

Šedá vodní stopa pěstování sladovnického ječmene

DAGMAR VOLOŠINOVÁ, LIBOR ANSORGE, LADA STEJSKALOVÁ

Klíčová slova: šedá vodní stopa – mikropolutanty – pesticidy – hnojiva – sladovnický ječmen

ABSTRAKT

Zemědělství je celosvětově hlavním spotřebitelem sladké vody. Zároveň však přispívá k její kontaminaci prostřednictvím hnojiv a pesticidů. Tento článek se zaměřuje na koncept šedé vodní stopy (GWF) jako environmentálního ukazatele hodnotícího dopad zemědělské produkce na vodní zdroje. Studie analyzuje GWF pěstování sladovnického ječmene na ploše 9 674 ha v různých regionech České republiky (ČR). Zvláštní důraz je kladen na započtení pesticidů do výpočtu GWF, jelikož jejich vliv na sladkovodní ekosystémy a lidské zdraví může převyšovat dopad hnojiv. Analýza ukazuje, že nejvyšší GWF vykazují insekticidy, zejména deltamethrin, jehož GWF je o řád vyšší než u ostatních agrochemikálií. Studie podtrhuje důležitost zahrnutí pesticidů do budoucích hodnocení GWF, aby bylo možné lépe posoudit environmentální dopady zemědělské produkce a optimalizovat strategie udržitelného hospodaření s vodními zdroji. Zároveň studie diskutuje různé přístupy zahrnutí biologicky aktivních látek do modelů šedé vodní stopy.

ÚVOD

Zemědělství je největším spotřebitelem sladké vody na světě, přičemž představuje přibližně 70 % celkové spotřeby vodních zdrojů [1, 2]. Intenzivní zemědělské postupy zahrnující nadměrné používání pesticidů a hnojiv mají výrazný dopad na vodní ekosystémy v důsledku vymývání přebytků těchto látek do vodního prostředí. Vyplavování živin, zejména dusičnanů, do podzemních vod často přispívá k překročení povolených limitů pro pitnou vodu. V povrchových vodách zvýšený obsah dusičnanů podporuje růst fytoplanktonu, jehož dominantními složkami jsou řasy a sinice. Ty snižují obsah kyslíku ve vodě a následně vedou k hypoxii či anoxii, tj. k procesu eutrofizace. Tyto změny způsobují úbytek biologické rozmanitosti a mohou vést až k masivnímu úhynu vodních organismů [3].

Pesticidy, které se aplikují k ochraně plodin před škůdci a chorobami, pronikají do půdy i vodních útvarů, kde mohou ohrožovat vodní ekosystémy i lidské zdraví. Dlouhodobá expozice těmto látkám je spojována s narušením endokrinního systému, se zvýšeným rizikem rakoviny a dalšími zdravotními problémy [2]. Kontaminace vod pesticidy je problematická zejména kvůli jejich perzistenci a schopnosti šířit se vodním prostředím, čímž dochází k ovlivnění i vzdálených oblastí od jejich aplikace.

Pro kvantifikaci environmentálního dopadu zemědělství byly vyvinuty různé metody, včetně ekologické stopy [4], dusíkové stopy [5] a vodní stopy, konkrétně šedá vodní stopa (Grey Water Footprint, GWF) [6, 7]. Vodní stopa [8] se skládá ze tří složek. Modrá a zelená vodní stopa představují fyzický objem sladké vody spotřebované pro produkci výrobků. Spotřebou se myslí nedostupnost spotřebované vody jiným uživatelům v příslušném povodí a v dané časové periodě; tím se vodní stopa odlišuje od jiných environmentálních ukazatelů, jež vyjadřují jakékoli užití vody, bez ohledu na to, zda je dostupná pro další uživatele, či nikoli. Šedá vodní stopa představuje teoretický objem vody potřebný k naředění znečišťujících látek, které vstupují do vod, na úroveň splňující normy kvality vody v recipientu v daném místě.

Představuje taktéž „spotřebu“ vody, protože daný objem vody již není k dispozici pro naředění stejné znečišťující látky. Tento ukazatel umožňuje hodnotit míru znečištění vodních zdrojů a poskytuje podklad pro rozhodování o udržitelném využívání vody.

Výpočet GWF v této studii se zaměřuje na identifikaci množství vody potřebné k naředění znečišťujících látek, zejména dusíku, fosforu a pesticidů, použitých při pěstování sladovnického ječmene v ČR. Předchozí studie se při výpočtu šedé vodní stopy při produkci plodin soustředily především na hnojiva, zatímco vliv pesticidů je často podceňován.

Vyplavování živin do povrchových vod vede k eutrofizaci a následnému poklesu kvality vody [9]. Dusík má vysokou mobilitu a jeho přítomnost v povrchových i podzemních vodách může způsobit významné ekologické problémy. Nedostatek dat o perzistenci pesticidů ve vodním prostředí a jejich kumulativních dopadech na ekosystémy ztěžuje přesné vyčíslení jejich podílu na GWF. Novější studie Yi et al. [10], stejně jako naše studie, však zdůrazňují nutnost zahrnout i pesticidy, neboť jejich environmentální dopad může být vyšší než u hnojiv.

V oblastech s omezenými vodními zdroji nebo zranitelnými ekosystémy může být negativní dopad kontaminace výraznější než v regionech s vyšší kapacitou přírodních systémů ke zředění znečištění. Proto má sledování a snižování GWF zásadní význam nejen pro zemědělství, ale i pro navazující průmyslová odvětví, jež využívají zemědělské produkty jako vstupní surovinu, např. potravinářský a nápojový průmysl. Kvantifikace GWF [11] umožňuje identifikaci kritických bodů v dodavatelském řetězci a ve výrobním procesu. Hodnocení GWF při pěstování ječmene tak poskytuje důležité informace pro environmentální politiku, zemědělskou praxi i navazující potravinářský a nápojový průmysl. Tento přístup umožňuje efektivnější využívání vodních zdrojů a minimalizaci jejich znečištění, ale i environmentálně udržitelnou produkci potravin, nápojů a dalších produktů založených na zemědělské produkci.

Použitá metodika poskytuje komplexní přístup k výpočtu GWF sladovnického ječmene a umožňuje detailní analýzu vlivu zemědělské produkce na vodní zdroje. Výsledky studie mohou být klíčové pro návrh udržitelnějších zemědělských postupů a lepší správu vodních ekosystémů. Sledování a optimalizace GWF představuje důležitý nástroj pro zemědělce, průmyslové výrobce i environmentální politiky s cílem minimalizovat negativní dopady na životní prostředí a zvýšit efektivitu využívání vodních zdrojů.

METODIKA A ZDROJE DAT

Tato studie se zaměřuje na analýzu GWF sladovnického ječmene pěstovaného na ploše 9 674,05 ha v různých částech ČR, konkrétně v okresech Bruntál, Frýdek-Místek, Hodonín, Jeseník, Karviná, Kroměříž, Nový Jičín, Olomouc, Opava, Ostrava-město, Prostějov, Přerov, Rychnov nad Kněžnou, Semily, Svitavy, Šumperk a Ústí nad Orlicí. Pro výpočet GWF pěstování sladovnického ječmene byly získány podrobné údaje o množství použitých hnojiv a pesticidů přímo od pěstitelů dodávajících sladovnický ječmen pro Pivovar Radegast. Pro sběr dat byl připraven dotazník a zástupci Pivovaru Radegast zajistili jeho vyplnění u svých dodavatelů. Shromážděná data byla zpracovatelům studie předána již v agregované formě, tj. jako průměrné množství aplikovaných látek na 1 hektar pěstební plochy.

Dotazníkové šetření se zaměřilo na detailní informace o druzích a množství aplikovaných hnojiv a přípravků s obsahem pesticidů při pěstování sladovnického ječmene. Na základě používaných přípravků a jejich objemu bylo stanoveno množství aplikované účinné látky.

Pro výpočet GWF v metrech krychlových na tunu pěstované plodiny byly použity rovnice dle Hoekstry a Hunga [9] a podle *Water Footprint Assessment Manual* [8]:

$$WF_{grey\ l\ i} = \frac{\frac{\alpha \times AR_{li}}{c_{max\ li} - c_{nat\ li}}}{Y}$$

$$WF_{grey\ l} = \max\{WF_{grey\ l,1}, WF_{grey\ l,2}, \dots, WF_{grey\ l,i}\}$$

$$WF_{grey} = \sum_{l=1}^n WF_{grey\ l}$$

kde:

α je podíl ztráty hnojiv a pesticidů (%), tzv. vyluhovací faktor

AR množství aplikovaných hnojiv a pesticidů pro každou plodinu (kg/ha)

c_{max} kritická koncentrace sledované látky z hnojiv a pesticidů (g/m³)

c_{nat} přirozená koncentrace sledované látky z hnojiv a pesticidů v recipientu (g/m³)

Y produkce plodiny (t/ha)

Průměrný vyluhovací faktor α byl stanoven na základě oficiální metodiky *Water Footprint Network* [12]. Má následující hodnoty: pro dusíkatá hnojiva 0,1, fosforečná hnojiva 0,03, draselná hnojiva 0,7 a pesticidy 0,01. Faktor vyluhování pesticidů byl stanoven na 0,01 kvůli absenci detailních údajů o půdních vlastnostech daných lokalit. Pro výpočet regionalizovaného koeficientu α v souladu s metodikou [12] nebyla poskytnuta potřebná data.

Rozdíl mezi hodnotami c_{max} a c_{nat} představuje asimilační kapacitu toku. Pro hnojiva dusík, fosfor a draslík byly stanoveny tyto hodnoty asimilační kapacity: dusík 3 g/m³, fosfor 0,1 g/m³ a draslík 5 g/m³ [12]. U pesticidů byla hodnota c_{nat} nastavena na nulu, zatímco hodnoty c_{max} byly odvozeny z nejnižších hodnot předpovědovaných sladkovodních koncentrací bez účinku (Predicted No Effect Concentration, PNEC) z databáze NORMAN [13]. Hodnoty PNEC se běžně používají jako c_{max} ve studiích GWF odpadních vod [14–17], lze je také použít při výpočtu GWF pesticidů v zemědělství [18]. Hodnoty PNEC použité pro tuto studii uvádí *tab. 2*.

Informace o produkci pivovarnického ječmene Y ve sledovaných okresech poskytly opět zástupci Pivovaru Radegast na základě informací z dotazníkového šetření u zemědělců. Všechna data byla platná pro rok 2022 a pro tento rok jsou tak platné i výsledky studie.

VÝSLEDKY

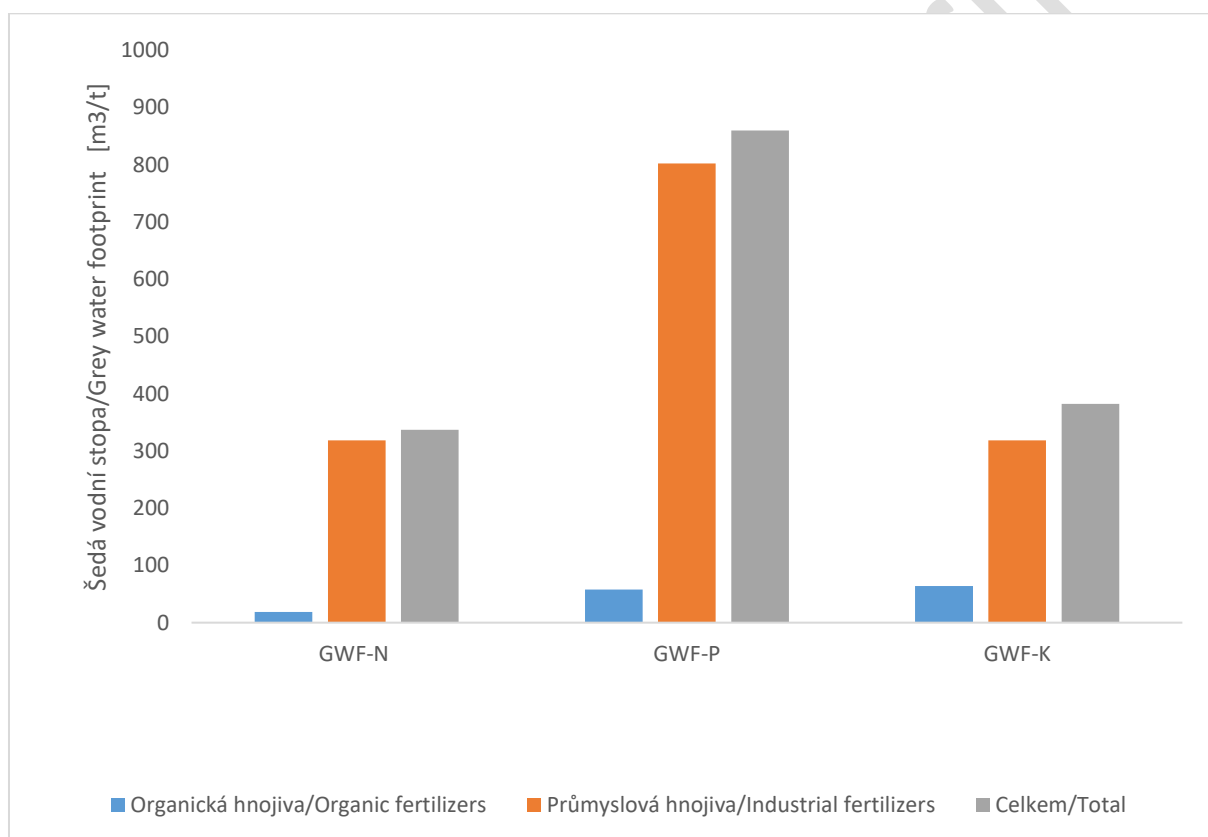
Tab. 1 ukazuje hodnoty GWF jednotlivých hnojiv aplikovaných na pole sladovnického ječmene. Nejvyšší hodnoty GWF byly zjištěny u fosforu. *Tab. 2* ukazuje hodnoty GWF jednotlivých pesticidů aplikovaných na pole se sladovnickým ječmenem. Insekticidy dosahují daleko nejvyšších hodnot GWF kvůli své vysoké ekotoxicitě pro vodní organismy. Výrazně nejvyšší GWF má insekticid deltamethrin, i když jej bylo použito jen malé množství. Hodnota GWF deltamethrinu je o jeden řád vyšší než hodnoty GWF dalších dvou důležitých insekticidů (gamma-cyhalothrin a esfenvalerate) a o tři řády vyšší než GWF fungicidů (prothioconazol),

herbicidů (2,4-D 2-EHE), hnojiv (fosforu) a o čtyři řády vyšší než GWF morforegulátoru (trinexapac-ethyl).

Tab. 1. Šedá vodní stopa hnojiv – sladovnický ječmen

Tab. 1. Grey water footprint of nutrients – malting barley

	GWF-N	GWF-P	GWF-K
	[m ³ /t]		
Organická hnojiva	18,65	57,96	63,72
Průmyslová hnojiva	318,40	801,85	318,37
Celkem	337,05	859,81	382,09



Obr. 1. [ŘZ1] Šedá vodní stopa hnojiv – sladovnický ječmen

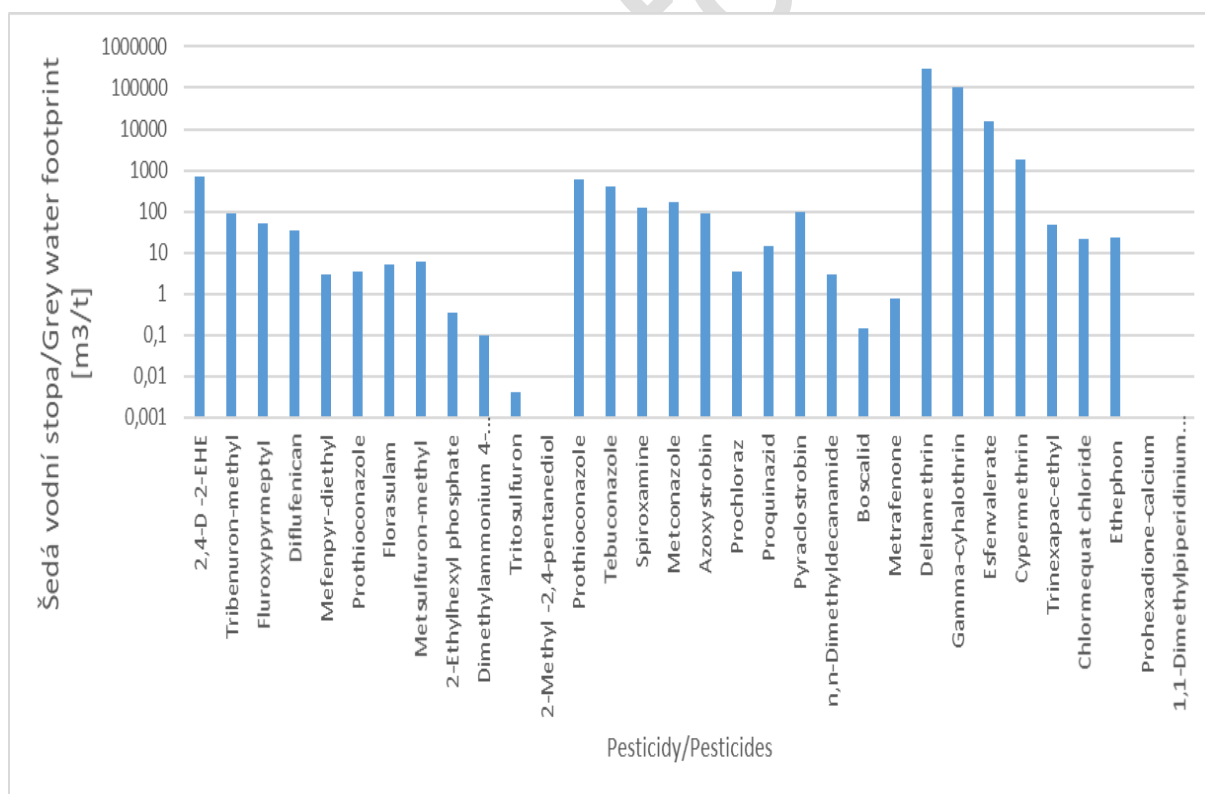
Fig. 1. Grey water footprint of nutrients – malting barley

Tab. 2. Šedá vodní stopa pesticidů – sladovnický ječmen

Tab. 2. Grey water footprint of pesticides – malting barley

Hlavní aktivní složka	Druh pesticidu	Aplikované množství [kg/ha]	Smyv do vody [kg/ha]	PNEC ($C_{\max}-C_{\text{nat}}$) [mg/m ³]	GWF [m ³ /t]
2,4-D -2-EHE	herbicide	276,768	2,768	0,051	714,923
Tribenuron-methyl	herbicide	67,449	0,674	0,100	88,856
Fluroxypyrmeptyl	herbicide	70,357	0,704	0,179	51,780
Diflufenican	herbicide	193,485	1,935	0,010	34,917
Mefenpyr-diethyl	herbicide	37,400	0,374	1,650	2,986
Prothioconazole	herbicide	8,557	0,086	0,330	3,416
Florasulam	herbicide	2,350	0,024	0,062	4,993
Metsulfuron-methyl	herbicide	0,450	0,005	0,010	5,930
2-Ethylhexyl phosphate	herbicide	44,266	0,443	17,100	0,341
Dimethylammonium 4-chloro-o-tolyloxyacetate	herbicide	29,352	0,294	41,300	0,094
Tritosulfuron	herbicide	0,021	0,000	0,750	0,004
2-Methyl -2,4-pentandiol	herbicide	4,787	0,048	822,000	0,001
Prothioconazole	fungicide	1 471,041	14,710	0,330	587,251
Tebuconazole	fungicide	758,947	7,589	0,240	416,594
Spiroxamine	fungicide	598,644	5,986	0,63	125,182
Metconazole	fungicide	368,477	3,685	0,290	167,389
Azoxystrobin	fungicide	134,723	1,347	0,200	88,741
Prochloraz	fungicide	42,643	0,426	1,56	3,601
Proquinazid	fungicide	20,420	0,204	0,180	14,945
Pyraclostrobin	fungicide	147,911	1,479	0,200	97,428
n,n-Dimethyldecanamide	fungicide	42,832	0,428	1,940	2,909
Boscalid	fungicide	13,036	0,130	12,000	0,143
Metrafenone	fungicide	25,455	0,255	4,500	0,745

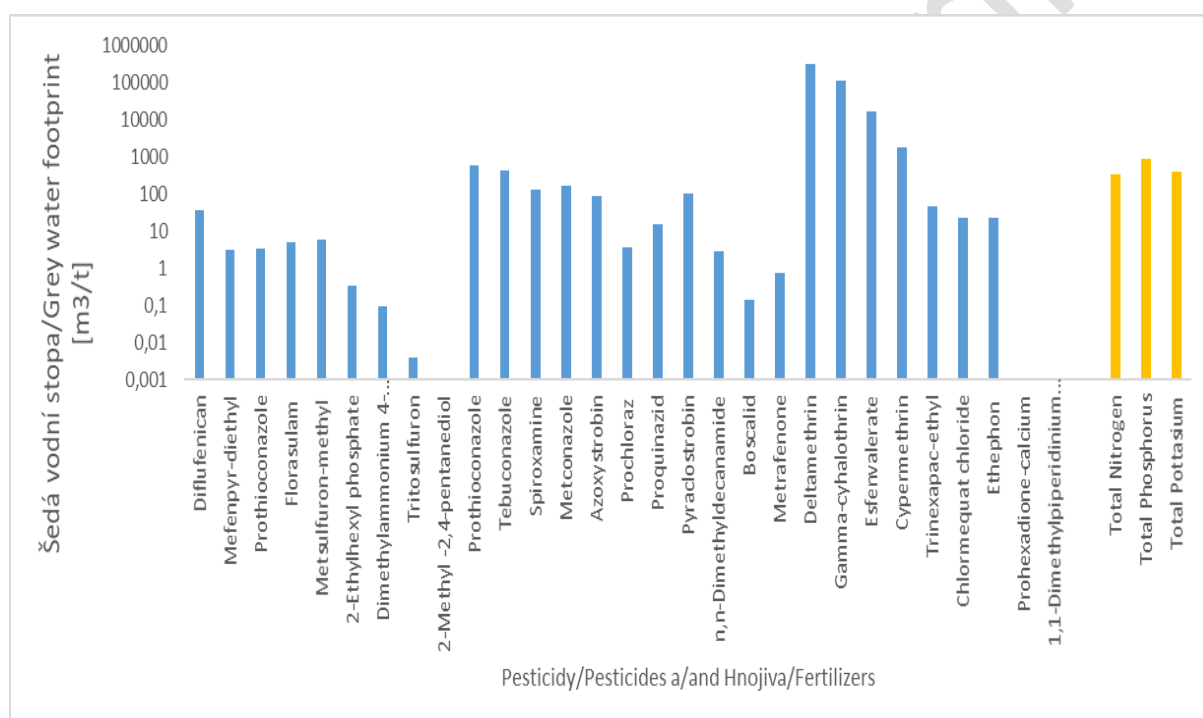
Hlavní aktivní složka	Druh pesticidu	Aplikované množství [kg/ha]	Smyv do vody [kg/ha]	PNEC ($C_{max}-C_{nat}$) [mg/m ³]	GWF [m ³ /t]
Deltamethrin	insekticid	3,903	0,039	0,0000017	302 440,814
Gamma-cyhalothrin	insekticid	17,779	0,178	0,0000220	106 461,850
Esfenvalerate	insekticid	12,134	0,121	0,0001000	15 984,660
Cypermethrin	insekticid	1,094	0,011	0,00008	1 800,702
Trinexapac-ethyl	morforegulátor	381,223	3,812	1,100	45,656
Chlormequat chloride	morforegulátor	1 689,165	16,892	10,000	22,253
Ethephon	morforegulátor	801,548	8,015	4,700	22,467
Prohexadione-calcium	morforegulátor	40,265	0,403	10 000,000	0,001
1,1-Dimethylpiperidinium chloride	morforegulátor	2,030	0,020	260,000	0,001029

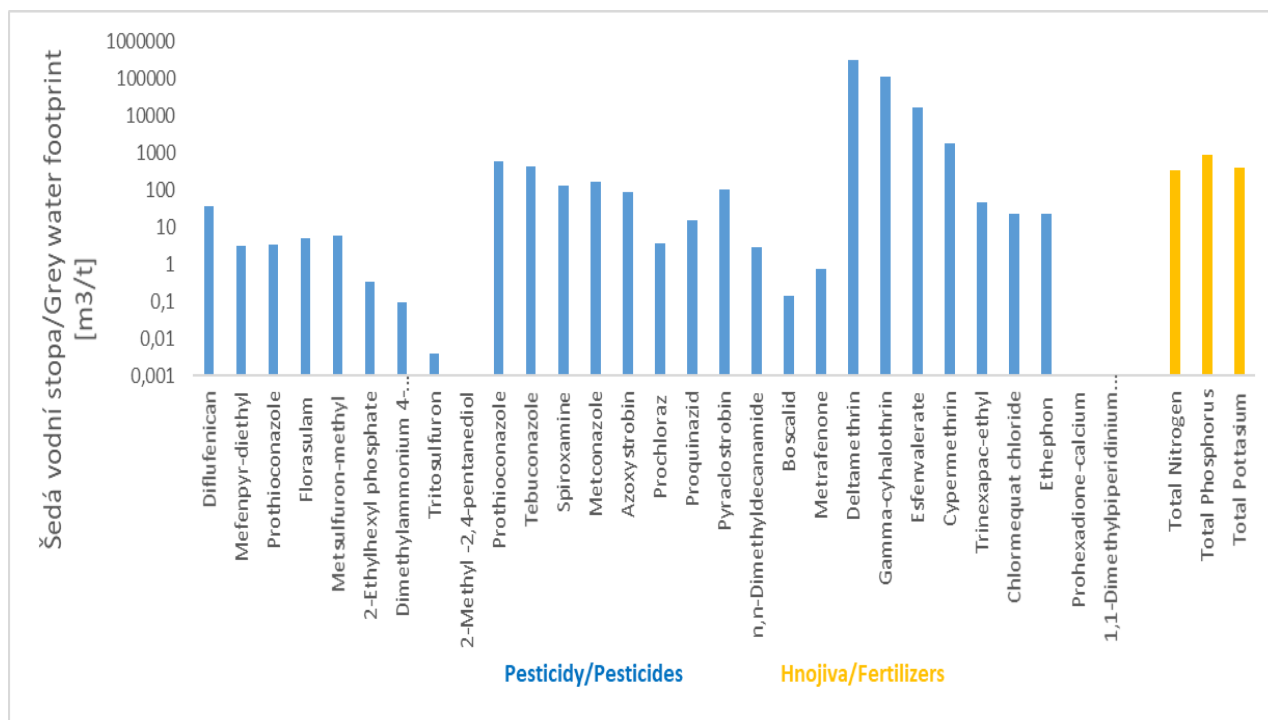


Obr. 2. [ŘZ2] Šedá vodní stopa pesticidů – sladovnický ječmen

Fig. 2. Grey water footprint of pesticides – malting barley

Obr. 3 podává souhrnné hodnoty šedé vodní stopy (GWF) spojené s použitím hnojiv a pesticidů při pěstování sladovnického ječmene. Nejvyšší hodnoty GWF vykazují insekticidy, což souvisí s jejich vysokou ekotoxicitou pro vodní organismy. Mezi nimi jednoznačně dominuje deltamethrin, jehož GWF je přibližně o jeden řád vyšší než u dalších dvou významných insekticidů (gamma-cyhalothrin a esfenvalerát). Zároveň je o tři řády vyšší než GWF fungicidů (prothiokonazol), herbicidů (2,4-D 2-EHE) a fosforečných hnojiv, a dokonce o čtyři řády vyšší než u morforegulátoru (trinexapac-ethyl). Ačkoli bylo deltamethrinu aplikováno pouze malé množství, jeho celkový dopad na vodní ekosystémy je nejvýraznější. Celková šedá vodní stopa spojená s pěstováním sladovnického ječmene dosahuje hodnoty 302 440,814 m³/t, přičemž právě insekticidní přípravky s účinnou látkou deltamethrin představují nejvýznamnější složku tohoto znečištění.





Obr. 3. [ŘZ3] Šedá vodní stopa pěstování sladovnického ječmene

Fig. 3. Grey water footprint of malting barley production

DISKUZE

I když má aplikace hnojiv a pesticidů znatelný pozitivní vliv na podporu výnosu plodin, masivní používání těchto látek způsobuje kontaminaci životního prostředí jak v místním, tak globálním měřítku. Dosud publikované studie se obvykle soustředily na GWF způsobenou hnojiv, kterých je obecně používáno velké množství. Pesticidy nebyly ve většině studií zahrnuty – jednak s ohledem na jejich relativně malé množství (v porovnání s hnojiv) a jednak s ohledem na metodické problémy spojené s jejich zahrnutím do modelu GWF.

Pesticidy se obvykle rozkládají velmi pomalu, a proto jejich rezidua zůstanou v zemědělské půdě i mnoho let po jejich aplikaci. Na druhou stranu je jejich negativní vliv ve vodách patrný již při výrazně nižších koncentracích než v případě živin. Člověku vystavenému vodě kontaminované zbytky pesticidů hrozí onemocnění, jako je rakovina, endokrinní poruchy atd. Vodní ekosystémy jsou pak ještě citlivější na vliv těchto látek.

Výše popsané výsledky ukazují, že pesticidy mohou být nezbytné pro správné posouzení GWF plodin. Na základě současných poznatků již nelze považovat studie GWF pěstování zemědělských plodin za reprezentativní, pokud se zaměřují jen na GWF hnojiv. Na základě výše uvedených informací se ukazuje potřeba porovnat GWF hnojiv s GWF pesticidů v budoucích studiích GWF pěstování zemědělských plodin. Bez tohoto porovnání mohou být výsledky takových studií zavádějící.

Na druhou stranu je třeba upozornit na možná omezení našich výsledků. Prvním omezením je aplikace na jeden druh plodiny pěstované na 9 674,05 ha. Množství aplikovaných hnojiv i pesticidů a jejich složení se liší podle pěstované plodiny, vlastností půd i způsobu hospodaření. Tyto proměnné faktory pak ovlivňují hodnotu GWF, jak jednoznačně prokázala studie Borsata

et al. [19]. Druhým omezením je použití konstantního vyluhovacího faktoru α , což je v souladu s TIER 1 dle Frankeho et al. [12]. Použití konstantního vyluhovacího faktoru α představuje určité zjednodušení heterogenních podmínek, jež panují v zemědělství. Takové zjednodušení je proto vhodné pro velkoplošné studie nebo v případě nedostatku podkladových dat pro podrobnější přístupy k vyjádření leaching faktoru (TIER 2 či TIER 3). V našem případě bylo použito z důvodu nedostatku podkladových informací pro aplikaci podrobnějšího řešení.

Posledním zjednodušením, které jsme použili z důvodu nedostatku podrobných dat, je složení jednotlivých směsí aplikovaných na jednotlivá pole v rámci zkoumaného území. Údaje, jež byly získány od jednotlivých zemědělců a předány zástupci Pivovaru Radegast, uváděly pouze celková množství aplikovaného přípravku na zájmovém území, a nikoli na konkrétním poli. Proto jsme uvažovali aplikaci použitého množství na celé zájmové území 9 674,05 ha. Směs přípravků uvedená v tab. 2 a 3 tak představuje jakousi „zprůměrovanou směs“ použitou při produkci.

Problém při stanovení GWF pesticidů spočívá v obvyklé aplikaci pesticidů ve formě směsí různých účinných látek. Všechny znečišťující látky, které se do vod dostávají z lidské činnosti, mají charakter směsi více látek. *Water Footprint Assessment Manual* [8] předpokládá, že jednotlivé látky ve směsi spolu neinteragují a GWF je určena látkou s nejvyšší hodnotou. Tento předpoklad modelu GWF však ve skutečnosti často není splněn. Při smíchání různých bioaktivních látek dochází k jejich vzájemnému působení a mění se jejich toxicita a dopad na přijímající vodní útvar v závislosti na složení směsi. Někteří výzkumníci proto navrhli alternativní přístupy k řešení GWF směsí.

Jedním z přístupů je úprava modelu GWF. Paraiba et al. [18] navrhli model, který předpokládá, že toxicita směsi je součtem toxicit každé látky ve směsi. De Lavor Paes Barreto et al. [20] porovnali takový přístup s původním přístupem popsáním ve *Water Footprint Assessment Manual* [8] a zjistili, že model navržený Paraibou et al. [18] je obvykle přísnější. To je logický závěr, když si uvědomíme, že v modelu každá další látka přidaná do modelové směsi zvýší její toxicitu.

Dalším přístupem k nakládání se směsmi je zahrnutí samočisticí schopnosti vodního toku. Např. studie GWF komunálních odpadních vod [21] identifikovala amonný dusík (N-NH_4^+) jako látku nejčastěji určující GWF. V řekách se amonný dusík rychle oxiduje na jiné formy dusíku, nicméně model GWF podle *Water Footprint Assessment Manual* s touto skutečností nepočítá. Proto několik výzkumníků zahrnuje samočisticí efekt ve vodních tocích přímo do modelů GWF [22, 23].

Ještě jiný přístup k řešení GWF směsí lze nalézt v článku o ekodesignu výrobků L'Oréal [24]. Jejich metodika je založena na využití postupů používaných v LCA, tedy na principu aditivity účinků každé složky v poměru k její koncentraci v receptuře.

Výše uvedené nejistoty řešení i různé přístupy různých autorů ke GWF zdůrazňují potřebu dalšího výzkumu v oblasti GWF. Podle našeho názoru by se tento výzkum měl zaměřit na tři oblasti:

- První oblastí je identifikace látek, které mohou určovat GWF. Naše studie GWF sladovnického ječmene (tento článek) nebo mikropolutantů ve vyčištěných městských odpadních vodách [14] ukázaly, že běžně sledované polutanty nemusejí být (a často nejsou) těmi rozhodujícími pro stanovení GWF. Výběr nereprezentativních znečišťujících látek tak vede k systematickému podhodnocování hodnot GWF. K nalezení relevantních znečišťujících

látek pro různá odvětví a použití vody je zapotřebí řada výzkumných studií v různých oblastech souvisejících s vodním hospodářstvím.

- Druhá oblast se zabývá směsmi v modelech GWF. Na jedné straně musí být zachována „nezávislost“ hodnot vodní stopy na vnějších vlivech. Vodní stopa je jedním z environmentálních indikátorů, který popisuje chování hodnoceného systému. Indikátor, jehož hodnota by se beze změny samotného posuzovaného systému měnila, není dobře navržen. Na druhou stranu je třeba adekvátně řešit otázky související s novými, tzv. emergentními polutanty, které jsou často bioaktivními látkami a chovají se v různých směsích odlišně.

- Třetí oblastí, kde považujeme současný stav znalostí za neúplný, je posouzení udržitelnosti GWF. Přístupy, jež do modelů GWF zavádějí samočisticí proces, nepovažujeme za vhodnou praxi. Samočisticí schopnost vodního prostředí je nezávislá na produktových systémech hodnocených pomocí GWF. Samočisticí schopnost vody by proto neměla být zahrnuta do modelu GWF. Vhodnějším řešením se jeví úprava hodnocení udržitelnosti. Současný systém, popsáný ve *Water Footprint Assessment Manual* [8], porovnává hodnoty GWF s dostupnými zdroji pro zředění znečištění pomocí aktuálního odtoku z povodí. Tento přístup tedy srovnává odtok v určitém povodí s potřebami ředící vody v jednotlivých částech posuzovaného povodí. To může vést k přecenění vlivu vypouštěného znečištění právě v důsledku zanedbání samočisticí schopnosti ve vodním prostředí.

ZÁVĚR

Tato studie potvrdila, že GWF je významným ukazatelem pro hodnocení environmentálních dopadů zemědělství, přičemž je nutné zahrnout všechny aplikované látky, tedy nejen hnojiva, ale i pesticidy. Největší dopad na vodní zdroje v rámci pěstování sladovnického ječmene měl insekticid Deltamethrin. Vzhledem k vysoké ekotoxicitě pesticidů a jejich dlouhodobé persistenci ve vodních ekosystémech je důležité, aby budoucí studie zahrnovaly jejich podrobnou analýzu. Při posuzování GWF je nezbytné zohlednit lokální podmínky, jako jsou klimatické faktory, typy půd a dostupnost vody. Implementace opatření ke snížení GWF, jako jsou optimalizace použití agrochemikálií a inovativní technologie v zemědělství, mohou významně přispět k udržitelnějšímu využití vodních zdrojů a ochraně životního prostředí.

PODĚKOVÁNÍ

Tato studie vznikla v rámci komerční zakázky pro Pivovar Radegast. Rádi bychom poděkovali zástupcům Pivovaru Radegast za pomoc, kterou poskytli při získávání vstupních dat pro studii.

Samotný článek byl podpořen finančními prostředky tzv. Institucionální podpory v rámci interních grantů poskytovaných Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka.

PROHLÁŠENÍ O STŘETU ZÁJMŮ

Zástupci Pivovaru Radegast ani propojených firem neměli žádný vliv na výsledky studie. Druhý autor je součástí managementu VÚV TGM, který časopis VTEI vydává, a předsedou Redakční rady časopisu VTEI. Tyto skutečnosti však neměly žádný vliv na podporu poskytnutou na sepsání článku ani na přijetí článku k publikaci v časopise VTEI.

LITERATURA[NJ4]

- [1] *State of the World's Drinking Water: An Urgent Call to Action to Accelerate Progress on Ensuring Safe Drinking Water for All*. 1st ed. Geneva: World Health Organization, 2022. ISBN 978-92-4-006080-7.
- [2] WORLD HEALTH ORGANIZATION. *World Health Statistics 2017: Monitoring Health for the SDGs, Sustainable Development Goals* [on-line]. Geneva: World Health Organization, 2017 [citováno 2025-02-19]. ISBN 978-92-4-156548-6. Dostupné z: <https://iris.who.int/handle/10665/255336>
- [3] BIJAY-SINGH, CRASWELL, E. Fertilizers and Nitrate Pollution of Surface and Ground Water: An Increasingly Pervasive Global Problem. *SN Applied Sciences* [on-line]. 2021, 3(4), 518. ISSN 2523-3963, 2523-3971. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>
- [4] WACKERNAGEL, M., ONISTO, L., BELLO, P., CALLEJAS LINARES, A., SUSANA LÓPEZ FALFÁN, I., MÉNDEZ GARCÍA, J., ISABEL SUÁREZ GUERRERO, A., GUADALUPE SUÁREZ GUERRERO, M. National Natural Capital Accounting with the Ecological Footprint Concept. *Ecological Economics* [on-line]. 1999, 29(3), s. 375–390. ISSN 0921-8009. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)90063-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)90063-5)
- [5] LEACH, A. M., GALLOWAY, J. N., BLEEKER, A., ERISMAN, J. W., KOHN, R., KITZES, J. A Nitrogen Footprint Model to Help Consumers Understand their Role in Nitrogen Losses to the Environment. *Environmental Development* [on-line]. 2012, 1(1), s. 40–66. ISSN 2211-4645. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2011.12.005>
- [6] HOEKSTRA, A. Y. Water Footprint Assessment: Evolvment of a New Research Field. *Water Resources Management* [on-line]. 2017, 31(10), s. 3 061–3 081. ISSN 0920-4741, 1573-1650. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5>
- [7] HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Malden, MA: Blackwell Pub, 2008. ISBN 978-1-4051-6335-4.
- [8] HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K., ALDAYA, M. M., MEKONNEN, M. M. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. London, Washington, DC: Earthscan, 2011. ISBN 978-1-84971-279-8.
- [9] HOEKSTRA, A. Y., HUNG, P. Q. Globalisation of Water Resources: International Virtual Water Flows in Relation to Crop Trade. *Global Environmental Change* [on-line]. 2005, 15(1), s. 45–56. ISSN 09593780. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.06.004>
- [10] YI, J., GERBENS-LEENES, P. W., ALDAYA, M. M. Crop Grey Water Footprints in China: The Impact of Pesticides on Water Pollution. *Science of The Total Environment* [on-line]. 2024, 935, 173464. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173464>
- [11] MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A. Y. *National Water Footprint Accounts: The Green, Blue and Grey Water Footprint of Production and Consumption* [on-line]. 50. Delft, The Netherlands: UNESCO-IHE. 2011 [citováno 2018-02-03]. Value of Water Research Report Series. Dostupné z: <http://waterfootprint.org/media/downloads/Report50-NationalWaterFootprints-Vol1.pdf>

[12] FRANKE, N. A., BOYACIOGLU, H., HOEKSTRA, A. Y. *The Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines* [on-line]. Delft, The Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2013 [citováno 2018-05-24]. Water Research Report Series, 65. Dostupné z: <http://waterfootprint.org/media/downloads/Report65-GreyWaterFootprint-Guidelines.pdf>

[13] DULIO, V., KOSCHORRECK, J., VAN BAVEL, B., VAN DEN BRINK, P., HOLLENDER, J., MUNTHE, J., SCHLABACH, M., AALIZADEH, R., AGERSTRAND, M., AHRENS, L., ALLAN, I., ALYGIZAKIS, N., BARCELO, D., BOHLIN-NIZZETTO, P., BOUTROUP, S., BRACK, W., BRESSY, A., CHRISTENSEN, J. H., CIRKA, L., COVACI, A., DERKSEN, A., DEVILLER, G., DINGEMANS, M. M. L., ENGWALL, M., FATTAKASSINOS, D., GAGO-FERRERO, P., HERNÁNDEZ, F., HERZKE, D., HILSCHEROVÁ, K., HOLLERT, H., JUNGHANS, M., KASPRZYK-HORDERN, B., KEITER, S., KOOLS, S. A. E., KRUBE, A., LAMBROPOULOU, D., LAMOREE, M., LEONARDS, P., LOPEZ, B., LÓPEZ DE ALDA, M., LUNDY, L., MAKOVINSKÁ, J., MARIGÓMEZ, I., MARTIN, J. W., MCHUGH, B., MIÈGE, C., O'TOOLE, S., PERKOLA, N., POLESELLO, S., POSTHUMA, L., RODRIGUEZ-MOZAZ, S., ROESSINK, I., ROSTKOWSKI, P., RUEDEL, H., SAMANIPOUR, S., SCHULZE, T., SCHYMANSKI, E. L., SENGL, M., TARÁBEK, P., TEN HULSCHER, D., THOMAIDIS, N., TOGOLA, A., VALSECCHI, S., VAN LEEUWEN, S., VON DER OHE, P., VORKAMP, K., VRANA, B., SLOBODNIK, J. The NORMAN Association and the European Partnership for Chemicals Risk Assessment (PARC): Let's Cooperate! *Environmental Sciences Europe* [on-line]. 2020, 32(1), 100. ISSN 2190-4707, 2190-4715. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00375-w>

[14] ANSORGE, L., STEJSKALOVÁ, L., SOLDÁN, P. Nové znečišťující látky v odpadních vodách – výsledky Společného průzkumu Dunaje 4 pohledem šedé vodní stopy. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* [on-line]. 2024, 66(1), s. 38. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2023.11.002>

[15] MARTÍNEZ-ALCALÁ, I., PELLICER-MARTÍNEZ, F., FERNÁNDEZ-LÓPEZ, C. Pharmaceutical Grey Water Footprint: Accounting, Influence of Wastewater Treatment Plants and Implications of the Reuse. *Water Research* [on-line]. 2018, 135, s. 278–287. ISSN 0043-1354. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.033>

[16] WÖHLER, L., NIEBAUM, G., KROL, M., HOEKSTRA, A. Y. The Grey Water Footprint of Human and Veterinary Pharmaceuticals. *Water Research X* [on-line]. 2020, 7, 100044. ISSN 2589-9147. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2020.100044>

[17] WÖHLER, L., BROUWER, P., AUGUSTIJN, D. C. M., HOEKSTRA, A. Y., HOGEBOOM, R. J., IRVINE, B., LÄMMCHEN, V., NIEBAUM, G., KROL, M. S. An Integrated Modelling Approach to Derive the Grey Water Footprint of Veterinary Antibiotics. *Environmental Pollution* [on-line]. 2021, 288, 117746. ISSN 0269-7491. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117746>

[18] PARAIBA, L. C., PAZIANOTTO, R. A. A., LUIZ, A. J. B., MAIA, A. D. H. N., JONSSON, C. M. A Mathematical Model to Estimate the Volume of Grey Water of Pesticide Mixtures. *Spanish Journal of Agricultural Research* [on-line]. 2014, 12(2), s. 509–518. ISSN 2171-9292, 1695-971X. Dostupné z: <https://doi.org/10.5424/sjar/2014122-4059>

[19] BORSATO, E., GALINDO, A., TAROLLI, P., SARTORI, L., MARINELLO, F. Evaluation of the Grey Water Footprint Comparing the Indirect Effects of Different

Agricultural Practices. *Sustainability* [on-line]. 2018, 10(11), 3992. ISSN 2071-1050.
Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su10113992>

[20] BARRETO, M. D. L. P., NETTO, A. M., SILVA, J. P. S. D., AMARAL, A., BORGES, E., FRANÇA, E. J. D., VALE, R. L. Gray Water Footprint Assessment for Pesticide Mixtures Applied to a Sugarcane Crop in Brazil: A Comparison between Two Models. *Journal of Cleaner Production* [on-line]. 2020, 276, 124254. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124254>

[21] ANSORGE, L., STEJSKALOVA, L., DLABAL, J. Effect of WWTP Size on Grey Water Footprint-Czech Republic Case Study. *Environmental Research Letters* [on-line]. 2020, 15(10), 104020. ISSN 1748-9326. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba6ae>

[22] LAHLOU, F.-Z., MACKEY, H. R., AL-ANSARI, T. Towards the Development of an Improved Mass Balance and Water Quality Index Based Grey Water Footprint Model. *Environmental and Sustainability Indicators* [on-line]. 2023, 18, 100236. ISSN 2665-9727. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100236>

[23] LI, H., LIU, G., YANG, Z. Improved Gray Water Footprint Calculation Method Based on a Mass-Balance Model and on Fuzzy Synthetic Evaluation. *Journal of Cleaner Production* [on-line]. 2019, 219, s. 377–390. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.080>

[24] L'HARIDON, J., MARTZ, P., CHENÉBLE, J.-C., CAMPION, J.-F., COLOMBE, L. Ecodesign of Cosmetic Formulae: Methodology and Application. *International Journal of Cosmetic Science* [on-line]. 2018, 40(2), s. 165–177. ISSN 0142-5463, 1468-2494. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ics.12448>

Autoři

Ing. Dagmar Vološínová

dagmar.volosinova@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-1195-7046

Ing. Libor Ansorge, Ph.D.

libor.ansorge@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-3963-8290

Mgr. Lada Stejskalová

lada.stejskalova@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-2271-7574

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha (Česká republika)

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2025.03.001

ISSN 0322-8916/© 2025 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

GREY WATER FOOTPRINT OF MALTING BARLEY PRODUCTION

VOLOŠINOVÁ, D.; ANSORGE, L.; STEJSKALOVÁ, L.

T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague (Czech Republic)

Keywords: grey water footprint – micropollutants – pesticides – fertilizers – malting barley

Agriculture is the world's main freshwater consumer and contributes to its contamination through fertilizers and pesticides. This article focuses on the grey water footprint (GWF) as an environmental indicator assessing the impact of agricultural production on water resources. The study analyses the GWF of malting barley cultivation on an area of 9,674 ha in different regions of the Czech Republic. Special emphasis is placed on including pesticides in the GWF calculation, as their impact on freshwater ecosystems and human health may exceed the effect of fertilizers. The analysis shows that insecticides have the highest GWF, especially Deltamethrin, whose GWF is an order of magnitude higher than other agrochemicals. The study underlines the importance of including pesticides in future GWF assessments to better assess the environmental impacts of agricultural production and optimize sustainable water resource management strategies. At the same time, the study discusses different approaches to including biologically active substances in grey water footprint models.