

VHODNOST KONZUMACE HMYZU PRO JEDINCE S INTOLERANCEMI DISACHARIDŮ

SUITABILITY OF EDIBLE INSECTS FOR INDIVIDUALS WITH DISACCHARIDE INTOLERANCES

Lenka Kouřimská¹ – Eliška Václavíková² – Filip Beňo² – Petra Škvorová¹
Martin Kulma³ – Pavel Kouřimský¹ – František Kvasnička²

¹ Katedra mikrobiologie, výživy a dietetiky, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, ČZU, Kamýcká 129, 165 00 Praha-Suchdol, Česká republika

² Ústav konzervace potravin, Fakulta potravinářské a biochemické technologie, VŠCHT, Technická 5, 166 28 Praha-Dejvice, Česká republika

³ Katedra zoologie a rybářství, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, ČZU, Kamýcká 129, 165 00 Praha-Suchdol, Česká republika

<https://doi.org/10.11118/978-80-7701-100-6-0188>



ABSTRAKT

Jedlý hmyz představuje perspektivní a udržitelný zdroj živin, avšak detailní údaje o jeho sacharidovém složení jsou v odborné literatuře stále vzácné. Tato studie se zaměřila na stanovení trehalózy, glukózy, fruktózy, laktózy, sacharózy a maltózy v 19 lyofilizovaných vzorcích hmyzu z pěti řádů pomocí HPLC-PAD. Cílem bylo posoudit bezpečnost konzumace hmyzu pro jedince trpící deficitem enzymů štěpících disacharidy. Celkový obsah sledovaných cukrů se pohyboval v rozmezí 49–1675 mg·100 g⁻¹ lyofilizovaného vzorku. Dominantními sacharidy byly glukóza, trehalóza a maltóza. Nejvyšší koncentrace celkových cukrů byly zjištěny u subadultních jedinců *Locusta migratoria* a u larev *Musca domestica*, zatímco nejnižší hodnoty vykazovaly larvy *Bombyx mori*. Významné rozdíly v sacharidovém profilu byly pozorovány mezi druhy, vývojovými stádii i pohlavími. Laktóza a sacharóza byly ve většině vzorků přítomny v nižších množstvích v porovnání s maltózou a trehalózou. Z nutričního hlediska lze tedy většinu analyzovaných druhů hmyzu klasifikovat jako potenciálně vhodnou pro osoby s intolerancí laktózy a sacharózy. Vyšší obsahy trehalózy a maltózy, které vykazují druhovou a vývojovou variabilitu, vyžadují pozornost u osob s deficitem trehalázy či maltázy.

Klíčová slova: jedlý hmyz, disacharidy, intolerance

ABSTRACT

Edible insects represent a promising and sustainable source of nutrients; however, detailed data on their carbohydrate composition remain scarce in the scientific literature. This study focused on the determination of trehalose, glucose, fructose, lactose, sucrose, and maltose in 19 lyophilized insect samples from five orders using HPLC-PAD. The aim was to assess the safety of insect consumption for individuals with deficiencies of disaccharide-splitting enzymes. The total content of the analysed sugars ranged from 49 to 1,675 mg·100 g⁻¹ of lyophilized sample. Glucose, trehalose, and maltose were the dominant carbohydrates. The highest total sugar concentrations were found in *Locusta migratoria* subadults and in larvae of *Musca domestica*, whereas the lowest values were observed in *Bombyx mori* larvae. Significant differences in carbohydrate profiles were detected among species, developmental stages, and sexes. Lactose and sucrose were present in most samples at lower levels compared with trehalose and maltose. From a nutritional perspective, most of the analysed insect species can therefore be classified as potentially suitable for individuals with lactose or sucrose intolerances. However, the higher levels of trehalose and maltose, which exhibit species- and stage-specific variability, warrant attention in individuals with trehalase or maltase deficiencies.

ÚVOD

Hmyz je považován za slibný zdroj alternativních živočišných bílkovin, které mohou přispět k řešení problémů s potravinovou bezpečností způsobených růstem globální populace a rostoucí poptávkou po krmivech pro hospodářská zvířata a ryby v akvakultuře. Na světě je zdokumentováno 2 111 druhů jedlého hmyzu (Jongema Yde, 2017), přičemž čtyři druhy hmyzu byly v EU schváleny jako nové potraviny a celkem 8 druhů hmyzu je povoleno jako krmivo pro hospodářská zvířata (ryby, drůbež a prasata). Hlavními výhodami využití hmyzu jsou rychlý životní cyklus, nízké nároky na zdroje a dobrá nutriční hodnota.

Hmyz obsahuje 6,25–80,26 g·100 g⁻¹ hrubého proteinu v sušině (DM) v závislosti na druhu, vývojovém stádiu, podmínkách chovu, pohlaví a dalších faktorech. U druhů hmyzu, které se nejčastěji používají jako potravina nebo krmivo, se však obsah bílkovin obvykle uvádí v rozmezí přibližně 20–70 g·100 g⁻¹ sušiny (Ordoñez-Araque et al., 2022). Tuk je dalším hojným mikroživinou u hmyzu, kromě bílkovin, s obsahem v rozmezí od 2,2 do 43,0 g·100 g⁻¹ sušiny, a to také v závislosti na výše uvedených faktorech (Zhou et al., 2022). U běžně chovaných jedlých druhů hmyzu se obsah tuku obecně pohybuje v rozmezí přibližně 10–50 g·100 g⁻¹ sušiny (Ordoñez-Araque et al., 2022). Třetí makroživinou jsou sacharidy, které lze podle počtu sacharidových jednotek rozdělit na monosacharidy, oligosacharidy a polysacharidy. Polysacharidy u hmyzu jsou zastoupeny především chitinem, který tvoří hmyzí exoskelet a jeho obsah se pohybuje od 5 do 15 g·100 g⁻¹ sušiny (Kvasnička et al., 2023). Cukry jsou definovány nařízením (EU) č. 1169/2011 jako všechny monosacharidy a disacharidy přítomné v potravinách s výjimkou polyolů.

Zatímco obsah bílkovin a tuků je v poslední době intenzivně studován, údaje o obsahu sacharidů a zejména cukrů v hmyzu jako potravě nebo krmivu jsou velmi omezené. Pouze studie Son et al. (2021), kteří testovali obsah sacharidů a jejich složení v larvách *Tenebrio molitor*, byl obsah všech sacharidů $11,45 \pm 0,38$ g·100 g⁻¹, celkový obsah rozpustných cukrů byl $3,22 \pm 0,10$ g·100 g⁻¹ a redukujících cukrů bylo $0,19 \pm 0,01$ g·100 g⁻¹.

Přestože je konzumace schválených jedlých druhů hmyzu považována za bezpečnou (stanovisko EFSA, 2015), hmyz může obsahovat některé sloučeniny, které mohou být problematické pro osoby s alergií na korýše a mořské plody nebo pro osoby s různými metabolickými onemocněními. Existují jedinci, kteří mají problémy se štěpením a trávením některých disacharidů v důsledku snížených hladin nebo úplné absence enzymů, které tyto disacharidy štěpí na monosacharidy. Nejznámější je intolerance laktózy způsobená deficitem laktázy (β -galaktosidázy). Mezi méně časté intolerance patří deficit sacharázy, maltázy nebo trehalázy. Sacharáza je trávicí enzym, který štěpí sacharózu, maltáza štěpí maltózu a trehaláza je enzym, který hydrolyzuje neredukující disacharid trehalózu (α -D-glukopyranosyl-1,1- α -D-glukopyranosid) na dvě glukózové jednotky. Intolerance trehalózy je v běžné populaci vzácná a častější ve vyšších zeměpisných šířkách než v mírném podnebí. Je vzácná u populací evropského původu (Bergoz et al., 1982). U zdravých Dánů (Gudmand-Høyer et al., 1988) ani u bělošských Američanů (Welsh et al., 1978) nebyl zjištěn žádný deficit trehalázy. Murray et al. (2000) uvádějí 0,3% malabsorpci trehalózy v populaci Spojeného království (U.K.). Podle Kozlova et al. (2023) je 1 až 5 % jedinců evropského původu ohroženo intolerancí trehalózy. Častější je u domorodců z Grónska, kde je deficit trehalázy hlášen u 8 % populace (Satyam a Fallahtafi, 2024). Prevalence geneticky podmíněného deficitu trehalázy u některých domorodých populací Sibiře a ruského Dálného východu může dosáhnout až 24 až 86 % (Kozlov et al., 2023).

Disacharid trehalóza je v přírodě široce rozšířený a lze jej nalézt v mnoha organismech. Tento cukr je jedním z nejdůležitějších sacharidů produkovaných téměř všemi formami života kromě savců. Trehalóza, jako jeden z hlavních cirkulujících cukrů v hmyzí hemolymfě, může být rychle mobilizována k podpoře svalové aktivity během letu, pohybu a dalších energeticky náročných činností. Tento neredukující disacharid hraje také

klíčovou roli v udržování osmotické rovnováhy a ochraně buněčných struktur před stresem způsobeným vysycháním a extrémními teplotami (Łopienska-Biernat et al., 2019). Hladina trehalózy v hmyzu je hormonálně kontrolována a liší se v závislosti na druhu, vývojovém stádiu a krmivu (Becker et al., 1996) od 5 do 50 mM (Thompson, 2003). Jelikož se ukazuje, že údaje o obsahu cukru v hmyzu jsou nekonzistentní a dostupné jen pro určité druhy hmyzu, cílem této studie bylo monitorovat obsah mono- a disacharidů ve velkém souboru u různých druhů hmyzu sloužících jako potrava nebo krmivo. Důležité bylo zhodnotit, zda by hmyz mohl být vhodný jako potrava pro jedince s deficitem disacharidáz.

MATERIÁL A METODIKA

Vzorky hmyzu

Obsah mono- a disacharidů byl analyzován v devatenácti různých vzorcích hmyzu z pěti řádů (tab. 1). Vzorky zahrnovaly různá vývojová stadia (larvy, nymfy, subadultní jedince a dospělé) a u vybraných druhů byl sledován i vliv pohlaví. Vzorky byly získány z chovů hmyzu České zemědělské univerzity v Praze (AD, BD, BDA_A, GA, GS, EP, LM, TM, ZM), Státního zdravotního ústavu (AD_L, BL, HI, MD) a od soukromého chovatele hmyzu (BM). S výjimkou HI a MD byl hmyz před sklizní vyláčen 24 hodin. Všechny vzorky byly po usmrcení lyofilizovány a homogenizovány.

Tabulka 1: Analyzované vzorky hmyzu

Řád	Stádium	Latinský název	Český název	Označení
Orthoptera	dospělec samec	<i>Gryllodes sigillatus</i>	cvrček krátkokřídlý	GS [^]
	dospělec samice	<i>Gryllodes sigillatus</i>	cvrček krátkokřídlý	GS+
	dospělec samec	<i>Acheta domesticus</i>	cvrček domácí	AD [^]
	dospělec samice	<i>Acheta domesticus</i>	cvrček domácí	AD+
	dospělec samec	<i>Gryllus assimilis</i>	cvrček banánový	GA [^]
	dospělec samice	<i>Gryllus assimilis</i>	cvrček banánový	GA+
	dospělec	<i>Locusta migratoria</i>	saranče stěhovavá	LS
	nedospělec (subadult)	<i>Locusta migratoria</i>	saranče stěhovavá	LS_A
Coleoptera	larva	<i>Zophobas morio</i>	potemník brazilský	ZM
	larva	<i>Alphitobius diaperinus</i>	potemník stájový	AD_L
	larva	<i>Tenebrio molitor</i>	potemník moučný	TM
Blattodea	dospělec	<i>Eublaberus posticus</i>	šváb oranžový	EP
	dospělec	<i>Blaptica dubia</i>	šváb argentinský	BD
	dospělec	<i>Blatta lateralis</i>	šváb turkeštánský	BL
	dospělec	<i>Blaberus discoidalis</i>	diskoidní šváb	BD_A
	nymfa	<i>Blaberus discoidalis</i>	diskoidní šváb	BD_N
Diptera	larva	<i>Hermetia illucens</i>	moucha bráněnka	HI
	larva	<i>Musca domestica</i>	moucha domácí	MD
Lepidoptera	larva	<i>Bombyx mori</i>	bourec morušový	BM

Analytické stanovení sacharidů

Pro stanovení volných mono- a disacharidů (glukóza, fruktóza, trehalóza, laktóza, sacharóza a maltóza) byla použita metoda vysokoúčinné aniontové výměnné chromatografie s pulzní amperometrickou detekcí (HPAEC-PAD, přístroj ICS 3000 (Dionex)). Extrakce sacharidů ze vzorků probíhala v deionizované vodě za horka s následným vyčištěním extraktu. Separace byla provedena na koloně CarboPac PA 100 (250 × 4 mm, 8,5 μm, Dionex, USA) temperované na 30 °C; mobilní fáze: 200mM NaOH (49–51 %, eluent pro IC, Supelco, USA), průtok 0,7 ml·min⁻¹, nástřik 5 μl; délka analýzy 15 minut. Jako interní standard sloužila 2-deoxy-D-glukóza (+99 %, Sigma Aldrich, USA). Pro kalibraci byly připraveny kalibrační roztoky sledovaných mono- a disacharidů v koncentračním rozmezí 0,01–5 μg·ml⁻¹ v deionizované vodě.

Odtučněný vzorek byl homogenizován (kulový mlýn MM400 (RETSCH, Německo) při frekvenci 20 Hz po dobu 20 sekund. Do 50ml Erlenmeyerovy baňky byl navážen 1 g ($\pm 0,01$ g) jemně mletého vzorku a přidáno 25 ml 75% acetonitrilu. Směs byla třepána dvě hodiny při 60 °C ve vodní lázni (GFL 1083, Německo). Po extrakci byla suspenze přefiltrována přes papírový filtr. Filtrát byl zředěn (10–100krát) deionizovanou vodou, byl přidán IS o koncentraci 1 $\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$ a roztok byl před chromatografickou analýzou přefiltrován přes nylonový membránový filtr (0,22 μm). Koncentrace sacharidů byla vypočtena pomocí kalibrační rovnice pro příslušný sacharid.

Statistická analýza

Před dalším zpracováním byla všechna data posouzena na normalitu pomocí Shapiro-Wilkova testu a byl provedena screening na odlehle hodnoty pomocí Dixonova Q testu. Vliv druhů hmyzu na koncentraci jednotlivých sacharidů byl kvantitativně vyhodnocen pomocí jednofaktorové analýzy rozptylu (ANOVA) se softwarem Statistica 14.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) a následným post hoc Tukey HSD testem ($p < 0,05$).

VÝSLEDKY A DISKUZE

Naměřené hodnoty (tab. 2) ukazují na značnou variabilitu v obsahu mono- a disacharidů v závislosti na druhu hmyzu, vývojovém stádiu a pohlaví.

Tabulka 2: Obsah sacharidů v lyofilizovaných vzorcích hmyzu ($\text{mg}\cdot 100\text{ g}^{-1}$ *as is*)

Vzorek	Tre	Glu	Fru	Lak	Sach	Mal	Celkem
GS [^]	75,8 $\pm$ 3,8 ^a	194,2 $\pm$ 9,7 ^a	12,5 $\pm$ 0,6 ^a	2,5 $\pm$ 0,1 ^a	5,3 $\pm$ 0,3 ^a	73,9 $\pm$ 3,7 ^a	364 $\pm$ 18
GS ⁺	48,4 $\pm$ 2,4 ^b	85,1 $\pm$ 4,3 ^b	5,3 $\pm$ 0,3 ^b	1,4 $\pm$ 0,1 ^a	2,5 $\pm$ 0,1 ^b	25,8 $\pm$ 1,3 ^b	168 $\pm$ 8
AD [^]	92,3 $\pm$ 4,6 ^a	116,9 $\pm$ 5,8 ^b	15,6 $\pm$ 0,8 ^a	0,6 $\pm$ 0,1 ^a	22,7 $\pm$ 1,1 ^c	53,9 $\pm$ 2,7 ^c	302 $\pm$ 15
AD ⁺	41,2 $\pm$ 2,1 ^{bc}	101,9 $\pm$ 5,1 ^b	15,2 $\pm$ 0,8 ^a	1,0 $\pm$ 0,1 ^a	8,7 $\pm$ 0,4 ^d	30,0 $\pm$ 1,5 ^{bd}	198 $\pm$ 10
GA [^]	74,5 $\pm$ 3,7 ^a	105,8 $\pm$ 5,3 ^b	10,4 $\pm$ 0,5 ^{ab}	1,5 $\pm$ 0,1 ^a	12,2 $\pm$ 0,6 ^{eg}	59,6 $\pm$ 3,0 ^{ac}	264 $\pm$ 13
GA ⁺	70,3 $\pm$ 3,5 ^a	95,7 $\pm$ 4,8 ^b	16,8 $\pm$ 0,8 ^a	1,9 $\pm$ 0,1 ^a	33,2 $\pm$ 1,7 ^f	35,4 $\pm$ 1,8 ^{be}	253 $\pm$ 13
LS	210,7 $\pm$ 10,5 ^d	1327,7 $\pm$ 66,4 ^c	6,8 $\pm$ 0,3 ^b	1,0 $\pm$ 0,1 ^a	7,1 $\pm$ 0,4 ^d	122,1 $\pm$ 6,1 ^f	1675 $\pm$ 84
LS_A	77,6 $\pm$ 3,9 ^a	537,1 $\pm$ 26,9 ^d	22,9 $\pm$ 1,1 ^c	<LOD	9,4 $\pm$ 0,5 ^d	55,9 $\pm$ 2,8 ^c	703 $\pm$ 35
ZM	73,1 $\pm$ 3,7 ^a	361,0 $\pm$ 18,1 ^c	3,9 $\pm$ 0,2 ^b	3,7 $\pm$ 0,2 ^{ab}	4,0 $\pm$ 0,2 ^{ab}	45,1 $\pm$ 2,3 ^{cde}	491 $\pm$ 25
AD_L	27,7 $\pm$ 1,4 ^{be}	73,7 $\pm$ 3,7 ^{bf}	30,9 $\pm$ 1,5 ^d	0,2 $\pm$ 0,1 ^a	23,6 $\pm$ 1,2 ^c	64,0 $\pm$ 3,2 ^{ac}	220 $\pm$ 11
TM	215,0 $\pm$ 10,7 ^d	470,4 $\pm$ 23,5 ^g	16,9 $\pm$ 0,8 ^a	4,9 $\pm$ 0,2 ^{ab}	12,9 $\pm$ 0,6 ^g	167,2 $\pm$ 8,4 ^g	887 $\pm$ 44
EP	494,7 $\pm$ 24,7 ^f	141,3 $\pm$ 7,1 ^{ab}	9,4 $\pm$ 0,5 ^{ab}	5,7 $\pm$ 0,3 ^b	21,2 $\pm$ 1,1 ^{ch}	98,9 $\pm$ 4,9 ^h	771 $\pm$ 39
BD	7,6 $\pm$ 0,4 ^e	345,4 $\pm$ 17,3 ^e	30,5 $\pm$ 1,5 ^d	84,4 $\pm$ 4,2 ^c	19,0 $\pm$ 0,9 ^h	127,4 $\pm$ 6,4 ^f	614 $\pm$ 31
BL	24,5 $\pm$ 1,2 ^{ce}	22,1 $\pm$ 1,1 ^{fh}	0,8 $\pm$ 0,1 ^b	0,8 $\pm$ 0,1 ^a	<LOD	12,6 $\pm$ 0,6 ^b	62 $\pm$ 3
BD_A	17,8 $\pm$ 0,9 ^e	65,8 $\pm$ 3,3 ^{bh}	3,0 $\pm$ 0,2 ^b	1,6 $\pm$ 0,1 ^a	3,2 $\pm$ 0,2 ^{ab}	49,3 $\pm$ 2,5 ^{ce}	141 $\pm$ 7
BD_N	76,9 $\pm$ 3,8 ^a	605,3 $\pm$ 30,3 ⁱ	2,2 $\pm$ 0,1 ^b	4,8 $\pm$ 0,2 ^{ab}	30,3 $\pm$ 1,5 ⁱ	183,6 $\pm$ 9,2 ^g	903 $\pm$ 45
HI	25,2 $\pm$ 1,3 ^{ce}	460,0 $\pm$ 23,0 ^g	2,9 $\pm$ 0,1 ^b	5,1 $\pm$ 0,3 ^{ab}	3,2 $\pm$ 0,2 ^{ab}	269,7 $\pm$ 13,5 ⁱ	766 $\pm$ 38
MD	164,9 $\pm$ 9,2 ^g	677,0 $\pm$ 33,9 ⁱ	155,3 $\pm$ 7,7 ^e	10,0 $\pm$ 0,5 ^d	11,0 $\pm$ 0,6 ^{eg}	290,1 $\pm$ 14,5 ⁱ	1325 $\pm$ 66
BM	6,3 $\pm$ 0,3 ^e	8,8 $\pm$ 0,4 ^h	<LOD	<LOD	15,4 $\pm$ 0,8 ^j	19,0 $\pm$ 0,9 ^{bd}	49 $\pm$ 2

Legenda: Tre = trehalóza; Glu = glukóza; Fru = fruktóza; Lak = laktóza; Sach = sacharóza; Mal = maltóza. Rozdílné horní indexy ve stejném sloupci ukazují statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$)

Celková suma stanovených cukrů se pohybovala v širokém rozmezí 49–1 675 mg·100 g⁻¹ lyofilizovaného vzorku. Nejvyšší celkový obsah cukrů byl zjištěn u subadultních jedinců *L. migratoria* (1 675 ± 84 mg·100 g⁻¹) a u larev *M. domestica* (1 325 ± 66 mg·100 g⁻¹), zatímco nejnižší hodnoty vykazovaly larvy *B. mori* (49 ± 2 mg·100 g⁻¹) a *B. lateralis* (62 ± 3 mg·100 g⁻¹). Dominantními sacharidy byly trehalóza a glukóza, což odpovídá jejich fyziologické roli hlavních cirkulujících cukrů v hemolymfě hmyzu.

Zjištěné hladiny trehalózy, glukózy a fruktózy jsou v souladu s literárními údaji. Například Son et al. (2021) uvádějí u sušeného prášku *T. molitor* obsah glukózy 31,02 ± 1,95 mg·100 g⁻¹, fruktózy 77,36 ± 0,35 mg·100 g⁻¹ a sacharózy 12,46 ± 0,94 mg·100 g⁻¹. Ve srovnání s těmito údaji byly v naší studii zaznamenány vyšší hodnoty některých cukrů, zejména glukózy a trehalózy, což může souviset s rozdílnými podmínkami chovu, krmivem nebo použitou analytickou metodou. Na rozdíl od některých publikovaných prací jsme ve všech vzorcích detekovali také maltózu a u několika vzorků i laktózu. Vysoká citlivost použité analytické metody může vysvětlovat, proč tyto sacharidy nebyly jinými autory detekovány.

Z fyziologického hlediska je glukóza v hmyzu buď přímo přítomna, nebo je ukládána ve formě glykogenu a trehalózy. Naproti tomu enzymatická schopnost syntetizovat laktózu, sacharózu či maltózu de novo chybí (Thompson, 2003). Přítomnost těchto disacharidů je proto pravděpodobně spojena se zbytky krmiva nebo s produkty trávení. Zvýšený obsah laktózy zjištěný u larev *M. domestica* (84,4 ± 4,2 mg·100 g⁻¹) lze vysvětlit použitím sušeného mléka v krmné směsi a absencí hladovění před sklizní, což mohlo vést k přítomnosti nestrávených zbytků ve střevním traktu. V ostatních případech byly hladiny laktózy velmi nízké. Studie Brai et al. (2024) uvádí, že i při krmení *T. molitor* vedlejšími produkty mlékárenského průmyslu bohatými na laktózu nebyla tato látka v larvách detekována, což naznačuje druhově specifické rozdíly v metabolismu a retenci sacharidů. Naše výsledky proto poukazují na potřebu dalšího výzkumu metabolismu disacharidů u jednotlivých druhů.

Mezi druhy byly zjištěny statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$) v obsahu jednotlivých sacharidů. Nejvyšší hladiny trehalózy byly zjištěny u larev *H. illucens* a *T. molitor*, zatímco velmi nízké koncentrace všech analyzovaných cukrů vykazovaly larvy *B. mori*. Subadultní jedinci *L. migratoria* se vyznačovali mimořádně vysokou hladinou glukózy, což lze vysvětlit zvýšenými energetickými nároky spojenými s přípravou na svlékání a vývoj letových svalů (Vaandrager et al., 1988). U dospělců *B. discoidalis* byly zaznamenány nejvyšší hladiny fruktózy a maltózy, přičemž zvýšená koncentrace maltózy může být důsledkem kombinace glykogenolýzy a výrazné amylolytické aktivity ve střevě (Arrese a Soulages, 2010; Wada-Katsumata et al., 2021). Dospělci *G. assimilis* vykazovali nejvyšší obsah sacharózy.

Rozdíly byly pozorovány také mezi vývojovými stádii. Subadultní vzorky *L. migratoria* měly vyšší celkový obsah cukrů než dospělci, zatímco u *B. discoidalis* byl obsah mono- a disacharidů vyšší u dospělců než u nymf. Morales-Ramos et al. (2016) u *T. molitor* uvádějí, že celkový obsah cukrů se mezi larvami a kuklami významně neliší, avšak jednotlivé sacharidy vykazovaly rozdílné zastoupení, což potvrzuje, že sacharidový profil je silně závislý na fyziologickém stavu organismu. V případech, kdy byli analyzováni jedinci obou pohlaví (*G. sigillatus*, *A. domesticus*, *G. assimilis*), byly u samic většinou zaznamenány nižší hladiny mono- a disacharidů než u samců. Tento rozdíl může souviset s metabolickým přesměrováním sacharidů do syntézy lipidů a proteinů podporujících oogenezi, zatímco samci si mohou udržovat vyšší hladiny cirkulujících cukrů pro podporu aktivity a reprodukčního chování. Tento předpoklad je v souladu s proteomickými studiemi, které prokazují zvýšenou regulaci metabolismu lipidů a proteinů u samic cvrčků (Gutiérrez et al., 2021; Tsukamoto et al., 2014).

Z hlediska nutriční bezpečnosti a vhodnosti pro jedince s deficitem disacharidáz je podstatné, že absolutní koncentrace laktózy a sacharózy byly ve většině vzorků velmi nízké a pohybovaly se v řádu jednotek až desítek mg·100 g⁻¹ sušiny. Ve srovnání s běžnými potravinami, například kravským mlékem obsahujícím

přibližně 4 800 mg laktózy ve 100 ml, představují tyto hodnoty nutričně zanedbatelné množství. Analyzované vzorky lze proto obecně považovat za vhodné pro osoby s deficitem laktázy nebo sacharázy. Vyšší variabilita byla zjištěna u maltózy a zejména trehalózy, která je přirozeným krevním cukrem hmyzu. U osob s deficitem maltázy či trehalázy by však při konzumaci druhů hmyzu s vysokým obsahem těchto disacharidů mohla být na místě zvýšená opatrnost. Výsledky rovněž ukazují, že obsah některých disacharidů může být ovlivněn krmivem a nedostatečným hladověním před sklizní, což představuje technologický faktor důležitý pro zajištění konzistentní kvality a bezpečnosti produktu.

ZÁVĚR

Tato studie přináší komplexní srovnání profilů mono- a disacharidů u širokého spektra jedlých druhů hmyzu, jejich vývojových stádií a pohlaví. Výsledky potvrzují, že obsah rozpustných cukrů v hmyzu je obecně nízký, avšak výrazně druhově specifický, přičemž dominantními sacharidy jsou trehalóza, glukóza a maltóza. Přítomnost laktózy a sacharázy byla ve většině vzorků zanedbatelná a v případech vyšších hodnot byla s největší pravděpodobností spojena se zbytky krmiva spíše než s endogenní syntézou. Byly prokázány rozdíly v sacharidovém složení mezi jednotlivými druhy, vývojovými stádii i pohlavími, což zdůrazňuje význam biologických a fyziologických faktorů v metabolismu sacharidů. Subadultní jedinci *L. migratoria* a larvy *H. illucens* a *T. molitor* vykazovali zvýšené hladiny trehalózy a glukózy, zatímco larvy *B. mori* měly konzistentně nízké koncentrace všech analyzovaných cukrů. Z nutričního a bezpečnostního hlediska naznačují nízké hladiny laktózy a sacharázy u většiny druhů, že hmyz je obecně vhodný pro osoby s intolerancí laktózy či sacharázy. Vyšší a výrazná variabilita v obsazích trehalózy a maltózy však ukazuje, že u jedinců s deficitem trehalázy či maltázy je na místě zvýšená opatrnost při konzumaci určitých druhů hmyzu s jejich vyšší koncentrací. Tyto výsledky vyplňují důležitou mezeru v nutriční charakterizaci jedlého hmyzu a poskytují relevantní podklady pro tvorbu nutričních doporučení, vývoj potravinářských produktů i další výzkum zaměřený na citlivé skupiny spotřebitelů.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce vznikla za podpory projektu MŠMT METROFOOD-CZ, č. LM2023064.

LITERATURA

- Arrese, E. L., Soulages, J. L. (2010): Insect fat body: Energy, metabolism, and regulation. *Annual Review of Entomology*, 55, 207. Dostupné z: <https://doi.org/10.1146/annualrev-ento-112408-085356>
- Becker, A., Schlöder, P., Steele, J. E., Wegener, G. (1996): The regulation of trehalose metabolism in insects. *Experientia*, 52(5), 433–439. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF01919312>
- Bergoz, R., Vallotton, M. C., Loizeau, E. (1982): Trehalase deficiency: Prevalence and relation to single-cell protein food. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 26(5), 291–295. Dostupné z: <https://doi.org/10.1159/000176576>
- Brai, A., Neri, C., Tarchi, F., Poggialini, F., Vagaggini, C., Frosinini, R., Simoni, S., Francardi, V., Dreassi, E. (2024): Upcycling milk industry byproducts into *Tenebrio molitor* larvae: Investigation on fat, protein, and sugar composition. *Foods*, 13(21), 3450. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/FOODS13213450/SI>
- Gudmand-Høyer, E., Fenger, H. J., Skovbjerg, H., Kern-Hansen, P., Madsen, P. R. (1988): Trehalase deficiency in Greenland. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*, 23(7), 775–778. Dostupné z: <https://doi.org/10.3109/00365528809090759>

- Gutiérrez, Y., Fresch, M., Hellmann, S. L., Hankeln, T., Scherber, C., Brockmeyer, J. (2021): A multifactorial proteomics approach to sex-specific effects of diet composition and social environment in an omnivorous insect. *Ecology and Evolution*, 11(13), 8623–8639. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ECE3.7676>
- Jongema, Y. (2017): List of edible insect species of the world. Laboratory of Entomology [online]. Dostupné z: <https://www.wur.nl/en/research-results/chair-groups/plant-sciences/laboratory-of-entomology/edible-insects/worldwide-species-list.htm>
- Kozlov, A., Vershubskaya, G., Gorin, I., Petrushenko, V., Lavryashina, M., Balanovska, E. (2023): Prevalence of genetically determined trehalase deficiency in populations of Siberia and Russian Far East. *International Journal of Circumpolar Health*, 82(1), 2183931. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/22423982.2023.2183931>
- Kvasnička, F., Kouřimská, L., Bleha, R., Škvorová, P., Kulma, M., Rajchl, A. (2023): Electrophoretic determination of chitin in insects. *Journal of Chromatography A*, 1695, 463952. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2023.463952>
- Łopienska-Biernat, E., Stryński, R., Dmitryjuk, M., Wasilewska, B. (2019): Infective larvae of *Anisakis simplex* (Nematoda) accumulate trehalose and glycogen in response to starvation and temperature stress. *Biology Open*, 8(3), 1766. Dostupné z: <https://doi.org/10.1242/bio40014/1766>
- Morales-Ramos, J. A., Rojas, M. G., Shelby, K. S., Coudron, T. A. (2016): Nutritional value of pupae versus larvae of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) as food for rearing *Podisus maculiventris* (Heteroptera: Pentatomidae). *Journal of Economic Entomology*, 109(2), 564–571. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/jee/tov338>
- Murray, I. A., Coupland, K., Smith, J. A., Ansell, I. D., Long, R. G. (2000): Intestinal trehalase activity in a UK population: establishing a normal range and the effect of disease. *British Journal of Nutrition*, 83(3), 241–245. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/S0007114500000313>
- Ordoñez-Araque, R., Quishpillo-Miranda, N., Ramos-Guerrero, L. (2022): Edible insects for humans and animals: Nutritional composition and an option for mitigating environmental damage. *Insects*, 13(19), 944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/insects13100944>
- Satyam, A., Fallahtafi, P. (2024): Trehalase deficiency. In: Rezaei, N. (ed.) *Genetic Syndromes*, 1–3. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66816-1_1800-1
- Son, Y. J., Hwang, I. K., Nho, C. W., Kim, S. M., Kim, S. H. (2021): Determination of carbohydrate composition in mealworm (*Tenebrio molitor* L.) larvae and characterization of mealworm chitin and chitosan. *Foods*, 10(3), 640. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/FOODS10030640>
- Thompson, S. N. (2003): Trehalose - the insect “blood” sugar. *Advances in Insect Physiology*, 31, 205–285. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0065-2806\(03\)31004-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2806(03)31004-5)
- Tsukamoto, Y., Kataoka, H., Nagasawa, H., Nagata, S. (2014): Mating changes the female dietary preference in the two-spotted cricket, *Gryllus bimaculatus*. *Frontiers in Physiology*, 5, 95. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00095>
- Vaandrager, S. H., Wynne, H. J. A., Beenackers, A. M. T. (1988): Regulation of flight related trehalose utilization in the locust *Locusta migratoria*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 91(4), 653–657. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(88\)90943-7](https://doi.org/10.1016/0300-9629(88)90943-7)
- Wada-Katsumata, A., Schal, C., Ozaki, M., Pauchet, Y. (2021): Salivary digestion extends the range of sugar-aversions in the German cockroach. *Insects*, 12(3), 263. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/insects12030263>

Welsh, J. D., Poley, J. R., Bhatia, M., Stevenson, D. E. (1978): Intestinal disaccharidase activities in relation to age, race, and mucosal damage. *Gastroenterology*, 75(5), 847–855.

Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0016-5085\(78\)90468-7](https://doi.org/10.1016/0016-5085(78)90468-7)

Zhou, Y., Wang, D., Zhou, S., Duan, H., Guo, J., Yan, W. (2022): Nutritional composition, health benefits, and application value of edible insects: A review. *Foods*, 11(24), 3961.

Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/foods11243961>

Kontaktní adresa: prof. Ing. Lenka Kouřimská, Ph.D., Katedra mikrobiologie, výživy a dietetiky, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129, 165 00 Praha-Suchbát, e-mail: kourimska@af.czu.cz