

Solidifikace kalu ze zpracování odpadních vod

Mgr. Ekaterina Korotenko^{a)}, Ing. Jiří Hendrych, Ph.D.^{a)}, Ing. Pavel Mašín, Ph.D.^{b)}

^{a)}Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta technologie ochrany prostředí, Technická 5, 166 28 Praha 6; e-mail: korotene@vscht.cz

^{b)}Dekonta a.s., Dřetovice 109, 273 42 Stehelčevy

Souhrn

Příspěvek je věnován problematice stabilizace/solidifikace kalu ze zpracování odpadních vod, které pocházejí z nelegálního nakládání s galvanickými kaly kontaktovanými se silážními vodami. Předmětný kal byl zatížen vysokým obsahem těžkých kovů, rozpuštěných organických látek a anorganických solí. Solidifikáty byly vyluhovány podle ČSN EN 12457-4 a hodnoceny v souladu s vyhláškou č. 294/2005 Sb. Pro uvažované receptury byl proveden odhad nákladů.

Klíčová slova: stabilizace, solidifikace, kal, výluh, DOC.

Summary

This paper is aimed to the stabilization/solidification of sludge from wastewater treatment. Wastewater arised from illegal handling with waste galvanic sludge contacted by the silage waters. Treated sludge contained high amount of heavy metals and dissolved organic substances and inorganic salts. Solidificates were leached according to standardized method ČSN EN 12457-4 and assessed in accordance with Decree no. 294/2005 Coll. For the considered mixtures the costs were estimated.

Keywords: stabilization, solidification, sludge, leachate, DOC.

Úvod

Na anonymizované lokalitě došlo k nežádoucímu smísení odpadů ze zemědělství, obsahujících velké množství látek převážně organického původu, a odpadních vod z galvanoven, které jsou znečištěny anorganickými solemi a těžkými kovy. Celkové množství takto vzniklých odpadů činí 3-3,5 tis. m³.

Podnikatelským subjektem působícím v oblasti technické péče o životní prostředí bylo vyzkoušeno několik postupů zpracování kapalného odpadu. Žádný z nich však sám o sobě nepřinesl dostatečný efekt. Řešení se tedy bude pravděpodobně ubírat směrem víceokrového zpracování.

Hodnota pH v odpadní vodě se pohybovala kolem 2,2, vzhledem ke složení vod bylo vyloučeno jejich přijetí na libovolnou ČOV bez předchozí úpravy.

Průměrné složení odpadních vod je představeno v Tab. 1.

Tab. 1 - Charakteristiky analyzovaných odpadních vod – vybrané ukazatele [1]

Ukazatel	Koncentrace, mg/l	Ukazatel	Koncentrace, mg/l
TOC	4570	Pb	12,4
Zn	2 560	Mn	60,7
Cd	1,38	Cr	236
Sr	1,5	Al	56,0
Ba	0,36	Cl ⁻	26 000
Cu	31,3	SO ₄ ²⁻	9 400
Ni	102,9	F ⁻	917

Společností Dekonta a. s. byla provedena řada experimentů majících za cíl ověřit možnost použití různých technologií pro čištění odpadní vody. Z hlediska splnění parametrů pro přijetí analyzované vody na ČOV je účinnější kombinace srážení vody Ca(OH)₂ a reverzní osmózy kapalné fáze po sedimentaci.

Současně ještě nejsou zcela dořešeny možnosti nakládání s koncentrátem po procesu reverzní osmózy. Koncentrát bude muset být patrně stabilizován společně s odvodněným kalem a částečně by mohl být recirkulován znovu do vstupní vody určené pro reverzní osmózu.

V rámci úpravy výše popsané odpadní vody bude prováděno srážení vápnem a zahušťování vzniklého kalu.

Stěžejním cílem této práce je tedy zhodnocení možnosti stabilizace/solidifikace (S/S) předmětného kalu s různou mírou zahuštění na základě splnění výluhových zkoušek a provedení odhadu nákladů pro zvolené receptury. Technologie stabilizace/solidifikace je známou a hojně využívanou metodou zpracování odpadů, pomocí které lze snadno omezit vyluhovatelnost nežádoucích složek, předejít tím pádem jejich možné emisi do prostředí [2,3].

Experimentální práce

Vznikající nezahuštěný kal lze charakterizovat jako zapáchající materiál vykazující zeleno-černou barvu a uvolňující po dlouhodobém stání žlutě zbarvenou čirou kapalnou fází. Při kontaktu se vzduchem probíhají na povrchu kalu oxidační reakce s přítomnými kovy projevující se ve změně zbarvení.

Zkušební solidifikáty byly vytvořeny zpracováním kalů s různým způsobem předúpravy. Popisy použitých kalů jsou představeny v Tab. 2. Společně byla také charakterizována separovaná kapalná fáze z kroku zahušťování kalu (F).

Tab. 2 - Charakteristiky kalů a kapalně fáze

Označení materiálu	Popis	Obsah sušiny, [%]
F	Kapalná fáze vzniklá po odstředění a filtraci	-
K0	Původní neupravený kal	10,6
K1	Kal K0 předupravený odstředováním	16,7
K2	Kal K0 předupravený odstředováním	21,6
N	Kal z kalolisu	25,5

Při tvorbě zkušebních těles byl kal zhomogenizován pomocí tyčového mixeru, v některých případech byla do kalu přidána vodovodní voda tak, aby byla zajištěna vhodná konzistence pasty výsledného solidifikátu. Poté byl do kalu přisypáván cement. Výsledná směs byla dobře promíchána a ponechána zrát 3 týdny na vzduchu za laboratorní teploty. Poté byla tělesa podrobena vyluhovacím zkouškám. Složení solidifikačních směsí je představeno v Tab. 3.

Tab. 3 - Složení solidifikačních směsí

Receptura ¹	Hmotnost složky, [g]			Receptura	Hmotnost složky, [g]		
	Pojivo	Kal	Voda		Pojivo	Kal	Voda
K0 30/70	15,1	35,8	-	K1 80/20	44,3	11,1	7,2
K0 40/60	20,1	29,9	-	K2 30/70	15,0	35,0	-
K0 50/50	25,1	25,2	-	K2 40/60	20,0	30,6	-
K0 60/40	30,1	20,1	-	K2 50/50	25,1	25,9	-
K0 70/30	35,0	15,2	-	K2 80/20	40,1	10,1	9,6
K0 80/20	40,9	10,2	-	N 30/70	15,0	35,1	-
K1 30/70	15,0	36,4	-	N 40/60	20,0	30,1	-
K1 40/60	20,0	30,2	-	N 50/50	25,1	25,0	-
K1 50/50	25,1	25,2	-	N 60/40	30,0	20,2	3,5
K1 60/40	30,1	20,4	-	N 70/30	35,0	15,0	6,9
K1 70/30	35,0	15,7	-				

¹ Označení solidifikační směsi má formát XX YY/ZZ, kde XX je typ kalu, YY/ZZ představuje poměr pojivo/kal.

Byla provedena screeningová analýza surového kalu pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie. Na základě obsahu jednotlivých těžkých kovů a bilance a ve vztahu k limitům uvedeným ve vyhl. č. 294/2005 Sb. byly určeny kovy, které byly dále analyzovány metodou atomové absorpční spektrometrie ve vodném výluhu. Těžké kovy, které byly nalezeny ve velmi malém či neměřitelném obsahu, nebyly ve vodném výluhu stanovovány, resp. proběhlo ověření jedním stanovením u solidifikátu s největší zátěží kalu. Prioritními kovy se jeví především Cr, Ni, Cu, Zn, Pb.

Vyluhovací testy byly provedeny podle ČSN EN 12457-4 [4]. Rozdrcený vyžralý solidifikát (případně vstupní kal) po dezintegraci (velikost částic odpadu menší než 10 mm) byl vložen do uzavíratelné láhve a doplněn destilovanou vodou na poměr 10/1 vztaženo na sušinu. Láhev byla umístěna na třepačku hlava-pata na 24 hodin při rychlosti otáčení 6,5 otáček/min. Po uplynutí této doby byl obsah láhve zfiltrován přes filtr o velikosti pórů 0,45 µm. Dále byl výluh rozdělen na 2 podíly. Jeden byl ponechán beze změny pro stanovení hodnoty pH, konduktivity a zjištění obsahu rozpuštěných látek, DOC a aniontů. Druhý podíl byl okyselen pár kapkami koncentrované kyseliny dusičné pro stanovení koncentrací kovů ve výluhu.

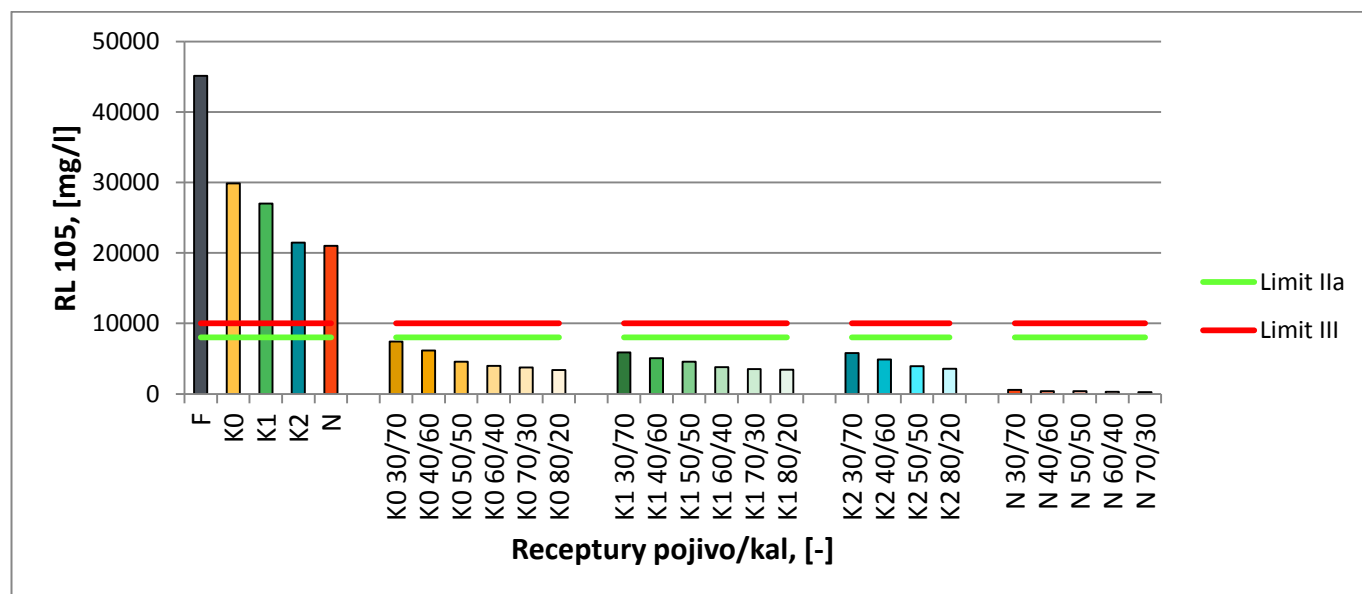
Výsledky a diskuze

Charakterizace kalů a solidifikátů – vodný výluh

V následujících grafech jsou představeny naměřené hodnoty vybraných parametrů daných vyhláškou č. 294/2005 Sb. [5]. Ačkoliv kapalná fáze F netvoří s kaly či solidifikáty sourodou skupinu vzorků, pro představu a srovnání je do následujících obrázků včleněna. Kaly a solidifikáty byly analyzovány ve vztahu k limitům výluhových tříd IIa a III.

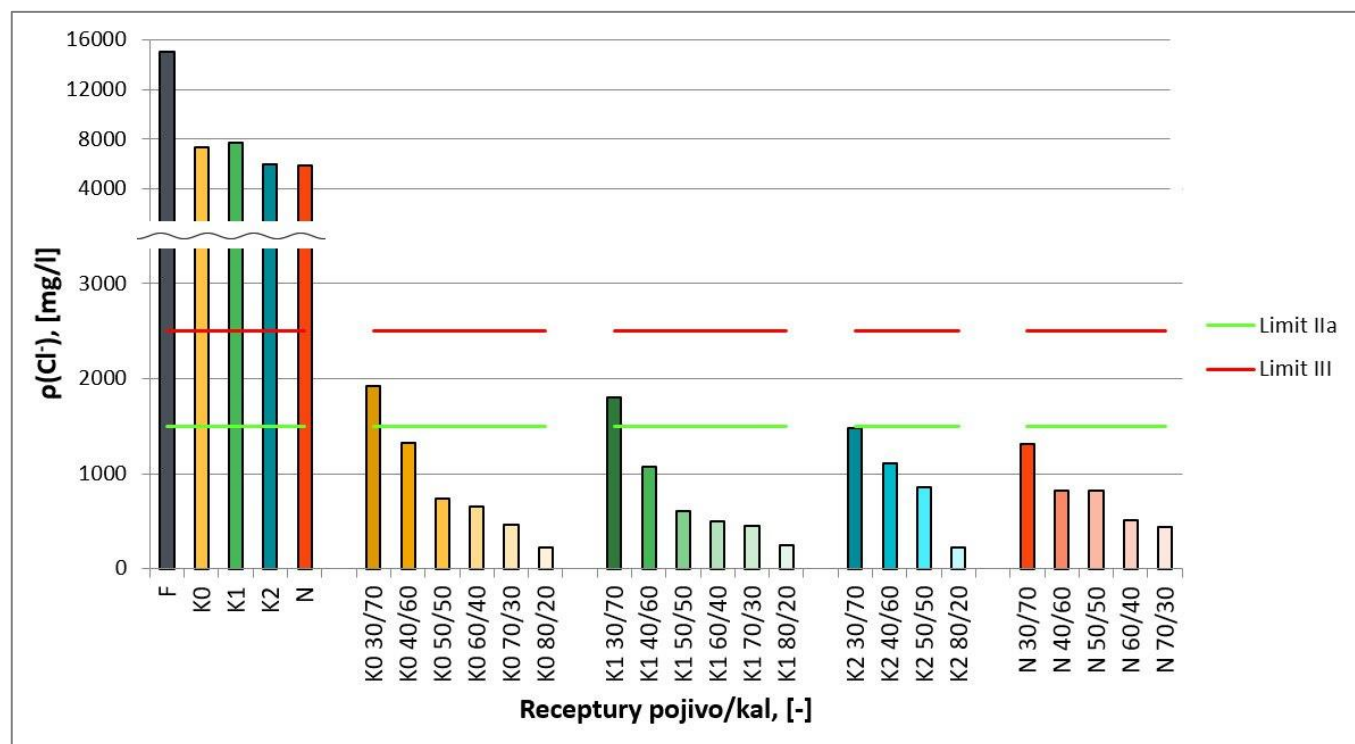
Hodnota pH – požadavek pro třídy vyluhovatelnosti IIa a III činí minimální hodnotu pH = 6. Požadavek byl splněn u všech kalů a solidifikátů. Kaly stejně jako kapalná fáze F vykazovaly hodnotu pH výluhu nad 6. Solidifikáty měly hodnotu pH výluhu vyšší, přibližně 11-12, přičemž hodnota rostla přirozeně ve směru rostoucího zastoupení cementu v solidifikátech.

Rozpuštěné látky – na Obr. 1 je uvedena hodnota parametru RL105. Požadavek pro třídu vyluhovatelnosti IIa činí maximálně 8000 mg/l, pro třídu III je roven 10000 mg/l. Kapalná fáze F obsažená v původním kalu je charakterizována vysokou koncentrací rozpuštěných látek (45000 mg/l). S rostoucí mírou odvodnění kalu hodnota tohoto ukazatele výrazně klesá, limity však nespĺňuje. Z Obr. 1 je patrné, že všechny analyzované solidifikáty splňují limit daný vyhláškou č. 294/2005 Sb., a to jak pro třídu vyluhovatelnosti III, tak pro třídu vyluhovatelnosti IIa. S rostoucím zastoupením pojiva a s rostoucí mírou zahuštění kalu klesá obsah RL105, což je podle očekávání způsobeno tím, že zbytková kapalná fáze v kalu je dominantním nositelem příspěvku rozpuštěných látek následně nalézáných ve vodném výluhu solidifikátů.



Obr. 1 – Koncentrace rozpuštěných látek v kapalně fázi F a ve výluzech z kalů a ze solidifikátů

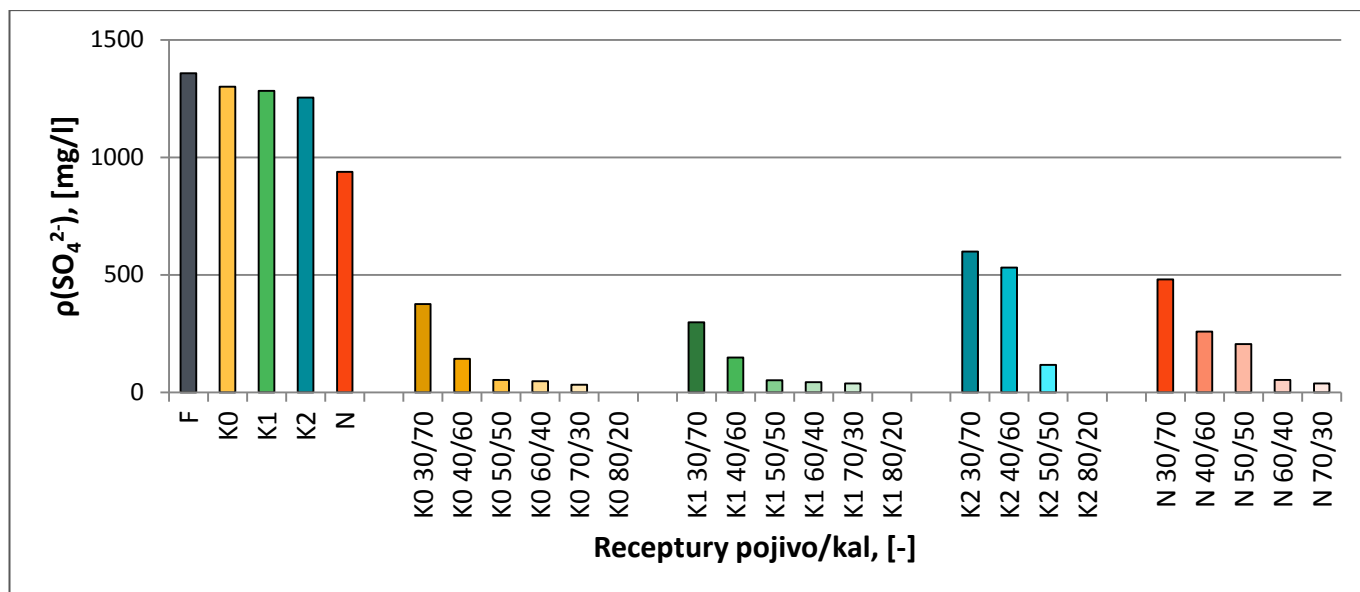
Chloridy (Obr. 2) – požadavek pro třídu vyluhovatelnosti IIa činí 1500 mg/l, pro třídu vyluhovatelnosti III – 2500 mg/l. Největší koncentrace chloridů (15000 mg/l) byla stanovena v kapalné fázi F separované ze surového kalu. Je to dáno velice dobrou rozpustností chloridů ve vodě. Předúprava odstředěním řeší problém zvýšeného obsahu chloridů jen částečně. Koncentrace chloridů ve výluzích z kalů činí 7700 mg/l pro kaly K0 a K1 a 5900 mg/l pro kaly K2 a N. Pro splnění legislativních požadavků je potřeba provést další opatření. Limit pro třídu vyluhovatelnosti IIa, jak plyne z Obr. 2, je splněn již při zkoumaném poměru pojivo/kal 40/60. Se zvyšujícím se obsahem pojiva klesá hmotnostní koncentrace Cl⁻ ve výluhu. Limit IIa je překročen pouze dvěma solidifikáty – K0 30/70 a K1 30/70. Komentář pro výskyt chloridů je obdobný jako u RL105.



Obr. 2 – Hmotnostní koncentrace chloridů v kapalné fázi F a ve výluzích z kalů a ze solidifikátů

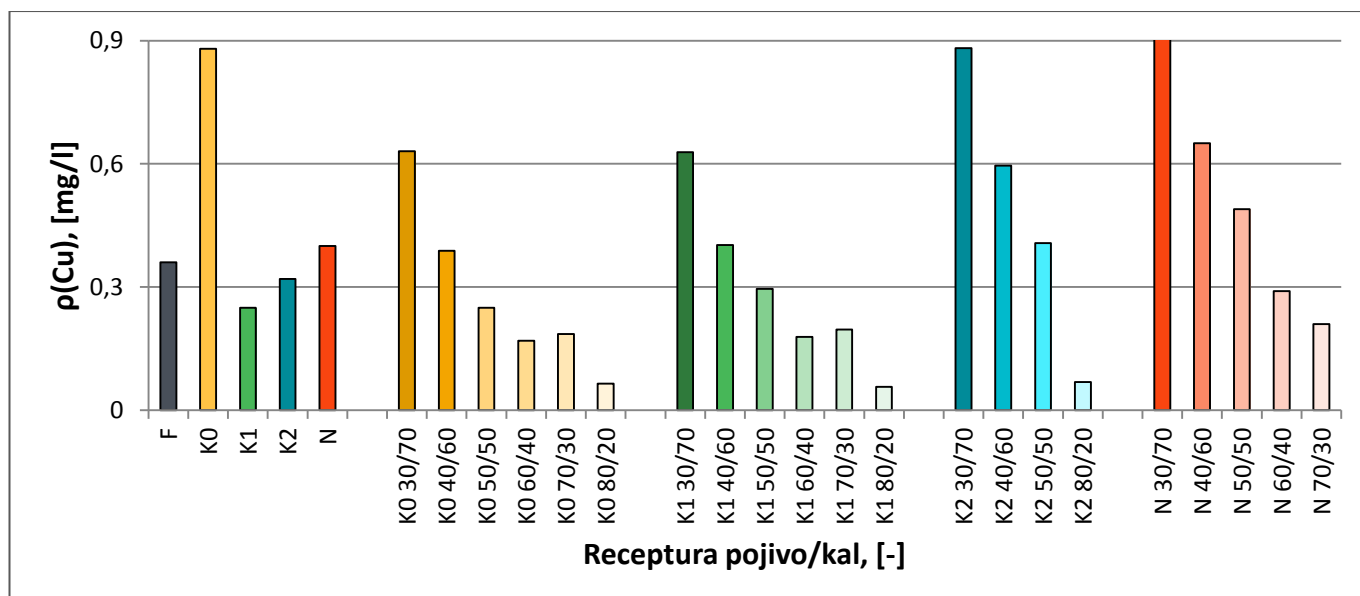
Síraný (Obr. 3) – požadavek pro třídu vyluhovatelnosti IIa činí 3000 mg/l, pro třídu vyluhovatelnosti III – 5000 mg/l. Obsah síranů nepřekročil limitní hodnoty tříd vyluhovatelností IIa a III v žádném z analyzovaných vzorků. Jako u všech předchozích parametrů klesá obsah síranu ve výluzích s rostoucím poměrem pojivo/kal.

Zřetelný trend poklesu obsahu síranů při srovnání adekvátních receptur z hlediska poměru pojivo/kal není obdobný jako u rozpuštěných látek a chloridů, je tedy zřejmé, že nakládání s odpadním proudem před vznikem kalu a jeho zahušťováním má vliv na výslednou vyluhovatelnost a obsah síranů. První srážení vápenným mlékem má za následek tvorbu síranu vápenatého, který vzhledem ke své rozpustnosti částečně přechází do kalu. Roli hraje vzájemné množství dodávaného vápenného mléka a síranů v odpadní vodě. Interakce síranů v systému odpad/pojivo za přítomnosti složek portlandského slínku rovněž nemusí být jednoduše vysvětlitelná na základě dostupných dat (tvorba různých produktů, procesy rekrystalizace apod.). Lze však konstatovat, že obsah síranů ve výluzích ze solidifikátů výrazně poklesl ve srovnání s výluhy z kalů.



Obr. 3 – Hmotnostní koncentrace síranů v kapalné fázi F a ve výluzích z kalů a ze solidifikátů

Měď (Obr. 4) – pro třídy vyluhovatelnosti IIa a III je limit roven 10 mg/l. Hmotnostní koncentrace mědi v analyzovaných vzorcích jsou podlimitní. Vzhledem k očekávanému dramatickému nárůstu pH v systému kal/pojivo je však třeba věnovat i tomuto parametru pozornost, neboť může docházet ke změnám forem výskytu a Cu může být při vyluhování solidifikátu následně mobilizována. Uvnitř jednotlivých řad se koncentrace mědi ve výluzích zmenšuje s rostoucím poměrem pojivo/kal, což svědčí o účinné stabilizaci Cu pomocí pojiv a rovněž o zmenšení relativního množství Cu v materiálu vlivem většího zastoupení pojiva. S rostoucí mírou odštědění kalu hodnota tohoto ukazatele naopak roste. Tento trend lze vysvětlit rostoucími komplexačními schopnostmi mědi v alkalickém prostředí (s rostoucí mírou odštědění roste alkalita kalů). Lze konstatovat, že uvedené jevy a vysvětlení obsahu Cu mohou být do značné míry protichůdné. Obsah mědi ve výluzích je po solidifikaci větší, než u vstupních kalů s různou mírou zahuštění, vlivem procesu S/S tedy došlo k mobilizaci tohoto kovu, z hlediska porovnání se vztažnými hodnotami však není tento parametr limitující.

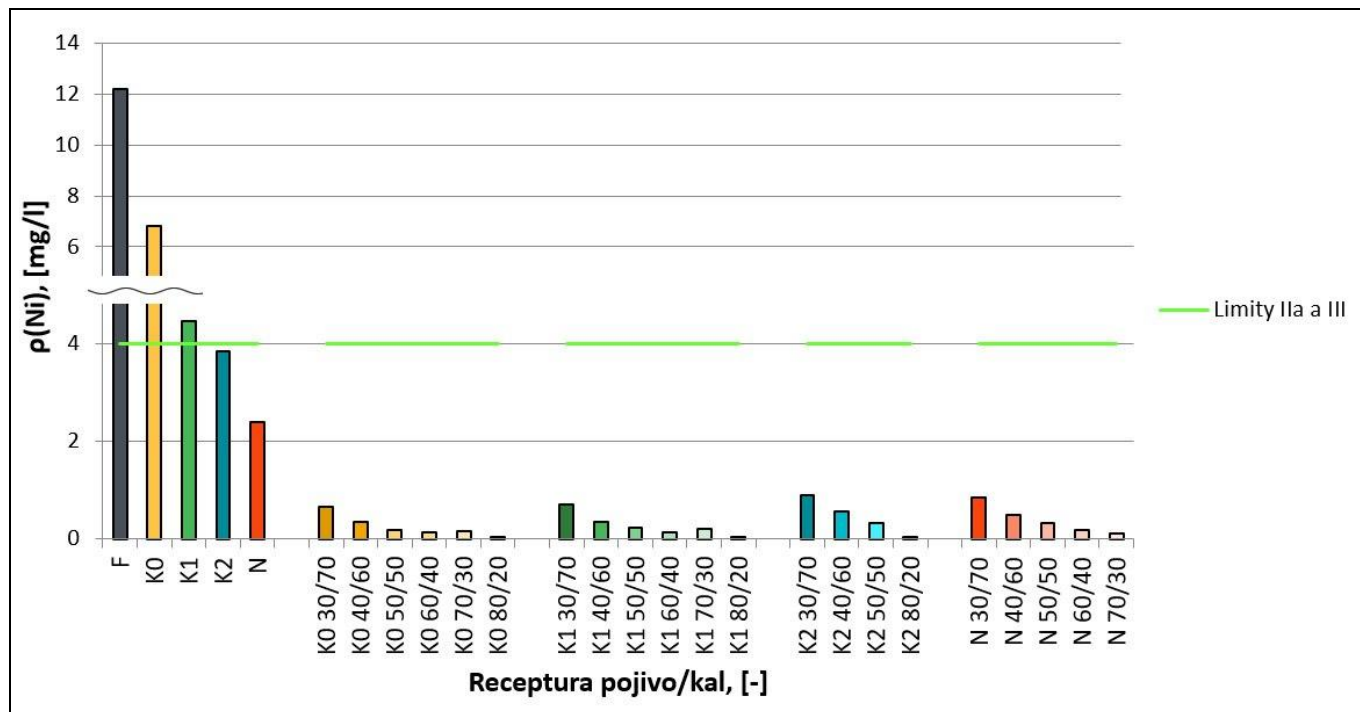


Obr. 4 – Hmotnostní koncentrace mědi v kapalné fázi F a ve výluzích z kalů a ze solidifikátů

Nikl (Obr. 5) – pro třídy vyluhovatelnosti IIa a III je limit roven 4 mg/l. Legislativní limit obsahu niklu ve vodném výluhu kalu/předupravených kalů je splněn pouze v případě kalů K2 a N. Koncentrace Ni je mnohem větší v kapalné fázi F, což svědčí o tom, že sloučeniny niklu přítomné v systému jsou rovněž

obsažené ve zbytkové kapalně fázi přetrvávající v zahušťovaných kalech. Obsah Ni ve výluzích z kalů výrazně klesá s rostoucí mírou zahuštění kalu.

Legislativní požadavky na hmotnostní koncentraci Ni ve výluzích ze solidifikátů jsou splněny. Jako v případě mědi, je patrná superpozice jevů. S rostoucím poměrem pojivo/kal klesá obsah Ni, s rostoucí mírou odstředění kalu obsah Ni ve výluhu roste. Hmotnostní koncentrace Ni ve výluzích ze solidifikátů však výrazně poklesla v porovnání s výluhy získanými z kalů.



Obr. 5 - Hmotnostní koncentrace niklu v kapalně fázi F a ve výluzích z kalů a ze solidifikátů

Zinek – pro třídy vyluhovatelnosti IIa a III je limit roven 20 mg/l. Vodné výluhy kalů splnily limity dané legislativou. Komentář k obsahu Zn a zjištěnému trendu je obdobný jako v předchozím případě, avšak s tím rozdílem, že z hlediska absolutních hodnot nebyl limit překročen u žádného z vyluhovaných kalů.

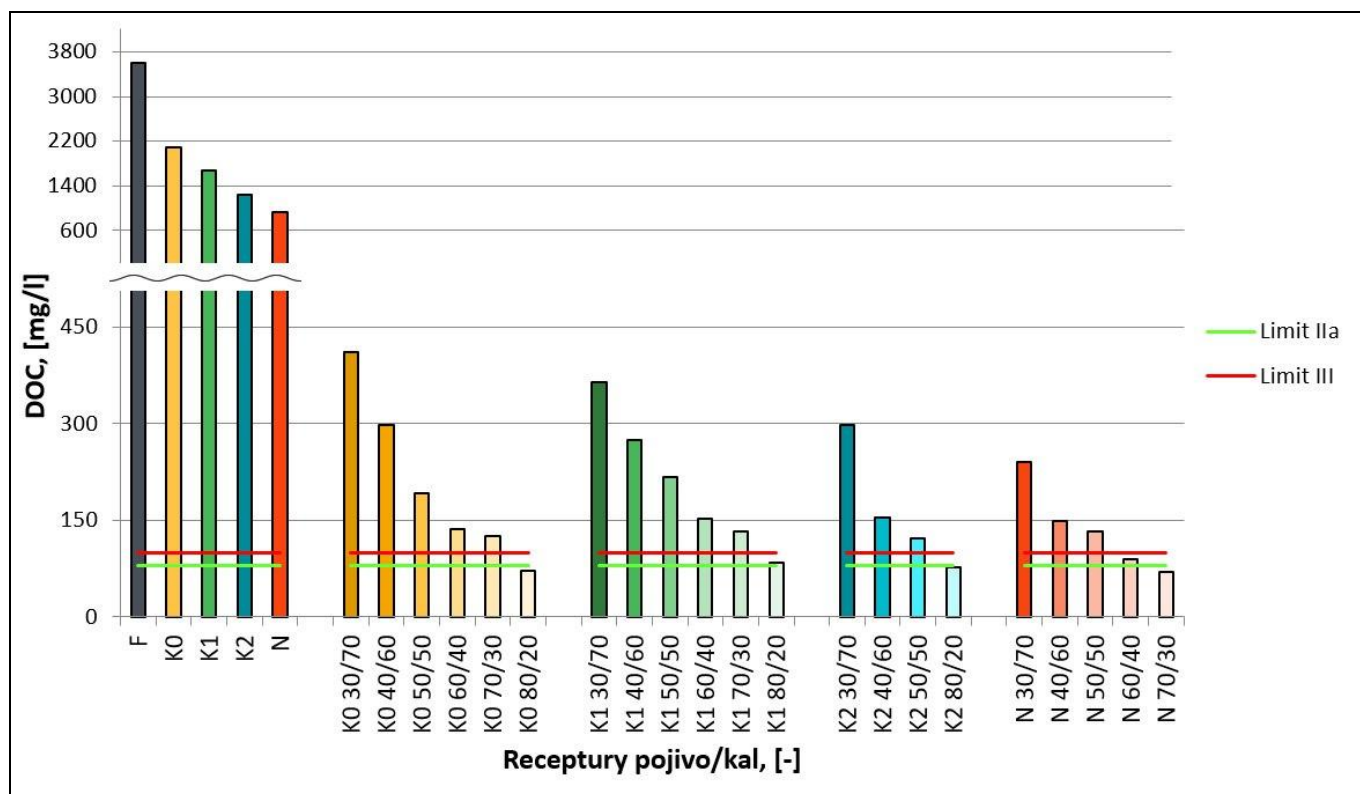
Hodnoty hmotnostní koncentrace jsou podlimitní u všech výluhů ze solidifikátů. Trend v případě Zn nelze najít ani uvnitř jednotlivých řad, ani mezi kaly s různou mírou odstředění. Opět lze konstatovat uplatnění více probíhajících dějů jako v předchozích případech. Nehledě na to, lze technologii S/S považovat za velmi účinnou ve vztahu ke koncentraci Zn, protože pokles hodnoty tohoto ukazatele je značný vzhledem k obsahu ve vodných výluzích vstupních kalů.

DOC (Obr. 6) - požadavek pro třídu vyluhovatelnosti IIa činí 80 mg/l, pro třídu vyluhovatelnosti III – 100 mg/l. Z obrázku je vidět, že DOC je ze všech parametrů nejnáchylnější k překročení limitu. V kapalně fázi převyšuje jeho obsah limitní hodnoty přibližně 35 krát. Se zvyšující se mírou odstředění klesá hmotnostní koncentrace rozpuštěného organického uhlíku ve výluzích z kalů velmi pomalu ve vztahu k limitům a lze říci, že limit u vodných výluhů z různě předupravených kalů je překračován řádově. Z povědomí o charakteru přítomných organických látek v silážní vodě po provedené neutralizaci a srážení vápenným mlékem lze očekávat, že jejich imobilizace v solidifikátech nebude valná.

DOC představuje z hlediska vyšetřovaných parametrů a uplatnitelnosti metody S/S největší problém a je tedy kritickým limitujícím parametrem. Legislativní požadavky jsou splněny pouze v případě velmi vysokých poměrů pojivo/kal. Z hlediska splnění limitů IIa jsou vhodné pouze směsi 80/20 (K0 a K2) a N 70/30. Limitu III vyhovuje víc testovaných poměrů, konkrétně směsi 80/20 (K0 až K2), N 60/40 a N 70/30.

S rostoucím poměrem pojivo/kal klesá hodnota DOC ve výluzích ze solidifikátů velmi výrazně. S rostoucí mírou odstředění kalu hodnota DOC též klesá. Přítomné organické látky jsou obsaženy ve zbytkové kapalně fázi v předupravovaných kalech. Vzhledem k původu a charakteru těchto látek lze říci, že v solidifikátech budou obtížně zadržovány, nedochází k tvorbě málo rozpustných produktů, lze uvažovat okrajově pouze o adsorpci a uplatňuje se především proces zředování.

Je obecně známo, že organické sloučeniny jsou nedostatečně účinně zachycovány anorganickými pojivy (např. cementem). Bylo by možné zkoušet aditiva účinně zachycující organické látky. Z hlediska praktické uplatnitelnosti však tento krok nenabyl významu a realizace.



Obr. 6 - Koncentrace rozpuštěného organického uhlíku v kapalně fázi F a ve výluzích z kalů a ze solidifikátu

Na závěr této podkapitoly je potřeba shrnout, že se podařilo pomocí technologie S/S dosáhnout takových receptur a kvalit solidifikátů, že byly v různých směsích postupně splněny limity třídy vyluhovatelnosti IIa. Je však na dalším šetření a uvážení, ve vztahu k reálné aplikaci metody na konkrétní odpad a situaci, zda bude toto řešení ekonomicky průchodné.

Této problematice je ve stručnosti a v rovině odhadu dílčích nákladů a jejich porovnání věnován následující oddíl.

Odhad nákladů

Při jakémkoliv zacházení se surovinami a technologiemi je potřeba pohlížet na systém nejenom z hlediska technologického, ale též z hlediska ekonomického. Nepřiměřená snaha o zdokonalování technologie může vést k prodražení procesu a odmítnutí jeho realizace.

Cílem provedení odhadu dílčích nákladů bylo jednak posuzování možnosti snižování nákladů na pojivové materiály, jednak výběr technologie stabilizace/solidifikace odpadu, která bude nejlevnější a zároveň splňující legislativní požadavky.

Při provedení bilance nákladů byly uvažovány pouze náklady na materiál a poplatek za uložení solidifikátů na skládku. Žádné jiné provozní náklady nebyly zahrnuty do analýzy, neboť jsou pro uvažované případy více méně obdobné vyjma částky za dopravu výsledného množství materiálu (dle receptur) na místo určení.

Uvažované náklady na pojivové materiály jsou představeny v Tab. 4. Cena za uložení nebezpečného odpadu činí 7900 Kč za tunu. Pro ukládání ostatního odpadu na skládku činí poplatek 1850 Kč za tunu [6].

Tab. 4 – Ceník pojiv a předúpravy [7–9]

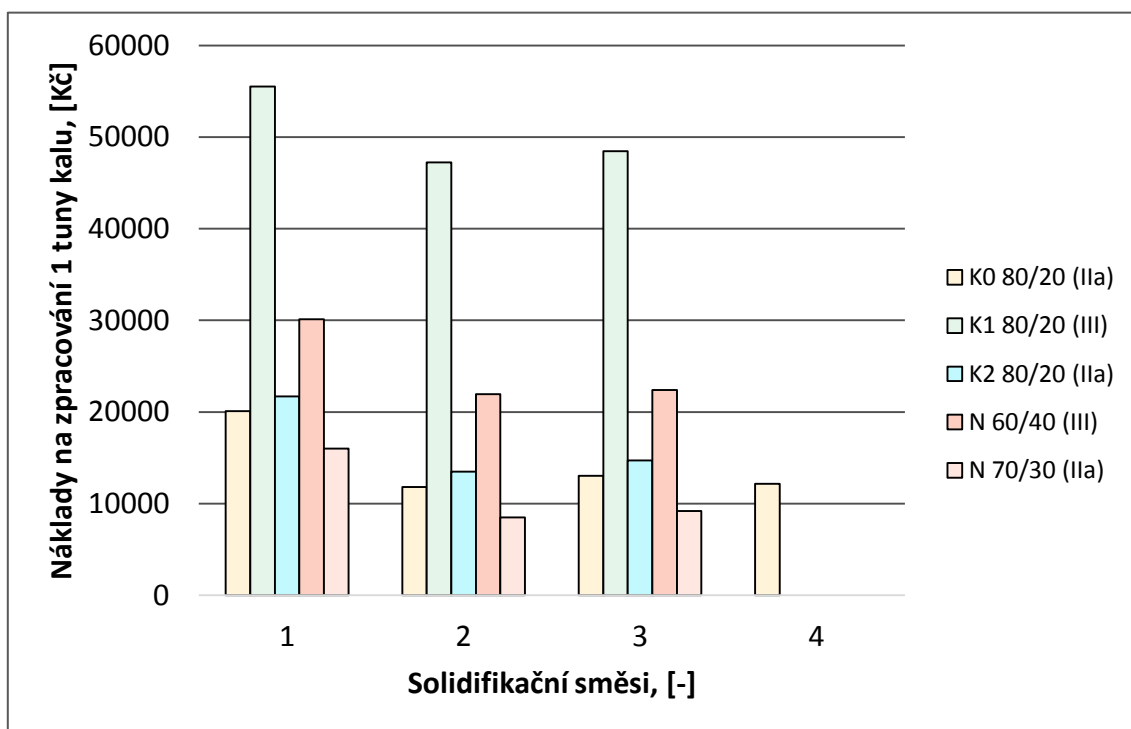
Surovina	Cena, [Kč/t pojiva]	Předúprava, [Kč/t pojiva]
cement	2700	0
struska	230	50
fluidní popílek	150	0
energósádovec	100	800
popílek	120	0

Ze zkušeností a na základě charakteristik kalů a náhradních pojiv byly navrženy 3 alternativní receptury nahrazující cement. Složení a označení zvolených receptur je představeno v Tab. 5.

Tab. 5 – Popis receptur solidifikačních směsí

Receptura	Hmotnostní podíl pojiv, [-]				
	Cement	Struska	Fluidní popílek	Energósádovec	Popílek
1	1	0	0	0	0
2	0,2	0	0	0	0,8
3	0,3	0,3	0	0	0,4
4	0,15	0	0,60	0,25	0

Na základě výše uvedených údajů byl proveden odhad cen na přípravu solidifikátů, splňujících limity IIa nebo III (vždy první přípustný z konkrétní série), a jejich následné ukládání na skládku. Nákladové položky jsou lineární kombinací cen a zastoupení jednotlivých složek. Výsledné odhady nákladů jsou porovnány pro relevantní receptury na Obr. 7. Zastoupení pojiv ve směsném pojivu odpovídá číselnému označení složení z Tab. 5.



Obr. 7 – Výsledky odhadu nákladů pro vybrané receptury solidifikátů

Z obrázku je vidět, že náklady na zpracování 1 tuny kalu se výrazně liší v závislosti na typu použitého pojiva a na třídě vyluhovatelnosti, kterou splňuje konkrétní solidifikát.

Nejvýhodnější variantou stabilizace/solidifikace kalu je receptura N 70/30 se složením solidifikační směsi č. 2. Tato varianta splňuje třídu vyluhovatelnosti IIa, je založena na použití kalu z kalolisu, hmotnostní poměr pojivo/kal je 70/30, cement je nahrazen směsí pojiv se složením cement/popílek 20/80. Pro lepší konzistenci je do směsi přidána vodovodní voda. Cena za zpracování 1 tuny kalu tímto způsobem činí 8500 Kč. Pomocí nahrazování cementu méně hodnotnými materiály se povedlo zlevnit technologii 1,5 krát.

Vzhledem k vysoké spotřebě pojiv a vysoké nákladovosti procesu je nutné zvážit veškeré okolnosti ohledně uplatnění procesu pro odpady vznikající na konkrétní lokalitě a rovněž vzít do úvahy další možnosti nakládání se vznikajícím odpadem.

Závěr

V rámci této práce byl studován proces stabilizace/solidifikace kalu ze zpracování odpadních vod, které pocházejí z nelegálního nakládání s galvanickými kalami kontaktovanými se silážními vodami. Předmětný kal vznikl při procesu srážení odpadních vod suspenzí vápna.

Byla provedena charakterizace vstupního kalu a jeho modifikací vzniklých procesem zahušťování (odstředování a zpracování na kalolisu) z hlediska vyluhovatelnosti a bylo provedeno srovnání ke vztažným limitům vyhlášky č. 294/2005 Sb.

Kritickými ukazateli se jeví obsah chloridů, obsah rozpuštěného organického uhlíku (DOC) a obsah rozpuštěných látek (RL105), což je očekáváno vzhledem k podstatě analyzovaného/zpracovávaného kalu.

Z upravených kalů bylo vyhotoveno několik sérií solidifikátů, které byly následně podrobeny vyluhovací zkoušce. Pojivem ve všech těchto sériích vystupoval cement. Výsledky vyluhovací zkoušky ukázaly, že limity dané vyhláškou č. 294/2005 Sb. jsou splněny pouze v případě použití dostatečně velkého poměru pojivo/kal, konkrétně pro řady K0 až K2 tento poměr činil 80/20, pro řadu N – 60/40.

Vzhledem k poměrně vysoké ceně použitého pojiva bylo rozhodnuto o provedení odhadu nákladů různých pojivových směsí s cílem nahradit použitý cement jinými materiály, které by svými vlastnostmi odpovídaly požadavkům na kvalitu solidifikátů, a zároveň by byly úspornější z finančního hlediska. Nejlevnější variantou se jevila varianta s použitím kalu z kalolisu (N) s hmotnostním poměrem pojivo/kal 70/30, přičemž cement byl nahrazen směsí cement/popílek 20/80. Cena za zpracování a ukládání na skládku materiálu vzniklého zpracováním 1 tuny tohoto kalu je přibližně 8500 Kč. Pomocí nahrazování cementu méně hodnotnými materiály se povedlo zlevnit technologii 1,5 krát.

Literatura

1. MAŠÍN, P., DEKONTA a.s. Písemné sdělení. 2016.
2. KURAŠ, M. *Odpady a jejich zpracování*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2014. ISBN 978-80-86832-80-7.
3. MEANS, J. et al. *The Application of Solidification-Stabilization to Waste Materials*. CRC Press, 1994. ISBN 9781566700801.
4. ČSN EN 12457-4: *Charakterizace odpadů - Vyluhování - Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů - Část 4: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg pro materiály se zrnitostí menší než 10 mm (bez zmenšení velikosti částic, nebo s ním)*. Český normalizační institut, 2003.
5. Vyhláška č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: Sbíрка zákonů. 2005. ISSN: 1211-1244.
6. *Ceník ukládání odpadů na řízenou skládku Benátky nad Jizerou* [online]. [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: http://www.ave.cz/file/edee/benatky/cenik_ukladani_odpadu_benatky_nad_jizerou.pdf
7. *Ceník společnosti Českomoravský cement Heidelberg Cement Group* [online]. [cit. 04.05.2013] Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.com>
8. HLASOVÁ, P., ČEZ a.s., Písemné sdělení. 2014.
9. VEJVODA, J. et al. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. 1. Praha: VŠCHT Praha, 2003. ISBN 80-7080-517-X.