



# **UPORABNOST ZOFOBOV ZA RAZGRADNJO POGOSTO UPORABLJENIH SINTETIČNIH POLIMEROV IN BIOPLASTIK**

**Taja Leber**

Mentorja: Darja Rizmal, Mitja Suvajac

Celje, 2024/25

## POVZETEK

V raziskavi smo preučevali, koliko plastike lahko zaužijejo ličinke hrošča *Zophobas morio* v obdobju trinajstih tednov in kako to vpliva na njihovo maso in razvoj. Rezultati so pokazali, da zofobi resnično zaužijejo določeno količino plastike, kar je bilo razvidno iz sprememb mase plastike in prisotnosti iztrebkov. Vendar pa je bila pri večini vzorcev masa zofobov med eksperimentom v upadu, kar potrjuje hipotezo, da se njihova masa pri prehranjevanju s plastiko zmanjšuje. Raziskava potrjuje sposobnost zofobov za razgradnjo plastike, vendar opozarja, da bi bila za širšo uporabo pri odstranjevanju plastičnih odpadkov potrebna velika količina ličink ter dodatne raziskave o vlogi njihove črevesne mikrobiote pri razgradnji plastike.

Ključne besede: *Zophobas morio*, plastika, biorazgradnja, sintetični polimeri, ekološka rešitev

## ABSTRACT

In this study, we looked at how much plastic can be ingested by the larvae of the *Zophobas morio* beetle over a period of thirteen weeks and how this affects their mass and development. The results showed that zophobes do indeed ingest a certain amount of plastic, which was evident from changes in the mass of plastic and the presence of feces. However, in most of the samples, the mass of the zophobes declined during the experiment, confirming the hypothesis that their mass decreases when eating plastic. The research confirms the ability of zophobes to degrade plastics, but warns that a large amount of larvae would be needed for wider use in the disposal of plastic waste, as well as further research into the role of their gut microbiota in the degradation of plastics.

Keywords: *Zophobas morio*, plastic, biodegradation, synthetic polymers, ecological solution

## Vsebina

Uvod.....	4
Hipoteze .....	4
Najpogosteje uporabljene plastike .....	5
Polistiren (PS).....	5
Polimlečna kislina ali polilaktid (PLA) .....	5
Vrečka (LDPE) .....	6
Poliamid ali najlon (PA) .....	6
Sestava najlonk .....	7
Biorazgradljiva vrečka .....	7
Zofob ( <i>Zophobas morio</i> ).....	8
Metode dela.....	10
Eksperiment .....	10
Glavni eksperiment .....	14
Kvalitativna opažanja.....	15
Rezultati in razprava .....	16
Zaključek.....	27
Viri in literatura.....	28

## Uvod

Vsi smo seznanjeni s problematičnostjo plastike. Le-ta nam zelo olajšuje vsakodnevno življenje, saj je zasnovana tako, da traja. Trajnost plastike pa nastane problematična takrat, ko določena plastika ni več uporabna in jo je potrebno zavreči. Če bi vso neuporabno plastiko pustili na soncu, da se razkroji, bi razgradnja plastične vrečke trajala 20 let, plastične slamice 200 let, platenke 450 let, plenice za enkratno uporabo ter plastične kapsule za kavo pa kar 500 let [1]. Vpliv na okolje ima tudi biorazgradljiva plastika, zato smo raziskovali, kakšen vpliv ima plastika na ličinke zofobov (*Zophobas morio*). Pri raziskavi smo uporabili naslednje sintetične polimere in biorazgradljive plastike: biorazgradljivo vrečko za sadje, PS (polistiren), PLA (polimlečna kislina ali polilaktid), PA (poliamid ali najlon) in celulozo. Med raziskovanjem smo opazovali količino zaužite plastike, spreminjanje mase ličink, naredili pa smo tudi preparate črevesja ličinke, ki je bila v stiku s plastiko.

Sposobnost *T. molitor* in *Z. morio*, da zaužijeta plastiko, je bila že večkrat dokazana. *T. molitor* je ena najbolj raziskanih vrst ličink v smislu razgradnje plastike, zlasti stiropora. Ličinke mokarjev so najbolj priljubljen organizem v študijah biorazgradnje plastike zaradi njihove odpornosti na neugodne okoljske razmere in hitro pridobivanje mase. Po drugi strani imamo *Zophobas morio*, ki lahko 36,7 % zaužitega ogljika iz polistirena pretvori v CO<sub>2</sub>. Zofobi imajo sposobnost pridobivanja teže in preživetja na prehrani, sestavljeni iz bioplastike in polibutilena sukcinata. Kljub tem ugotovitvam pa razumevanje mikrobiote *Z. morio* in njene vloge pri razgradnji plastike ostaja omejeno. Pri raziskavi, ki so jo izvedli Urbanek, Rybak, Komisarczyk, Hanus-Lorenz in Mirończuk, so omenili, da lahko sklepajo, da ličinke *Z. morio* razgrajujejo nekatere plastične spojine uspešneje kot *T. molitor* [2].

Cilj te raziskovalne naloge je ugotoviti, koliko plastike lahko zaužije *Zophobas morio* ter kako plastika vpliva na njegovo maso in razvoj.

## Hipoteze

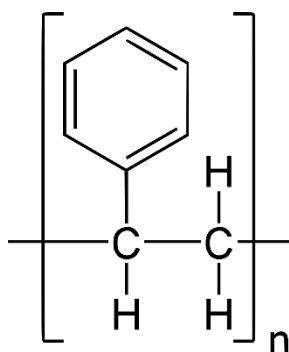
Hipoteza 1: *Zophobas morio* lahko zaužije neko količino plastike, pri čemer se bo njegova masa zmanjšala.

Hipoteza 2: *Zophobas morio* se po zaužitju plastike razvija počasneje.

## Najpogosteje uporabljene plastike

### Polistiren (PS)

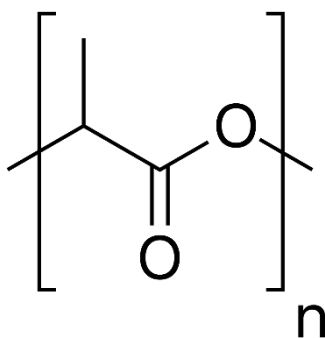
Polistiren je sintetična plastika (polimer), pridobljena s polimerizacijo stirena. Gre za proces, pri katerem se molekule stirena povežejo v dolge verige in tvorijo trden material. Uporaben je pri embalaži, toplotni ali zvočni izolaciji ter kot dekorativni element. Najpomembnejše lastnosti polistirena so lahkotnost, odpornost na vlago, dobra toplotna in zvočna izolacija ter preprosta obdelava [3].



Slika 1: Kemijska sestava polistirena

### Polimlečna kislina ali polilaktid (PLA)

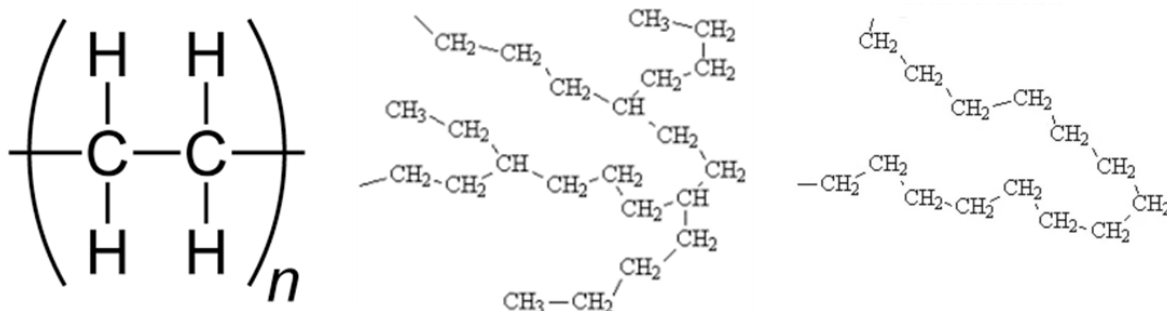
Polimlečna kislina je vrsta poliestra, izdelanega iz fermentiranega rastlinskega škroba iz koruze ali sladkornega trsa. Sladkor v teh obnovljivih materialih fermentira in se spremeni v mlečno kislino, ki se nato pretvori v polimlečno kislino ali PLA. Primeren je za pridelavo plastičnih folij, vijakov, zatičev ... Zaradi enostavnega taljenja ni primeren za izdelavo skodelic, je pa zato toliko bolj uporaben pri 3D-tiskanju [4].



Slika 2: Kemijska sestava polilaktida

## Vrečka (LDPE)

LDPE je lahka in prožna oblika polietilena, ki ga uporabljamo pri proizvodnji različnih plastičnih vrečk, ovojev igrač ipd. V letu 2018 je bilo v južnoafriških obratih predelanih in recikliranih malo manj kot 120.000 ton LDPE. Zaradi prilagodljivosti in vzdržnosti je idealen za embalažo in vrečke, ki morajo biti lahke in primerne za večkratno uporabo. Za razliko od običajnega polietilena ima nižjo molekulsko maso, zaradi česar je lažji in prožnejši. Vsi polietilenski polimeri so belkaste barve ter polkristalni, vendar je LDPE bolj prožen. Njegovo recikliranje ima pri predelavi 100-odstotno stopnjo konverzije, kar pomeni, da izgube sploh ni. Največji porabnik plastičnih recikliranih materialov je trg fleksibilne embalaže, 19 % južnoafriškega trga reciklirane plastike predstavlja fleksibilno embalažo, kar pomeni, da je LDPE zelo iskan material za reciklaže in proizvajalce embalaže. Ker je LDPE netoksičen in nereaktiven, ga je možno uporabiti v živilski industriji za shranjevanje izdelkov za uživanje. Zaradi vseh teh lastnosti je LDPE eden izmed najdragocenejših plastičnih embalažnih materialov na svetu in eden najbolj recikliranih materialov v Južni Afriki [5].



Slika 3: Osnovni gradnik HDPE in LDPE, kemijska sestava LDPE in kemijska sestava HDPE (gledano iz leve proti desni)

## Poliamid ali najlon (PA)

Poliamid ali najlon je polkristalni termoplast z nizko gostoto in visoko toplotno stabilnostjo. Je eden najpomembnejših gradbenih plastik. Lastnosti najlona so visoka odpornost proti obrabi, nizek koeficient trenja, visoka toplotna odpornost ter dobra kemična odpornost na olja, goriva, bencin, mineralna olja in nekatere alkohole [6].

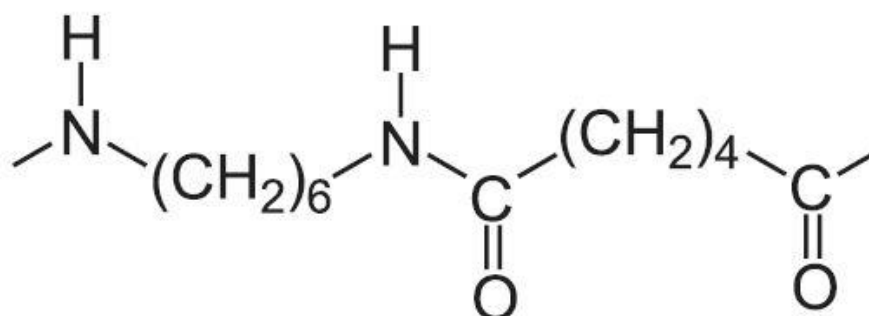
## Sestava najlonk

POLIAMID (97 %)

Poliamidna tkanina je splošen izraz, ki se uporablja za označevanje različnih tkanin, ki so izdelane iz nizov poliamidnih monomerov. Obstaja kar nekaj različnih vrst poliamidnega tekstila, najbolj znan pa je najlon. Glavna prednost poliamidne tkanine je njena elastičnost, ta tekstil pa toplote ne zadržuje učinkovito ali odvaja vlage v tolikšni meri kot druge tkanine [7].

ELASTAN (3 %)

Elastan je »elastomerno« vlakno, kar pomeni, da ima podobne lastnosti kot guma in je narejen iz polimerov. Zaradi svojih elastičnih lastnosti se uporablja pri izdelavi oblačil, saj se lahko elastanska vlakna raztegnejo do petkratne lastne dolžine in povrnejo na prvotno brez izgube oblike. [8].



Slika 4: Kemijska sestava poliamida

## Biorazgradljiva vrečka

V današnjem času večino sodobne plastike (približno 80 %) proizvede petrokemijska industrija, kar pomeni, da je proizvedena iz fosilnih (neobnovljivih) virov, kot sta zemeljski plin ali nafta. Takšna plastika je domnevno odporna na biološko razgradnjo, zato njena široka uporaba povzroča kopičenje velikih količin plastičnih odpadkov. Pred kratkim je industrija začela uporabljati naravne in obnovljive materiale, kot so maščobe in rastlinska olja, gluten, beljakovine jajčnega beljaka in škrob pri proizvodnji plastike, za proizvodnjo bioplastike. Bioplastika je opredeljena kot material na biološki osnovi, biorazgradljivi material ali oboje. Pri njeni proizvodnji se monomeri ekstrahirajo ali sintetizirajo iz spojin biomase (kot so sladkorji v rastlinah) in nato polimerizirajo, da bodisi neposredno nadomestijo obstoječo plastiko, kot je polietilen, ali da tvorijo povsem nove polimere, kot so polihidroksialkanoati

(PHA). Pri pridobivanju biomase lahko pridobimo tudi nesintetične naravne polimere, kot so škrob, naravni kavčuk in beljakovine. Ta pristop bistveno zmanjša skupno ravnotežje ogljikovega dioksida, saj se  $CO_2$ , izpuščen med predelavo, uporabo in recikliranjem plastike, uravnoteži s  $CO_2$ , absorbiranim med ciklom rasti rastlin. Poleg tega je ta pristop zelo ekonomičen, saj se nafta, ki ji cena nenehno narašča, nadomešča z obnovljivimi surovinami iz kmetijstva. Bioplastiko je mogoče ustvariti tudi z uporabo bakterijskih mikroorganizmov in nanodelcev, zlasti verig ogljikovih hidratov (polisaharidov). Definicija označuje bioplastiko kot biorazgradljivo plastiko in/ali plastiko iz obnovljivih virov. To pomeni, da ni nujno, da je bioplastika tudi biorazgradljiva. Glede na vir jo delimo na bioplastiko iz obnovljivih virov, iz fosilnih virov in iz mešanice obnovljivih in fosilnih virov. Večinoma je lahko pripravljena na osnovi škroba, polimlečne kisline, polihidroksialkanoatov, celuloze, lignina ali alifatsko-aromatskih poliestrov [9].

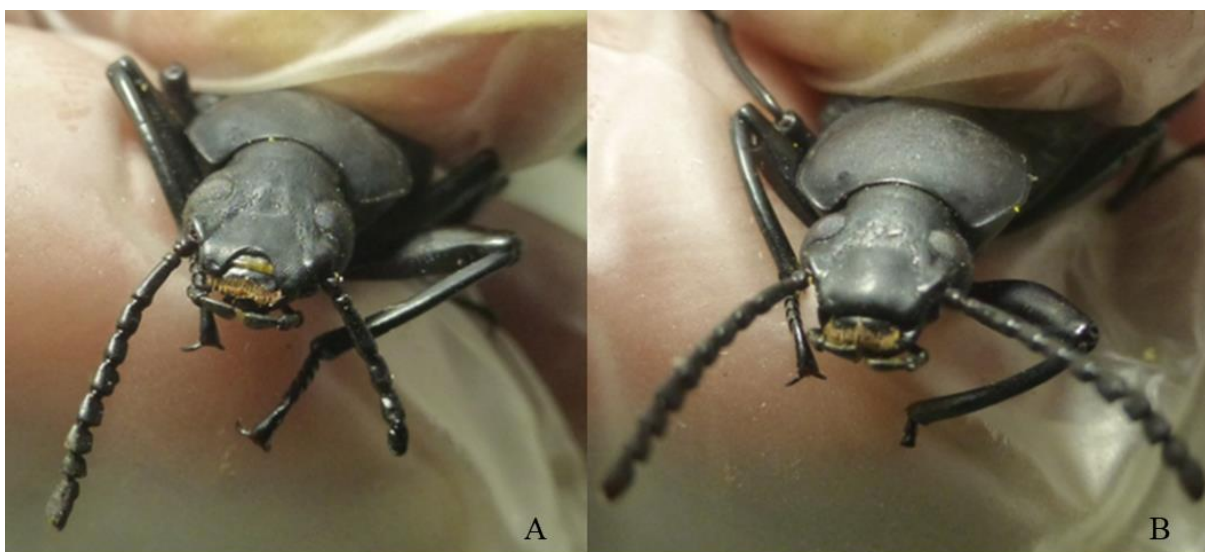
### **Zofob (*Zophobas morio*)**

Ličinke so rumene barve s temno rjavim sprednjim in zadnjim koncem. Imajo valjast, močno otrdel eksoskelet. Dolgi so lahko do 55 mm. Izležejo se po 8 dneh pri 25 °C. Ličinke se zabubijo po 11–18 stopnjah, medtem ko se največji odstotek zabubitev zgodi po 16 ali 17 levitvah. Približno 6 dni po izolaciji pri 25 °C se ličinke imobilizirajo kot predbube v drži v obliki črke C, kar označuje začetek procesa metamorfoze [10]. Ena najzanimivejših značilnosti te vrste je, da se njene ličinke ne zabubijo v gneči, čeprav se levljenje ličink nadaljuje do smrti. Tschinkel in Willson sta na primer dokazala, da se je stopnja razmnoževanja mladičev upočasnila s povečanjem gostote ličink [11]. Bube ne hodijo, ampak se na dražljaje odzivajo z gibanjem. Bube večinoma mirujejo, vendar pa imajo ob stimulaciji z dotikom sposobnost vrtenja svojih trebušnih segmentov v krožnem gibanju ali kažejo druge fizične odzive. Vse te reakcije veljajo za učinkovit obrambni mehanizem bube pred napadi plenilcev in kanibalskim vedenjem ličink. Stadij bube traja 13–15 dni pri 25 °C, odvisno od njene mase [10]. Pri bubi je spol možno videti tako, da opazimo dva različna štrleča pigopoda na devetem trebušnem segmentu samice blizu urogomfusa, ki ju ni pri samcih. Pri odraslih hroščih pa se spol opazi pri sprednjem delu glave. Samica ima sprednji del glave lepo zaobljen, samec pa ima sprednji del oblikovan kot izrezano črko C (Slika 6) [12]. Odrasli so veliki (dolžina telesa od 38 do 57 mm) s podolgovatim telesom črne barve. Stadij hrošča traja pri samcih okoli 6 mesecev, pri samicah pa malo manj. Prikazani so deli telesa ličinke (Slika 7) in vsi stadiji *Zophobas morio* (Slika 5). Prva ličinka na sliki

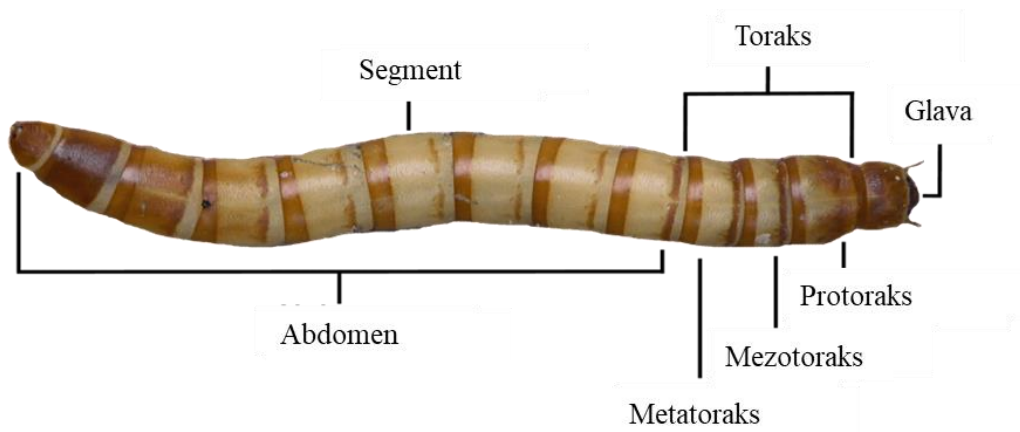
gledana iz leve proti desni se je pravkar levila. Poleg nje je ličinka, ki ji je eksoskelet že otrdel. Tretja ličinka se je oblikovala v črko C, kar pomeni, da se pripravlja na zabubitev. Nato sledi buba ki je belo-rumenkaste barve, po njej pa buba, ki so se ji obarvale oči, glava in noge. Zatem sledi hrošč, ki pa je tudi zadnji stadij življenjskega cikla *Zophobas morio*. Stadij hrošča traja pri samcih okoli 6 mesecev, pri samicah pa malo manj [10].



Slika 5: Prva ličinka, gledana iz leve proti desni, se je levila, naslednji ličinki je eksoskelet že otrdel, tretja je zvita v črko C, četrta je buba, pri peti so oči, glava in noge že obarvane, zatem pa sledi stadij hrošča.



Slika 6: Samec odraslega hrošča *Zophobas morio* (A) in samica odraslega hrošča *Zophobas morio* (B)



Slika 7: Deli telesa ličinke *Zophobas morio*

## Metode dela

Za raziskavo smo uporabili skupno okoli 415 g ličink *Zophobas morio*. Ličinke so bile kupljene decembra 2024 pri prodajalcu DS Reptiles – trgovina, specializirana za prodajo hrane in opreme za eksotične živali. Uporabili smo sedem steklenih petrijevk s premerom 250 mm. Vsaka petrijevka je vsebovala 40 g žagovine, približno 40 g ličink (povprečno 37,8 g), 10 g otrobov, 5 g jabolka ter 10 g določene plastike. Količina jabolka, ki smo ga dodali, je zadostovala za dva tedna, majhna količina pa je preprečevala nastanek plesni. Žagovina je ličinkam omogočala normalno premikanje. PLA, PA, biorazgradljivo vrečko ter celulozo smo narezali na različne kose, velike od 2 do 7 cm, plastično vrečko pa smo dodali kar v celoti. Postavili smo tudi dva kontrolna vzorca. Ena petrijevka je vsebovala ličinke, žagovino, otrobe in jabolko, druga pa ličinke, žagovino in otrobe. Vse petrijevke so bile shranjene v zaprti omari, da niso bile ličinke izpostavljene direktni svetlobi.

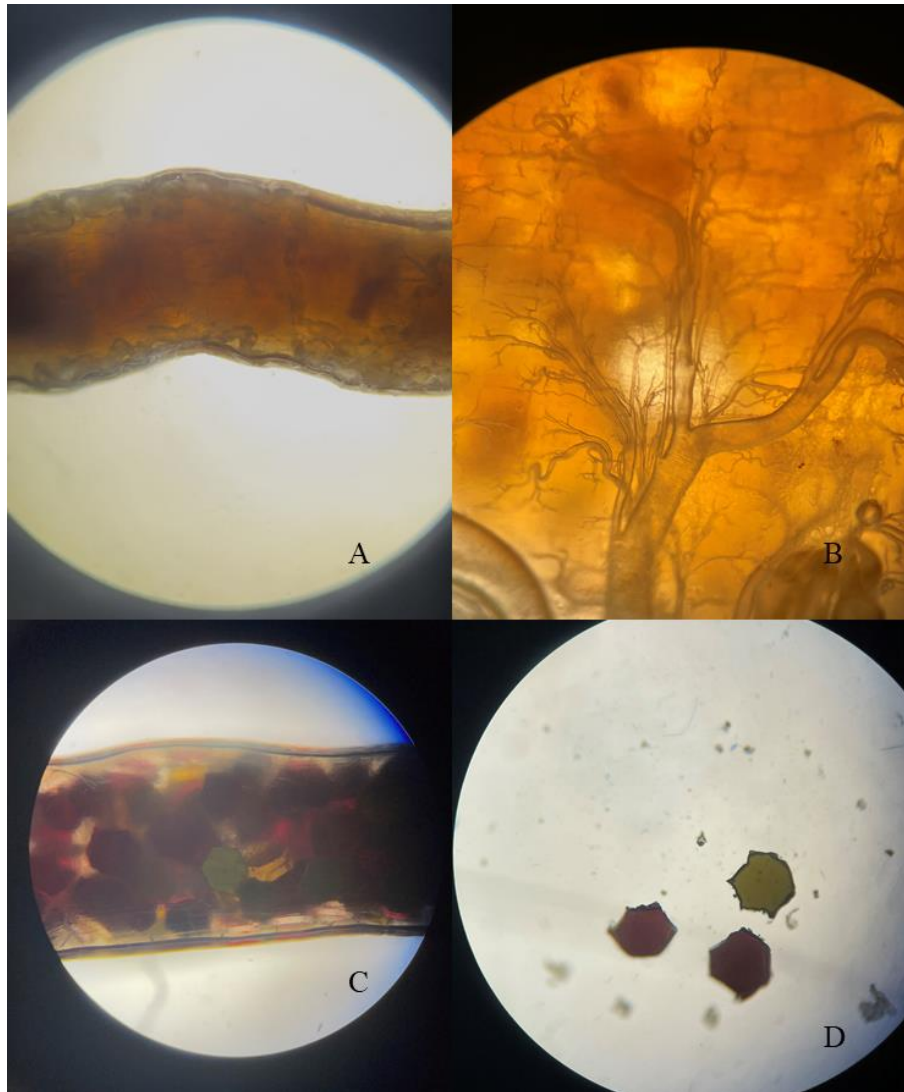
## Eksperiment

Pred glavnim eksperimentom smo postavili poskusni eksperiment, pri katerem smo želeli dokazati, da ličinka res lahko poje določeno količino plastike. V petrijevko smo postavili deset ličink s skupno maso 9,27 g in 10 g bleščic. Ličinke smo v bleščicah pustili sedem dni. Po sedmih dneh smo najprej secirali ličinko iz kontrolne petrijevke, nato pa še iz petrijevke, v kateri so bile ličinke izpostavljene bleščicam. Seciranje je potekalo tako, da smo s skalpelom odrezali prsni koš in nato še zadek ličinke. S pinceto smo nežno izvlekli drobovje. Drobovje smo potem položili na objektno steklo in ga pokrili s krovnim steklom. Preparat smo opazovali pod mikroskopom s 100-kratno povečavo. Pri preparatu drobovja ličinke iz kontrolne

petrijevke so vidna definirana prebavila in dihalne poti, prebavila pri petrijevki z bleščicami pa so povsem zapolnjena z bleščicami. Prikazana je originalna oblika bleščic (Slika 9d). V prebavilu (Slika 9c) opazimo enako obliko bleščic, kar pomeni, da bleščice še niso bile prebavljene.



Slika 8: Testni eksperiment za preverjanje, ali *Zophobas morio* res zaužije določeno količino plastike. Na fotografijah so ličinke v bleščicah (A), odrezana prsni koš in zadek (B in C), na delu drobovine opazne bleščice v notranjosti (D, E) in preparat drobovine (F).



Slika 9: Prikazane so mikroskopske slike pod 100-kratno povečavo, in sicer preparat ličinke iz kontrolne petrijevke (A), čista definirana prebavila in dihalne poti (B), neprebavljene bleščice iz petrijevke z bleščicami (C) in bleščice pod mikroskopom (D).

Postopek smo ponovili po petindvajsetih dneh od postavitve eksperimenta. Opaženi sta bili dve ličinki, zviti v črko C, kar pomeni, da sta se že pripravljali na naslednji stadij (Slika 10). Naredili smo preparat ličinke, ki je bila slabotnejša, in sledi bleščic ni bilo opaženih. Pri drugi ličinki, ki se je že pripravljala na naslednji stadij, so bile v drobovini opažene tri bleščice, dve od njih pravilnih oblik (Slika 10), ena pa malo iznakažena (Slika 10). Celotno drobovje je bilo že od začetka rdečkasto obarvano (Slika 10). Sklepamo, da je bila rdečkasta obarvanost posledica barvnih bleščic. Izgledalo je, kot da bi bila v drobovju raztopljen barva bleščic. Med bleščicami v petrijevki so bili opaženi tudi iztrebki. Vidimo prepolovljen iztrebek, poleg njega pa bleščico (Slika 10). Iztrebki so dokaz, da so ličinke bleščice prebavljale, v iztrebku samem pa jih ni bilo opaziti.



Slika 10: Ličinki, pripravljene na zabubitev (A), postopek seciranja ličink (B), bleščici brez znakov razkroja (C1), iznakažena bleščica (C2), preparat drobovja ličinke, ki se je pripravljala na zabubitev (D), prepolovljen iztrebek (E) in bleščica (E1).

Po šestindvajsetih dneh smo v poskusnem eksperimentu opazili prvo bubo (Slika 11), kar je nakazalo, da surovo okolje ne zaustavi razvojnega cikla.



Slika 11: Buba v bleščicah

## Glavni eksperiment

V raziskavi smo preučevali, kakšno količino plastičnih polimerov je zmožen zaužiti *Zophobas morio*, kako se spreminja njegova masa, ter ugotavljali, ali so plastiko prebavili.

Eksperiment smo začeli izvajati 9. 12. 2024. Prvo merjenje je bilo opravljeno 13. 12. 2024 (4 dni po postavitvi eksperimenta). Tehtanje je potekalo tako, da smo ličinke najprej ločili od žagovine in jih stehali, prav tako smo posebej stehali plastiko, ki smo jo pred tem otrsli in z nje očistili otrobe ter iztrebke. Uporabljali smo tehtnico, ki pokaže dve decimalni mesti natančno. Pri prvem tehtanju smo opazili, da je bila največja razlika med začetno in takratno maso pri plastičnih lončkih, zato smo v novo stekleno petrijevko postavili le 10 g plastičnih lončkov in 40,3 g ličink. Meritve smo opravljali vsakih sedem dni. Pri četrtem merjenju, ki je potekalo po hladnejšem tednu, se je gibanje ličink umirilo, prav tako se je količina zaužitega jabolka zmanjšala.

17. januarja (šest tednov po začetku izvajanja eksperimenta) smo v petrijevki, kjer so bile ličinke izpostavljene plastiki PLA, opazili dve bubi. V nobenem drugem vzorcu se ličinke niso zabubile. Preverili smo tudi kontrolne petrijevke, kjer je bil rezultat enak. Sedmi teden so se bube pojavile v petrijevki, kjer so bile ličinke izpostavljene plastičnim nožem. Po devetem

tednu so bile bube prisotne že pri vseh petrijevkah, razen pri petrijevki, ki je vsebovala plastiko PS, PA-plastiko ter pri vseh treh kontrolah.

## **Kvalitativna opažanja**

Prvi bubi sta bili opaženi 17. januarja (šesto merjenje) v petrijevki z žagovino, plastičnimi lončki, otrobi in jabolkom. 31. januarja (osmo merjenje) se je buba pojavila tudi v petrijevki, v kateri so bile ličinke izpostavljene le plastičnim lončkom (brez žagovine, jabolka in otrobov), teden kasneje bube ni bilo, kar je dokaz, da ličinke ob negodnih pogojih pojedjo tudi bube. Pri petrijevki s plastično vrečko so bili opaženi majhni delci plastike, ki imajo podobno strukturo kot plastična vrečka. Predvidevamo, da so bili to delci prežvečene in izpljunjene vrečke (Slika 12). V petrijevki z delciplastičnih lončkov smo opazili tudi veliko količino iztrebkov (Slika 13). Iztrebki so dokaz, da so ličinke uživale in prebavljale plastiko, čeprav se to ni poznalo pri masi plastike. Prav tako je možno, da so bili iztrebki posledica kanibalskega vedenja ličink. Prvi hrošč se je pojavil pri petrijevki s celulozo, pri kateri se je kasneje pojavilo tudi največ bub. Prav tako je bilo veliko ličink pri petrijevki s celulozo masivnejših kot drugod. V petrijevki s trdimi lončki je bila pri enajstem merjenju opažena ličinka, ki se je olevila. Pri ostalih petrijevkah kasneje ni bilo opaženih olevkov.



Slika 12: Delci vrečke

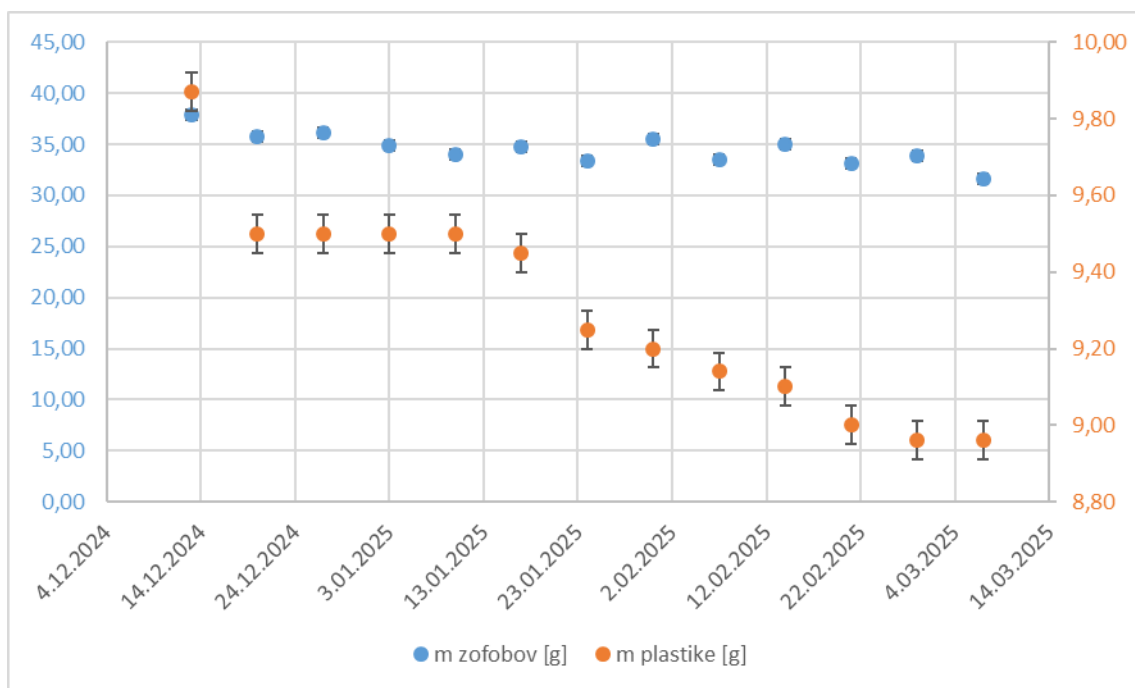


Slika 13: Iztrebki, opaženi pri ličinkah, izpostavljenih samo kosom plastičnih lončkov

## Rezultati in razprava

### Vrečka (LDPE)

Graf spreminjanja mase zofobov in mase plastike od prvega do trinajstega tehtanja je prikazan na sliki 14. Kot lahko opazimo, je masa zofobov nihala, masa plastike pa se je hitro spuščala. Pri šestem merjenju lahko opazimo povečanje mase ličink in zmanjšanje mase plastične vrečke. To lahko prav tako opazimo pri osmem, devetem in desetem merjenju. Obgrizena vrečka po šestem, sedmem, devetem in dvanajstem tehtanju je prikazana na sliki 15. Masa zofobov se je od prvega do trinajstega tehtanja zmanjšala za 6,3 g (16,6 %), masa plastične vrečke pa za 0,91 g (9,2 %).



Slika 14: Spreminjanje mase ličink in plastike od prvega do trinajstega tehtanja. Masi sta se sorazmerno spreminjali – kadar je masa plastične vrečke upadla, se je masa ličink povečala (šesto, osmo, deveto in deseto merjenje).

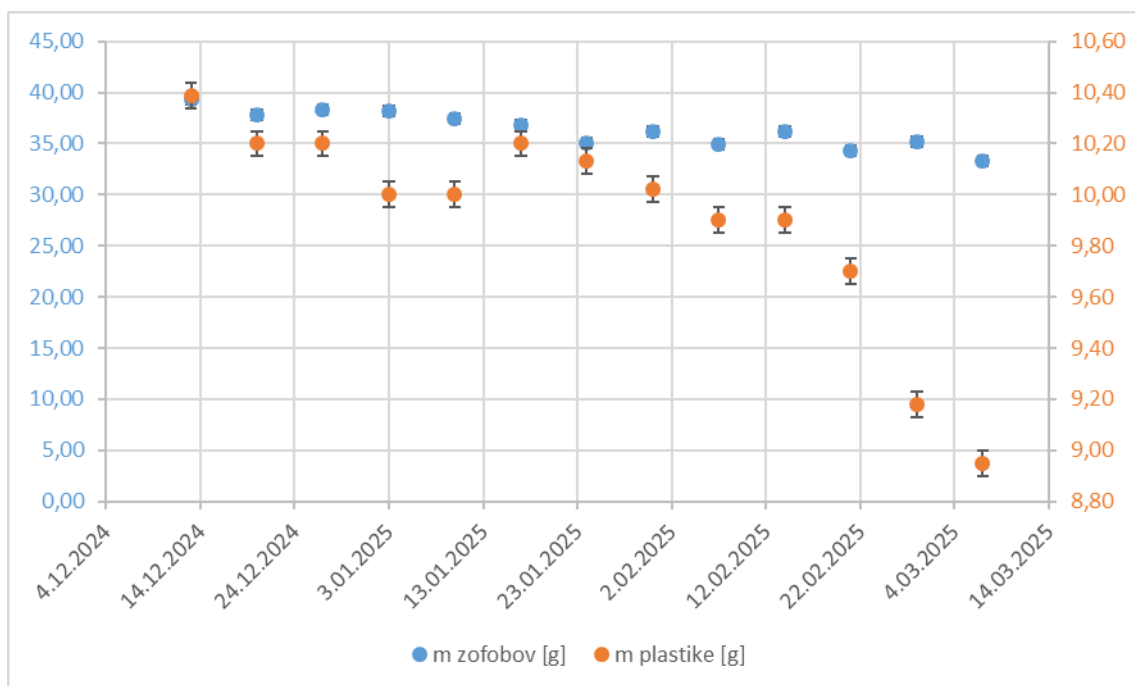
Ker so bile ličinke med drugim tudi v žagovini, smo ocenili napako  $\pm 0,05\text{ g}$ . Na nihanja je lahko vplivala tudi menjava tehtnice.



Slika 15: A) Obgrizena vrečka po šestem tehtanju, B) sedmem tehtanju, C) devetem tehtanju in D) dvanajstem tehtanju.

### Biorazgradljiva vrečka

Graf spreminjanja mase biorazgradljive vrečke in mase zofobov od prvega do trinajstega tehtanja je prikazan na sliki 16. Masa plastike je strmo padala, to pa se je opazilo tudi na biorazgradljivi vrečki, ki je bila opazno obgrizena (Slika 17). Masa plastike je začela strmo upadati po šestem merjenju, masa ličink je nihala. Masa zofobov se je od prvega do trinajstega tehtanja zmanjšala za 6,01 g (15,3 %), masa biorazgradljive vrečke pa za 1,44 g (13,9 %).



Slika 16: Spreminjanje mase ličink in biorazgradljive vrečke od prvega do trinajstega tehtanja.

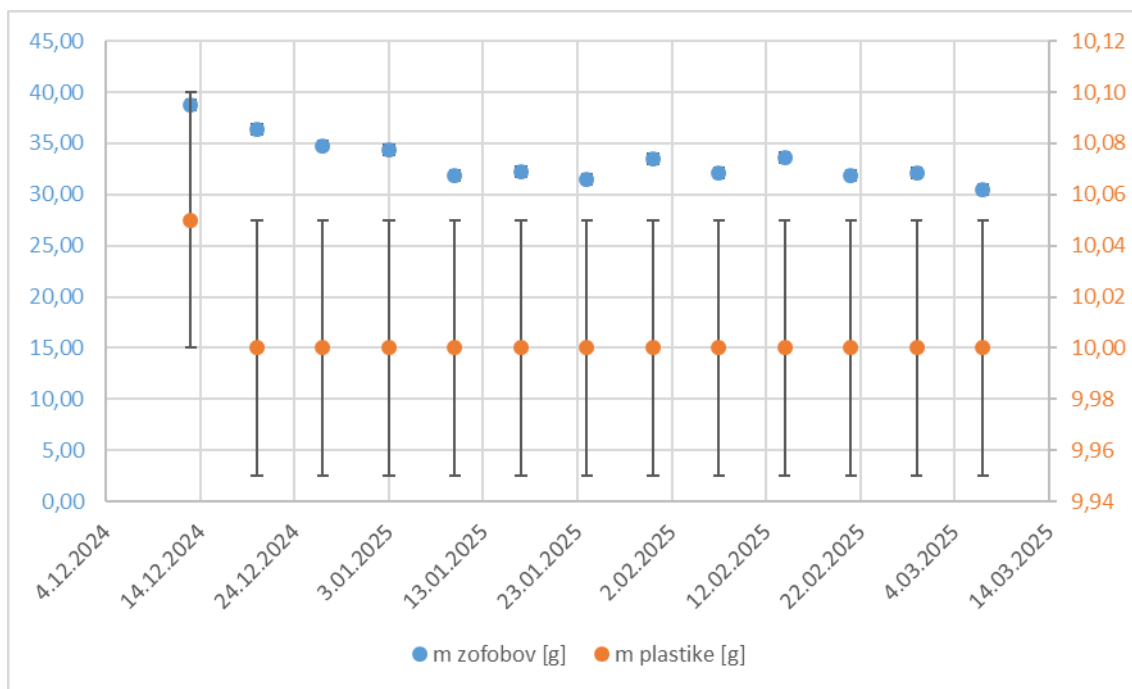


Slika 17: Obgrizena biorazgradljiva vrečka

Ker so bile ličinke med drugim tudi v žagovini, smo ocenili napako  $\pm 0,05 \text{ g}$ . Na nihanja je lahko vplivala tudi menjava tehtnice.

## Biorazgradljivi plastični noži

Na grafu je prikazano spreminjanje mase ličink in mase biorazgradljivih plastičnih nožev od prvega do trinajstega tehtanja (Slika 18). Masa ličink je večino časa padala, masa plastike pa je ostajala enaka. Razberemo lahko, da se ličinke niso veliko prehranjevale z plastičnimi noži. Masa zofobov se je od prvega do trinajstega tehtanja zmanjšala za 8,17 g (21,1 %), masa biorazgradljivih plastičnih nožev pa za 0,05 g (0,5 %).

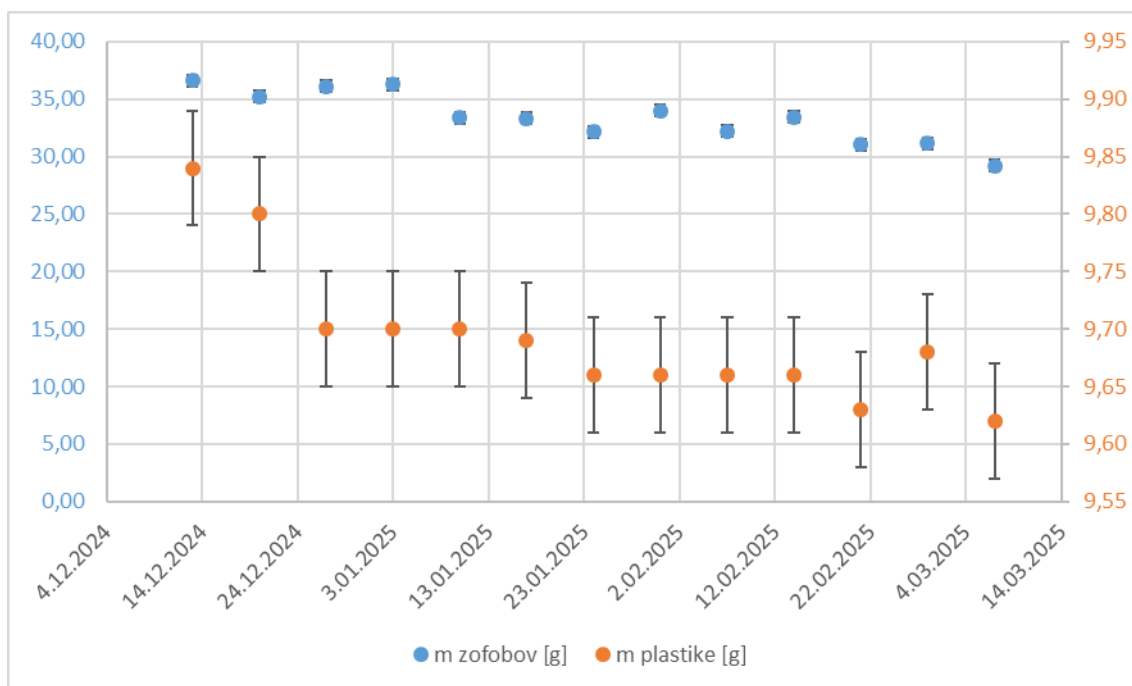


Slika 18: Spreminjanje mase ličink in mase biorazgradljivih plastičnih nožev od prvega do trinajstega tehtanja.

Ker so bile ličinke med drugim tudi v žagovini, smo ocenili napako  $\pm 0,05$  g. Na nihanja je lahko vplivala tudi menjava tehtnice.

## Desertni lončki (PS)

Graf spreminjanja mase zofobov in mase desertnih lončkov od prvega do trinajstega tehtanja je prikazan na sliki 19. Opazimo, da sta tako masa plastike kot tudi masa ličink padali. Največji padec mase plastike se pojavi med drugim in tretjim tehtanjem. Padec se ponovi tudi med šestim in sedmim ter desetim in enajstim tehtanjem. Masa zofobov se je od prvega do trinajstega tehtanja zmanjšala za 7,42 g (20,3 %), masa desertnih lončkov pa za 0,22 g (2,2 %).

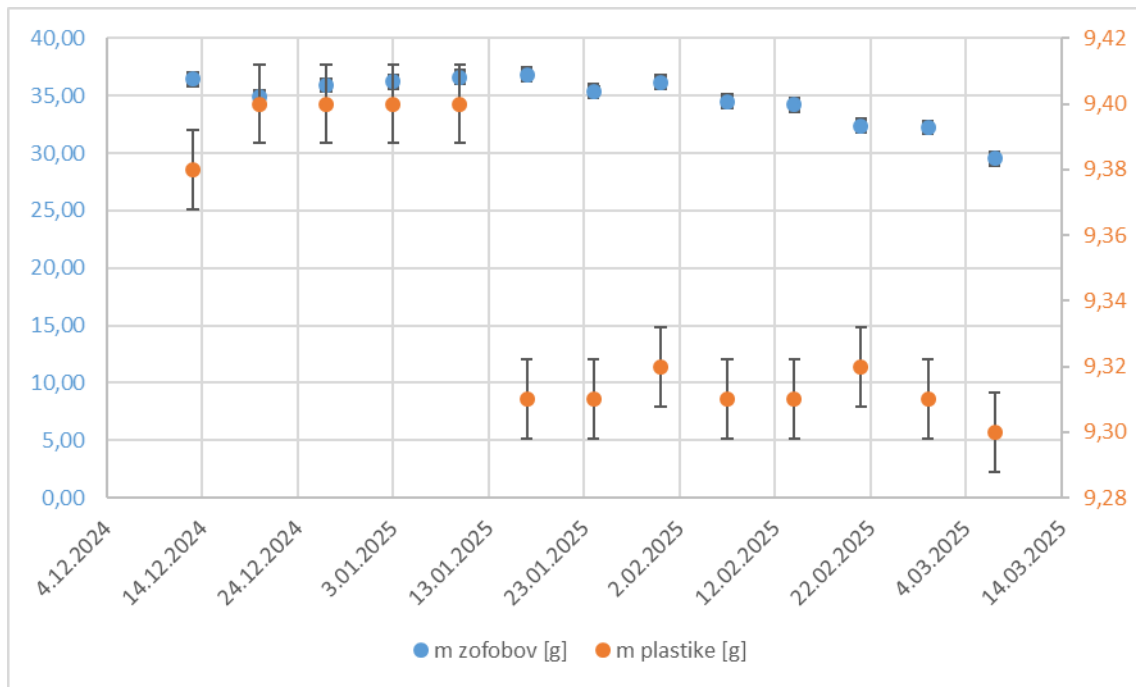


Slika 19: Spreminjanje mase ličink in desertnih lončkov od prvega do tretjega tehtanja.

Ker so bile ličinke med drugim tudi v žagovini, smo ocenili napako  $\pm 0,05 g$ . Na nihanja je lahko vplivala tudi menjava tehtnice.

#### Lončki (PLA)

Na grafu vidimo spreminjanje mase ličink in spreminjanje mase plastičnih lončkov od prvega do trinajstega tehtanja (Slika 20). Pri masi ličink ne opazimo veliko nihanj, pri masi plastičnih lončkov pa se sprememba najbolj opazi med petim in šestim tehtanjem. Po šestem tehtanju se masa plastike ni precej spreminjala. Masa zofobov se je od prvega do trinajstega tehtanja zmanjšala za  $6,89 g$  (18,9 %), masa lončkov pa za  $0,08 g$  (0,9 %).

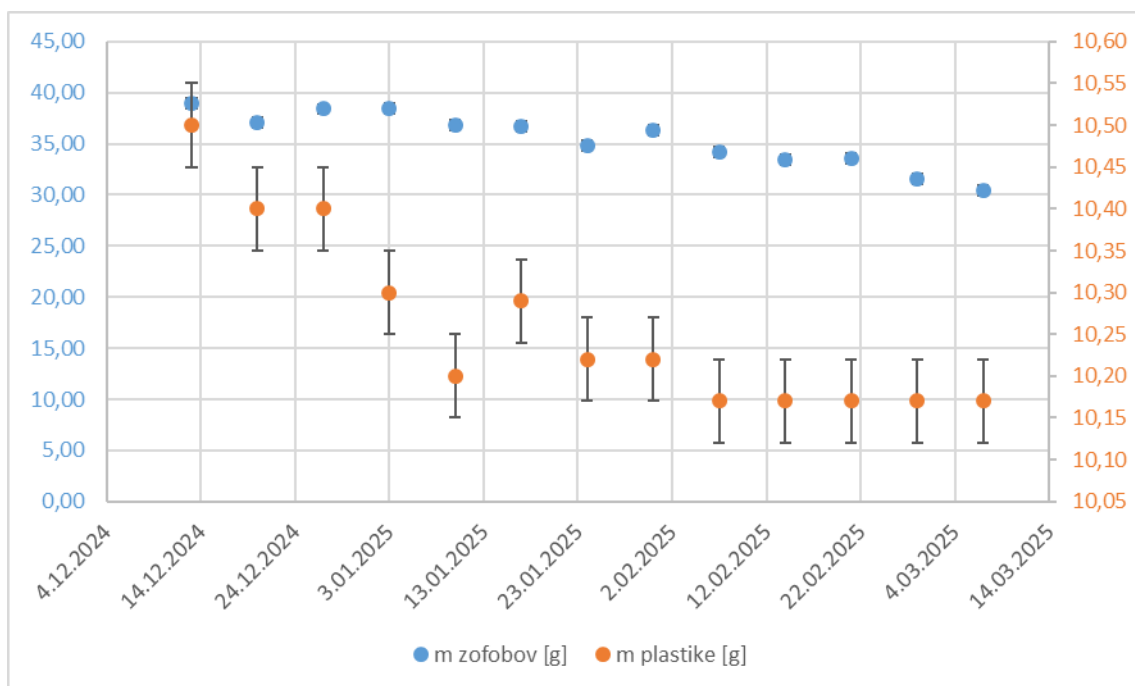


Slika 20: Spreminjanje mase ličink in lončkov od prvega do trinajstega tehtanja

Ker so bile ličinke med drugim tudi v žagovini, smo ocenili napako  $\pm 0,05 \text{ g}$ . Na nihanja je lahko vplivala tudi menjava tehtnice.

#### Najlonke (PA)

Spreminjanje mase ličink in mase najlonk od prvega do trinajstega tehtanja je prikazano na naslednjem grafu (Slika 21). Masa ličink je večino tehtanj padala. Tako kot masa ličink tudi pri masi najlonk opazamo padanje mase. Največji padec se opazi med tretjim in petim tehtanjem. Masa zofobov se je od prvega do trinajstega tehtanja zmanjšala za  $8,61 \text{ g}$  (22,1 %), masa najlonk pa za  $0,33 \text{ g}$  (3,1 %).

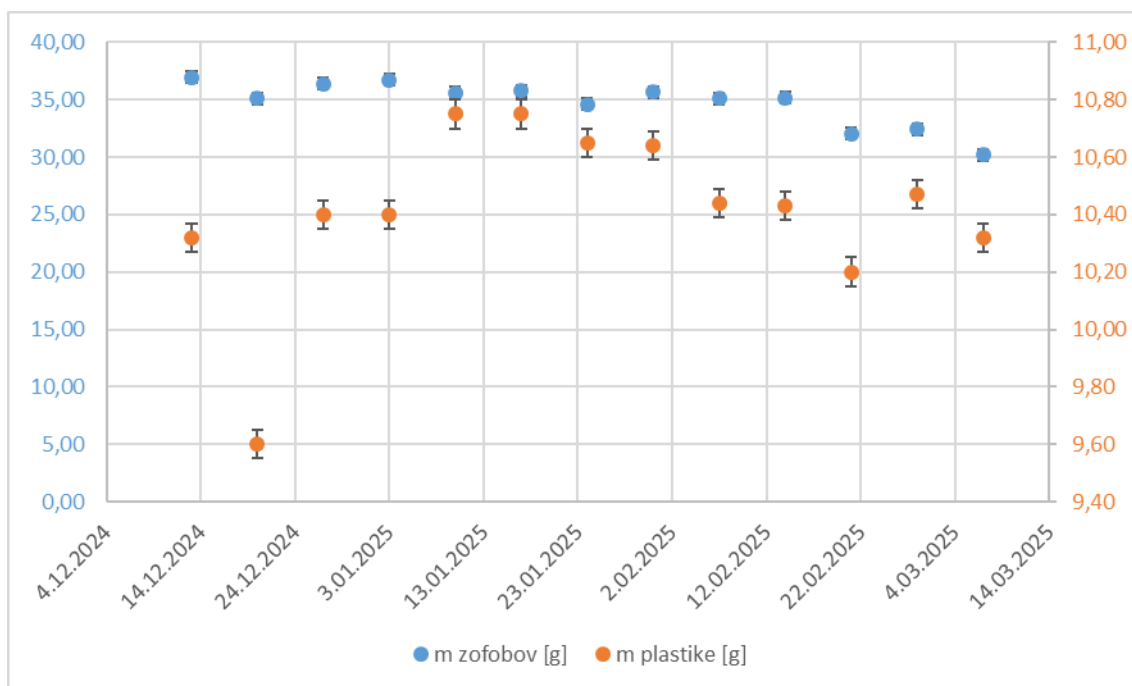


Slika 21: Spreminjanje mase ličink in najlonk od prvega do trinajstega tehtanja

Ker so bile ličinke med drugim tudi v žagovini, smo ocenili napako  $\pm 0,05 g$ . Na nihanja je lahko vplivala tudi menjava tehtnice.

### Celuloza

Na grafu je prikazano spreminjanje mase ličink in mase celuloze od prvega do trinajstega tehtanja (Slika 22). Sklepamo, da padec mase plastike pri tej petrijevki ni bil velik zaradi prisotnosti žagovine. Masa zofobov se je od prvega do trinajstega tehtanja zmanjšala za  $6,75 g$  (18,3 %), masa celuloze pa za  $0,00g$  (0 %).

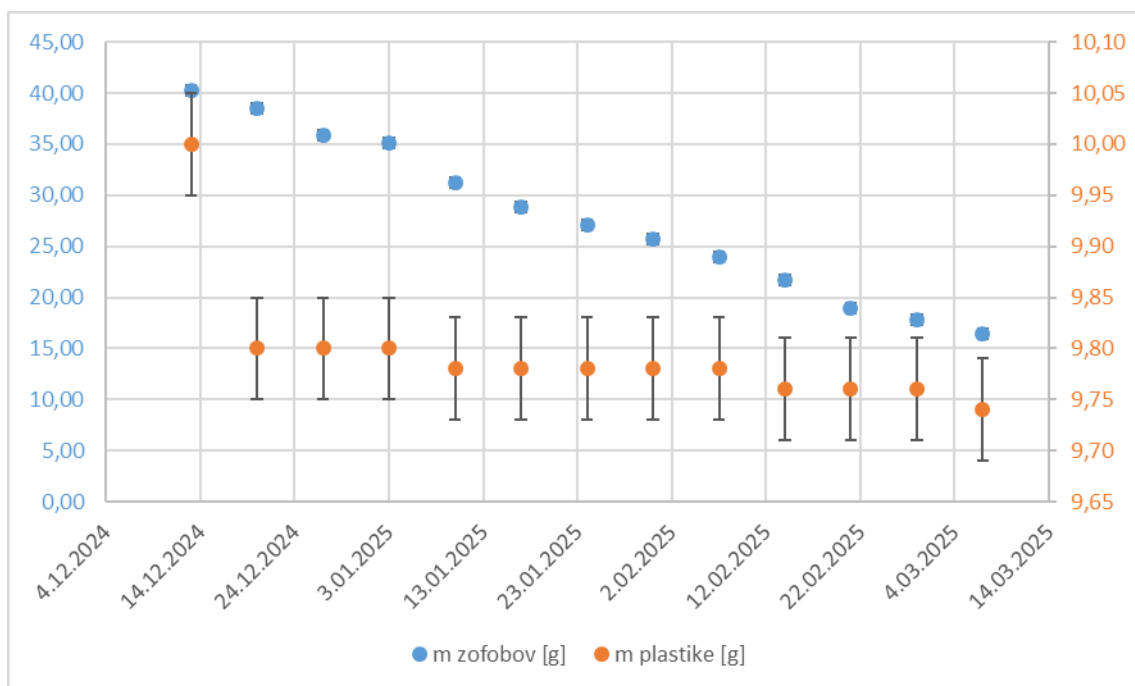


Slika 22: Spreminjanje mase ličink in celuloze od prvega do trinajstega tehtanja

Ker so bile ličinke med drugim tudi v žagovini, smo ocenili napako  $\pm 0,05 g$ . Na nihanja je lahko vplivala tudi menjava tehtnice. Prav tako opazimo veliko nihanje mase, kar je posledica zahtevnih pogojev za merjenje, saj sta bili žagovina in celuloza precej premešani.

#### Samo plastični lončki

Graf (Slika 23) prikazuje spreminjanje mase ličink in plastičnih lončkov od prvega do trinajstega tehtanja, ko so bile ličinke izpostavljene samo plastičnim lončkom (brez žagovine, otrobov in jabolka). Masa ličink je strmo padala. Prav tako je strmo padla masa plastičnih lončkov med prvim in drugim tehtanjem. Ta petrijevka je edina, kjer masa ličink pade pod 30 in 20 g. Masa zofobov se je od prvega do trinajstega tehtanja zmanjšala za 23,82 g (59,1 %), masa plastičnih lončkov pa 0,26 g (2,6 %).

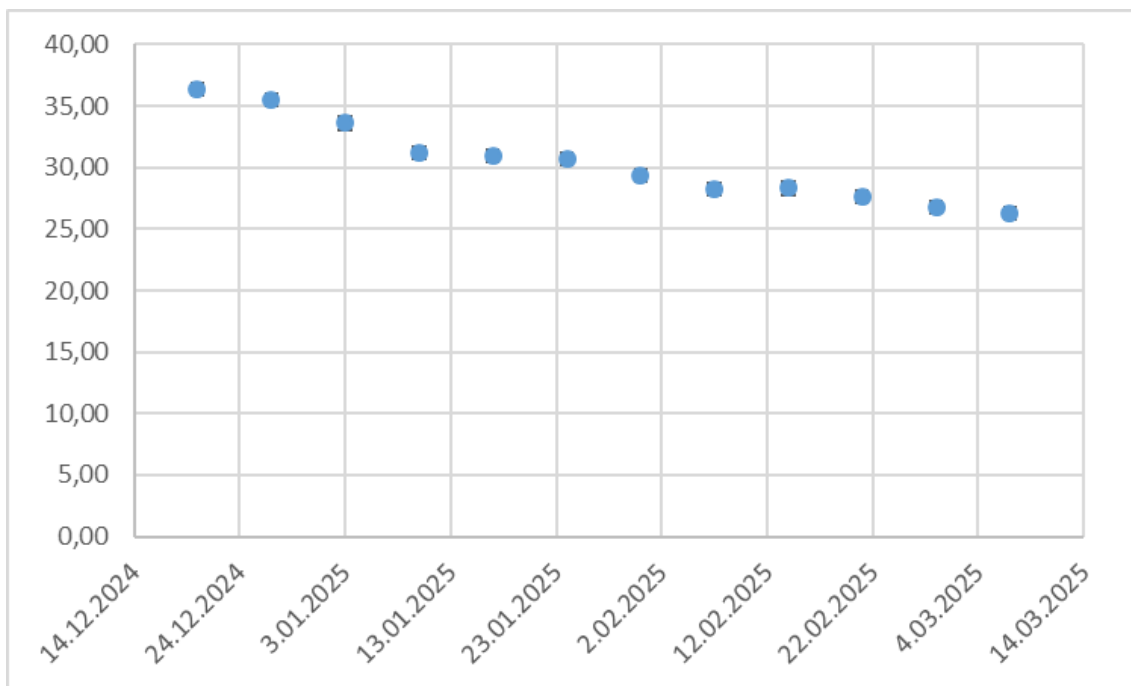


Slika 23: Spreminjanje mase ličink in plastičnih lončkov od prvega do trinajstega tehtanja v petrijevki, kjer so bile ličinke izpostavljene samo plastičnim lončkom.

Ker so bile ličinke med drugim tudi v žagovini, smo ocenili napako  $\pm 0,05 \text{ g}$ . Na nihanja je lahko vplivala tudi menjava tehtnice.

#### Kontrola z jabolkom

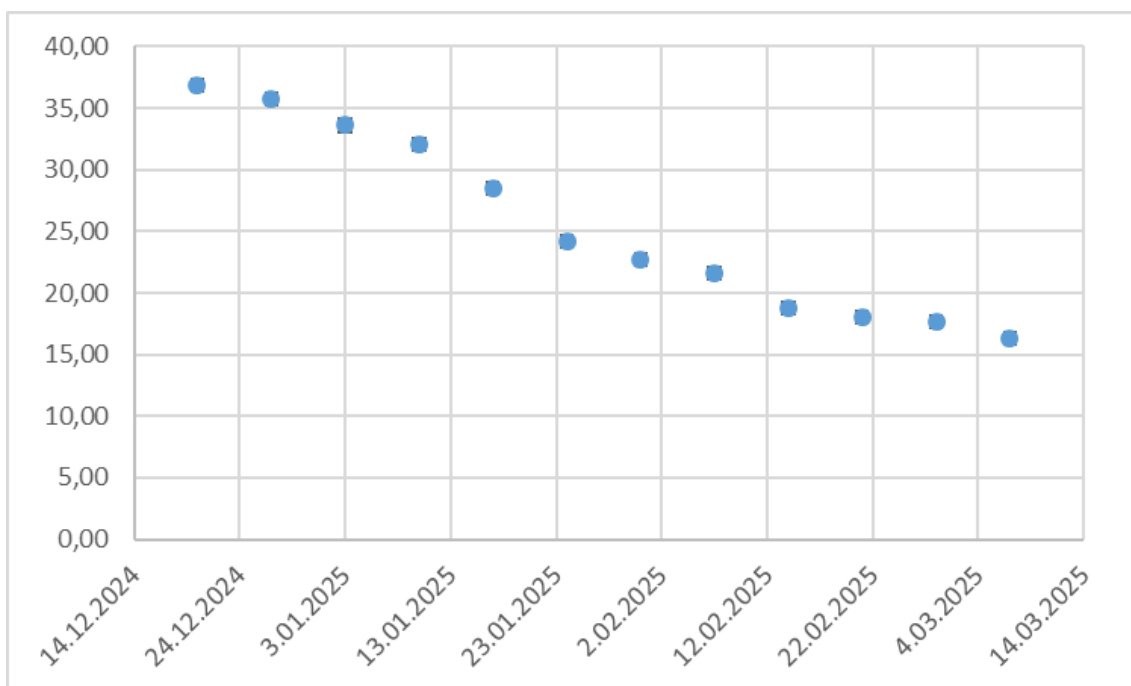
Prikazan je graf spreminjanja mase zofobov od prvega do dvanajstega tehtanja pri kontrolni petrijevki z jabolkom (Slika 24). Masa ličink je padla za  $10,09 \text{ g}$  (27,7 %).



Slika 24: Spreminjanje mase zofobov od prvega do dvanajstega tehtanja pri kontrolni petrijevki z jabolkom.

#### Kontrola brez jabolka

Na grafu je prikazano spreminjanje mase zofobov v kontrolni petrijevki brez jabolka od prvega do dvanajstega tehtanja (Slika 25). Masa je tako kot pri kontrolni petrijevki z jabolkom padala tudi pri kontrolni petrijevki brez jabolka. Masa ličink je padla za 20,57 g (55,7 %).



Slika 25: Spreminjanje mase zofobov v kontrolni petrijevki brez jabolka.

## Zaključek

Ugotovili smo, da ličinke hrošča *Zophobas morio* pojedó določeno količino plastike. Na zgornjih grafih je vidno, da masa ličink pada pri vseh vzorcih. S tem smo potrdili prvo hipotezo, ki pravi, da lahko *Zophobas morio* zaužije neko količino plastike, pri čemer se njegova masa zmanjša. Največji padec mase ličink je bil opažen pri obeh kontrolnih petrijevkah (pri prvi kontroli z jabolkom 27,7 %, pri drugi 55,7 %) in pri petrijevkah, kjer so bile ličinke izpostavljene samo plastičnim lončkom, brez žagovine, otrobov in jabolk (59,1 %). Največji padec mase plastike pa je bil opažen pri petrijevki z biorazgradljivo vrečko (13,9 %).

Rezultati nakazujejo, da zofobi ne le uživajo plastiko, temveč jo tudi prebavljajo, kar kažejo prisotni iztrebki in spremembe mase plastike.

Opazili smo tudi, da se je razvoj zofobov v določenih pogojih pospešil, s čimer smo drugo hipotezo ovrgli. Najhitrejša zabubitev je bila opažena pri zofobih, izpostavljenih plastičnim lončkom in celulozi, bube pa so se kasneje pojavile v vseh vzorcih, razen v kontrolnih, kar pomeni, da plastika pospeši njihov razvojni cikel. Pri nekaterih vzorcih so se pojavili tudi delci plastike, kar nakazuje, da so ličinke nekatere materiale zgolj mehansko obdelale, ne pa nujno prebavile v celoti.

Kljub temu da zofobi lahko razgradijo določeno količino plastike, potrebujemo za praktično uporabo pri odstranjevanju plastičnih odpadkov veliko količino zofobov. Potrebne so dodatne raziskave, ki bi natančneje preučile vlogo njihove črevesne mikrobiote pri razgradnji plastike ter potencialne možnosti uporabe encimov, ki sodelujejo pri tem procesu. Prav tako bomo v prihodnosti raziskali kritično sposobnost zofobov, da prebavijo vrste plastike in njihovo uporabnost v komercialne namene.

## Viri in literatura

- [1] “The Lifecycle of Plastics | WWF-Australia | The Lifecycle of Plastics | WWF Australia,” dostopano 17. 11. 2024, <https://wwf.org.au/blogs/the-lifecycle-of-plastics/>.
- [2] Urbanek, A. K., Rybak, J., Hanus-Lorenz, B., Komisarczyk, D. A., & Mirończuk, A. M. (2024). Zophobas morio versus Tenebrio molitor: Diversity in gut microbiota of larvae fed with polymers. *Science of The Total Environment*, 952, 176005. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176005>
- [3] “What Is Polystyrene (PS) and What Is It Used For?,” *PCC Group Product Portal*, dostopano 17. 11. 2024, <https://www.products.pcc.eu/en/blog/what-is-polystyrene-ps-and-what-is-it-used-for/>.
- [4] “What Is PLA? (Everything You Need To Know),” dostopano 17. 11. 2024, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla.aspx>.
- [5] Plastics SA Admin, “All About Plastics: What Is PE-LD?,” *Plastics SA*, January 12, 2021, dostopano 7. 2. 2025, <https://www.plasticsinfo.co.za/2021/01/12/all-about-plastics-what-is-pe-ld/>.
- [6] “PA Plastic | Ensinger,” dostopano 17. 11. 2024, <https://www.ensingerplastics.com/en/thermoplastic-materials/pa-polyamide>.
- [7] “What Is Polyamide Fabric: Properties, How Its Made and Where,” *Sewport*, dostopano 12. 3. 2025, <https://sewport.com/fabrics-directory/polyamide-fabric>.
- [8] TextileR: Future Textile Industries, “Elastane,” page, *TextileR: Future Textile Industries*, n.d., dostopano 12. 3. 2025, <https://research.qut.edu.au/textiler/knowledge-base/elastane/>.
- [9] Ravindra V. Gadhave et al., “Starch Based Bio-Plastics: The Future of Sustainable Packaging,” *Open Journal of Polymer Chemistry* 8, no. 2 (Maj 29, 2018): 21–33, dostopano 10. 3. 2025, <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=84926>.
- [10] Rumbos, C. I., & Athanassiou, C. G. (2021). The Superworm, Zophobas morio (Coleoptera:Tenebrionidae): A ‘Sleeping Giant’ in Nutrient Sources. *Journal of Insect Science*, 21(2), 13. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieab014>
- [11] Tschinkel, W. R., & Willson, C. D. (1971). Inhibition of pupation due to crowding in some tenebrionid beetles. *Journal of Experimental Zoology*, 176(2), 137–145. <https://doi.org/10.1002/jez.1401760203>

[12] Mondragón, I. (2021). Dimorfismo sexual de *Zophobas morio* (Fabricius, 1776) (Coleoptera, Tenebrionidae) en las etapas de pupa y de adulto. *Ingeniería y Región*, 25, 22–31. <https://doi.org/10.25054/22161325.2703>