

Stavební odpad jako náhrada jemné frakce v betonech – hodnocení fytotoxicity vůči okřehku

Construction waste as a substitute for fine fraction in concrete – evaluation of phytotoxicity against duckweed

Hedvika Roztočilová¹ | Diana Mariaková² | Klára Anna Mocová³

INFORMACE O ČLÁNKU

DOI 10.35933/ENTECHO.2021.002

HISTORIE

Datum doručení: 4. 2. 2021

Datum revize: 29. 4. 2021

Datum akceptace: 30. 5. 2021

AFILACE

Ústav chemie ochrany prostředí
VŠCHT Praha,

Technická 5, 166 28 Praha 6

¹ roztocih@vscht.cz

+420 731 847 198

0000-0002-8198-4894

³ Klara.Mocova@vscht.cz

+420 736 102 221

0000-0002-6832-682X

Univerzitní centrum energeticky
efektivních budov ČVUT

Třínecká 1024, 272 43 Buštěhrad

² Diana.Mariakova@cvut.cz

+420 725 008 285

0000-0003-0181-9248

KLÍČOVÁ SLOVA

Lemna minor; fytotoxicita; stavební odpad z demolic; recyklované písky; beton

KEYWORDS

Lemna minor; phytotoxicity; construction demolition waste; recycled aggregates; concrete

SOUHRN

Stavebnictví patří mezi největší odběratele nerostných surovin, s čímž souvisí i následná produkce odpadů. Výroba nejvíce využívaných produktů v tomto odvětví, jako jsou například cihly a betony, je v současné době závislá na neustálé těžbě primárních materiálů z neobnovitelných zdrojů. Značný potenciál pro ušetření primárních zdrojů má ve stavebnictví opětovné využívání recyklátů. Pro využití odpadních materiálů jako náhrady určité složky betonu je důležité, aby byly zachovány jeho mechanické a chemické vlastnosti. Současně je na místě posoudit také míru dopadu na životní prostředí. Jednou z možností je provést výluhové zkoušky a následné testy ekotoxicity s vodními organismy.

Cílem této práce bylo posoudit a porovnat fytotoxické účinky výluhů cihelného prachu, tří druhů písků z betonových recyklátů a referenčního materiálu (přírodního písku). Hodnocen byl růst biomasy a množství chlorofylu. Výsledky ukázaly velké rozdíly mezi vzorky. Písek nepůsobil toxic-ky, účinky výluhu cihelného prachu se téměř nelišily od kontroly. Beton, který byl již jednou recyklován, působil mírně inhibičně, zatímco výluhy podlahového betonu s obsahem epoxidového lepidla a betonu pocházejícího z dálnice měly výrazné toxické až letální účinky.

SUMMARY

Construction sector is one of the largest consumers of mineral resources, which is also related to the subsequent production of waste. The production of the most widely used products in this sector, such as bricks and concrete, is currently dependent on the constant extraction of primary materials from non-renewable resources. The reuse of recycled materials in the construction industry has considerable potential for saving of the primary resources. For the use of waste materials as a substitute for a certain component of concrete, it is important that its mechanical and chemical features remain unchanged. At the same time, it is appropriate to assess the degree of impact on the environment. One option is to perform leaching tests and subsequent ecotoxicity tests with aquatic organisms.

The aim of this study was to determine and compare the phytotoxic effects of brick powder extracts, three types of recycled concrete aggregate and reference material (natural aggregate). Biomass growth and chlorophyll levels were evaluated. The results showed large differences among the samples. The sand was not toxic, the effect of brick dust was almost the same as the control. Concrete, which has already been recycled once, had a slightly inhibitory effect, while extracts of floor concrete containing epoxy glue and concrete from the highway had significant toxic to lethal effects.

1 Úvod

V dnešní moderní době, nabízející stále nové možnosti nejen v oblasti bydlení a cestování, představuje nezastupitelnou úlohu stavební průmysl. Stavebnictví patří mezi největší odběratele nerostných surovin, s čímž souvisí i následná produkce odpadů. Právě každoročně narůstající množství odpadů a vyčerpávání neobnovitelných přírodních zdrojů jsou jedny z hlavních problémů současné společnosti. V roce 2019 bylo vyprodukováno 1,55⁷ tun stavebního a demoličního odpadu, což činí 42 % z celkového množství odpadu (ČSÚ, 2021). Z toho se opětovně využívá přibližně 40 % a zbytek končí většinou na skládkách, protože se jedná o z větší části nespálitelný materiál. Rozvíjejí se proto meto-

dy k opětovnému využívání odpadů ve formě sekundárních materiálů. Na tomto konceptu staví cirkulární ekonomika, jejíž hlavní myšlenkou je snižování množství odpadů a zároveň zachování primárních zdrojů surovin. To je klíčové ke zredukování ekologických zátěží pro životní prostředí a zlepšení jeho kvality.

Výroba nejvíce využívaných produktů ve stavebnictví, jako jsou například cihly a betony, je v současné době závislá na neustálé těžbě primárních materiálů z neobnovitelných zdrojů. Podobně je tomu i u tepelných izolací, například minerální vaty nebo polystyrenu. Moderní stavebnictví je na začátku zkoumání a využívání trvale udržitelných surovin. Mezi ty můžeme zařadit používání ovčí vlny jako izolačního materiálu nebo využití korku a bambusu (Elemental Green, 2019).

Značný potenciál pro ušetření primárních zdrojů má ve stavebnictví opětovné využívání různých recyklátů. Největší podíl recyklátů se využívá jako zásypový materiál nebo na podklad dopravních staveb. Jedná se především o recykláty betonové, cihelné a asfaltové. Například cihelný recyklát se využívá na červenou antuku pro povrchy sportovišť nebo po technologické úpravě jako vstupní surovina do nových cihel a prefabrikátů (Brožová a Kuntová, 2016).

Vzhledem k tomu, že beton je nepoužívanějším vyráběným materiálem na světě, má největší význam zabývat se možnostmi snížení právě jeho dopadu na životní prostředí (Hájek et al., 2011). Ročně se na světě vyrobí 2×10^{10} tun betonu. Pro výrobu běžného betonu je potřeba 41 % kameniva (hrubá frakce), 26 % písku (jemná frakce), 11 % cementu, zbytek tvoří voda, vzduch, přísady a příměsi (Benghida, 2016). Jedná se tedy o primární neobnovitelné suroviny, které celosvětově dochází a je nutné zabývat se možnostmi jejich náhrady v betonech. Největší environmentální dopad betonu má na svědomí cement. Jeho výroba představuje téměř 10 % celosvětové antropogenní produkce CO_2 (Moumin et al., 2020). Cement slouží v betonu jako pojivo a jeho nahrazování sekundárními zdroji je značně problematické, lze jej nahradit jen z malé části. Nejlépe nahraditelná část je plnivo – hrubá a jemná frakce, která má v betonu prioritní zastoupení. Jejich nahrazením se dá tudíž významně snížit množství těžných primárních surovin.

Celosvětové zásoby kvalitního písku pro betonářský průmysl se snižují. Globálním problémem je otázka, jak toto nedostatkové zboží co nejlépe nahradit. Jednou z cest je využití stavebních a demoličních odpadů – betonových a cihelných recyklátů. To vede k současnému vyřešení dvou problémů – náhrada nerostné suroviny a snížení množství nevyužitých odpadních materiálů, končících na skládkách. Výzkumy potvrzují, že je možné nahradit až 45 % betonové směsi rozemletým cihelným a betonovým odpadem (Raini et al., 2020). Další možností je nahrazení písku skleněným prachem a rozemletým demoličním odpadem. V tomto případě bylo takto experimentálně nahrazeno 100 % písku bez výrazného ovlivnění vlastností výsledného betonu (Khan et al., 2020). Jeden z dalších nejnovějších výzkumů dokládá možnost nahrazení 25 % písku drtí z pneumatik při zachování všech potřebných vlastností (Gajendra Rajan et al., 2021). Potenciální využití má také plastový nebo uhelný odpad. Z uvedených možností můžeme předpokládat, že nejlépe budou využitelné stavební odpady – cihelné a betonové recykláty jako náhrada jemné frakce v betonech. Tyto recykláty jsou nejlépe dostupné, dlouhodobě používané, takže u nich nehrozí riziko výrazně negativního ovlivnění vlastností a po dosloužení se dají opět znovu využít.

Pro využití odpadních materiálů jako náhrady určité složky betonu je důležité zachování potřebných mechanických a chemických vlastností materiálu. Beton si musí zachovat svou pevnost v tlaku, trvanlivost, hustotu a odolnost. Nahrazením velké nebo nevhodné části složek by se mohly vlastnosti tohoto konstrukčního materiálu ohrozit, je tudíž podstatné tyto nové materiály pečlivě testovat. Pro následné reálné využití jsou také nezbytné testy pro potvrzení ekologické nezávadnosti. Je třeba mít jistotu, že nedojde k ohrožení okolního ekosystému a k tomuto účelu se využívají různé ekotoxické testy na modelových organismech.

2 Experimentální část

2.1 Materiál

2.1.1 Rostliny

Pro provedení testů byla použita kultura vodní rostliny – okřešku menšího. Okřehek menší (*Lemna minor*) odrůdy Steinberg pocházel z UBA Berlin.

2.1.2 Vzorky a živné roztoky

Testováno bylo 5 různých stavebních materiálů a recyklátů (Tab. 1).

Tabulka 1: Testované vzorky

Testovaný výluh	Zkratka	Informace o materiálu
Písek	P	Referenční materiál
Cihla	C	Cihelný prach
Beton – recyklát	BR	Již použit 2x ve stavbě
Beton – z dálnice	BD	Beton z dálnice s vysokým obsahem cementu
Beton – z podlahy	BP-L	Beton s obsahem lepidla na bázi epoxidu

Pro přípravu výluhů byly použity vzorky materiálů ve formě jemné frakce s velikostí částic ≤ 4 mm.

Pro kultivaci okřešku jako ředící voda bylo použito modifikované Steinbergovo médium (ČNI, 2007). Jeho složení je uvedeno v Tab. 2. Na přípravu 1 l média bylo odměřeno 20 ml ze zásobních roztoků I a II a 1 ml z roztoků III a IV a doplněno destilovanou vodou po rysku. pH Steinbergova média bylo vždy upraveno na hodnotu 5,5 pomocí 1M HCl a 1M NaOH.

Tabulka 2: Steinbergovo médium pro okřehek

Zásobní roztok	Chemikálie	Koncentrace [g/l]	Zdroj
I	KNO_3	17,50	Sigma – Aldrich
	KH_2PO_4	4,50	
	K_2HPO_4	0,63	
II	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	5,00	Sigma – Aldrich
	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	14,75	
Zásobní roztok	Chemikálie	Koncentrace [mg/l]	Zdroj
III	H_3BO_3	120,00	Sigma – Aldrich
	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	180,00	
	$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	44,00	
	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	180,00	
IV	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	760,00	Sigma – Aldrich
	$Na_2-EDTA \cdot H_2O$	1 500,00	

Pro extrakci chlorofylu byl použit methanol od firmy PENTA s. r. o.

2.2 Příprava výluhů

Testované výluhy byly připravovány podle normy ČSN EN 12457-4 (ČNI, 2003). Nejprve byly umístěny v dvoulitrových zásobních lahvích na překlopnou třepačku s rychlostí 5 otáček za minutu na 24 hodin. Poté na 10 minut na centrifugu s frekvencí otáčení 4 600 otáček za minutu. Následně byly výluhy přefiltrovány a bezprostředně poté jim bylo změřeno pH a konduktivita (elektrická vodivost) při laboratorní teplotě. Před provedením testů fyto toxicity byly vzorky skladovány při 4 °C.

V případě měření obsahu vybraných prvků byly výluhy okyseleny pomocí HCl na hodnotu pH 2 a roztoky přefiltrovány přes filtr s velikostí pórů 5 μ m. Stanovení obsahu Ca, Na, Zn, B, Mo probíhalo metodou AAS na přístroji Agilent 280FS AA s plamenovou technikou atomizace.

2.3 Příprava koncentračních řad

Testované výluhy byly připraveny v podobě roztoků koncentrační řady. Získaný výluh byl postupně ředěn na požadované koncentrace živným roztokem. Rozpětí koncentračních řad bylo voleno s ohledem na to-

xicitu výluhů i citlivost modelových organismů. Použité koncentrace u vzorků výluhů P, C, BR byly: 41; 51; 64; 80; 100 objemových % a 100% výluh obohacený solemi. U vzorku BD byly koncentrace: 1,56; 3,125; 6,25; 12,5; 25; 50; 100; 100 + soli % obj. U vzorku BP-L 6,25; 12,5; 25; 50; 100; 100 + soli % obj. Uvedené koncentrace odpovídají procentuálnímu obsahu výluhu v živném roztoku a vždy byly ještě prováděny kontroly pouze s živným roztokem (100% H₂O + soli), čistou destilovanou vodou (100% H₂O) a koncentrační řadou směsí destilované vody a živného roztoku v rozmezí 41–80% H₂O. Každé ředění výluhu bylo reprezentováno 3 opakováními, kontroly byly připraveny ve 4–5 opakováních.

2.4 Test toxicity na okřešku menším

Metodika testu vycházela z normy (ČNI, 2007). Okřehek byl ze sterilní kultury pěstované na agaru nejprve přemístěn do tekutého Steinbergova kultivačního média, aby se rozrostl a adaptoval. Týden poté byl okřehek opatrně přenesen do čerstvého kultivačního média, kde rostl další týden. Pro nasazení testu bylo opět připraveno čerstvé Steinbergovo médium. Jako ředící voda bylo použito Steinbergovo médium dle **Tab. 2**.

Test byl proveden v kádinkách, které se plnily 100 ml roztoku nebo kontrolního média. Do každé kádinky bylo přeneseno pinzetou 10 stélek okřešku. Jednotlivé kádinky byly uzavřeny průhlednou fólií a poté byla každá zvlášť vyfotografována. Do jedné kádinky obsahující pouze 100 ml vody bylo umístěno centimetrové čtvercové voděodolné měřítko. Tato kádinka byla také vyfotografována pro pozdější kalibraci. Poté byly umístěny pod zdroj světla (6 500–10 000 lux) a tepla (24 ± 2 °C). Po 96 hodinách byly kádinky opět jednotlivě vyfoceny. Po dalších 72 hodinách – 7. den byly vzorky naposledy vyfoceny a testování bylo ukončeno.

Následně byl okřehek přemístěn z kádinek do zkumavek, a to tak, že veškerá biomasa z jedné kádinky byla vložena do jedné zkumavky. Okřehek byl před umístěním do zkumavek vysušen buničinou a poté zalit vždy 8 ml methanolu (99,8%) pro extrakci chlorofylu. Extrakce probíhala 2–4 dny v chladu a temnu.

Po extrakci byly zkumavky umístěny do centrifugy. Odstředování probíhalo po dobu 10 minut rychlostí 4 500 otáček/min při 4 °C na centrifuze Rotanta 460R značky Hettich. Pak byla měřena absorbance při vlnových délkách 652 nm a 665 nm na přístroji UV-1900 (Shimadzu).

Digitální obrazovou analýzou byla v programu NIS – Elements (Laboratory Imaging, 2019) vyhodnocena celková plocha stélek pro následný výpočet růstové rychlosti.

2.5 Výpočty

2.5.1 Výpočet růstové rychlosti u okřešku

Pro každou testovanou koncentraci a kontrolu byla z údajů o velikosti listové plochy na začátku, uprostřed a na konci testu vypočítána růstová rychlost.

$$\mu = \frac{\ln N_n - \ln N_0}{t_n} \quad (1)$$

N_0 velikost plochy na počátku testu

N_n velikost plochy po době n

t_n doba trvání testu (růstového období) ve dnech

2.5.2 Výpočet obsahu chlorofylu

Výpočet chlorofylu byl proveden podle autora Wellburna (1994). Obsah celkového chlorofylu byl vyjádřen v μg na jednotku celkové listové plochy okřešku.

$$C_{Chl a} = 15,65 \times A_{666} - 7,34 \times A_{653} \quad (2)$$

$$C_{Chl b} = 27,05 \times A_{653} - 11,21 \times A_{666} \quad (3)$$

$$C_{Chl celk} = C_{Chl a} + C_{Chl b} \quad (4)$$

$C_{Chl a}$ koncentrace chlorofylu a [$\mu\text{g}/\text{ml}$]

$C_{Chl b}$ koncentrace chlorofylu b [$\mu\text{g}/\text{ml}$]

$C_{Chl celk}$ celková koncentrace chlorofylu [$\mu\text{g}/\text{ml}$]

A_{666} absorbance při 666 nm

A_{653} absorbance při 653 nm

2.5.3 Vyhodnocení výsledků

Z naměřených hodnot rychlosti růstu a obsahu chlorofylu byly u jednotlivých koncentrací výluhů a kontrol vypočteny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky.

3 Výsledky a diskuze

Na **Obr. 1–4** jsou zobrazeny účinky testovaných materiálů na obsah chlorofylu a růstovou rychlost okřešku. Hodnoty měřených charakteristik byly vždy srovnány s kontrolou, kterou představovala odpovídajícím způsobem zředěná destilovaná voda. V **Tab. 3, 4** jsou uvedeny vlastnosti výluhů a kontrolních médií. Na **Obr. 5** je znázorněna odezva okřešku na různé koncentrace destilované vody sedmý den testování.

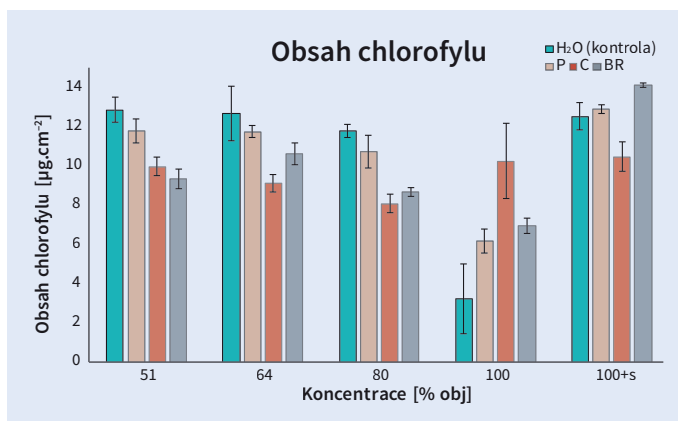
Okřehek je zcela závislý na příjmu živin z vody, ve které se vyskytuje, a proto na něj mají neobohacené roztoky výrazný vliv. Destilovaná voda s nulovým obsahem živin, která byla naředěná na testovanou koncentraci výluhu vzorku, sloužila jako kontrolní koncentrace. Srovnáním výluhů s touto kontrolou bylo zjištěno, jestli byl okřehek ovlivňován pouze nedostatkem živin ve výluzech nebo i toxickými vlastnostmi vzorků. Z **Obr. 1, 2 a 5e** je zřejmé, že negativně působí pouze čistá destilovaná voda. Při přidávku 20% živného roztoku (tj. 80% koncentrace destilované vody) již negativní účinky ustupují a hodnoty měřených charakteristik jsou srovnatelné s kontrolní hodnotou – živným roztokem. Z tohoto důvodu byla testována destilovaná voda pouze v intervalu 51%–100% a nižší koncentrace jsou již považovány za nevýznamné. Vzhledem k tomu je na **Obr. 3 a 4** uvedena pouze jedna kontrolní hodnota, a to 100% živný roztok.

Písek, jako referenční materiál, byl srovnatelný s kontrolními hodnotami. Výjimku představuje 100% koncentrace výluhu, kde jsou až o polovinu nižší hodnoty obsahu chlorofylu a růstové rychlosti (**Obr. 1, 2**). Tento jev je způsoben velmi pravděpodobně nedostatkem živin ve výluhu, nikoliv přítomností toxických látek. Z **Tab. 3, 4** je zřejmé, že výluh písku má velmi nízkou konduktivitu a obsah prvků je také minimální. Po obohacení výluhu živnými solemi rostliny opět prospívají a oproti kontrole vykazují mírnou stimulaci.

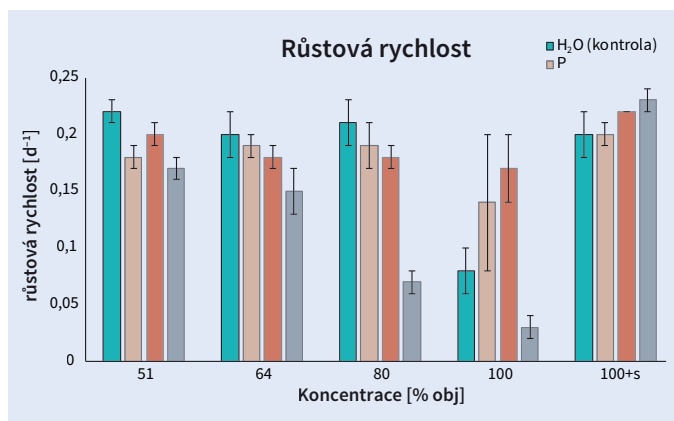
Vzorek cihelného výluhu působil ve všech recyklátů nejméně inhibičně. Na rozdíl od písku, 100% koncentrace neměla tak výrazný vliv na okřehek (**Obr. 1, 2**). Z konduktivity a obsahu prvků můžeme usuzovat, že z cihelného recyklátu se uvolnilo podstatně více iontů (**Tab. 3, 4**). Růstová rychlost je ve všech koncentracích téměř srovnatelná s kontrolou.

Betonový recyklát působil ve vyšších koncentracích inhibičně na růst okřešku. Při 80% koncentraci výluhu je již patrný nižší růst v porovnání s kontrolou (**Obr. 1**). Obsah chlorofylu byl ovlivněn i v nižších koncentracích, ale listy nevykazovaly známky nekrózy. Inhibiční působení bylo pravděpodobně způsobeno i vyšší hodnotou pH, po naředění na 64% a více se hodnoty sledovaných charakteristik začínají blížit kontrole. Písek, cihelný a betonový recyklát lze považovat za netoxické vzorky.

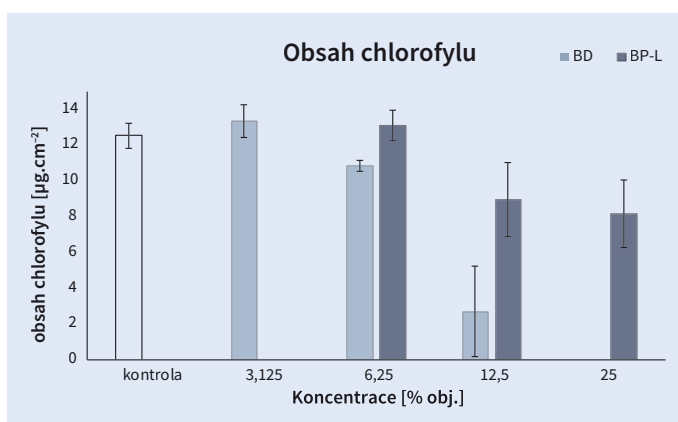
Naopak beton z dálnice se jeví jako nejvíce toxický ze všech testovaných vzorků. Na okřehek působil výrazně inhibičně i při naředění na 12,5%. Při koncentraci 25% již listy okřešku podlely úplné nekróze, a to za pouhý jeden den a poté byly vyloučeny z testu. Ani obohacení výluhu živnými solemi, na rozdíl od předchozích vzorků, nepřineslo zmírnění toxického působení. Limitujícím faktorem byla i vysoká hodnota pH – 12,2, kterou bylo obtížné snížit ředěním. Ze všech vzorků měl tento výluh také nejvyšší konduktivitu (**Tab. 3**), která byla pravděpodobně způsobena tím, že beton obsahoval vysoké množství cementu. To potvrzuje i **Tab. 4**, kde je uvedena extrémně vysoká hodnota vápní-



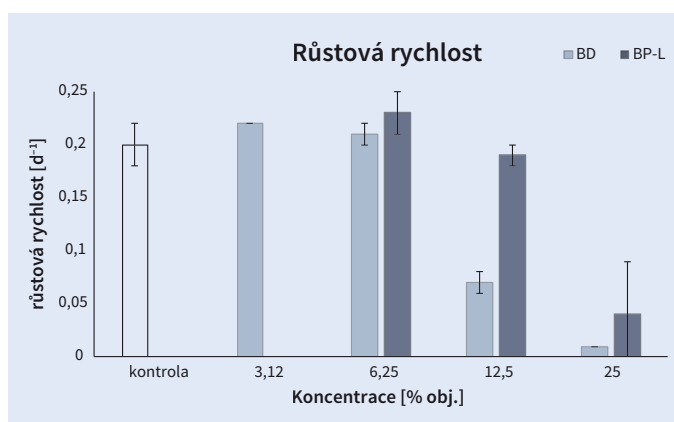
Obr. 1: Vliv vzorků písku (P), cihly (C) a betonového recyklátu (BR) na obsah chlorofylu v okřešku v porovnání s vlivem destilované vody



Obr. 2: Vliv vzorků písku (P), cihly (C) a betonového recyklátu (BR) na růstovou rychlost okřeška v porovnání s vlivem destilované vody



Obr. 3: Vliv vzorků betonu z dálnice (BD) a betonu z podlahy s obsahem lepidla (BP-L) na obsah chlorofylu v okřešku. Jako kontrola byl použit modifikovaný Steinbergův roztok



Obr. 4: Vliv vzorků betonu z dálnice (BD) a betonu z podlahy s obsahem lepidla (BP-L) na růstovou rychlost okřeška. Jako kontrola byl použit modifikovaný Steinbergův roztok

ku. Výluhy betonu s vyšším obsahem cementu jsou poměrně zásadité a způsobují například i imobilizaci dafnií (Choi et al., 2013). Při provádění experimentu bylo v kádinkách vidět velké množství vysrážených solí. Vzhledem k hodnotě pH by se mohlo jednat například o uhličitán vápenatý.

Beton s obsahem organického lepidla se projevoval o něco méně toxicky než beton z dálnice, nicméně jeho inhibiční působení bylo také vysoké. Při práci s tímto betonem byl cítit intenzivní zápach, pravděpodobně uvolňováním lepidla. Je tedy možné, že část toxické látky vytékala. Omezení růstové rychlosti nastalo při 25% koncentraci a vyšší koncentrace, jako v případě betonu z dálnice, již byly letální. Při 25% koncentraci byla zjištěna chloróza a při 50% už úplná nekroza listů.

Vliv na růst rostlin u některých vzorků mohl mít i obsah prvků ve výlužích (Tab. 4). Ve vzorcích byly sledovány prvky uvedené ve vyhlášce pro hodnocení nebezpečných vlastností odpadů, která byla platná v době provedení experimentu, tj. v roce 2020 (MŽP a MZdr, 2016). Všechny hodnoty se pohybovaly pod limitem. Dále byl hodnocen ještě obsah sodíku a vápníku. V Tab. 4 jsou uvedeny pouze ty prvky, které se přidávají rovněž do kultivačního média pro okřehek. Mezi šestnácti hodnocenými prvky se vyskytují jak toxické kovy (As, Hg, Pb), tak prvky, které jsou ve stopovém množství pro růst rostlin nezbytné. Vyvážené koncentrace hořčíku a zinku jsou nezbytné pro tvorbu chlorofylu. Zinek, molybden a bor také patří mezi esenciální mikroprvky. Těchto prvků mohly mít rostliny v neředěných a méně zředěných výlužích nedostatek. Zvýšené koncentrace boru mohou rostlinám naopak uškodit. Uvádí se, že vhodná koncentrace boru ve vodách pro závlahy je do 1 mg/l (Sýkora et al., 2016). Vysoké koncentrace vápníku a sodíku,

kteří byly detekovány ve všech výlužích s výjimkou písku, také nejsou pro rostliny vhodné.

Tabulka 3: Vlastnosti výluhů a živných médií

	pH (25 °C)	Konduktivita [μS/cm ²]
P	8,1 ± 0,6	27 ± 3
C	8,6 ± 0,0	1129 ± 6
BR	10,3 ± 0,0	545 ± 13
BD	12,2 ± 0,0	7150 ± 80
BP-L	11,7 ± 0,1	2730 ± 10
Steinbergovo médium	5,5 ± 0,1	997 ± 23

Tabulka 4: Významné prvky ve výlužích a živných médiích

ρ [mg/l]	Steinbergovo médium	Výluhy				
		C	P	BR	BD	BP-L
Ca	50,1	217	3	80	661	146
Na	0,2	21	1	14	9	10
Zn	0,04	0,02	0,03	~ 0,01	~ 0,01	~ 0,008
B	0,02	< 3	< 3	< 3	< 4	< 4
Mo	0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

V současné době existuje jen omezené množství prací zabývajících se přímým hodnocením ekotoxicity stavebních a demoličních odpadů. Ze studie (Brás et al., 2017) zabývající se náhradou jemné frakce v betonech za průmyslové odpady jako je vápenný kal a popílek z biomasy prováděné na okřešku (*Lemna gibba*) byly vyvozeny podobné závěry jako z našeho experimentu. Písek byl nahrazován uvedenými odpady z 50 a 100%. Ve výlužích se měřily tyto parametry: pH, konduktivita a oxidačně-redukční potenciál (ORP). Ve výlužích betonu bez náhrad a písku byly naměřeny velice podobné hodnoty pH jako u písku a betonu z dálnice v této studii. Konduktivita u písků se řádově lišila a při porovnání betonů byla srovnatelná s našimi vzorky. Hodnota ORP byla u písku kladná a u betonu záporná. Z ekotoxikologického hlediska byl hodnocen počet stélek okřešku a obsah chlorofylu. Žádné rostliny nevykazovaly náznaky chlorózy ani nekrózy. Ve všech vzorcích proběhl nárůst stélek bez významných odlišností od kontroly. Koncentrace chlorofylu ve vzorcích nebyla nižší než v kontrole. Naopak u vzorku betonu se 100% náhradou písku popelem z biomasy byl obsah zelených pigmentů výrazně vyšší. Toto zjištění by ovšem mohlo vyloučit použití popelu z biomasy jako vhodnou náhradu písku, protože by výsledný materiál mohl mít na svědomí eutrofizaci prostředí.

Ekotoxikologické testy související s betony byly prováděny i na dalších organismech, jako je například hrotnatka *Daphnia magna*. Tento zástupce vodních organismů se používá pro jeho snadnou kultivaci, krátkou dobu života a také je to ekologicky relevantní druh, jelikož je celosvětově rozšířen a slouží jako potrava pro mnoho druhů ryb. V různých koncentracích byly testovány výluhy portlandského cementu a jeho možných náhrad, např. vysokopecní strusky. Cement může mít pro životní prostředí negativní dopady způsobené vyluhováním těžkých kovů a jiných anorganických toxických prvků do vodního prostředí. Pro snížení těchto negativních dopadů je možné využít různých náhrad. Výluh samotného cementu s pH kolem 12 způsobil 100% imobilizaci hrotnatek ve všech testovaných koncentracích. U mleté vysokopecní strusky při koncentracích pod 12,5% bylo zaznamenáno pH kolem 8 a žádná imobilizace nebyla pozorována. Ze studie vyplývá, že jemná frakce vysokopecní strusky přispívá ke snížení ekotoxicity výsledného betonu a mohla by být z ekotoxikologického hlediska jako náhrada použita (Choi et al., 2013).

Na hrotnatkách byla prováděna i studie zaměřena na nahrazení kameniva a portlandského cementu recyklovaným betonem a elektrárenským popílkem. Nahrazovalo se 60% cementu a 100% kameniva v různých kombinacích a pozorovalo se působení různě koncentrovaných výluhů. Kromě hrotnatek byly použity i kvasinky *Saccharomyces cerevisiae* a mořské luminiscenční bakterie *Vibrio fischeri* pro komplexnější náhled na problematiku. Chemickou analýzou byly zjištěny významné koncentrace prvků: Al, Ca, Fe, Mg a Cr ve všech výlužích a ve výlužích, kde byl použit popílek z uhelných elektráren, byly navíc ve významných koncentracích: Ba, Cu, Mn, Ni, Pb a Zn. Problematicky se jeví hlavně výluhy s popílkem, který výrazně ovlivnil pohyblivost hrotnatek.

Jeho působením se také snížila luminiscence bakterií, ale růst kvasinek nebyl významně ovlivněn (Rodrigues et al., 2020).

Okřehek (*Lemna minor*) je vhodným modelovým organismem pro posuzování ekotoxicity výluhů nejen díky svému kosmopolitnímu výskytu v přírodě, ale také pro zvýšenou toleranci na výkyvy pH prostředí (mezi hodnotami 5,0 až 9,0) (ČNI, 2007). Předností tohoto organismu je možnost sledovat jak akutní, tak chronické účinky, tedy letalitu i inhibiční reprodukce. Již dříve bylo zjištěno, že okřehek je vhodným rostlinným zástupcem pro studium ekotoxicity stavebních a demoličních odpadů (Mocová et al., 2019). Také v této práci byla zvolena nedestruktivní metoda hodnocení růstu rostlinné biomasy pomocí obrazové analýzy, díky čemuž mohlo být měření doplněno ještě o sledování účinků na subbuněčné úrovni, pomocí obsahu celkového chlorofylu. Biotest v tomto uspořádání proto podává komplexnější informaci o toxicitě hodnocených vzorků.

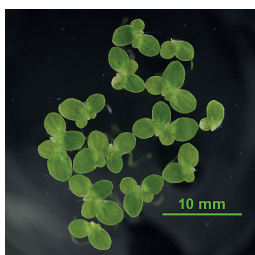
Z naší práce stejně jako z ostatních studií vyplývá, že největším problémem u stavebních a demoličních odpadů z ekotoxikologického hlediska je vysoká hodnota pH a vyluhovatelnost toxických prvků, sodíku a vápníku. Pro budoucí experimenty budou z použitých odpadních materiálů vyrobeny reálné vzorky betonu, u kterých předpokládáme celkové omezení vyluhovatelnosti prvků a tudíž i snížení ekotoxicity.

4 Závěr

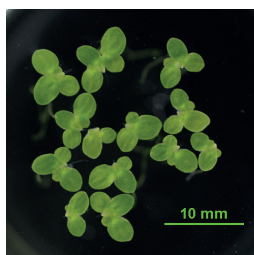
- Mezi testovanými materiály i testovacími organismy byly z ekotoxikologického hlediska značné rozdíly.
- Jako nevhodnější materiál se jeví cihelný recyklát, který nezpůsobil významné inhibiční účinky. Naopak nejtoxičtější se projevoval vzorek betonu z dálnice, u kterého se již při koncentraci výluhu 6,25% začínala ukazovat inhibice růstu a chloróza.
- Na výsledky testu měly vliv i hodnoty pH výluhů a obsahy prvků ve výlužích.
- Přestože obsahy prvků nepřekračují limity uvedené ve vyhlášce pro hodnocení nebezpečných vlastností odpadů, testy ekotoxicity ukazují výrazné toxické působení vzorků betonu z dálnice a betonu s obsahem lepidla. U betonu z dálnice nastala úplná nekróza okřešku za necelých 24 hodin, při koncentraci výluhu 25%, což naznačuje velmi výraznou toxicitu.
- Na základě výsledků ekotoxicity a technických zkoušek budou z vybraných odpadních materiálů připraveny betonové směsi a následně výrobky, které budou rovněž otestovány pomocí výluhových zkoušek.

5 Poděkování

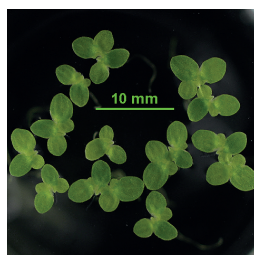
Studie byla financována z účelové podpory na specifický vysokškolský výzkum (MŠMT, č. SGS21/096/OHK1/2T/11 – Vliv chemických vlastností na použití odpadních materiálů v betonových aplikacích).



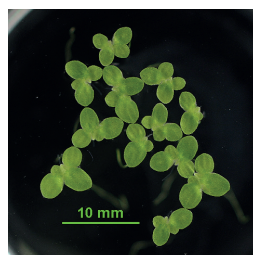
5a: Růst okřešku ve Steinbergově roztoku (destilovaná voda + soli)



5b: Růst okřešku v destilované vodě – 51%



5c: Růst okřešku v destilované vodě – 64%



5d: Růst okřešku v destilované vodě – 80%



5e: Růst okřešku v destilované vodě – 100%

Literatura

- Benghida, D., 2016. *CO₂ reduction from cement industry*, In: Advanced Materials, Mechanical and Structural Engineering – Proceedings of the 2nd International Conference of Advanced Materials, Mechanical and Structural Engineering (AMMSE 2015), Je-ju Island, South Korea, September 18-20, 2015. CRC Press, 127–130. <https://doi.org/10.1201/b19934-29>
- Brás, I.; Silva, P. C.; Almeida, R.; Silva, M. E.; Lourenço, C., 2017. *Eco-toxicity assessment of concrete prepared with industrial wastes*. Energy Procedia 136, 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.296>
- Brožová, L.; Kuntová, K., 2016. *Recyklace stavebního demoličního odpadu a jeho využití u pozemních staveb*. Business & IT 6(2), 32–50. <https://doi.org/10.14311/bit.2016.02.05>
- ČNI, 2007. *ČSN EN ISO 20079 (757745) Jakost vod – Stanovení toxických účinků složek vody a odpadní vody na okřehek (Lemna minor) – Zkouška inhibice růstu okřešku*. Český normalizační institut, Praha.
- ČNI, 2003. *ČSN EN 12457-4 (83 8005) Charakterizace odpadů – Vyluhování – Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů – Část 4: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10l/kg pro materiály se zrnitostí menší než 10 mm (bez zmenšení velikosti částic, nebo s ním)*. Český normalizační institut, Praha.
- ČSÚ, 2021. *Produkce, využití a odstranění odpadů za období 2019*. Český statistický úřad, Praha.
- Elemental Green, 2019. *10 Eco Building Materials Revolutionizing Home Construction*. <https://elemental.green/10-eco-building-materials-revolutionizing-home-construction/>
- Gajendra Rajan, R.; Sakthieswaran, N.; Ganesh Babu, O., 2021. *Experimental investigation of sustainable concrete by partial replacement of fine aggregate with treated waste tyre rubber by acidic nature*. Materials Today: Proceedings, International Conference on Newer Trends and Innovation in Mechanical Engineering: Materials Science 37, 1019–1022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.279>
- Hájek, P.; Fiala, C.; Kynčlová, M., 2011. *Life cycle assessments of concrete structures - A step towards environmental savings*. Structural Concrete. <https://doi.org/10.1002/suco.201000026>
- Choi, J. B.; Bae, S. M.; Shin, T. Y.; Ahn, K. Y.; Woo, S. D., 2013. *Evaluation of Daphniamagna for the Ecotoxicity Assessment of Alkali Leachate from Concrete*. International Journal of Industrial Entomology 26(1), 41–46. <https://doi.org/10.7852/ijie.2013.26.1.041>
- Khan, S.; Maheshwari, N.; Aglave, G.; Arora, R., 2020. *Experimental design of green concrete and assessing its suitability as a sustainable building material*. Materials Today: Proceedings, 10th International Conference of Materials Processing and Characterization 26, 1126–1130. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.225>
- Laboratory Imaging, 2019. *NIS-Elements, Laboratory Imaging*.
- Mocová, K. A.; Sackey, L. N. A.; Renkerová, P., 2019. *Environmental Impact of Concrete and Concrete-Based Construction Waste Leachates*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 290, 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012023>
- Moumin, G.; Ryssel, M.; Zhao, L.; Markewitz, P.; Sattler, C.; Robinius, M.; Stolten, D., 2020. *CO₂ emission reduction in the cement industry by using a solar calciner*. Renewable Energy 145, 1578–1596. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.045>
- MŽP; MZdr, 2016. *Vyhláška č. 94/2016 Sb., o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů*.
- Raini, I.; Jabrane, R.; Mesrar, L.; Akdim, M., 2020. *Evaluation of mortar properties by combining concrete and brick wastes as fine aggregate*. Case Studies in Construction Materials 13, e00434. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00434>
- Rodrigues, P.; Silvestre, J. D.; Flores-Colen, I.; Viegas, C. A.; Ahmed, H. H.; Kurda, R.; de Brito, J., 2020. *Evaluation of the ecotoxicological potential of fly ash and recycled concrete aggregates use in concrete*. Applied Sciences 10(1), 351. <https://doi.org/10.3390/app10010351>
- Sýkora, V.; Kujalová, H.; Pitter, P., 2016. *Hydrochemie pro studenty bakalářského studia*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha.
- Wellburn, A. R., 1994. *The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution*. Journal of Plant Physiology 144(3), 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)