremembe lesa kot posledica razgradnje smo ocenili s FT-IR spektroskopijo. Zaradi potreb po *in situ* shranjevanju arheološkega mokrega lesa smo v depozitoriju arheološkega mokrega lesa v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju z rednim okoljskim monitoringom fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov preverjali ustreznost tega okolja za daljše shranjevanje arheoloških lesenih predmetov.

5.1.1 Razgradnja arheološkega mokrega lesa

Na hitrost razgradnje svežega lesa vplivajo različni fizikalno – kemijski in biološki parametri. Med najpomembnejše parametre spada redoks potencial, saj prisotnost kisika pomembno pospeši razgradnjo organskih snovi, v okoljih, kjer kisika ni oziroma ga je izredno malo, je razgradnja počasnejša. Pri razgradnji težje razgradljivih komponent je prisotnost kisika še pomembnejša. Rezultati razgradnje arheološkega mokrega lesa, ki je večinsko sestavljen iz ligninskih komponent kažejo, da je bila razgradnja hitrejša v aerobnih ter počasnejša v anaerobnih okoljih. Razgradnja je bila večinsko mikrobiološka in je bila večja v sedimentu v primerjavi z vodo.

Tudi temperatura je pomemben parameter, saj določa hitrost reakcij. Z višanjem temperature smo pričakovali večanje hitrosti razgradnje arheološkega mokrega lesa. Pri kemijski razgradnji lesa je z višanjem temperature prišlo do eksponentnega povečanja hitrosti kemijske oksidacije (razgradnje) arheološkega mokrega lesa. Po drugi strani je biološka oksidacija vezana na optimalno temperaturo za rast mikroorganizmov. Nad temperaturnim optimumom začne aktivnost mikroorganizmov padati. Hitrost biološke razgradnje je naraščala do temperature 28 °C, nato je hitro padla. Ker pri razgradnji lesa v mezofilnem področju prevladujejo mikroorganizmi, rezultati kažejo, da je temperatura pomemben faktor, ki vpliva na hitrost razgradnje.

Poleg temperature in kisika smo preverili kako na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa vplivajo različne koncentracije hranil in različne vrednosti pH. Povišane koncentracije hranil so povečale hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa, vendar povišanje ni bilo izjemno. Zdi se, da hitrost razgradnje hranil omejujejo tudi drugi okoljski dejavniki. Presenetljive rezultate smo dobili tudi pri preverjanju vpliva vrednosti pH na razgradnjo arheološkega mokrega lesa. Sama priprava vzorcev za eksperiment se je izkazala za precej problematično, saj so se vrednosti pH za puferske raztopine močno spremenile po dodatku lesa. pH vrednosti so signifikantno padle, kljub relativno močnim uporabljenim puferskim

raztopinam (1 M raztopine). pH vrednost se je po nekaj dnevni predinkubaciji ustalila na določeni vrednosti, tako da je merjenje hitrosti razgradnje potekalo pri razmeroma konstantni pH vrednosti. Izkazalo se je, da je hitrost razgradnje najhitrejša pri kislem pH, medtem ko z višanjem pH vrednosti razgradnja pada. Pri pH vrednosti 8,8 nismo zaznali nobene razgradnje. Najhitrejšo razgradnjo smo opazili pri vzorcu vodne raztopine pri pH 2,8, medtem ko je bila razgradnja počasnejša v puferskem sistemu pri pH vrednosti 2,4 in 3,8. Najhitrejša hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa pri kislih pH vrednostih je smiselna, saj so mikroorganizmi prilagojeni na rast na kisli površini lesa (pKa vrednost huminskih kislin je okoli 4 (Shin, 1999)). Na kemijsko razgradnjo arheološkega mokrega lesa vpliva pH podobno kot na biološko razgradnjo. Najvišji nastanek CO₂ je pri pH vrednosti 2,8 v vodni raztopini, medtem ko je pri pH vrednostih 2,4 in 3,8 nižji. Pri pH vrednosti 8,8 ni zaznane kemijske razgradnje lesa (slika B5).

Preverili smo tudi, kako različno vodno okolje vpliva na hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa in sicer smo preverjali razlike med vodo iz reke Ljubljanice in vodo iz opuščenih glinokopov. Izkazalo se je, da je bila hitrost razgradnje višja v reki Ljubljanici. Ravno kisik v največji meri vpliva na razgradnjo lesa pod vodno gladino. Primarni organizmi, ki razgrajujejo les v takšnih okoljih so bakterije (Schweingruber, 2007). Verjetno gre razliko v hitrosti razgradnje iskati v različni količini hranil, vendar tega nismo merili.

Ker se različni tipi lesa med seboj razlikujejo, se posledično razlikuje tudi hitrost razgradnje. Preverili smo razlike med hitrostjo razgradnje dveh svežih vrst lesa (hrast in bukev) in dveh tipov arheološkega mokrega lesa, ravno tako hrasta in bukve. Razlike smo ugotajali preko količine nastalega CO₂ in s karakterizacijo razlik v kemijski sestavi med posameznimi tipi lesa z FT-IR spektroskopijo. Pričakovano so se pokazale razlike med arheološkim mokrim lesom in svežim lesom tako na nivoju hitrosti razgradnje lesa kot tudi na nivoju kemijske sestave. Hitrost razgradnje je pri svežem lesu hitrejša, saj je količina razpoložljivih hranil višja, kar nam kaže tudi FTIR analiza. Predvsem je v svežem lesu višji delež celuloze in hemiceluloze, ki sta lažje razgradljiva. Razlike so opazne tudi med samima vrstama. Sveži hrastov les je trši in težje razgradljiv kot bukov les (Schwarze, 2007), kar se kaže v počasnejši razgradnji. Za težjo razgradljivost lesa so lahko odgovorne higroskopske lastnosti lesa in lesni ekstrakti, ki delujejo protimikrobno in onemogočajo zadrževanje in razmnoževanje bakterij (Milling, 2005). Razgradnja arheološkega mokrega lesa hrasta je bila hitrejša kot razgradnja arheološkega lesa bukve. Kot kažejo rezultati je razlog je verjetno v boljši ohranjenosti lesa hrasta, ki smo ga uporabili v raziskavi in v višji vsebnosti celuloznih komponent.

5.1.2 Porazdelitev fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov preko horizontalnega transektu treh ribnikov v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju

Depozitorij za shranjevanje arheološkega mokrega lesa je lociran v tretjem in hkrati zadnjem ribniku v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju. Ker so ribniki med seboj povezani preko plitvih prelivov, nas je zanimala porazdelitev hranil v horizontalnem transektu, saj lahko morebiten vir hranil poveča mikrobno produkcijo in biorazgradnjo arheološkega mokrega lesa. Potencialen vir hranil se nahaja v prvem in hkrati najmanjšem ribniku, kjer je ribogojnica. Zaradi hranjenja rib ribiči iz Ribiškega društva Vrhnika v ribogojnico redno vnašajo hranila.

Glede na rezultate fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov lahko sklepamo, da kljub temu da gre za enovit vodni sistem hranila niso enakomerno porazdeljena po celotnem transektu. V višjih koncentracijah se hranila nahajajo v prvem bazenu, medtem ko so v ostalih dveh koncentracije nižje. Razlog za to je lahko stalno dodajanje hranil za oskrbo rib ter velikost samega ribnika, ki je manjša od ostalih dveh. Tako je tudi s številom heterotrofnih in koliformnih mikroorganizmov, saj je mikrobna aktivnost v prvem ribniku višja. Koncentracija raztopljenega kisika, pH vrednost in redoks potencial so v prvem bazenu nižje kakor v drugih dveh. Iz rezultatov lahko povzamemo, da je prvi bazen razmeroma samostojna enota, ki predstavlja vir hranil in mikroorganizmov. V času vzorčenja je obstajal izrazit gradient med prvim in ostalima dvema bazenoma. Kako izrazito je mešanje vode med posameznimi ribniki v različnih letnih časih ni poznano. Ribniki nimajo znanega vtoka in iztoka vode. V času meritev fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov je bil vpliv prvega bazena na depozitorij arheološkega mokrega lesa v tretjem bazenu majhen.

5.1.3 Celoletno spremljanje fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju

Kot poskus pasivnega konzerviranja arheološkega mokrega lesa so arheologi v sodelovanju z Mestnim muzejem Ljubljana v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju postavili depozitorij, v katerem bodo v obdobju petih let spremljali stanje arheološkega mokrega lesa. Ker je ekosistem ribnikov iz vidika razpoložljivih hranil, kisika, mikroorganizmov in drugih pomembnih parametrov popolnoma nedefiniran, smo v letu 2013 v omenjenem glinokopu izvajali rutinski monitoring nekaterih fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov, ki so bolj ali manj pomembni za razgradnjo arheološkega mokrega lesa. Monitoring je potekal povprečno dvakrat mesečno z izjemo poletnih mesecev in sicer od marca do novembra. Kljub temu, da je bilo leto 2013 po količini padavin, temperaturah in sončni obsevanosti pogosto izven dolgoletnega povprečja, nam pridobljeni podatki služijo za oceno potencialno ekstremnih stanj preučevanega okolja.

Temperaturne razmere v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju tekom opazovanega obdobja so bile leta 2013 ugodne za rast mezofilnih mikroorganizmov, saj so bile temperature vzdolž celotnega vodnega stolpca večinoma višje od 10 °C. Prav tako stratifikacija, ki bi omejevala mešanje plasti vode v opazovanem obdobju ni bila dolgotrajna. Koncentracija kisika je bila tekom celotnega obdobja opazovanja in po celotni globini vodnega stolpca dovolj velika, da je lahko aerobna razgradnja organskega materiala potekala skozi celotno opazovano obdobje. Poletne nižje koncentracije kisika v vodi niso imele izrazitega vpliva na razgradnjo arheološkega mokrega lesa, saj so bile še vedno dovolj visoke. Na dobro aeriranost celotnega vodnega stolpca preko celega leta kaže tudi redoks potencial, ki je bil ves čas relativno visok. Dobra aeriranost tudi v poletnih mesecih je lahko posledica povečane fotosintezne aktivnosti, ki je posledica daljše sončne obsevanosti in daljšega dneva (Patil in sod., 2012). V literaturi nihanje in sama pH vrednost (med 7,5 in 8,0) nima posebnega vpliva na samo rast mikroorganizmov na lesu. Pri teh eksperimentih so sveži les hrasta zakopali na treh različnih globinah v morski sediment. V prvi skupini so les položili na sediment tako, da je bil v neposrednem stiku z morskovo vodo. V drugi skupini so ga zakopali ravno pod površje in v tretji 50 cm globoko v sediment. Med izvajanjem eksperimenta so merili koncentracijo kisika, pH in druge parametre (Curci, 2006). Med letom smo opazili, da se je pH vrednost v poletnih mesecih povišala, kar je verjetno posledica asimilacije ogljikovega dioksida in nižje koncentracije raztopljenega kisika (Patil in sod., 2012).

Večinski del sušine v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju predstavlja raztopljena sušina. V začetku vzorčenj je bila trdna snov približno enakomerno porazdeljena med suspendirano in raztopljeno sušino, nato večinsko prevladuje raztopljena sušina. Suspendirana sušina se je zelo verjetno sedimentirala. Koncentracije hranil (fosforja v fosfatu, skupnega organskega ogljika in raztopljenih anorganskih oblik dušika) so preko celega opazovanega obdobja izredno nizke, kar je limitni dejavnik za večjo metabolno aktivnost in produktivnost tega okolja. Glede na koncentracijo skupnih anorganskih oblik dušika lahko po OECD kriterijih za uvrščanje jezer v trofično kategorijo stanja uvrščamo opuščen glinokop med oligotrofne ribnike. Glede na maksimalno in povprečno koncentracijo klorofila-*a* lahko opuščen glinokop uvrščamo med mezotrofne ribnike. Razlika v trofičnosti glede na koncentracijo dušikovih spojin in glede na koncentracijo klorofila-*a* je lahko tudi v dodajanju hranil za potrebe krmljenja rib. Ker v sistemu primanjkujejo hranila le-ta hitro krožijo, kar se kaže v nizki izmerjeni koncentraciji hranil ob sočasno višji koncentraciji klorofila-*a* med opazovanim obdobjem z dvema značilnima vrhoma spomladi in jeseni. Ker je koncentracija skupnega organskega ogljika nizka, je pričakovano nizka tudi biološka potreba po kisiku za razgradnjo organske snovi. Organska snov v depozitoriju bi lahko predstavljala takšen vnos organske snovi, zato bo zanimivo spremljati skozi daljše obdobje, kako se bo na novo vnešena organska snov (arheološki mokri les) razgrajevala. Število mikroorganizmov je razmeroma nizko in ne odstopa od primerljivih oligotrofnih okolij. Samo število mikroorganizmov sicer narašča po globini

vodnega stolpca in je najvišje ravno na površini platforme depozitorija. Okolje je na površini platforme depozitorija aerobno, zato lahko pričakujemo počasno rast mikrobov na površini lesa platforme in lesa arheoloških vzorcev.

Glede na zbrane podatke o kvaliteti jezer na Slovenskem (Preglednica 3) opuščeni glinokop na podlagi ekološkega stanja spada med jezera z dobrim ekološkim stanjem. Po količini klorofila-*a* je primerljiv večini mezotrofnih jezer v Sloveniji. Vrednosti klorofila-*a* v gorskih jezerih Triglavskega narodnega parka (Preglednica 4) so nižje kot vrednosti v ribnikih opuščenega glinokopa, medtem ko so koncentracije hranil višje. Nižje vrednosti klorofila-*a* so verjetno posledica višje nadmorske višine in nižjih temperatur. Po pravilniku o pitni vodi (2014) voda v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju v letu 2013 ne ustreza kriterijem, torej ni primerna za pitje in stekleničenje. Glede na Pravilnik o minimalnih higienskih zahtevah, ki jih morajo izpolnjevati kopališča in kopalne vode (2011) opuščeni glinokop ravno tako ne ustreza kriterijem. Edini parameter, ki presega dovoljene meje je vrednosti pH, ki je bila tekom celotnega opazovanega obdobja nekoliko previsoka (mejna vrednost je 7,6).

Ker smo med monitoringom spremljali večje število na videz nepovezanih fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov, smo preverili stopnjo korelacije med pari parametrov. Arbitrarno smo določili, da dva parametra med seboj značilno korelirata, če je korelacijski koeficient pod -0,4 in nad 0,4. Za parametre, ki med seboj zelo dobro korelirajo smo določili mejo korelacijskega koeficienta pod -0,7 in nad 0,7. Med seboj pozitivno korelirajo temperatura vode in temperatura zraka, temperatura zraka in skupno št. heterotrofnih mikroorganizmov pri 37 °C, prevodnost in skupno št. heterotrofnih mikroorganizmov pri 28 °C, skupna sušina in raztopljenost sušina ter skupna sušina in biološka potreba po kisiku po 4. dneh. Negativno korelirata temperatura vode in količina raztopljenega kisika. Korelacija med temperaturo zraka in temperaturo vode ter temperaturo vode in količino raztopljenega kisika je pričakovana, saj sledi znanim fizikalnim zakonitostim. Pričakovana je tudi korelacija med temperaturo zraka/vode in skupnim št. heterotrofnih mikroorganizmov pri 37 °C, saj se z višanjem temperature ustvarjajo ugodnejše razmere za rast mikroorganizmov zlasti tistih, ki za svojo rast potrebujejo višje temperature. Gre za mikroorganizme, ki lahko predstavljajo patogeno ali alohtono mikrobno populacijo. Korelacija med skupnimi trdnimi snovmi in skupnimi raztopljenimi snovmi kaže na to, da predstavljajo večinski delež trdnih snovi pravzaprav raztopljene snovi. Pozitivna korelacija med skupnimi trdnimi snovmi in biološko potrebo po kisiku po 4. dneh kaže na to, da gre za prisotnost organskih trdnih snovi v vodi.

5.1.4 Shranjevanje arheološkega mokrega lesa v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju

Po skoraj enoletnem spremljanju različnih parametrov in stanja arheološkega mokrega lesa smo s pomočjo FT-IR spektroskopije poskusili ovrednotiti spremembe, ki so nastale med hrambo arheološkega mokrega lesa. Spremembe na strukturi lesa so relativno majhne, kar je razumljivo, saj je čas trajanja hrambe kratek. Če bi se v tako kratkem času pokazale velike spremembe, je smiselnost daljše hrambe že vnaprej vprašljiva. Največje spremembe smo pričakovali na celulozni komponenti lesa, manjše na ligninski, saj je ta težje razgradljiva. Na površini izbranega arheološkega mokrega lesa hrasta z FT-IR spektroskopijo nismo našli celuloznih komponent, le ligninske.

Ustreznost hrambe arheološkega mokrega lesa v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju po enoletnem spremljanju različnih fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov še ni moč podati, saj je potrebno za podrobne napovedi spremljati sistem in kvaliteto hranjenega lesa vsaj nekaj let. Preliminarni rezultati kažejo, da gre za oligotrofno okolje, ki mu primanjkuje hranil, je dobro založeno s kisikom, z relativno veliko motnostjo ter spomladanskim in jesenskim vrhom mikrobne aktivnosti, kjer je počasna razgradnja arheološkega lesa možna skozi celotno opazovano obdobje.

5.2 SKLEPI

- Mikrobiološka razgradnja arheološkega mokrega lesa je značilno višja od kemijske razgradnje pri temperaturah med 5 in 37 °C.
- V aerobnih okoljih je hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa bistveno višja kot v okoljih, kjer je kisika malo.
- pH okolja ima velik vpliv na razgradnjo arheološkega mokrega lesa, pri pH vrednosti okrog 9 razgradnje nismo zaznali.
- Dodatek hranil je povečal hitrost razgradnje arheološkega mokrega lesa.
- Sestava in vrsta arheološkega lesa vpliva na hitrost mikrobne razgradnje.
- Preliminarni enoletni rezultati monitoringa fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov v depozitoriju opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju kažejo, da gre za oligotrofno okolje, ki mu primanjkuje hranil, je dobro založeno s kisikom, z relativno veliko motnostjo ter spomladanskim in jesenskim vrhom mikrobne aktivnosti, kjer je počasna razgradnja arheološkega lesa možna skozi celotno opazovano obdobje.

6 POVZETEK

Les je kompleksno sestavljena organska snov, ki se med različnimi vrstami dreves razlikuje. Razlike so tako v izgledu kot v kemični sestavi. Arheološki mokri les se razlikuje po količini ligninskih in celuloznih komponent, količini vode in stopnji razgrajenosti. Ker je ohranjanje zgodovinsko pomembnih kosov arheološkega mokrega lesa pomembno, smo v magistrski nalogi preverjali pomembnost različnih okoljskih parametrov za razgradnjo arheološkega mokrega lesa in poskušali oceniti ustreznost ekosistema, ki bi služil kot depozitorij za takšne arheološke najdbe.

Razgradnja arheološkega mokrega lesa poteka predvsem po mikrobiološki poti. Rezultati so pokazali, da na hitrost razgradnje vpliva temperatura, prisotnost kisika, pH. Dodatek hranil je povečal hitrosti razgradnje. Spremembe v kemijski sestavi, ki jih povzroči razgradnja arheološkega mokrega lesa smo spremljali s FT-IR spektroskopijo. Hitrost razgradnje arheološkega lesa je bila višja v vodi iz Ljubljanice kot v vodi iz depozitorija za arheološki mokri les.

V opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju so arheologi v sodelovanju z Mestnim muzejem Ljubljana postavili podvodni depozitorij za shranjevanje takšnih kosov lesa. Redni monitoring fizikalno – kemijskih in mikrobioloških parametrov je pokazal, da je po hranilih oligotrofen in po koncentraciji klorofila-*a* mezotrofen ekosistem. Razgradnja arheološkega mokrega lesa je možna, sama hitrost razgradnje je majhna, saj je odvisna od ustreznih pogojev okolja (temperatura, kisik in hranila). Za verodostojno oceno ustreznosti izbranega ekosistema za shranjevanje arheološkega mokrega lesa je potrebno spremljati okoljske parametre in stanje lesa skozi daljše časovno obdobje.

7 VIRI

- ARSO. 2015a. Odklon povprečne mesečne temperature zraka za Ljubljano, leto 2013. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 1 str.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/current/last-12-months/archive/>
(15. mar. 2015)
- ARSO. 2015b. Mesečna višina padavin za Ljubljano, leto 2013. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 1 str.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/current/last-12-months/archive/>
(15. mar. 2015)
- ARSO. 2015c. Mesečno trajanje sončnega obsevanja za Ljubljano, leto 2013. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 1 str.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/current/last-12-months/archive/>
(15. mar. 2015)
- Baeza J., Freer J. 2001. Chemical characterization of wood. V: Wood and cellulosic chemistry. Hon D.N.S., Shiraishi N. (eds.). 2nd ed. New York, Marcel Dekker: 295-377
- Baglioni P., Giorgi R. 2006. Soft and hard nanomaterials for restoration and conservation of cultural heritage. *Soft Matter*, 2: 293-303
- Balal Arain M., Kuzi T.G., Jamali M.K., Afridi H.I., Baig J.A., Jalbani N., Shah A.Q. 2008. Evaluation of physico-chemical parameters of manchar lake water and their comparison with other global published values. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, 9, 2: 101-109
- Björdal C.G., Nilsson T., Daniel G. 1999. Microbial decay of waterlogged archaeological wood found in Sweden. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 43: 63-73
- Björdal C.G., Nilsson T. 2001. Observation on microbial growth during conservation treatment of waterlogged archaeological wood. *Studies in Conservation*, 46, 3: 211-220
- Blanchette R.A. 2000. A review of microbial deterioration found in archaeological wood from different environments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 46: 189-204
- Brancelj A. 1999. Onesnaževanje gorskih jezer. Dela, Oddelek za geografijo Filozofske fakultete, 13: 151-163
- Brown C.E. 1991. Conservation of waterlogged wood: A review. V: Waterfront archaeology. Proceedings of the 3th International Conference on waterfront archaeology. Bristol, 23-26 September 1988, Good G.L., Jones R.H., Ponsford M.W. (eds.). London, Council for British Archaeology: 121-123
- Capretti C., Macchioni N., Pizzo B., Galotta G., Giachi G., Giampaola D. 2008. The characterization of waterlogged archaeological wood: the tree Roman ships found in Naples (Italy). *Arcaeometry*, 50: 855-876

- Clesceri L.S., Greenberg A.E., Eaton A.D. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. Washington, DC, American Public Health Association: 1325 str.
- Curci J. 2006. The reburial of waterlogged archaeological wood in wet environments. Technical Briefs in Historical Archaeology, 1: 21-25
- D'Angelo E., Crutchfield J., Vandiviere M. 2001. Rapid, sensitive, microscale determination of phosphate in water and soil. Journal of Environmental Quality, 30: 2206-2209
- Daniel G. F., Nilsson T., Singh A.P. 1987. Degradation of lignocellulosics by unique tunnel-forming bacteria. Canadian Journal of Microbiology, 33, 10: 943-948
- Faix O. 1991. Classification of lignin from different botanical origins by FT-IR spectroscopy. Holzforschung, 45: 21-27
- Fengel D., Wegener G. 1989. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin, Walter de Gruyter & Co: 235 str.
- Gaspari A., Erič M. 2012. Preliminarno poročilo o odkritju rimske tovarne ladje v Ljubljani pri Sinji Gorici. V: Potopljena preteklost: arheologija vodnih okolij in raziskovanje podvodne kulturne dediščine v Sloveniji: zbornik ob 128-letnici Dežmanovih raziskav Ljubljane na Vrhniki (1884-2012). Gaspari A., Erič M. (ur.). Radovljica, Didakta d.o.o.: 293-299
- Giachi G., Capretti C., Macchioni N., Pizzo B., Donato I. D. 2010. A methodological approach in the evaluation of the efficacy of treatments for the dimensional stabilisation of waterlogged archaeological wood. Journal of Cultural Heritage, 11: 61 – 101
- Gregory D. 1995. Experiments into the deterioration characteristics of materials on the duarte point wreck site: An interim report. International Journal of Nautical Archaeology, 24, 1: 61-65
- ISO 10260. Water quality – Measurement of biochemical parameters – Spectrometric determination of the chlorophyll-*a* concentration. 1992: 6 str.
- ISO 13395. Water quality – Determination of nitrite nitrogen and nitrate nitrogen and the sum of both by flow analysis (CFA and FIA) and spectrometric detection. 1996: 18 str.
- ISO 11732. Water quality – Determination of ammonium nitrogen – Method by flow analysis (CFA and FIA) and spectrometric detection. 2005:18 str.
- Karafistan A., Arik-Colakoglu F. 2005. Physical, chemical and microbiological water quality of themanyaslake, Turkey. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 10: 127-143
- Kavkler K., Stopar D., Šinkovec I., Toman Kracina K. 2014. Ohranjanje lesa iz mokrih okolij: Spremljevalna razstava k razstavi Kolo 5200 let. Ljubljana, Mestni muzej Ljubljana: 8 str. (razstava)

- Kim Y.S., Singh A.P. 2000. Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments: A review. *International Association of Wood Anatomists Journal*, 21: 135-155
- Knez J. 2014. O agenciji. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 1 str. <http://www.arso.gov.si/o%20agenciji/> (15. mar. 2015)
- Kolišča kot del svetovne dediščine. 2014. Ljubljana, Javni zavod krajinski park Ljubljansko barje: 1 str. <http://www.ljubljanskobarje.si/unesco-na-ljubljanskem-barju/kolisca-kot-del-svetovne-dediscine> (3 mar. 2014)
- Landy E.T., Mitchell J. I., Hotchkiss S., Eaton R.A. 2008. Bacterial diversity associated with archaeological waterlogged wood: Ribosomal RNA clone libraries and denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 61, 1: 17-23
- Nilsson T., Björdal C., Fällman E. 2008. Culturing erosion bacteria: Procedures for obtaining purer cultures and pure strains. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 61, 1: 17-23
- Manohim V. 1968. Zgodovina razvoja meteorologije v Sloveniji. Ljubljana, Slovensko meteorološko društvo: 1 str. <http://www.meteo-drustvo.si/zgodovina/razvoj-meteorologije-v-sloveniji/> (15. mar. 2015)
- Milling A., Kehr R., Wulf A., Smalla K. 2005. Survival of bacteria on wood and plastic particles: Dependence on wood species and environmental conditions. *Holzforschung*, 59: 72-81
- O Ljubljanskem barju. 2014. Ljubljana, Javni zavod krajinski park Ljubljansko barje: 1 str. <http://www.ljubljanskobarje.si/ljubljansko-barje/o-ljubljanskem-barju> (3. mar. 2014)
- Opis enote nepremične kulturne dediščine. 2014. Ljubljana, Register nepremične kulturne dediščine: 1 str <http://giskd2s.situla.org/rkd/Opis.asp?Esd=12527> (10. mar 2014).
- Patil P. N., Sawant D. V., Deshmukh R. N. 2012. Physico-chemical parameters for testing of water – A review. *International Journal of Environmental Sciences*, 3, 3: 1194-1207
- Plestenjak A., Erjavec R., Verbič T., Novšak M. 2013. Poročilo o arheoloških raziskav pri projektu »Oskrba s pitno vodo v porečju Ljubljanice in ureditev primarnega voda na odseku Vrhnika (Škof) – Vrhnika (Ščetinarna)«. Ljubljana, Arhej d.o.o.: 43 str. http://www.arhej.com/datoteke/Pdf/porocilo_vrhnika.pdf (5. mar 2014).
- Polanc J., Leban I. 2004. Les – zgradba in lastnosti. 1. izd. Ljubljana, Lesarska založba: 176 str.
- Pravilnik o pitni vodi. 2014. Uradni list Republike Slovenije, 14, 19: 2155-2166
- Pravilnik o minimalnih higienskih zahtevah, ki jih morajo izpolnjevati kopališča in kopalne vode. 2011. Uradni list Republike Slovenije, 21, 39: 5257-5264

- Remec-Rekar Š. 2008. Kakovost jezer v letu 2007. Ljubljana, RS, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 167 str.
http://www.arso.gov.si/vode/jezera/Porocilo_jezera_2007.pdf (14. mar 2014)
- Remec-Rekar Š. 2009. Kakovost jezer v letu 2008. Ljubljana, RS, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 41 str.
http://www.arso.gov.si/vode/jezera/POROciLO%20JEZERA_2008.pdf (14. mar 2014)
- Remec-Rekar Š. 2010. Kakovost jezer v letu 2009. Ljubljana, RS, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 42 str.
http://www.arso.gov.si/vode/jezera/PORORO%C4%8CILO%20JEZERA%202009_splet.pdf (14. mar 2014)
- Remec-Rekar Š. 2011. Kakovost jezer v Sloveniji v letu 2010. Ljubljana, RS, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 8 str.
http://www.arso.gov.si/vode/jezera/JEZERA_kratko_2010_MDT.pdf (14. mar 2014)
- Remec-Rekar Š. 2012. Ocena stanja jezer v Sloveniji v letu 2011. Ljubljana, RS, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 12 str.
http://www.arso.gov.si/vode/jezera/Poro%C4%8Dilo%20JEZERA%20_2011.pdf (14. mar 2014)
- Remec-Rekar Š. 2013. Ocena stanja jezer v Sloveniji v letu 2012. Ljubljana, RS, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 13 str.
http://www.arso.gov.si/vode/jezera/Porocilo_JEZERA_2012.pdf (14. mar 2014)
- Sakakibara A., Sano Y. 2001. Chemistry of lignin. V: Wood and cellulosic chemistry. Hon D.N.S., Shiraishi N. (eds.). 2nd ed.. New York, Marcel Dekker: 113-120
- Schwarze F.W.M.R. 2007. Wood decay under the microscope. Fungal Biology Reviews, 21, 4: 133-170
- Schweingruber F.H. 2007. Wood structure and environment. Berlin, Springer: 245 str.
- Shin H.S., Monsallier J.M., Choppin G.R. 1999. Spectroscopic and chemical characterizations of molecular size fractionated humic acid. Talanta, 50: 641-647
- Singh A.P., Hedley M.E., Page D.R., Han C.S., Atisongkroh K. 1992. Microbial degradation of CCA-treated cooling tower timbers. International Association of Wood Anatomists Bulletin, 13, 215-231
- Skubic J. 2006. Vpliv obremenitve in morfologije jezera na kakovost jezera. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 58 str.
http://eprints.fgg.uni-lj.si/852/1/VKI_0053_Skubic.pdf (15. mar 2014)
- Stopar D., Stres B., Mahne I. 2009. Praktikum iz mikrobne ekologije za študente mikrobiologije. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za živilstvo: 78 str.
- Vidmar M. 2013. Popisni list št. 89: Glinokop Verd (Vrhnika). Ljubljana, Podvodni atlas Slovenije: 5 str.
http://pas.s56g.net/pdf/089_Verd.pdf (14. mar 2014)

- Vojaković P., Novšak M., Žerjal T., Verbič T., Krajšek J., Hrustel J. 2011. Poročilo o predhodnih arheoloških raziskavah na lokaciji Ljubljana – stanovanjska soseska Tribuna. Ljubljana, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije v sodelovanju z Arhej d.o.o.: 172 str.
<http://www.arhej.com/datoteke/Pdf/porocilo-tribuna-08-za-objavo-koncna.pdf> (5. mar 2014)
- Vreme in podnebje. 2014. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 1 str.
<http://www.arso.gov.si/vreme/> (15. mar. 2015)

ZAHVALA

Zahvaliti se želim:

Katedri za mikrobiologijo, Oddelka za živilstvo na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani za omogočenje izvedbe magistrske naloge.

Naravoslovnem oddelku Restavratorskega centra Zavoda za Varstvo Kulturne Dediščine Slovenije za omogočenje izvedbe enega dela magistrske naloge.

Mentorju **prof. dr. Davidu Stoparju** za posvečen čas, za dolge sestanke, za vse nasvete, dvome, ideje, za spodbudo in zahtevnost.

Somentorici in delovni metorici **doc. dr. Tjaši Danevčič** za dolge večerne ure v laboratoriju, za pomoč in nasvete, za potrpežljivost, odprtost in dostopnost.

Recezentki **prof. dr. Romani Marinšek Logar** za hiter pregled magistrskega dela, za nasvete in popravke.

Dr. Katji Kavkler za pomoč in nasvete pri izvedbi FT-IR spektroskopije.

Ekipi potapljačev za zanesljivo in vestno vzorčenje v globinah opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju, za vse prevoze in pozitiven duh.

Staršem za vse odrekanje, spodbudo, podporo in brezmejno vero, da zmorem.

Fantu Mirsadu za potrpežljivost, spodbudo in brezmejno ljubezen ter sinu Dinu, ki mi je pokazal, da se je v življenju vredno truditi.

Iskrena hvala.

PRILOGE

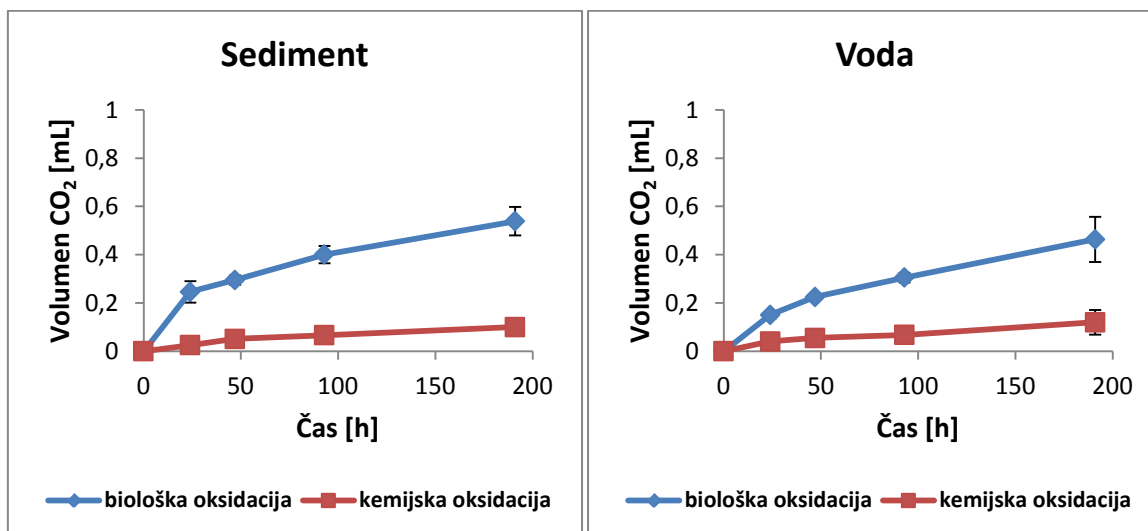
PRILOGA A

Priloga A1: Količina nastalega CO₂ v mL pri biološki in kemijski oksidaciji arheološkega mokrega lesa bukve v aerobnem okolju. V preglednici so zbrani rezultati, ki smo jih uporabili pri izrisu slike 11.

Čas [h]	0	24	47	93	191
SEDIMENT					
biološka oksidacija	0	0,58 ± 0,04	0,80 ± 0,09	1,2 ± 0,1	2,2 ± 0,2
kemijska oksidacija	0	0,050 ± 0,009	0,11 ± 0,03	0,20 ± 0,04	0,38 ± 0,08
VODA					
biološka oksidacija	0	0,19 ± 0,02	0,29 ± 0,02	0,50 ± 0,07	1,0 ± 0,2
kemijska oksidacija	0	0,075 ± 0,005	0,106 ± 0,006	0,155 ± 0,005	0,283 ± 0,008

Priloga A2: Količina nastalega CO₂ v mL pri biološki in kemijski oksidaciji arheološkega mokrega lesa bukve v anaerobnem okolju. V preglednici so zbrani rezultati, ki smo jih uporabili pri izrisu priloge A3.

Čas [h]	0	24	47	93	191
SEDIMENT					
biološka oksidacija	0	0,25 ± 0,04	0,29 ± 0,02	0,40 ± 0,04	0,54 ± 0,06
kemijska oksidacija	0	0,03 ± 0,02	0,051 ± 0,006	0,07 ± 0,01	0,10 ± 0,01
VODA					
biološka oksidacija	0	0,15 ± 0,02	0,22 ± 0,01	0,31 ± 0,02	0,46 ± 0,09
kemijska oksidacija	0	0,040 ± 0,002	0,055 ± 0,005	0,066 ± 0,006	0,12 ± 0,05



Priloga A3: Vpliv biološke in kemijske oksidacije pri razgradnji arheološkega mokrega lesa bukve v anaerobnih pogojih. Arheološki mokri les bukve smo (v treh ponovitvah) zmešali v sediment in vodo ter inkubirali v anaerobnih razmerah 191 ur pri 28 °C. Hitrost respiracije smo merili preko produkcije CO₂ na sobni temperaturi s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih. Vrednost kemijske oksidacije predstavlja količina nastalega CO₂ pri avtoklaviranem vzorcu sedimenta in vode. Vrednosti biološke oksidacije predstavlja razlika v količini nastalega CO₂ neavtoklaviranega in avtoklaviranega vzorca sedimenta in vode.

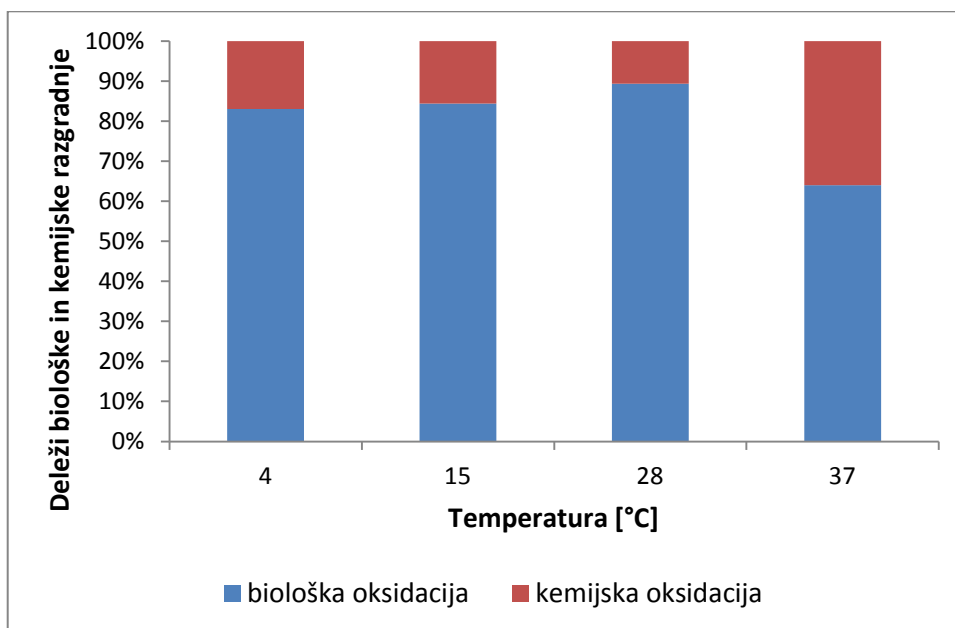
PRILOGA B

Priloga B1: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri 5 kratni koncentraciji hranil in različnih temperaturah inkubacije. V preglednici so zbrani podatki, ki smo jih uporabili za izris slike 12.

Čas [h]	0	24	48	96	193
4°C	0	0,14 ± 0,01	0,30 ± 0,03	0,39 ± 0,06	0,67 ± 0,05
15°C	0	0,262 ± 0,008	0,59 ± 0,03	0,76 ± 0,05	1,29 ± 0,07
28°C	0	0,66 ± 0,05	1,48 ± 0,03	2,1 ± 0,1	5,2 ± 0,2
37°C	0	0,5 ± 0,01	1,1 ± 0,06	1,32 ± 0,09	1,82 ± 0,06

Priloga B2: Deleži biološke in kemijske razgradnje arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih temperaturah. Deleži biološke in kemijske razgradnje lesa so izračunani po koncu 193 urne inkubacije v aerobni atmosferi. V preglednici so zbrani podatki, ki smo jih uporabili za izris slike B3.

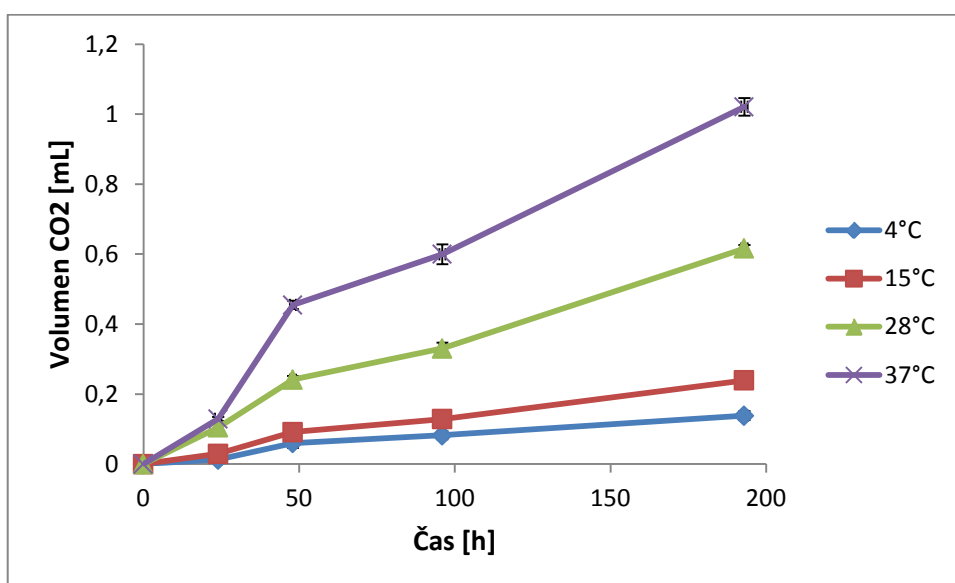
Temperatura [°C]	4	15	28	37
biološka oksidacija [%]	83,0	84,4	89,4	64,0
kemijska oksidacija [%]	17,0	15,6	10,6	36,0
SKUPAJ [%]	100	100	100	100



Priloga B3: Spreminjanje deležev biološke in kemijske razgradnje pri različnih temperaturah za arheološki mokri les hrasta v vodnem okolju s 5 kratno koncentracijo mikrohranil. Deleži so preračunani na izmerjeno količino CO₂ v vzorčni steklenički, delež biološke oksidacije predstavlja razliko med količino izmerjenega CO₂ v vzorčni steklenički in v avtoklavirani negativni kontroli. Deleži so preračunani iz rezultatov po končani 193 urni inkubaciji v aerobnem okolju.

Priloga B4: Količina nastalega CO₂ v mL pri kemijski razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih temperaturah po času. Vrednosti kemijske razgradnje arheološkega mokrega lesa nam predstavljajo avtoklavirani vzorci arheološkega mokrega lesa hrasta v vodni raztopini 5 kratne koncentracije mikrohranil (v treh ponovitvah) pri različnih temperaturah inkubacije. V preglednici so zbrani podatki, ki smo jih uporabili za izris slike B5. Podatke pri času 193 ur smo uporabili še za izris slike 13.

Čas [h]	0	24	48	96	193
4°C	0	0,01 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,14 ± 0,01
15°C	0	0,030 ± 0,003	0,092 ± 0,003	0,129 ± 0,002	0,239 ± 0,005
28°C	0	0,10 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,33 ± 0,02	0,62 ± 0,01
37°C	0	0,129 ± 0,006	0,45 ± 0,01	0,60 ± 0,03	1,02 ± 0,03



Priloga B5: Vpliv kemijske oksidacije na razgradnjo arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih temperaturah. Avtoklavirane vzorce arheološkega mokrega lesa v vodni raztopini s 5 kratno koncentracijo mikrohranil (v treh ponovitvah) smo predinkubirali tri dni pri sobni temperaturi. Po predinkubaciji smo vzorce prepihali in inkubirali pri različnih temperaturah. Hitrost respiracije smo spremljali s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih z merjenjem količine nastalega CO₂.

Priloga B6: Intenziteta vibracijskih vrhov v odstotkih transmisije za tri najbolj karakteristične vibracije lignina po različnih časih termične obdelave. Intenziteto posameznega vibracijskega vrha smo izračunali iz razdalje med bazno linijo in najnižjo točko posameznega vibracijskega vrha. V preglednici so zbrani podatki, ki smo jih uporabili za izris slike 15.

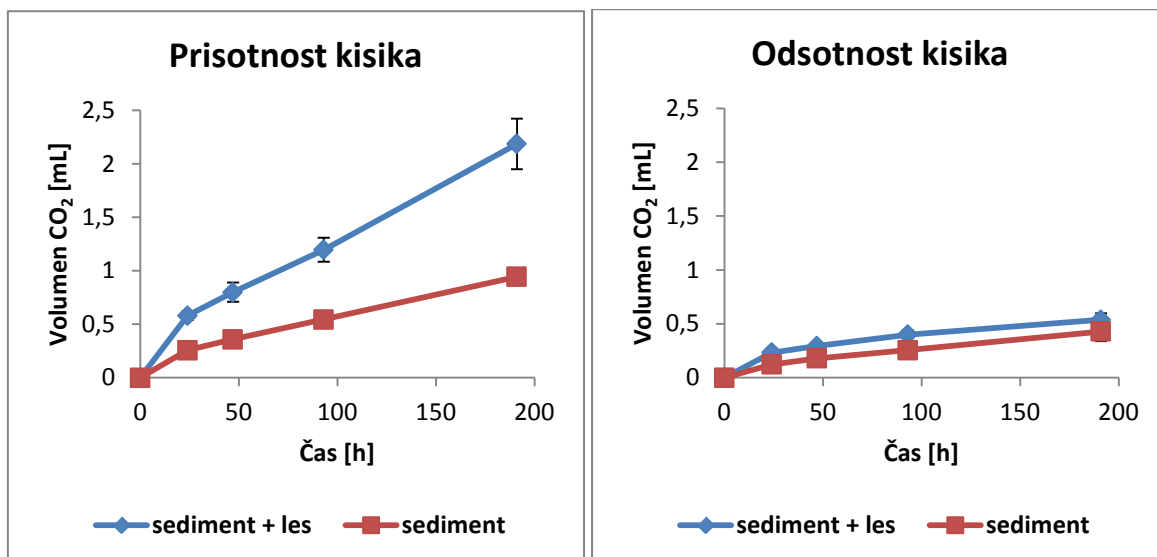
Čas [h]	0	2	4	6
1595 cm ⁻¹	4,1 ± 0,8	1,5 ± 0,5	1,1 ± 0,08	1,27 ± 0,05
1505 cm ⁻¹	3,6 ± 0,8	1,7 ± 0,5	1,3 ± 0,2	1,10 ± 0,07
1460 cm ⁻¹	3,4 ± 0,8	1,6 ± 0,8	1,44 ± 0,09	0,97 ± 0,08

Priloga B7: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji arheološkega mokrega lesa bukve v različnih ekosistemih in atmosferah po različnih časovnih intervalih. V preglednici so zbrani podatki, ki so služili izrisu slike 16.

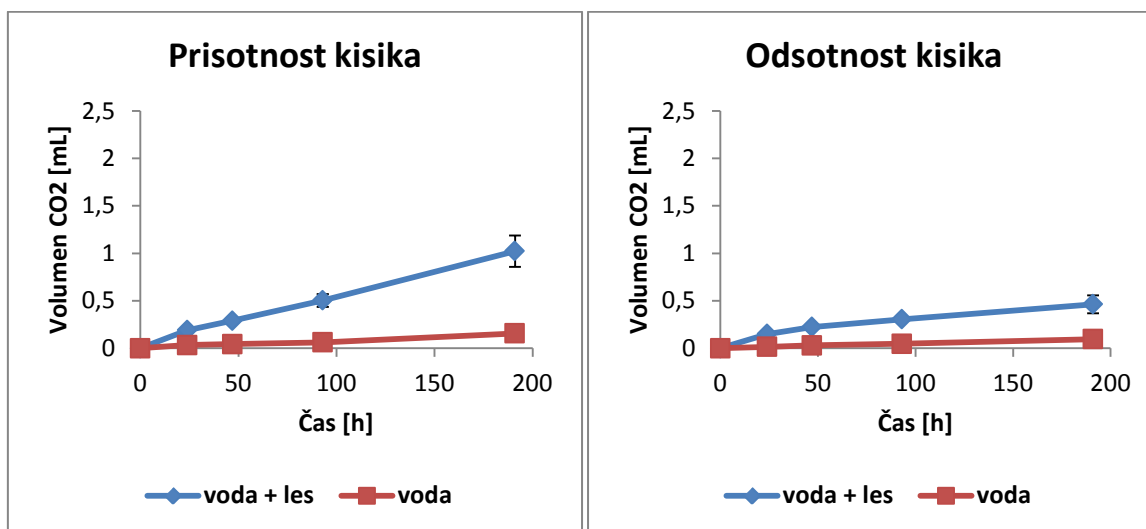
Čas [h]	0	24	47	93	191
Sediment					
Prisotnost kisika	0	0,581 ± 0,002	0,80 ± 0,09	1,2 ± 0,1	2,2 ± 0,2
Odsotnost kisika	0	0,233 ± 0,002	0,30 ± 0,02	0,40 ± 0,04	0,54 ± 0,06
Voda					
Prisotnost kisika	0	0,190 ± 0,001	0,29 ± 0,02	0,50 ± 0,07	1,0 ± 0,2
Odsotnost kisika	0	0,151 ± 0,001	0,22 ± 0,01	0,31 ± 0,02	0,46 ± 0,09

Priloga B8: Količina nastalega CO₂ v mL v različnih ekosistemih in atmosferah z in brez dodatka lesa po različnih časovnih intervalih. V preglednici so zbrani podatki, ki so služili izrisu slike B9 in B10.

Čas [h]	0	24	47	93	191
Prisotnost kisika					
Sediment	0	0,26 ± 0,02	0,36 ± 0,05	0,54 ± 0,05	0,94 ± 0,06
Sediment + les	0	0,581 ± 0,002	0,80 ± 0,09	1,2 ± 0,1	2,2 ± 0,2
Voda	0	0,03 ± 0,01	0,05 ± 0,02	0,07 ± 0,05	0,16 ± 0,08
Voda + les	0	0,190 ± 0,001	0,29 ± 0,02	0,50 ± 0,07	1,0 ± 0,2
Odsotnost kisika					
Sediment	0	0,12 ± 0,02	0,18 ± 0,01	0,26 ± 0,03	0,43 ± 0,09
Sediment + les	0	0,233 ± 0,002	0,30 ± 0,02	0,40 ± 0,04	0,54 ± 0,06
Voda	0	0,016 ± 0,007	0,03 ± 0,01	0,05 ± 0,02	0,10 ± 0,03
Voda + les	0	0,151 ± 0,001	0,22 ± 0,01	0,31 ± 0,02	0,46 ± 0,09



Priloga B9: Vpliv dodatka arheološkega mokrega lesa bukve sedimentu v prisotnosti in odsotnosti kisika. Na slikah vidimo razliko med količino CO₂ nastalega ob 191 urni inkubaciji za sediment in sediment, ki smo mu dodali arheološki moker les. Vzorce smo v treh ponovitvah inkubirali 191 ur pri 28 °C, za negativno kontrolo smo uporabili avtoklaviran vzorec.



Priloga B10: Vpliv dodatka arheološkega mokrega lesa bukve vodi v prisotnosti in odsotnosti kisika. Na slikah vidimo razliko med količino CO₂ nastalega ob 191 urni inkubaciji za vodo in vodo, ki smo ji dodali arheološki moker les. Vzorce smo v treh ponovitvah inkubirali 191 ur pri 28 °C, za negativno kontrolo smo uporabili avtoklaviran vzorec.

Priloga B11: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih koncentraciji mikrohranil. V preglednici so zbrani podatki, ki smo jih uporabili za izris slike 17.

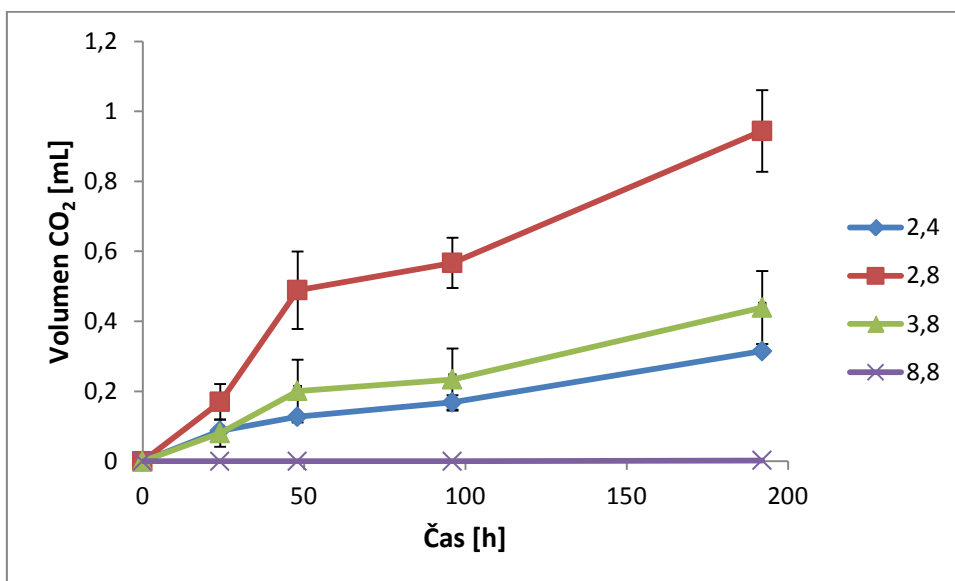
Čas [h]	0	24	72	96	193
0X	0	0,46 ± 0,01	0,92 ± 0,06	1,35 ± 0,06	3,77 ± 0,09
1X	0	0,54 ± 0,06	1,25 ± 0,08	1,84 ± 0,07	4,7 ± 0,4
5X	0	0,66 ± 0,05	1,5 ± 0,1	2,1 ± 0,1	5,2 ± 0,2

PrilogaB12: Količina nastalega CO₂ v mL pri biološki razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri 5 kratni koncentraciji mikrohranil in različnih pH vrednostih. V preglednici so zbrani podatki, ki smo jih uporabili za izris slike 18.

Čas [h]	0	24	48	96	192
pH 2,5	0	0,68 ± 0,03	1,41 ± 0,06	1,80 ± 0,09	3,6 ± 0,3
pH 3	0	0,85 ± 0,06	1,8 ± 0,2	2,9 ± 0,2	7,8 ± 0,4
pH 4	0	0,41 ± 0,09	0,90 ± 0,2	1,0 ± 0,1	2,0 ± 0,3
pH 9	0	0	0	0	0,03 ± 0,01

Priloga B13: Količina nastalega CO₂ v mL pri kemijski razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta pri 5 kratni koncentraciji mikrohranil in različnih pH vrednostih. V preglednici so zbrani podatki, ki smo jih uporabili za izris slike B14.

Čas [h]	0	24	48	96	192
pH 2,5	0	0,09 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,17 ± 0,02	0,31 ± 0,01
pH 3	0	0,17 ± 0,05	0,49 ± 0,11	0,57 ± 0,07	0,94 ± 0,11
pH 4	0	0,08 ± 0,04	0,20 ± 0,09	0,23 ± 0,09	0,44 ± 0,01
pH 9	0	0	0	0	0



Priloga B14: Vpliv kemijske oksidacije na razgradnjo arheološkega mokrega lesa hrasta pri različnih pH vrednostih. Avtoklavirane vzorce arheološkega mokrega lesa v vodni raztopini s 5 kratno koncentracijo mikrohranil (v treh ponovitvah) smo predinkubirali tri dni pri sobni temperaturi. Po predinkubaciji smo vzorce prepihali in inkubirali pri različnih temperaturah. Hitrost respiracije smo spremljali s plinskim kromatografom v različnih časovnih intervalih z merjenjem količine nastalega CO₂.

PRILOGA C

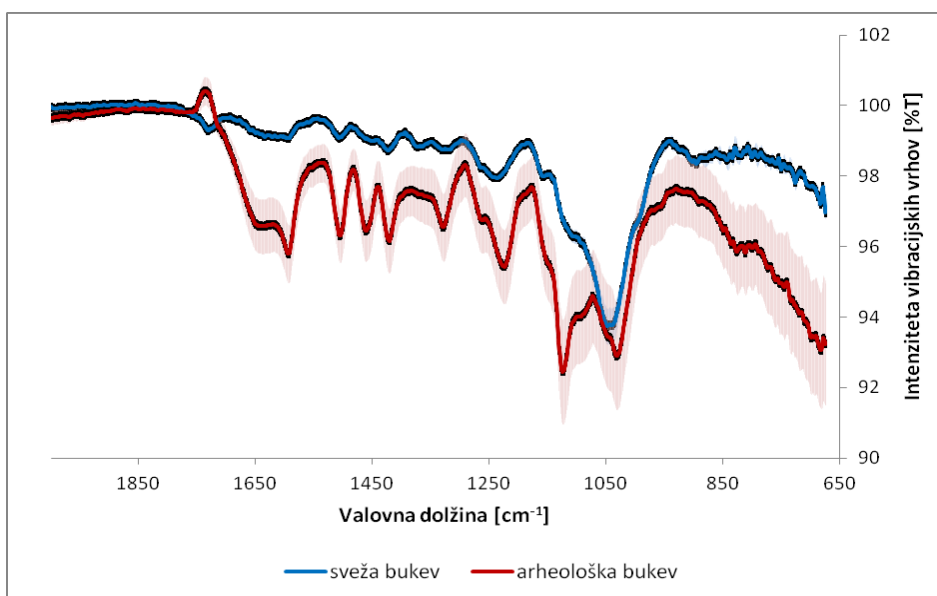
Priloga C1: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji arheološkega mokrega lesa hrasta v reki Ljubljanici in vodi opuščenega glinokopa na Verdu. V preglednici so zbrani podatki, ki smo jih uporabili za izris slike 19.

Čas [h]	0	24	48	96	193
LJUBLJANICA	0	0,41 ± 0,04	0,9 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,3 ± 0,2
GLINOKOP	0	0,27 ± 0,03	0,52 ± 0,09	0,6 ± 0,1	0,8 ± 0,1

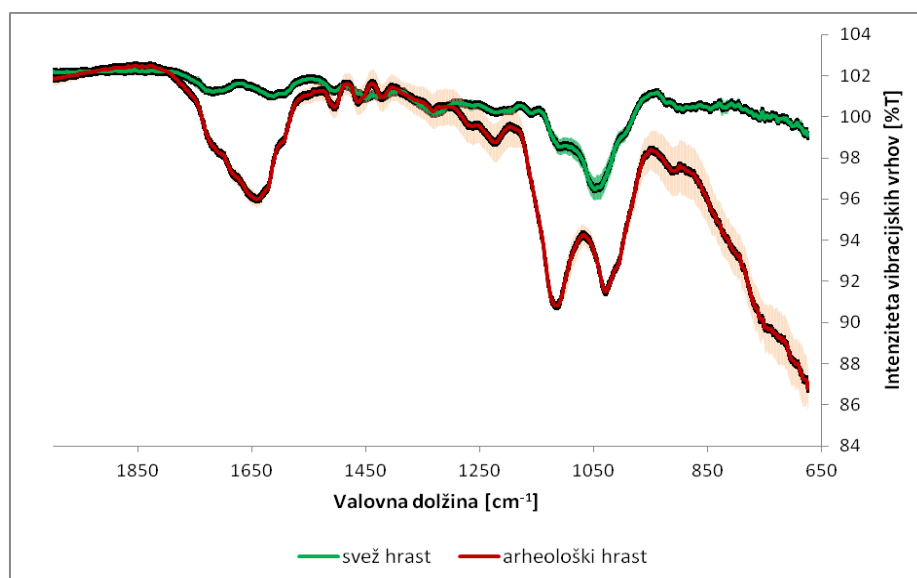
PRILOGA D

Priloga D1: Količina nastalega CO₂ v mL pri razgradnji svežega lesa bukve in hrasta in arheološkega mokrega lesa bukve in hrasta v vodi opuščenega glinokopa na Verdu pri Vrhniki. V preglednici so zbrani podatki, ki smo jih uporabili za izris slike 21.

Čas [h]	0	24	72	96	193
SVEŽA BUKEV	0	2,8 ± 0,4	6,6 ± 1	8,0 ± 2	13,7 ± 2
ARHEOLOŠKA BUKEV	0	0,28 ± 0,07	0,5 ± 0,1	0,6 ± 0,2	0,9 ± 0,4
SVEŽ HRAST	0	0,80 ± 0,06	1,9 ± 0,1	2,5 ± 0,1	5,5 ± 0,2
ARHEOLOŠKI HRAST	0	0,70 ± 0,09	1,35 ± 0,06	1,63 ± 0,08	3,71 ± 0,09



Priloga D2: Primerjava strukturnih razlik lesa sveže bukve in arheološkega mokrega lesa bukve. Vzorec arheološkega mokrega lesa bukve smo razrezali na koščke velike 2-5 mm, posušili pri 28 °C čez noč in razdrobili v prah, kot vzorec sveže bukve smo vzeli bukovo žaganje, ki smo ga tudi posušili pri 28 °C čez noč in razdrobili v prah. Na FT-IR spektrometru smo posneli spekter 4000-650 cm⁻¹ v vsaj 3 ponovitvah. Slika je prikaz povprečnih vrednosti in standardne napake za posamezen vzorec lesa.



Priloga D3: Primerjava strukturnih razlik svežega lesa hrasta in arheološkega mokrega lesa hrasta. Vzorec arheološkega mokrega lesa hrasta smo razrezali na koščke velike 2-5 mm, posušili pri 28 °C čez noč in razdrobili v prah, kot vzorec svežega hrasta pa smo vzeli hrastovo žaganje, ki smo ga posušili pri 28 °C čez noč in razdrobili v prah. Na FT-IR spektrometru smo posneli spekter 4000-650 cm^{-1} v vsaj 3 ponovitvah. Slika je prikaz povprečnih vrednosti in standardne napake za posamezen vzorec lesa.

PRILOGA E

Priloga E1: Zbrani rezultati različnih fizikalno - kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 na 0,5 m globine neposredno nad platformo depozitorija. Vodo so odvzeli potapljači v sterilne steklenice, analize so bile opravljene v najkrajšem možnem času po vzorčenju.

Datumi vzorčenja	4.marec	3.april	22.april	13.maj	29.maj	10.junij	1.julij
Temperatura [°C]	6	6,2	15,7	18,8	16,9	22,1	23,5
Raztopljeni kisik [mg/L]	8,58	10,5	9,67	8,67	8,62	8,09	7,8
pH	7,69	7,52	7,8	8,27	8,18	8,26	8,29
Eh [mV]	311	399	368	369	384	343	337
Prevodnost [μS/cm]	358	349	358	349	346	353	337
Skupna sušina [mg/L]	109,45 $\pm$ 9	281 $\pm$ 6	188 $\pm$ 5	193 $\pm$ 2	199 $\pm$ 1	191 $\pm$ 1	199,1 $\pm$ 0,6
Suspendirana sušina [mg/L]	56,5 $\pm$ 3,5	12,6 $\pm$ 0,2	3,2 $\pm$ 0,2	3,6 $\pm$ 0,05	3,3 $\pm$ 0,05	2 $\pm$ 0,5	2,85 $\pm$ 0,07
Raztopljena sušina [mg/L]	107,8 $\pm$ 17	166 $\pm$ 6	195 $\pm$ 5	205 $\pm$ 4	197 $\pm$ 8	181,8 $\pm$ 1,5	188 $\pm$ 4,8
Koncentracija fosforja v fosfatu [mg/L]	PMD	0,022 $\pm$ 0,007	0,025 $\pm$ 0,013	0,022 $\pm$ 0,004	PMD	PMD	0,023 $\pm$ 0,003
Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,047 $\pm$ 0,007	0,063 $\pm$ 0,008	0,059 $\pm$ 0,006	0,042 $\pm$ 0,006	0,037 $\pm$ 0,004	0,044 $\pm$ 0,005	0,047 $\pm$ 0,006
Koncentracija klorofila-<i>a</i> [μg/L]	PMD	4,8 $\pm$ 1	6,6 $\pm$ 0,6	3,41 $\pm$ 0,8	2,5 $\pm$ 0,6	3 $\pm$ 0,5	2,4 $\pm$ 0,3
Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0
Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	0	0,1	0	0	0	0	0
Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD₄ [mL CO₂]	0,03 $\pm$ 0,02	0,050 $\pm$ 0,004	0,045 $\pm$ 0,009	0,094 $\pm$ 0,001	0,099 $\pm$ 0,008	0,04 $\pm$ 0,01	0,07 $\pm$ 0,02
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28°C po 7. dneh [CFU/mL]	4 * 10 ²	7,1 * 10 ³	4,5 * 10 ³	1,7 * 10 ³	1,7 * 10 ³	7 * 10 ²	9,4 * 10 ⁴
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37°C po 48 urah [CFU/mL]	5 * 10 ¹	1,2 * 10 ²	1,8 * 10 ²	3,6 * 10 ²	7,6 * 10 ²	6,4 * 10 ²	3,4 * 10 ³
Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/100 mL]	<20	4	<4	<4	<4	<4	4

*PMD – pod mejo detekcije

»se nadaljuje«

»nadaljevanje priloge E1: Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013.«

Datumi vzorčenja	8. julij	19.avgust	7.september	18.september	4.oktober	23.oktober	4.november
Temperatura [°C]	25,1	25,7	24,5	20,5	17,4	15,5	15
Raztopljeni kisik [mg/L]	7,51	6,29	5,81	5,53	6,71	7,37	6,39
pH	8,3	8,22	8,15	7,46	7,92	7,81	7,8
Eh[mV]	361	330	359	363	360	356	361
Prevodnost [uS/cm]	337	329	332	334	338	331	332
Skupna sušina [mg/L]	217,2 ± 5	182 ± 6	175,7 ± 0,6	189 ± 2	188 ± 1	199 ± 1,5	174,05 ± 1,6
Suspendirana sušina [mg/L]	5 ± 0,7	2,8 ± 0	5,3 ± 0,4	3,7 ± 0,8	8,25 ± 0,07	1,05 ± 0,07	5,8 ± 0,7
Raztopljena sušina [mg/L]	207,7 ± 2,4	187 ± 2	168,9 ± 2	184,7 ± 1	182,7 ± 0,5	193 ± 2	167,6 ± 3
Koncentracija fosforja v fosfatu [mg/L]	0,022 ± 0,005	PMD	PMD	0,032 ± 0,004	PMD	PMD	0,026 ± 0,006
Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,042 ± 0,006	0,048 ± 0,006	0,052 ± 0,005	0,051 ± 0,007	0,056 ± 0,003	0,038 ± 0,008	0,044 ± 0,006
Koncentracija klorofila-a [ug/L]	1,24 ± 0,4	4,8 ± 0,6	6,04 ± 1,1	5,54 ± 1,2	5,6 ± 1,5	4,6 ± 0,6	3,1 ± 0,8
Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	0	0	0	0	0	0	0
Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD₄[mL CO₂]	0,056 ± 0,005	0,08 ± 0,03	0,04 ± 0,01	0,075 ± 0,004	0,070 ± 0,005	0,05 ± 0,03	0,069 ± 0,005
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28°C po 7. dneh [CFU/mL]	8,5 * 10 ³	1,9 * 10 ³	1,1 * 10 ⁴	2,8 * 10 ³	9,8 * 10 ²	4,4 * 10 ³	4,2 * 10 ³
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37°C po 48. urah [CFU/mL]	1,5 * 10 ³	1,4 * 10 ³	2,5 * 10 ³	1,9 * 10 ³	4,0 * 10 ²	8,5 * 10 ²	2,7 * 10 ²
Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/100 mL]	<4	<4	8	8	<4	<4	4
*PMD – pod mejo detekcije							

Priloga E2: Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 na obrežju omenjenega glinokopa. Vodo smo odvzeli v sterilne stekelnice, analize so bile opravljene v najkrajšem možnem času po vzorčenju.

Datumi vzorčenja	4.marec	3.april	22.april	13.maj	29.maj	10.junij	1.julij
Temperatura [°C]	6,45	5,75	15,5	18,9	17	22,5	23
Raztopljeni kisik [mg/L]	8,89	9,43	9,2	8,34	8,53	8,04	7,91
pH	7,46	7,52	7,52	7,39	7,89	7,17	7,32
Eh[mV]	318	389	386	351	383	348	342
Prevodnost [μS/cm]	405	353	387	368	457	370	363
Skupna sušina [mg/L]	138,5 $\pm$ 15	199 $\pm$ 11	200 $\pm$ 5	206 $\pm$ 3	197 $\pm$ 6	194 $\pm$ 4	200 $\pm$ 1
Suspendirana sušina [mg/L]	69,5 $\pm$ 29	8,8 $\pm$ 0,3	4,1 $\pm$ 0,1	6,4 $\pm$ 0,1	5,2 $\pm$ 0,1	2,9 $\pm$ 0	3,3 $\pm$ 0,6
Raztopljena sušina [mg/L]	127,1 $\pm$ 18	176 $\pm$ 7	207 $\pm$ 1	210 $\pm$ 5	206 $\pm$ 5	185,5 $\pm$ 2	188,2 $\pm$ 4
Koncentracija fosforja v fosfatu [mg/L]	PMD	0,022 $\pm$ 0,008	0,02 $\pm$ 0,005	0,021 $\pm$ 0,006	PMD	PMD	PMD
Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,061 $\pm$ 0,008	0,069 $\pm$ 0,006	0,062 $\pm$ 0,008	0,045 $\pm$ 0,005	0,044 $\pm$ 0,004	0,047 $\pm$ 0,004	0,059 $\pm$ 0,006
Koncentracija klorofila-a [μg/L]	PMD	4 $\pm$ 1	4,1 $\pm$ 0,8	3,8 $\pm$ 0,7	8,5 $\pm$ 0,5	2,4 $\pm$ 0,3	2,4 $\pm$ 0,3
Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	0,6	0,2	0,1	0,1	0	0,1	0
Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	0,7	0,5	0	0	0	0	0
Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD₄ [mL CO₂]	0,029 $\pm$ 0,006	0,039 $\pm$ 0,003	0,08 $\pm$ 0,08	0,08 $\pm$ 0,02	0,06 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,06 $\pm$ 0,03
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28°C po 7. dneh [CFU/mL]	4,5 * 10 ²	4,1 * 10 ³	6,8 * 10 ³	4,4 * 10 ³	5,8 * 10 ³	2,3 * 10 ³	2,9 * 10 ⁴
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37°C po 48 urah [CFU/mL]	5,0 * 10 ¹	7,0 * 10 ¹	2,2 * 10 ²	7,5 * 10 ²	1,7 * 10 ³	1,5 * 10 ³	1,3 * 10 ⁴
Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/100 mL]	<20	28	<4	14	4	<4	<4

*PMD – pod mejo detekcije

»se nadaljuje«

»nadaljevanje priloge E2: Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 na obrežju glinokopa.«

<<

Datumi vzorčenja	19.avgust	7.september	18.september	4.oktober	23.oktober	4.november
Temperatura [°C]	27,2	24,7	20,6	17,4	15,6	14,9
Raztopljeni kisik [mg/L]	6,36	6,22	5,69	6,68	7,85	6,4
pH	8,4	6,81	7,52	7,03	7,12	7,24
Eh [mV]	340	350	361	359	349	352
Prevodnost [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	353	329	327	332	334	329
Skupna sušina [mg/L]	199 ± 8	173 ± 1	188 ± 10	189 ± 5	195 ± 1	176,75 ± 3,2
Suspendirana sušina [mg/L]	2,2 ± 0,4	6,1 ± 1,3	3 ± 1	6,5 ± 0,3	4,1 ± 0,7	4,3 ± 0,2
Raztopljena sušina [mg/L]	179 ± 5	167,6 ± 2	192 ± 2	185 ± 3	186 ± 3	166,8 ± 0,7
Koncentracija fosforja v fosfatu [mg/L]	0,021 ± 0,002	PMD	PMD	PMD	0,025 ± 0,006	0,043 ± 0,006
Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,082 ± 0,007	0,039 ± 0,007	0,055 ± 0,009	0,053 ± 0,006	0,038 ± 0,008	0,05 ± 0,006
Koncentracija klorofila-<i>a</i> [$\mu\text{g}/\text{L}$]	4,2 ± 0,9	2,4 ± 0	10,81 ± 2,7	6,81 ± 2	6,23 ± 0,9	9,81 ± 1,6
Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	0	0	0	0	0	0
Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	0,6	0,2	0,9	0,2	0,2	0,2
Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD₄ [mL CO₂]	0,09 ± 0,01	0,028 ± 0,007	0,07 ± 0,02	0,050 ± 0,003	0,03 ± 0,02	0,081 ± 0,005
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28°C po 7. Dneh	2,1 * 10 ⁴	2,5 * 10 ³	7,3 * 10 ²	1,04 * 10 ³	1,9 * 10 ⁴	5,9 * 10 ³
Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37°C po 48 urah [CFU/mL]	1,6 * 10 ⁴	2,1 * 10 ³	1,0 * 10 ²	5,3 * 10 ²	1,7 * 10 ²	6,5 * 10 ²
Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/100 mL]	16	<4	<4	<4	<4	100
*PMD – pod mejo detekcije						

Priloga E3: Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v vodi opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 in sicer na globini 1, 2, 3 in 4 metrov neposredno nad platformo depozitorija. Vodo smo odvzeli v sterilne stekelnice, analize so bile opravljene v najkrajšem možnem času po vzorčenju.

Datumi vzorčenja	4.mar	3.apr	22.apr	13.maj	29.maj	10.jun	1.jul	19.avg	7.sep	18.sep	4.okt	23.okt	4.nov
Globina 1 m													
Temperatura [°C]	6,1	6,2	12,7	18,5	16,8	19,8	22,9	25,3	23,7	20,4	17,3	15,5	14,9
Raztopljeni kisik [mg/L]	8,58	10,4	9,65	8,77	8,48	8,32	7,94	6,41	6,34	4,71	6,87	7,66	6,25
pH	7,62	7,66	7,98	8,23	8,2	8,21	8,3	8,23	8,24	7,65	7,92	7,82	7,87
Eh[mV]	316	391	366	367	371	343	332	329	348	362	363	356	365
Prevodnost [μS/cm]	336	344	368	359	340	348	344	327	337	338	332	335	332
Globina 2 m													
Temperatura [°C]	6,3	6,3	11,9	17,4	14,7	19,3	22,7	25,2	23,4	20,3	17,3	15,4	14,7
Raztopljeni kisik [mg/L]	8,62	10,14	10,53	8,85	8,38	8,75	7,89	6,24	6,42	4,77	6,62	7,38	6,21
pH	7,66	7,63	7,94	8,14	8,18	8,04	8,3	8,22	8,2	7,67	7,88	7,89	7,89
Eh [mV]	317	389	366	360	362	348	332	335	347	363	365	356	365
Prevodnost [μS/cm]	339	343	364	354	321	364	338	329	334	331	331	330	331
Globina 3 m													
Temperatura [°C]	6,5	6,3	10,3	12,4	14,6	17,5	22,8	25	23,6	20,2	17,3	15,3	14,6
Raztopljeni kisik [mg/L]	9,09	10,17	10,54	8,68	8,43	8,12	7,74	6,39	6,31	4,7	6,74	6,38	6,19
pH	7,8	7,66	7,96	8,03	8,02	7,95	8,12	8,24	8,1	7,69	7,84	7,74	7,91
Eh [mV]	315	389	370	353	361	351	344	333	351	361	368	361	363
Prevodnost [μS/cm]	342	365	366	369	342	342	349	328	333	330	332	334	331
Globina 4 m													
Temperatura [°C]	6,5	6,5	10,8	10,9	14,6	15,5	21,1	25	23,3	20,2	17,4	15,3	14,6
Raztopljeni kisik [mg/L]	9,35	9,71	9,22	8,38	8,56	8,84	8,09	5,26	5,43	4,75	7,21	5,2	6,14
pH	7,43	7,58	7,35	7,9	7,86	7,64	7,96	7,84	7,85	7,68	7,79	7,6	7,91
Eh [mV]	320	389	369	345	359	372	355	341	366	363	380	366	363
Prevodnost [μS/cm]	354	365	372	394	357	353	366	343	341	326	333	335	330

Priloga E4: Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v sedimentu opuščenega glinokopa na Ljubljanskem barju tekom leta 2013 in sicer na obrežju in pod platformo depozitorija. Sediment so odvzeli potapljači v posebne valje, analize so bile opravljene v najkrajšem možnem času po vzorčenju.

	Datumi vzorčenja	4.mar	3.apr	22.apr	13.maj	29.maj	10.jun	1.jul
Sediment iz obrežja	pH	8,22	7,72	8,22	7,44	8,22	7,86	7,61
	Eh [mV]	-8	223	2	-34	266	69	289
	Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,459 ± 0,008	0,313 ± 0,006	0,386 ± 0,012	0,334 ± 0,006	0,245 ± 0,004	0,189 ± 0,007	0,274 ± 0,012
	Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	0	0,1	0	0,1	0	0	0
	Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,5	0,7
	Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD ₄ [mL CO ₂]	1,4 ± 0,3	0,63 ± 0,06	0,6 ± 0,2	1,04 ± 0,03	0,50 ± 0,06	0,64 ± 0,02	0,59 ± 0,05
	Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28°C po 7. dneh [CFU/g sedimenta]	5,3 * 10 ⁵	1,1 * 10 ⁵	6,3 * 10 ⁴	1,8 * 10 ⁴	9,9 * 10 ³	6,1 * 10 ³	2,1 * 10 ⁴
	Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37°C po 48 urah [CFU/g sedimenta]	2,8 * 10 ³	1,03 * 10 ⁴	2,6 * 10 ³	4,8 * 10 ⁴	2,8 * 10 ³	1,6 * 10 ³	2,8 * 10 ³
	Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/g sedimenta]	20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Sediment izpod platforme	pH	7,46	7,52	7,52	7,39	7,89	7,17	7,32
	Eh [mV]	10	132	-20	-71	211	24	-67
	Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,775 ± 0,009	0,95 ± 0,03	0,943 ± 0,03	0,676 ± 0,006	0,5 ± 0,004	0,554 ± 0,008	0,307 ± 0,006
	Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	0	0	0	0	0	0	0
	Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	2,3	4,1	3,2	2,4	1,5	1,8	2,7
	Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD ₄ [mL CO ₂]	0,6 ± 0,3	0,81 ± 0,04	0,9 ± 0,1	1,03 ± 0,2	0,96 ± 0,07	0,8 ± 0,1	0,93 ± 0,04
	Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28°C po 7. dneh [CFU/g sedimenta]	3,6 * 10 ³	2,0 * 10 ⁵	2,8 * 10 ⁴	1,9 * 10 ⁴	2,3 * 10 ⁴	2,7 * 10 ⁴	8,8 * 10 ³
	Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37°C po 48 urah [CFU/g sedimenta]	1,1 * 10 ³	8,5 * 10 ³	1,5 * 10 ³	1,8 * 10 ⁴	7,6 * 10 ³	1,0 * 10 ⁴	1,8 * 10 ³
	Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/g sedimenta]	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20

»se nadaljuje«

»nadaljevanje priloge E4. Zbrani rezultati različnih fizikalno-kemijskih in mikrobioloških parametrov izmerjenih v sedimentu opuščenega glinokopa tekom leta 2013.«

	Datumi vzorčenja	19.avg	7.sep	18.sep	4.okt	23.okt	4.nov
Sediment iz obrežja	pH	8,31	7,24	7,97	7,95	7,8	7,67
	Eh [mV]	58	138	184	30	47	57
	Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,36 ± 0,009	0,377 ± 0,01	0,271 ± 0,004	0,333 ± 0,006	0,51 ± 0,012	0,466 ± 0,012
	Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	1,7	1,6	2	1,8	1,8	1,8
	Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7
	Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD₄ [mL CO₂]	0,6 ± 0,2	0,56 ± 0,08	0,62 ± 0,06	0,63 ± 0,08	1,05 ± 0,04	0,88 ± 0,04
	Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28°C po 7. Dneh [CFU/g sedimenta]	1,4 * 10 ⁴	2,9 * 10 ⁴	1,1 * 10 ⁴	2,5 * 10 ⁴	2,2 * 10 ⁴	8,1 * 10 ³
	Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37°C po 48 urah [CFU/g sedimenta]	8,4 * 10 ²	9,2 * 10 ³	3,1 * 10 ³	8,6 * 10 ³	1,2 * 10 ³	8,2 * 10 ²
	Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/g sedimenta]	20	<20	<20	<20	<20	<20
Sediment izpod platforme	pH	8,4	6,81	7,52	7,03	7,12	7,24
	Eh [mV]	22	53	123	51	26	19
	Koncentracija skupnega organskega ogljika [mg/L]	0,624 ± 0,007	0,425 ± 0,015	0,612 ± 0,01	0,457 ± 0,004	0,601 ± 0,006	0,855 ± 0,012
	Koncentracija nitratnega in nitritnega dušika [mg/L]	1,6	1,9	1,8	1,8	2	2
	Koncentracija amonijskega dušika [mg/L]	4	2,8	4,1	2,1	3,7	5,2
	Biološka potreba po kisiku po 4. dneh BOD₄ [mL CO₂]	1,01 ± 0,03	0,86 ± 0,09	0,99 ± 0,09	1,01 ± 0,1	1,10 ± 0,02	0,88 ± 0,04
	Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 28°C po 7. dneh [CFU/g sedimenta]	1,4 * 10 ⁴	1,6 * 10 ⁵	1,9 * 10 ⁴	7,5 * 10 ⁴	1,9 * 10 ⁴	1,7 * 10 ⁴
	Količina heterotrofnih mikroorganizmov na 37°C po 48 urah [CFU/ g sedimenta]	5,9 * 10 ³	1,4 * 10 ⁴	5,7 * 10 ³	1,04 * 10 ⁴	6,7 * 10 ³	9,7 * 10 ³
	Količina koliformnih mikroorganizmov [MPN/ g sedimenta]	<20	<20	<20	<20	<20	<20

Priloga E5: Rezultati povprečne koncentracije klorofila-*a* (v µg/L) s pripadajočimi normiranimi dolžinami osi po posameznih mesecih v letu 2013. Podatke smo uporabili za izris slike 22. Dolžine osi so normirane na najvišjo povprečno mesečno izmerjeno koncentracijo klorofila-*a*.

Mesec	Povprečna koncentracija klorofila- <i>a</i> [µg/L]	Dolžina osi [cm]
marec	0	0
april	7,65	4,8
maj	6,45	4,0
junij	6,0	3,7
julij	3,0	1,9
avgust	4,5	2,8
september	8,1	5
oktober	4,6	2,9
november	2,6	1,6

*normirano na najvišjo vrednosti (8,1 µg/L predstavlja dolžino osi 5 cm)

Priloga E6: Rezultati povprečnega št. heterotrofnih mikroorganizmov pri 28 °C po 7. dneh (v CFU/mL) s pripadajočimi normiranimi dolžinami osi po posameznih mesecih v letu 2013. Podatke smo uporabili za izris slike 23. Dolžine osi so normirane na najvišjo povprečno mesečno število heterotrofov pri 28 °C po 7. dneh inkubacije.

Mesec	Povprečno št. heterotrofnih mikroorganizmov pri 28 °C po 7. dneh [CFU/mL]	Dolžina osi [cm]
marec	$5,6 \cdot 10^3$	0,8
april	$1,9 \cdot 10^4$	2,7
maj	$3,5 \cdot 10^4$	5
junij	$5,9 \cdot 10^3$	0,8
julij	$9,2 \cdot 10^3$	1,3
avgust	$2,5 \cdot 10^3$	0,4
september	$1,6 \cdot 10^4$	2,3
oktober	$3,45 \cdot 10^3$	0,5
november	$1,8 \cdot 10^3$	0,3

*normirano na najvišjo vrednost ($3,5 \cdot 10^4$ CFU/mL predstavlja dolžino osi 5 cm)

Priloga E7: Rezultati povprečnega št. heterotrofnih mikroorganizmov pri 37 °C po 48. urah (v CFU/mL) s pripadajočimi normiranimi dolžinami osi po posameznih mesecih v letu 2013. Podatke smo uporabili za izris slike 24. Dolžine osi so normirane na najvišjo povprečno mesečno število heterotrofov pri 37 °C po 48. urah inkubacije.

Mesec	Povprečno št. heterotrofnih mikroorganizmov pri 37 °C po 48. urah [CFU/mL]	Dolžina osi [cm]
marec	1	0
april	$3,65 \cdot 10^2$	0,3
maj	$4,1 \cdot 10^3$	3,9
junij	$3,1 \cdot 10^3$	2,9
julij	$5,3 \cdot 10^3$	5
avgust	$4,3 \cdot 10^3$	4,1
september	$2,9 \cdot 10^3$	2,7
oktober	$6,2 \cdot 10^2$	0,6
november	$2,3 \cdot 10^2$	0,2

*normirano na najvišjo vrednost ($5,3 \cdot 10^3$ CFU/mL predstavlja dolžino osi 5 cm)

PRILOGA F

Priloga F1: Rezultati vzorčenja posameznih parov parametrov na površini platforme depozitorija v opuščnem glinokopu na Ljubljanskem barju in njihov korelacijski koeficient. Korelacijski koeficient smo izračunali s pomočjo funkcije CORREL, programa Microsoft Office Excel 2007. Podatke smo uporabili za izris slik 25 in 26.

	Temperatura vode [°C]	Konc. raztopljenega kisika [mg/L]	Temperatura zraka [°C]	Skupno št. heterotrofov pri 37 °C [CFU/mL]
4. marec	6,5	9,37	12	1
3. april	6,5	9,73	6,7	$2,5 * 10^2$
22. april	7,9	9,3	12,3	$4,8 * 10^2$
13. maj	10,3	8,64	20,5	$3,5 * 10^3$
29. maj	15,1	8,11	17	$4,7 * 10^3$
10. junij	15,8	8,18	24,2	$3,1 * 10^3$
1. julij	20,1	7,26	23,8	$5,3 * 10^3$
19. avgust	24,2	5,96	28	$4,3 * 10^3$
7. september	23,1	4,72	26	$2,9 * 10^3$
18. september	20,1	4,73	16	$3,9 * 10^2$
4. oktober	17,3	6,95	11	$8,6 * 10^2$
23. oktober	15,2	5,64	17	$3,8 * 10^2$
4. november	14,5	6,16	10	$2,3 * 10^2$
	Korelacijski koeficient: -0,84		Korelacijski koeficient: 0,78	

PRILOGA G

Priloga G1: Intenziteta vibracijskih vrhov v odstotkih transmisije za dve najbolj karakteristični vibraciji lignina (1505 in 1460 cm^{-1}) po času shranjevanja v opuščenem glinokopu na Ljubljanskem barju. Intenziteto posameznega vibracijskega vrha smo izračunali iz razdalje med bazno linijo in najnižjo točko posameznega vibracijskega vrha. V preglednici so zbrani podatki s pripadajočimi standardnimi napakami, ki smo jih uporabili za izris slike 28.

Čas (meseci)	0	5	10
1505 cm^{-1}	$5,6 \pm 0,3$	$4,8 \pm 0,7$	$3,8 \pm 0,8$
1460 cm^{-1}	$6,0 \pm 0,3$	$5,0 \pm 0,4$	$4,1 \pm 0,9$