

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta chemická

Doc. Ing. Milan Vondruška, CSc.

STABILIZACE/SOLIDIFIKACE ODPADŮ
STABILIZATION/SOLIDIFICATION OF WASTES

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ



BRNO 2001

KLÍČOVÁ SLOVA

odpad, stabilizace/solidifikace, mapa odpadového hospodářství, asfaltová pojiva, asfaltové emulze, popílek fluidního spalování uhlí, popel a sůl ze spaloven odpadů, čistírenské kaly, odpad z výroby titanové běloby

KEY WORDS

waste, stabilization/solidification, waste management map, asphalt binders, asphalt emulsions, fluidized bed combustion fly ash, waste incinerator ash and salt, waste water treatment sludge, waste from titanium dioxide production

© 2001 Milan Vondruška

ISBN 80-214-2016-2

ISSN 1213-418X

OBSAH

Obsah.....	3
1 PODSTATA , ÚČEL A VÝZNAM STABILIZACE / SOLIDIFIKACE	4
1.1 Definice a základní pojmy	4
1.2 Místo S/S technologií v hierarchii hospodaření s odpady.	4
1.3 Odpady zneškodňované pomocí S/S technologií.....	6
1.4 Stabilizace/solidifikace versus spalování a přímé skládkování	6
2 VÝZKUM STABILIZACE /SOLIDIFIKACE KONKRÉTNÍCH ODPADŮ.....	11
2.1 Stabilizace/solidifikace popela a soli ze spaloven odpadů pomocí asfaltového pojiva	11
2.2 Dlouhodobý pokus vyluhovatelnosti stabilizátů soli ze spalovny odpadů	15
2.3 Aplikace vodných asfaltových emulzí pro S/S popela a soli ze spaloven odpadů.....	17
2.4 S/S průmyslových kalů.	18
3 ZÁVĚR.....	25

1 PODSTATA , ÚČEL A VÝZNAM STABILIZACE / SOLIDIFIKACE

1.1 Definice a základní pojmy

Stabilizace/solidifikace (S/S) odpadů je dynamicky se rozvíjející, plně akceptovaná **environmentální technologie**.^{1,2,3} Ačkoliv terminologie je dosud nejednotná a stále se vyvíjející, je možné definovat S/S jako technologické procesy, pomocí kterých se fyzikálně-chemicky upravuje a tím zneškodňuje široký rozsah rozmanitých nebezpečných odpadů, a to jak **pevných, tak kapalných**.

S/S procesy jsou vyvíjeny a používány proto, aby se dosáhlo jednoho nebo více následujících cílů:

- redukce mobility a/nebo rozpustnosti polutantů, snížení toxicity a ekotoxicity odpadu, případně odstranění infekčnosti odpadu;
- usnadnění manipulace s odpadem a zlepšení fyzikálních vlastností odpadu tvorbou pevné matrice;
- snížení povrchu odpadu, přes který dochází vyluhováním k přestupu polutantů do environmentu (specifický povrch odpadu/specifický povrch stabilizátu).

Četné jiné termíny, jako např. **fixace, chemická fixace, immobilizace, detoxikace, neutralizace**, se stále ještě používají. Označení „S/S“ však začíná být preferováno vzhledem k tomu, že nejlépe vystihuje velkou rozmanitost mechanismů, které se uplatňují u této technologie. „**Solidifikace**“ pojmenovává proces, při kterém dochází k vytvoření pevné matrice ze směsi odpadu, pojiva a případně dalších přísad. Solidifikací tedy vzniká z odpadu a pojiva pevné, monolitické těleso, čímž dochází k podstatnému snížení specifického povrchu upraveného odpadu. To může, ale nemusí zahrnovat chemickou nebo fyzikálně-chemickou interakci mezi polutanty a pojivem. Termín „**stabilizace**“ vystihuje přeměnu polutantů obsažených v odpadu na chemicky, popř. fyzikálně-chemicky stabilnější formu. Všeobecně bráno, S/S procesy využívají jednoduchá, relativně levná zařízení pro manipulaci, míchání, popř. hnětení velkých objemů materiálů, kalů a suspenzí. Výběr vhodného pojiva, popř. dalších aditiv však vyžaduje pochopení chemie odpadu a obsažených kontaminantů, jakož i mechanismů vzájemných interakcí při provádění S/S, aby se dosáhlo uspokojivých a spolehlivých výsledků. Je třeba poznamenat, že biotechnologické procesy nejsou zpravidla součástí S/S a také většinou nejsou za S/S ani považovány.

1.2 Místo S/S technologií v hierarchii hospodaření s odpady

Máme-li si učinit představu, jaké místo v odpadovém hospodářství S/S procesy zaujímají, je výhodné si ukázat např. hierarchii nakládání s nebezpečnými odpady vydanou americkým úřadem pro ochranu životního prostředí (EPA), která je uvedena na **Obr. 1**. Je zřejmé a také přirozené, že prevence znečištění (minimalizace množství produkovaného odpadu, jeho použití u zdroje a/nebo recyklace mimo zdroj) by měla předcházet jeho zneškodňování (spalování, skládkování, S/S). Je však třeba zdůraznit, že S/S procesy hrají důležitou roli právě pro toto místo v hierarchii, tedy pro svoji schopnost zneškodňovat jinak „**nepoddajné**“ (intractable) **odpady**. Často je v technologické praxi S/S jediným způsobem, který může být na daný odpad aplikován.

První volba (prevence)

Eliminace/snížení produkce odpadů

- hledání environmentálně vhodnějších výrobků
- změny výrobních technologií
- recyklace/znovupoužití u zdroje

Druhá volba (využití)

Recyklace mimo zdroj

- zajištění bezpečné přepravy
- výběr vhodné recyklační technologie
- zajištění odbytu produktu recyklace

Třetí volba (odstranění)

zneškodnění/úprava nevyhnutelných odpadů

- spalování a S/S produktů spalování + skládkování
- S/S odpadů + skládkování
- alternativní technologie a S/S alternativně upravených odpadů + skládkování

Obr. 1 Hierarchie hospodářství s nebezpečnými odpady dle úřadu pro ochranu životního prostředí EPA (mírně upraveno)

1.3 Odpady zneškodňované pomocí S/S technologií

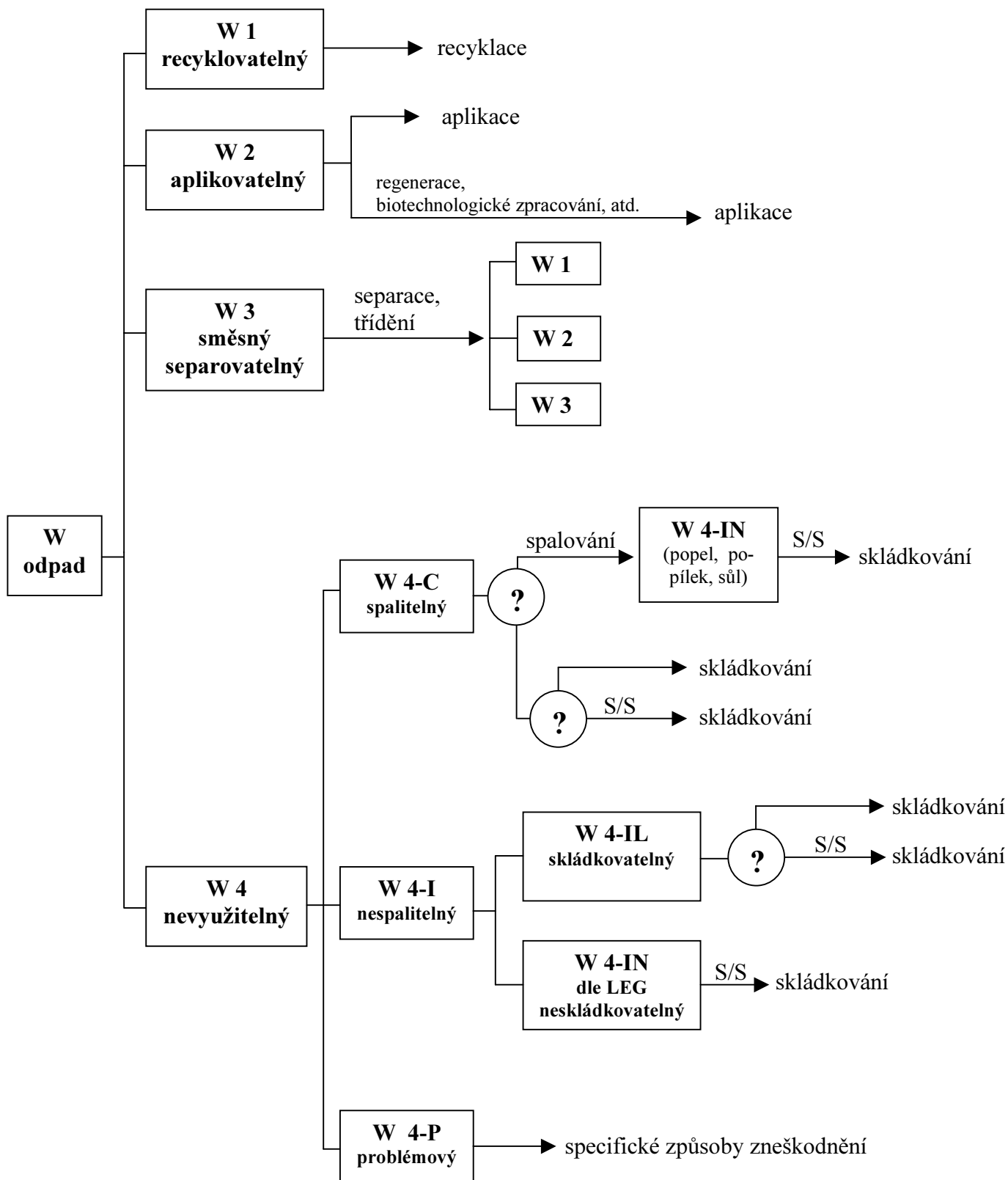
Vzhledem ke své flexibilitě a rozmanitosti jsou S/S technologie vhodné pro **odpady s chemickou podstatou jak anorganickou, tak organickou**. Rovněž obsažené polutanty (kontaminanty) mohou být látky anorganické i organické. Snad jediné omezení představuje obsah snadno těkavých organických látek (VOC) v odpadu. Je tomu tak proto, že tyto VOC by byly při provádění S/S uvolňovány do ovzduší jako emise. V tomto případě by měla být dána přednost kromě spalování tzv. alternativním technologiím, jako je parní stripování, extrakce vakuem, biodegradace. S/S procesy jsou pak velmi často vhodné pro zneškodňování produktu aplikace některé z výše zmíněných technologií. Alternativní technologie tak vlastně představují předúpravu odpadu před samotnou S/S. Specifikum by představoval odpad s vysokým obsahem amonných iontů, u kterého provádění S/S pomocí zásaditého pojiva vede k těkání vznikajícího amoniaku.

Z hlediska hospodaření a nakládání s odpady je odpověď na otázku, jaké odpady se především zneškodňují pomocí S/S, zřejmá z navržené **mapy odpadového hospodářství**, která je uvedena na **Obr. 2**. Vidíme, že se jedná o odpad **W4**, tedy nevyužitelný. Pokud je tento odpad spalitelný a je také spalován, pak je S/S nutno aplikovat na úpravu produktů tohoto spalování. Alternativou a konkurencí spalování odpadu **W4-C** je přímá S/S a v praxi bohužel i přímé skládkování. Pokud je odpad nevyužitelný, nespalitelný (**W4-I**), pak v případě, že vykazuje nebezpečné vlastnosti, je S/S jedinou možností.^{4,5}

K mapě je třeba dodat, že o tom, zda je určitý, konkrétní odpad využitelný či nikoliv, nerozhoduje pouze jeho fyzikálně-chemická podstata a obsah polutantů, ale také místo a někdy i roční doba vzniku, protože všechny tyto skutečnosti mají svůj dopad na výšku nákladů spojených s aplikací tohoto odpadu, která navíc závisí na poptávce. Mimoto je nutno respektovat odpadovou legislativu.⁶ Ta, jak známo, explicitně vyjmenovává odpady, které musí být před uložením na skládku upraveny stabilizací, a dále specifikuje odpady, které nesmějí být ukládány na skládkách všech skupin. Zákon o odpadech také podává „**přehled nebezpečných vlastností**“, které slouží pro sestavení **mezinárodního kódu odpadu IWIC**. Je samozřejmé, že pokud je odpad zneškodňován S/S technologií, pak by výsledný stabilizát odpadu neměl vykazovat žádnou z nebezpečných vlastností. Kritériem úspěšnosti a dokonalosti provedené S/S je především vyluhovatelnost, která simuluje potenciální vyluhování polutantů z odpadu, popř. stabilizátu odpadu, vodou v environmentu. Naše legislativa, jak známo, vymezuje tři **třídy vyluhovatelnosti**, přičemž nejpřísnější I. třída vyžaduje splnění celkem 43 parametrů, většinou konkrétních koncentračních limitů environmentálně nebezpečných polutantů. Pro demonstraci jsou jako **TAB. 1** uvedeny parametry vyluhovatelnosti zmíněné I. třídy tak, jak jsou prezentovány v odpadovém zákoně ČR. Je třeba připomenout, že aby byl odpad, popř. stabilizát odpadu zařazen do dané třídy, nesmí být ani jeden uvedený parametr překročen. Je zřejmé, že odborné posuzování nebezpečnosti odpadů, popř. jejich stabilizátů tkví především v **chemických analýzách jejich výluhů**.

1.4 Stabilizace/solidifikace versus spalování a přímé skládkování

Možnosti volby jsou indikovány na mapě odpadového hospodářství otazníky a vyvstávají u nevyužitelného, spalitelného odpadu (na **Obr. 2** je tento odpad označen jako **W4-C**; příkladem může být aktivovaný kal masově produkovaný čištěním průmyslových odpadních vod) a u nevyužitelného, nespalitelného, ale skládkovatelného odpadu (**W4-IL**; příkladem může být teplotěnský popílek nebo ocelářské odprašky).



Obr. 2 Navržená odpadová mapa uspořádaná z hlediska hospodaření s odpady (radioaktivní odpad, odpadní vody a plynné emise nejsou zahrnuty); W = odpad, S/S = stabilizace/solidifikace, LEG = legislativa

TAB. 1 Parametry výluhu odpadu, popř. stabilizátu/solidifikátu odpadu, vyžadované zákonem o odpadech č. 125/1998 Sb. pro třídu vyluhovatelnosti I

Ukazatel	Jednotka	Limitní hodnota I/I	Limitní hodnota I/II
pH		5,5 - 11	6,5 - 8
konduktivita	mS/m	150	40
pach		žádný	žádný
ekotoxicita	TU	negativní	negativní
PAU	mg/l	0,002	0,0002
fenolový index	mg/l	0,1	0,005
CHSK - Cr	mg/l	40,0	8,0
NEL	mg/l	0,2	0,05
AOX	mg/l	0,03	0,03
tenzidy aniontové	mg/l	0,5	0,2
BTEX	mg/l	0,05	0,03
Al	mg/l	2,0	0,2
As	mg/l	0,1	0,05
B	mg/l	-	1,0
Ba	mg/l	1,0	1,0
Be	mg/l	0,005	0,005
Pb	mg/l	0,1	0,05
Cd	mg/l	0,005	0,005
Cr celkový	mg/l	0,1	0,05
Fe	mg/l	5,0	0,1
Co	mg/l	0,1	0,05
Cu	mg/l	1,0	0,1
Mn	mg/l	1,0	0,1
Ni	mg/l	0,1	0,1
Hg	mg/l	0,002	0,001
Se	mg/l	0,05	0,01
Ag	mg/l	0,1	0,05
Tl	mg/l	0,02	0,01
V	mg/l	0,2	0,05
Zn	mg/l	5,0	5,0
fluoridy	mg/l	3,0	1,5
amonné ionty	mg/l	3,0	0,5
chloridy	mg/l	+	100,0
kyanidy celkové	mg/l	0,1	0,05
kyanidy volné	mg/l	0,02	0,01
dusičnany	mg/l	100,0	50,0
dusitany	mg/l	1,0	0,01
fosforečnany	mg/l	5,0	0,1
sírany	mg/l	+	250,0
DOC	mg/l	10,0	1,5
PCB-6 kongenerů (suma)	mg/l	0,0002	0,00002
TCE	mg/l	-	0,03
PCE	mg/l	-	0,01

Vysvětlivky:

Limitní hodnota I/I – vodný výluh musí vyhovovat limitním hodnotám I/I.

Limitní hodnota I/II – v případech, kdy odpady přicházejí do styku s podzemní vodou, musí výluhy odpadů vyhovovat limitním hodnotám I/II.

Obecně posuzováno, spalováním ve spalovně se odpad mající nebezpečné vlastnosti přemění na popel, popílek a sůl, přičemž se buďto energie uvolňuje, nebo naopak spotřebovává (např. odpar vody z kalů). Pevné produkty spalování mají sice menší objem než původní odpad, ale musí být vzhledem ke své chemické podstatě a obsahu nebezpečných polutantů upraveny pomocí S/S, což zákon také nařizuje. Vidíme, že spalováním odpadů spolu s následnou S/S jeho produktů a uložením stabilizátu na skládku se zbavíme nebezpečných vlastností odpadu a tedy jej zneškodníme. Na druhé straně ovšem spalováním dochází k produkci CO₂, tedy plynu vykazujícího škodlivý klimatický vliv. Dalším negativem spalování jsou přes zlepšující se způsoby čištění spalin emise PCDD/F a patrně i PAH.

Poznámka: V EU předpokládaný emisní limit PCDD/F činí 0,1 ng TEQ/m³_n. Jak ukázaly nejnovější studie⁷, spalovny produkují mnohem více PCDD/F a to 30–50 ×, než kolik bylo oficiálně přiznááno.

S/S odpadu znamená v obecném případě zvýšení hmotnosti, často i objemu odpadu spolu s nutností tento zvýšený objem dopravit a pojmout na skládku. Nebezpečné vlastnosti odpadu se odstraní, nicméně zůstává otevřená otázka dlouhodobé odolnosti stabilizátu na skládce. Je totiž asi nemožné detailně předpovídat chování stabilizovaného odpadu po uplynutí řekněme 100 let. Výhodou je, že k uvolňování CO₂ nedochází a že téměř vždy (např. u zmíněných kalů majících sušinu cca 15 %) je S/S mnohem levnější než spalování. V **TAB. 2** je učiněn pokus o demonstraci výhod a nevýhod obou způsobů zneškodnění odpadu. Zároveň je prezentován pokus o zhodnocení přímého skládkování tohoto odpadu. Z této konfrontace je zřejmé, že přímé skládkování odpadů je kontraproduktivní vzhledem k jeho závažným negativním environmentálním dopadům. Rozhodnutí, zda zneškodnit odpad (**W4-C**) spalováním nebo pomocí S/S bude vždy specifické, protože závisí na řadě okolností a faktorů, a není tedy možné učinit obecný závěr.

TAB. 2 Srovnání způsobů zneškodňování nevyužitelných spalitelných odpadů (odpady označené W4-C, Obr. 2)

Zneškodnění odpadu	Pozitiva	Negativa
S/S	<ul style="list-style-type: none"> • relativně dokonalé odstranění nebezpečných vlastností odpadu • nízké náklady bez velkých investičních nároků • plošná dostupnost, realizace možná jak v místě vzniku tak na skládce 	<ul style="list-style-type: none"> • zvýšení hmotnosti a často i objemu odpadu • nevyužití energie odpadu v případě kladné energetické bilance • nutnost výzkumu postupu S/S pro konkrétní typ odpadu • nejistota dlouhodobé stability
Spalování	<ul style="list-style-type: none"> • relativně dokonalé odstranění nebezpečných vlastností odpadu • redukce objemu odpadu • využití energie odpadu v případě kladné energetické bilance 	<ul style="list-style-type: none"> • energetické nároky v případě záporné energetické bilance • nutnost S/S produktů spalování: popela, popílku a soli • produkce skleníkového CO₂ • emise PCDD/F • emise PAH • vysoké náklady (investiční náročnost, provoz spalovny, doprava odpadu) • v případě odpadu s velkým nespalitelným podílem velká produkce popela
Přímé skládkování	<ul style="list-style-type: none"> • velmi nízké náklady • plošná dostupnost 	<ul style="list-style-type: none"> • emise CH₄, jehož efekt jakožto skleníkového plynu je podstatně větší než u CO₂ (!) • emise CO₂, popř. dalších plynů (H₂S, NH₃, CO ...) • nebezpečí otevřeného a skrytého zahoření skládky • nebezpečí výbuchu skládkového plynu • potenciální ložisko patogenních mikroorganismů • nebezpečí kontaminace spodních vod • hygienické problémy (hmyz, hlodavci, ptáci, zápach, prašnost)

2 VÝZKUM STABILIZACE/SOLIDIFIKACE KONKRÉTNÍCH ODPADŮ

2.1 Stabilizace/solidifikace popela a soli ze spaloven odpadů pomocí asfaltového pojiva

Oba odpady představují nebezpečné průmyslové **systemové odpady**, které musí být dle zákona před uložením na skládku stabilizovány. Staly se proto středem naší pozornosti již na začátku našich výzkumů.^{4, 8, 9} Na **Obr. 3** je uvedeno schéma vyvinutého a ověřeného postupu S/S těchto odpadů, který využívá asfaltového pojiva. Popel obsahoval mimo jiné extrémní množství vyluhovatelného šestimocného chromu a sůl je v podstatě 100 % polutant, protože obsah rozpustného podílu běžně překračuje 98 %. Hodnocení stabilizace je uvedeno na **Obr. 4, 5, 6** a v **TAB. 3**. Z obrázků je vidět, že dosažené hodnoty obsahu celkového chromu (u stabilizátů popela), konduktivity a pH (u stabilizátů soli) ve výluzích zkušebních těles s vytvořeným asfaltovým povlakem jsou velmi uspokojivé.

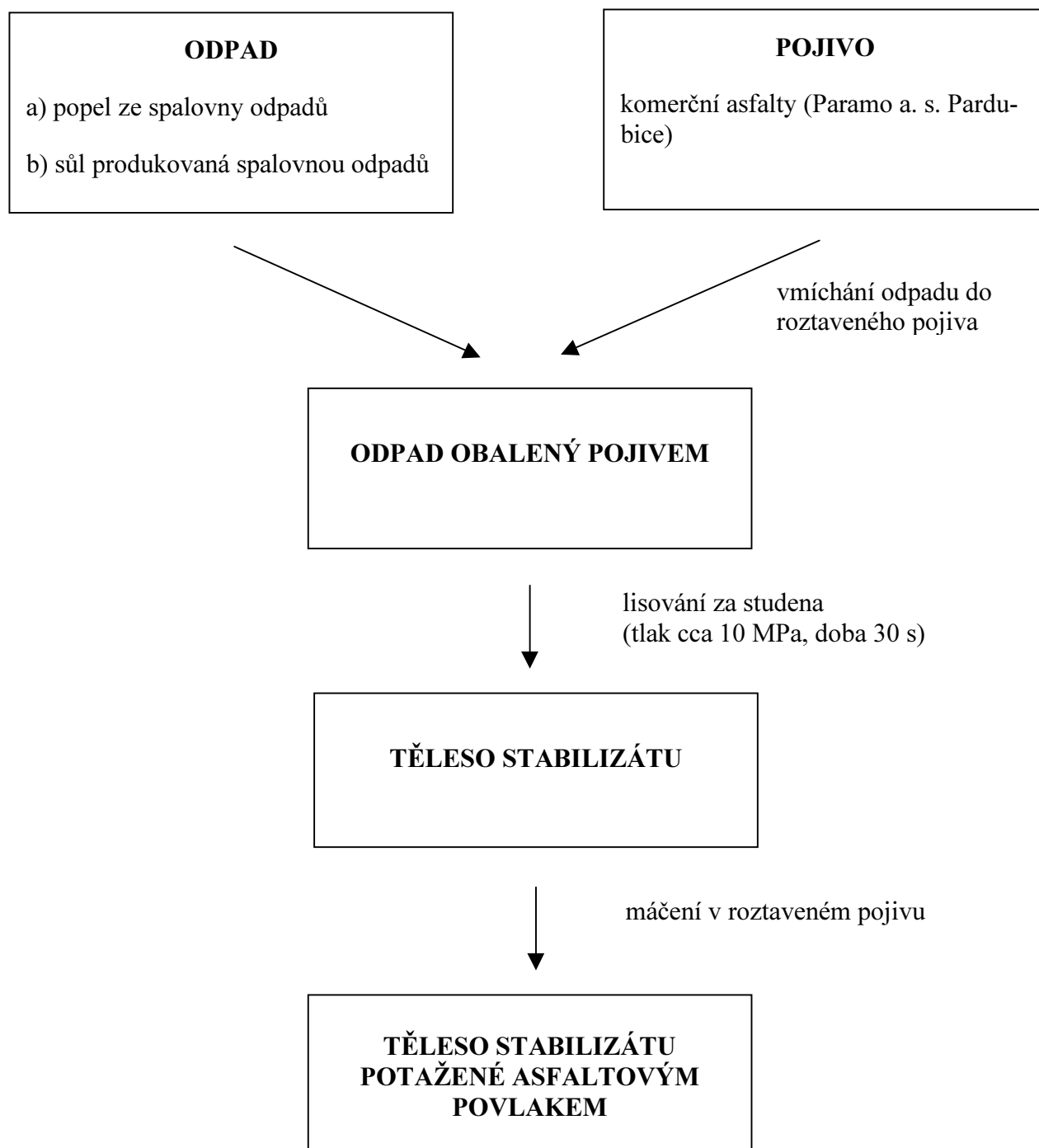
Je zřejmé, že asfaltový povlak představuje dokonalou imobilizační bariéru proti prostupu a tedy i vyluhování jakéhokoliv iontu. Dosahované hodnoty reprezentativních parametrů výluhů zkušebních těles, kterými jsou z hlediska stabilizovaných odpadů a použitého asfaltového pojiva také obsah polyaromatických uhlovodíků a nepolárních extrahovatelných látek, přináší **TAB. 3**.

TAB. 3 Výsledky S/S popela a soli ze spalovny odpadů, aplikováno asfaltové pojivo Parafix (Paramo Pardubice), zkušební tělesa opatřena asfaltovým povlakem (sekundární bariéra)

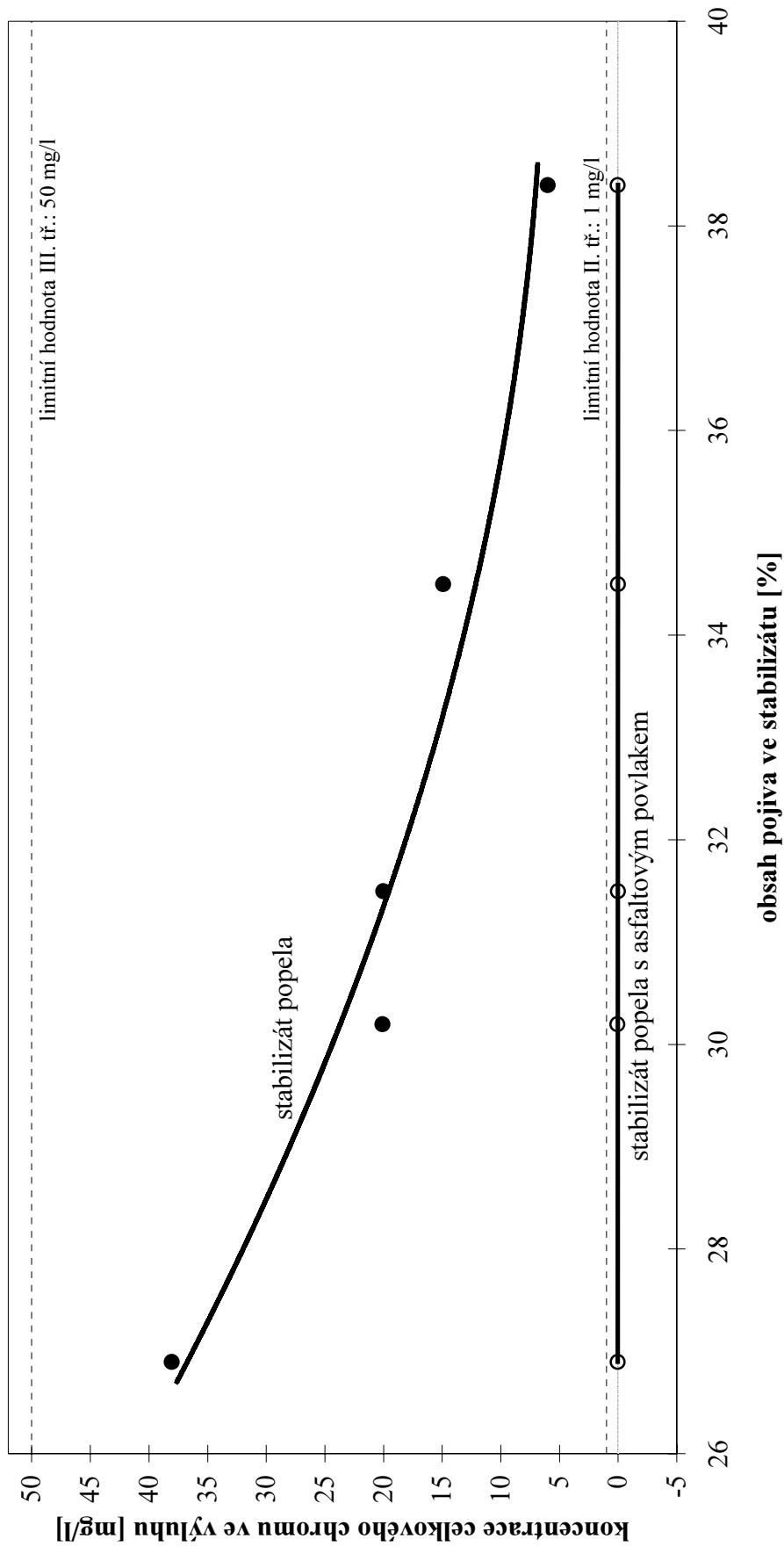
Vybraný parametr vyluhování	Hodnota parametru vodného výluhu zkušebních těles
PAH (polycyklické aromatické uhlovodíky)	< 0,001 mg/l (tř. I/I)
NEL (nepolární extrahovatelné látky)	< 0,1 mg/l (tř. I/I)
pH	6,60 - 7,20 (tř. I/II)
Konduktivita	< 30 mS/m (tř. I/II)
Koncentrace celkového chromu*	< 0,025 mg/l (tř. I/II)

* Tento parametr se vztahuje pouze k výluhu stabilizátu popela (surový popel vykazuje obsah cca 1 % vyluhovatelného Cr^{VI}).

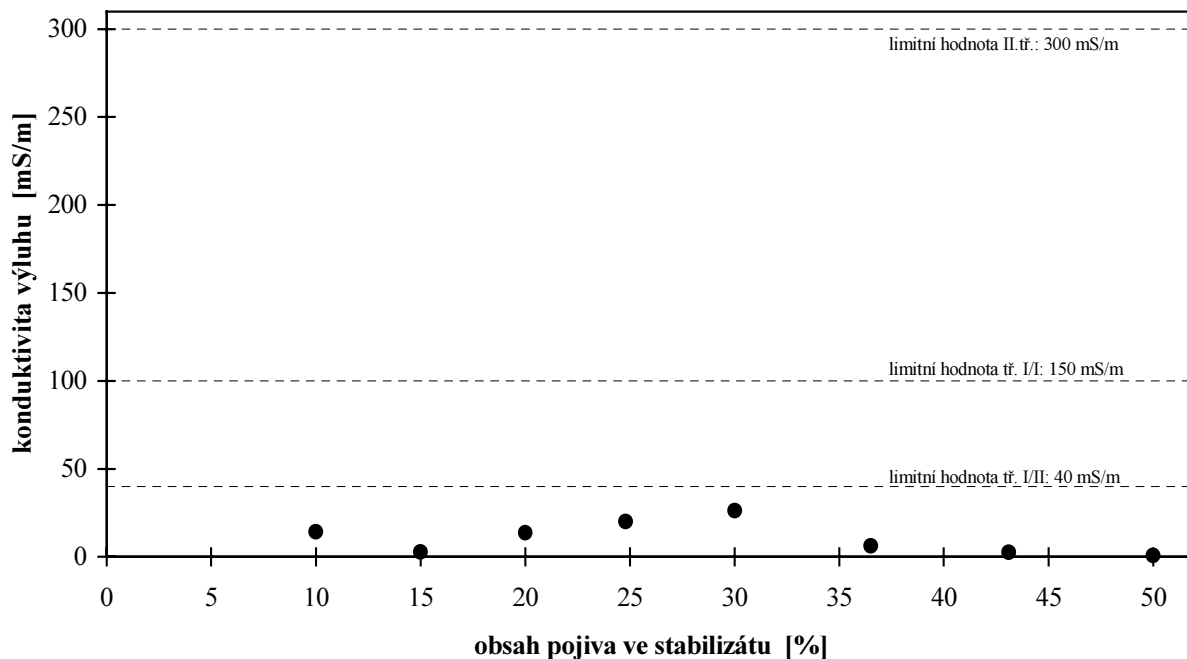
Důležitou stránkou S/S odpadu je **objemová bilance**. Při S/S, jak popela tak i soli pomocí asfaltového pojiva, dochází k zřetelnému poklesu objemu odpadu. Tento na první pohled paradoxní jev vyplývá z velkých rozdílů sypných hmotností a skutečných hustot obou odpadů. V **TAB. 4** jsou uvedeny hustoty popela a soli spolu s relativními objemy stabilizátů, které jsou vztaženy k původnímu objemu odpadů. Je zřetelné, že dochází u obou odpadů k ekonomicky významnému poklesu objemu v důsledku uskutečnění S/S. Pro vysvětlení tohoto objemového poklesu byl u soli předpokládán model, ve kterém všechna zrna soli jsou stejně velká, mají kulový tvar a jsou ve stabilizátu uspořádána v krychlové mřížce.⁹ Pro takovýto model stabilizátu je jednoduché vypočítat jeho objem vztahující se k určitému obsahu asfaltového pojiva.



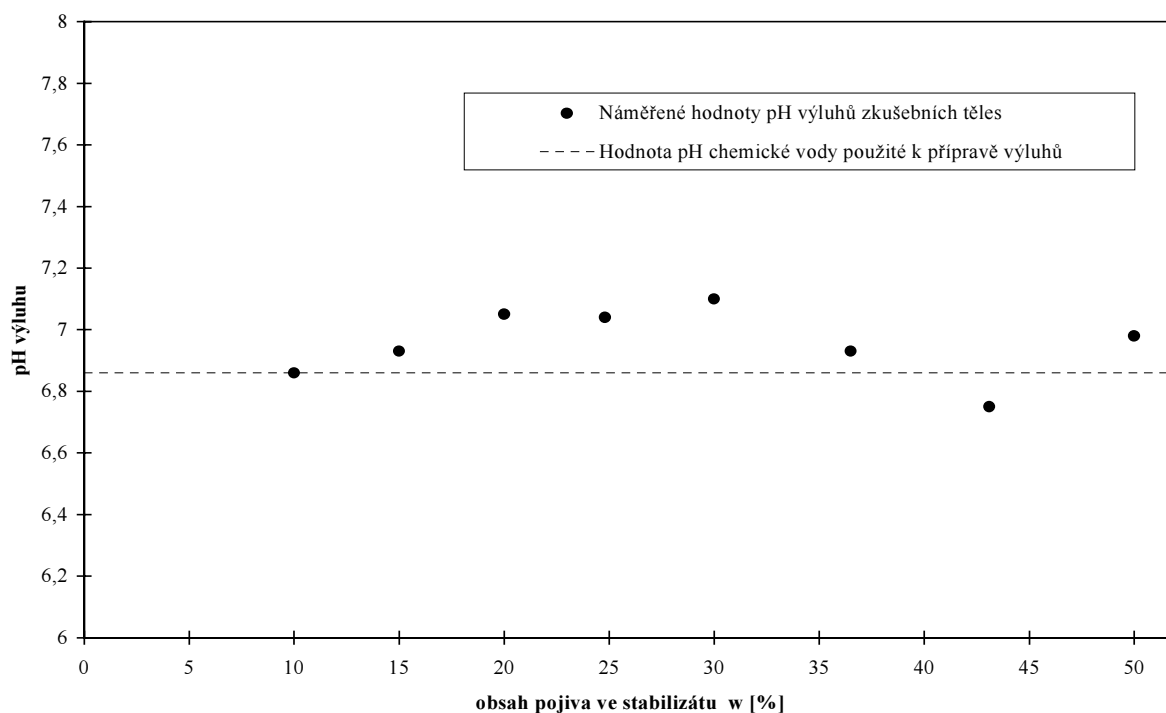
Obr. 3 Koncepce technologického postupu stabilizace/solidifikace popela a soli ze spalovny odpadů pomocí taveného asfaltového pojiva.



Obr. 4 Závislost koncentrace celkového chromu ve výluhu na obsahu asfaltového pojiva ve stabilizátu popela a ve stabilizátu popela s asfaltovým povlakem



Obr. 5 Závislost konduktivity výluhu stabilizátu soli na obsahu asfaltového pojiva u zkušebních těles s asfaltovým povlakem



Obr. 6 Závislost pH výluhu stabilizátu soli na obsahu asfaltového pojiva u zkušebních těles s asfaltovým povlakem; limitní hodnota pH ve třídě vyluhovatelnosti I/II je 6,5 až 8,0

TAB. 4 Hustoty popela a soli ze spalovny odpadů a relativní objemy asfaltových stabilizátů obou odpadů.

Odpad	Sypná hmotnost, g/ml	Skutečná hustota, g/ml	Obsah asfaltového pojiva* ve zkušebním tělese, %	Relativní objem stabilizátu, vztažený na původní objem odpadu, %
popel	0,920	2,98	26,9	68,3
sůl	0,476	2,00	24,8	48,0

* Hustota asfaltového pojiva činí 1,03 g/ml.

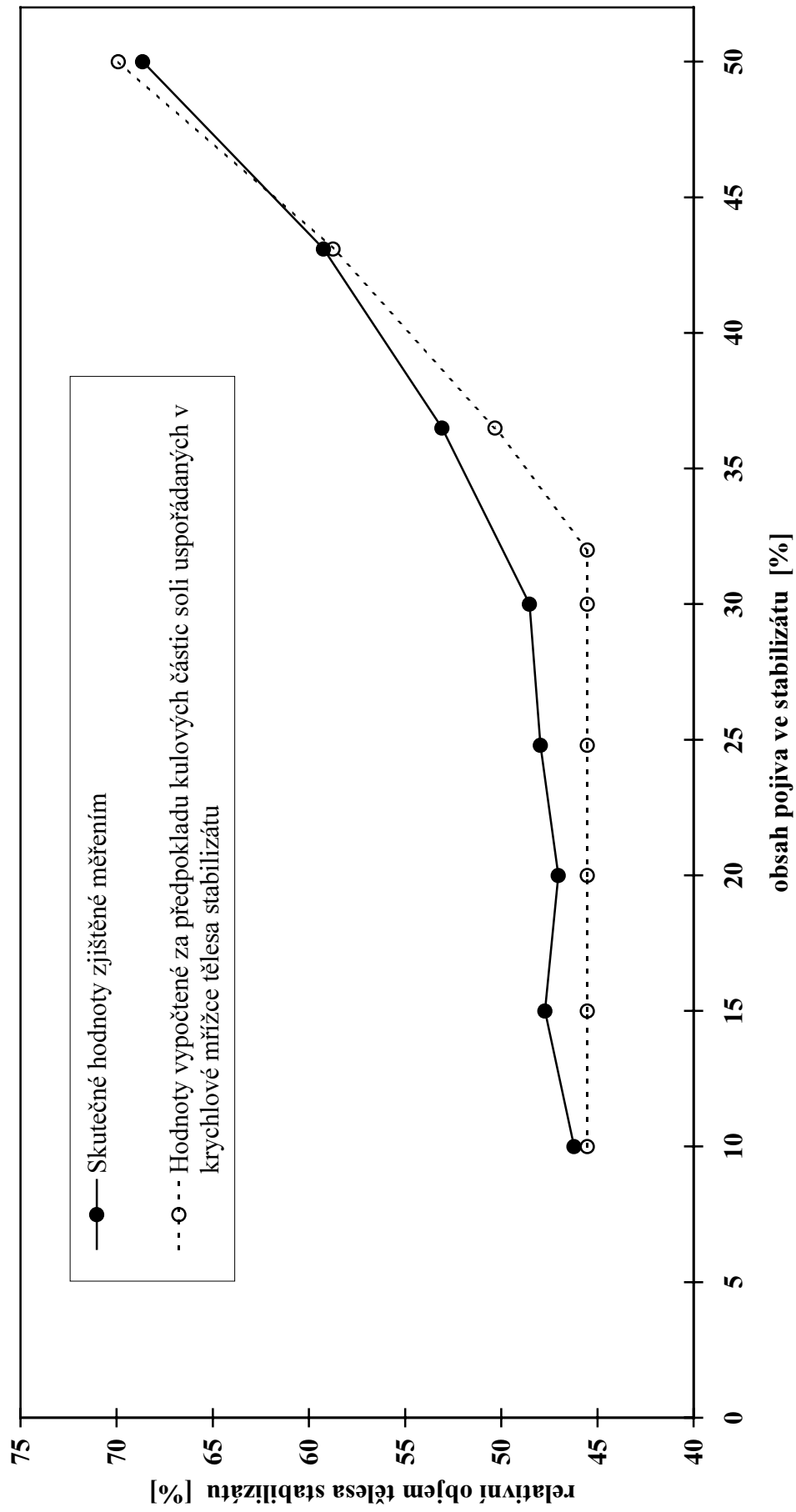
Na **Obr. 7** jsou konfrontovány relativní objemy, změřené u připravených zkušebních těles stabilizátů soli, s hodnotami vypočtenými pomocí zmíněného modelu. Je zřejmé, že obě křivky, tedy naměřená a vypočtená jsou vzhledem k experimentálním okolnostem v dobré shodě a přesvědčivě demonstrují pro praxi velmi příznivou **redukcí objemu**, ke které dochází během S/S obou odpadů pomocí asfaltového pojiva.

2.2 Dlouhodobý pokus vyluhovatelnosti stabilizátů soli ze spalovny odpadů

Postupem uvedeným v předchozí kapitole byla připravena zkušební tělesa stabilizátů soli s různým obsahem asfaltového pojiva. Všechna tělesa byla opatřena dokonalým asfaltovým povlakem, tedy sekundární bariérou. Přehled zkušebních těles je uveden v **TAB. 5**.

Připravená tělesa byla vložena do čistých lahví z tmavého skla. Ke každému tělesu byl přidán příslušný objem převařené destilované vody tak, aby bylo dosaženo poměru 1 000 ml vody na 100 g stabilizátu, jak to předepisuje zákon o odpadech. Zároveň byly založeny dva slepé pokusy; jeden, který měl monitorovat změnu vodivosti pouze u použité vody, a druhý, ve kterém byl zkušebním tělesem použitý asfalt. Lahve byly vzduchotěsně uzavřeny a skladovány při teplotě 5–8 °C. Průběžně byla měřena po dobu asi dvou a čtvrt roku (od 19. 5. 1997 do 6. 9. 1999) konduktivita výluhů vždy ve všech lahvích. Výsledky měření konduktivity na počátku, uprostřed a na konci pokusu jsou uvedeny v **TAB. 5**.

Z výsledků je zřejmé, že asfalt představuje pro ionty neprostupnou bariéru. Přestože tyto velmi příznivé výsledky byly očekávány, je třeba uvést, že největší vliv na prakticky zanedbatelný nárůst konduktivity u všech sledovaných výluhů mělo vyluhování iontů ze skla a otvírání lahví, při kterém dochází k pohlcování chemických individuů ze vzduchu, jak je patrné z hodnot vodivosti slepého pokusu.



Obr. 7 Závislost relativního objemu zkušebních těles stabilizátu soli na obsahu asfaltového pojiva

TAB. 5 Dlouhodobý pokus vyluhovatelnosti asfaltových stabilizátů soli. Vybrané konduktivity výluhů – pokus probíhal od 19. 5. 1997 do 6. 9. 1999

# tělesa	1	2	3	4	Použité asfaltové pojivo	Slepý pokus*
Obsah asfaltového pojiva % hmot.	10	20	30	40	100	-
Konduktivita výluhu tělesa po 4 dnech	0,198	0,236	0,210	0,203	0,553	0,186
Konduktivita výluhu tělesa po 1. roce mS/m	0,310	0,368	0,368	0,333	1,176	0,296
Konduktivita výluhu tělesa po cca 2,5 letech mS/m	0,596	0,423	0,465	0,873	1,329	0,329

* převařená destilovaná voda, používaná k veškerým výluhům

- měření konduktivity bylo prováděno prvního půl roku každé dva týdny a poté asi 1 × za tři měsíce
- limitní hodnota třídy I/II činí 40 mS/m

Je třeba si uvědomit, že hodnoty konduktivity všech testovaných výluhů včetně výluhu samotného pojiva představují ve srovnání i s nejpřísnější limitní hodnotou pro třídu I/II (40 mS/m) prakticky nulu. Navíc jsou hodnoty konduktivity téměř rovny hodnotě konduktivity slepého pokusu. Tyto skutečnosti jsou v naprosté shodě s výsledky dosaženými u 24 hod. výluhů připravovaných dle zákona o odpadech. Dále se opět potvrdilo, že účinnost stabilizace nezávisí na obsahu asfaltového pojiva ve stabilizátu (v rozmezí 10–40 %) a že tedy rozhodující je asfaltový povrch, čili dokonalá sekundární bariéra. Je tedy zřejmé, že S/S solí ze spaloven odpadů je možno uskutečňovat s relativně nízkým přídatkem pojiva, tedy např. s 15 %. Tato dávka bezpečně stačí na docílení solidifikace solí, přičemž tvorba asfaltového povlaku v technickém měřítku vyžaduje už pouze nevýznamné množství asfaltového pojiva.

Účelem dlouhodobého vyluhování bylo simulovat chování asfaltových stabilizátů na skládce. Po vyhodnocení pokusu je zcela zřejmé, že asfalt zabraňuje měřitelnému vyluhování solí, a to pravděpodobně i ve vzdáleném časovém horizontu. Dále je zřejmé, že nebezpečí vyluhování jakýchkoliv iontů do spodních vod při uložení asfaltových stabilizátů na skládce může hrozit pouze při vážném rozrušení asfaltových těles a asfaltových vrstev zmíněná tělesa obalujících. Jak známo, chemická a biologická odolnost asfaltu je však vynikající. Svědčí o tom např. zchovalost starověkých předmětů zhotovených z asfaltu. Biologická odolnost asfaltu vůči působení mikrobů, hmyzu, hlodavců a rostlin byla rozsáhle studována pro účely ochranných povlaků potrubí.¹² Závěr výše uvedené studie říká, že asfalt je mimořádně odolný proti biologickým vlivům. Za těchto okolností lze oprávněně předpokládat, že životnost asfaltových stabilizátů na skládkách bude zcela uspokojivá.

2.3 Aplikace vodných asfaltových emulzí pro S/S popela a soli ze spaloven odpadů

Výše uvedené výsledky přesvědčivě dokumentují, že **asfaltové pojivo**, jako vysoce **hydrofobní materiál**, tvoří dokonalou **imobilizační bariéru**, která velmi účinně zabraňuje vyluhování polutantů ze stabilizovaného odpadu do environmentu. Naskytá se otázka, proč se

tedy nevěnuje těmto pojivům odpovídající pozornost. Dle našeho mínění je to především pro svým způsobem nepříjemnou manipulaci s těmito pojivy. Dále se domníváme, že zde hrají jistou roli předsudky vůči asfaltu, které mají svůj kořen v nerozlišování asfaltu a dehtu.

Odstranění objektivních potíží spojených se zahříváním a tavením asfaltu nabízí aplikace asfaltových emulzí.¹⁰ Z našich prvních poznatků získaných při S/S obou odpadů pomocí asfaltových emulzí vyplývá, že se jedná o mimořádně perspektivní směr zneškodňování odpadů. Použitý postup je znázorněn na **Obr. 8**.

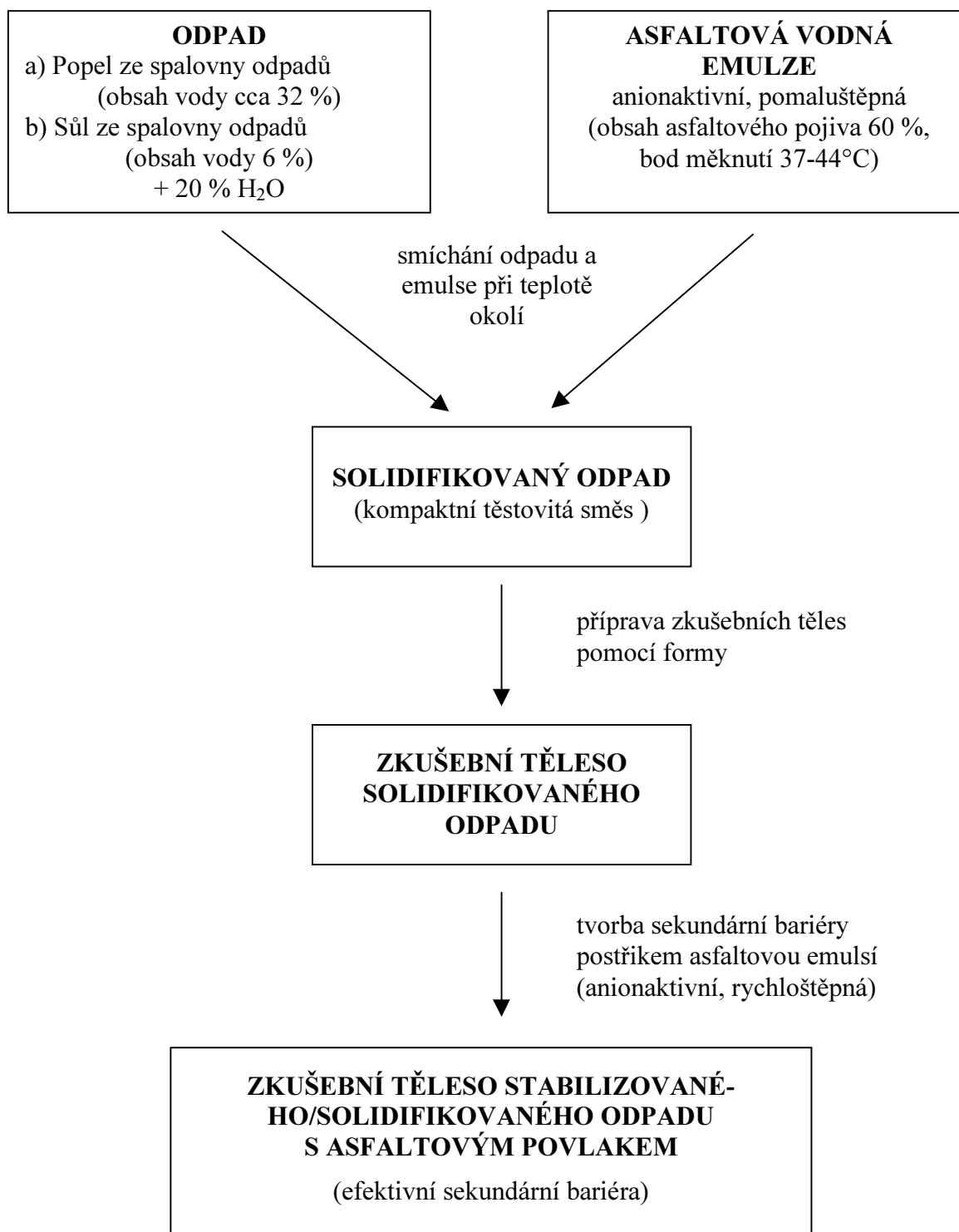
Ke studiu jsou používány asfaltové vodné emulze firmy Paramo Pardubice, anionaktivní, pomaluštěpná, mající obsah 60 % asfaltu (bod měknutí 37–44 °C) a obdobná anionaktivní rychloštěpná. Zahřívání a tavení asfaltu je eliminováno. Vlastnosti asfaltové imobilizační bariéry připravené postříkem emulzí, jsou stejně dobré jako u taveného asfaltu. Oba odpady, tj. popel a sůl, nejenže pohlcují veškerou vodu z emulze, ale k soli je třeba pro umožnění míchání vodu ještě přidávat. Všechno nasvědčuje tomu, že v praxi by se za teploty okolí hnětením připravená směs odpadu a emulze vnášela na skládku do připraveného vyasfaltovaného „hrobu“, který by se po zaplnění překryl asfaltovou vrstvou, realizovanou nastříkáním vodnou emulzí. Toto je samozřejmě stručně formulovaná optimistická představa. Zatím naše konkrétní poznatky indikují **možnost aplikace emulzí v závislosti na chemickém charakteru povrchu odpadu**. Další potenciální možnosti může přinést **volba rychlosti štěpení emulzí**. Např. lze pro tvorbu povlaku používat rychloštěpných emulzí, aby docházelo k tvorbě vrstvy co nejrychleji. Slibné možnosti aplikace kationaktivních a anionaktivních emulzí v závislosti na vlastnostech povrchu odpadů jsou na našem pracovišti studovány. Zcela neznámou veličinou při aplikaci asfaltových emulzí pro S/S různých odpadů je zatím obsah asfaltového pojiva s vysokým nebo naopak nízkým bodem měknutí, přesněji řečeno vliv bodu měknutí na povrchovou interakci daného asfaltu s konkrétním odpadem a na míchatelnost směsi odpad-asfaltová emulze.

2.4 S/S průmyslových kalů

Svým objemem představují kaly jednu z nejrozšířenějších **odpadových komodit**. Zákon přitom zdvojeně zakazuje ukládání kalů na skládkách všech skupin.⁶ Za prvé se zákaz týká jakéhokoliv odpadu, který sedimentací uvolňuje ve značné míře kapalnou fázi, a za druhé zákon stanovuje, že odpad s katalogovým číslem 190804 „kaly z čištění průmyslových odpadních vod“ musí být před uložením na skládku upraven stabilizací. Čistírenské kaly produkované dnes téměř každou výrobou obsahují často až 86 % vody, a to přes aplikaci flokulantů a strojní odvodnění. Tato velká množství vody, která se na skládce nesmí uvolňovat, znamenají při spalování mimořádně zápornou energetickou bilanci a pro aplikaci S/S kvalitativně nové výzkumné problémy. Úprava musí totiž zajistit navázání zmíněného vysokého obsahu vody, což vyžaduje aplikaci relativně velkého množství pojiva, čímž se řešení tohoto úkolu ekonomicky komplikuje. Pro účely S/S kalů jsme na našem pracovišti studovali možnosti použití **úletového popílku fluidního spalování uhlí**.¹³ Stabilizovanými odpady byly:

- a) **primární kal z čistírny průmyslových odpadních vod, Vítkovice a. s.**¹⁴,
- b) **kyselý průmyslový kal ze staré environmentální zátěže, z výroby oxidu titaničitého**¹¹,
- c) **aktivovaný kal z čistírny průmyslových odpadních vod, Synthesia a. s., Pardubice**¹⁵.

Pokročilá technologie **fluidního spalování uhlí (fluidized bed combustion = FBC)** představuje spojení požadavků na redukci plyných emisí s ekonomickou životaschopností. Literární údaje indikují a naše experimentální poznatky^{13, 16} ukázaly, že produkty fluidního spalování uhlí (FBC-P) mají řadu unikátních vlastností, které umožňují jejich aplikaci pro S/S nebezpečných odpadů.



Obr. 8 Koncepce technologického postupu S/S soli a popela pomocí asfaltových emulzí a přípravy zkušebních těles pro testy vyluhovatelnosti.

Ve všech našich studiích byl používán úletový popílek fluidního spalování černého uhlí, pocházející z Moravských tepláren Zlín, Cinergy Global Resources. Popílek z fluidního spalování má velký specifický povrch, je schopen vázat značné množství vody a zároveň solidifikovat odpad. Na našem pracovišti a i na několika dalších bylo ověřeno, že samotný nesolidifikovaný FBC-P neuvolňuje do vodného výluhu významná množství jakýchkoliv polutantů. Neméně důležitá je také skutečnost, že vodné výluhy FBC-P jsou v literatuře klasifikovány jako neškodné pro životní prostředí. Výsledky vyluhovatelnosti zkušebních těles připravených z FBC-P jsou přirozeně ještě příznivější a splňují dokonce parametry třídy I/I.

- a) **S/S primárního kalu z čistírny odpadních vod Vítkovice a. s.** lze posoudit z **TAB. 6**. Kritickými parametry pro S/S tohoto kalu jsou hodnoty DOC, obsahy NH_4^+ iontů a PAH. Obsah NH_4^+ iontů se po S/S sníží až pod detekční limit (0,5 mg/l) použité analytické metody. Nejdůležitějším výsledkem je významné snížení obsahu PAH ve vodných výluzích. Je zřejmé, že vysoký obsah PAH řadí zneškodněný kal až do IV. třídy vyluhovatelnosti. Dosažené hodnoty ukazují, že až na stabilizát s nejmenším uvedeným obsahem fluidního popílku, tj. 30 %, u kterého dochází už k rozpadu zkušebních těles při vyluhování, se všechny ostatní stabilizáty řadí dle obsahu PAH do třídy vyluhovatelnosti I/II (200 ng/l). Výrazný pokles obsahu PAH však není doprovázen obdobným poklesem DOC, který tak řadí stabilizát zneškodňovaného kalu „pouze“ do II třídy. Jak je vidět, pro přijatelnou S/S tohoto kalu je zapotřebí minimálně 40 % fluidního popílku, vztaženo na celkovou hmotnost stabilizátu. Protože bylo toto množství považováno producentem kalu a zadavatelem úkolu za příliš velké, byla uskutečněna referentní studie používající pro S/S tohoto kalu levný komerční cement, dodávaný v blízkosti místa, kde se zamýšlená S/S má provádět. Ukázalo se, že pro dosažení účelu S/S, tj. dokonalého vyvázání vody, a pro tvorbu pevnostně přijatelného stabilizátu je nutno použít rovněž asi 40 % cementu, tzn. stejného množství jako úletového popílku z fluidního spalování. Přitom navíc řada sledovaných parametrů vyluhovatelnosti je prakticky stejná. Obsah NH_4^+ je ve vodném výluhu vyšší (2,0 mg/l) a jeho konduktivita až dvakrát větší než u výluhů stabilizátů připravených z ekonomicky mimořádně výhodného fluidního popílku.

TAB. 6 Vybrané relevantní parametry vyluhovatelnosti stabilizátů kalu (Vítkovice a. s.) připravených pomocí popílku z fluidního spalování uhlí (Moravské teplárny Zlín, a. s.)

Obsah FBC-P %	DOC mg/l	Obsah NH_4^+ mg/l	PAH ng/l	Konduktivita mS/m	pH
30**	41,67	< 0,5	790,3	92	11,02
40	26,66	< 0,5	-	117	11,55
45	20,99	< 0,5	175,5	125	11,62
50	20,51	< 0,5	-	125	11,73
55	14,87	< 0,5	< 116,1	104	11,36
Třída vyluhovatelnosti II	30,00	5,0	3000	300	5,5-13,00
Kal (Vítkovice a.s.)	77,40	22,0	5450	182	7,55
FBC-P solidifikát (poměr voda/FBC-P = 0,5)	1,1	-	< 26,26	113	10,72

** u tohoto obsahu popílku dochází k rozpadu zkušebních těles při provádění výluhu

* pevnost v tlaku zkušebních těles stabilizátu se pohybuje kolem 7 až 8 MPa

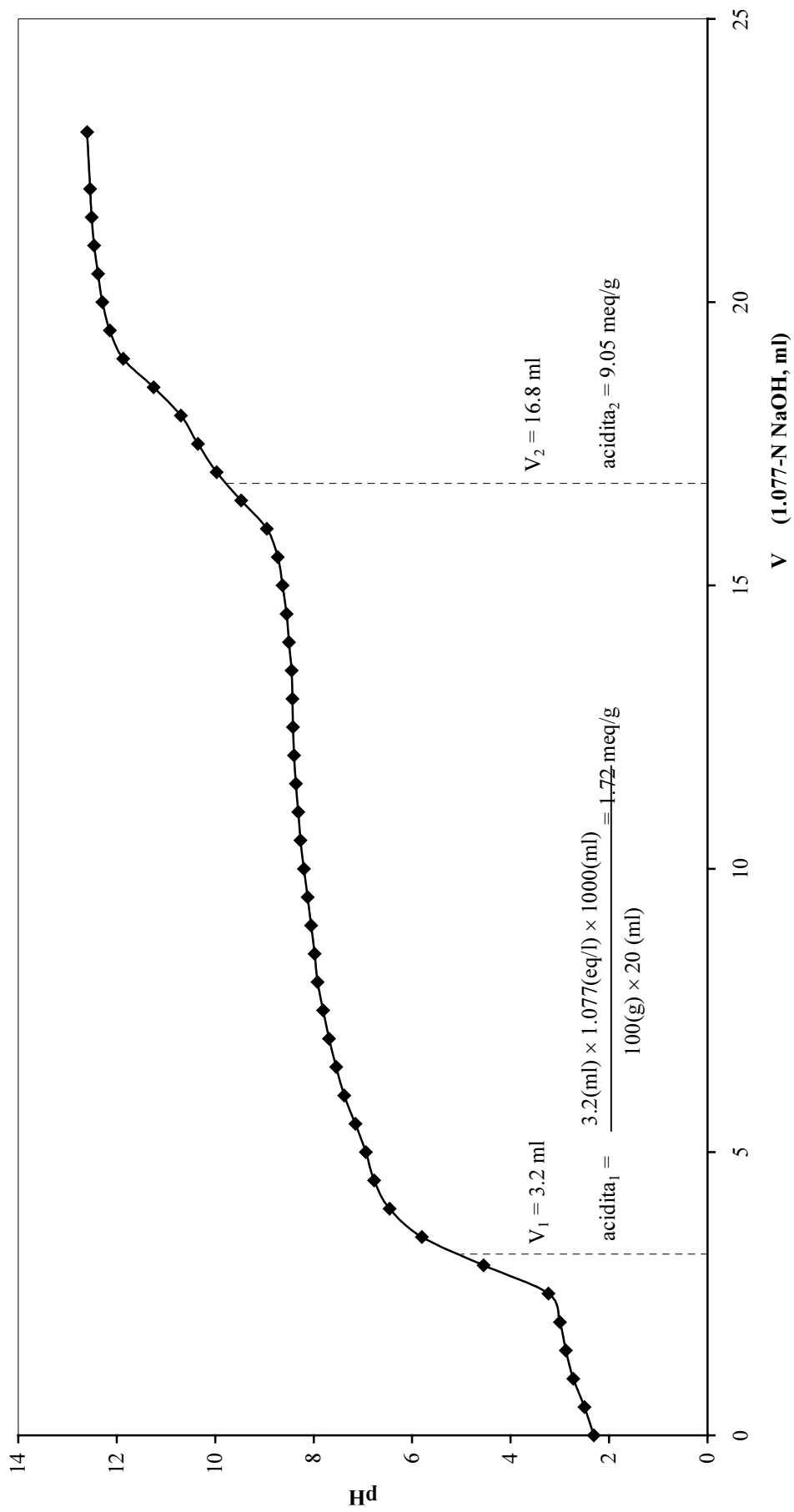
b) **Zneškodňovaný odpad ze staré environmentální zátěže po výrobě titanové běloby** představuje anorganický materiál. Podstatou je síran železnatý a železitý, obsahující kyselinu sírovou a hlušinový podíl výchozí suroviny, tedy nerostu ilmenitu. EU ve své směrnici 92/112/EEC¹⁷ vyžaduje, aby tento odpad byl zneškodňován bez ohrožování lidského zdraví nebo poškozování životního prostředí. Z titrační křivky uvedené na **Obr. 9** je zřejmé, že prvotním krokem při zneškodňování tohoto odpadu musí být zneutralizování jeho relativně vysoké acidity. Z křivky je také patrné, že pro zneutralizování obsažené volné kyseliny připadající na 1 kg sušiny odpadu je zapotřebí 1,72 eq neutralizačního činidla (např. 48,2 g CaO). Úspěšnost stabilizace je patrná z **TAB. 7**. Je zřejmé, že u směsí s *poměrem hmotností odpad/pojivo* 0,5 je odpad dostatečně zneutralizován. Ve vodných výlužích zkušebních těles s *poměrem odpad/pojivo* 0,5 a 0,6 byly metodou AAS stanovovány následující kovy: Fe, Co, Ni, Cr, Mn, Cd, Pb. Analýzy prokázaly, že vodné výluhy vyhovují limitním hodnotám třídy I/II. Tyto výsledky dokazují, že kovy přítomné v odpadu (především Fe, Co, Ni) jsou pevně vázány v matici pojiva. Stabilizát s *poměrem odpad/pojivo* 0,5 znamená dávkování 10 t úletového popílku, 7,7 t surového odpadu (5 t sušiny odpadu) a 4 t vody. Jednoduchým výpočtem z hodnot neutralizačních kapacit odpadu (9,05 eq/kg) a úletového FBC-P (4,5 eq/kg¹³) je možné dokázat, že takto relativně vysoké dávkování pojiva je pro dosažení zneškodnění odpadu skutečně nezbytné.

TAB. 7 S/S odpadu z výroby titanové běloby pomocí úletového popílku, produkovaného fluidním spalování uhlí (parametry vodných výluhů zkušebních těles po 4 měsících tvrdnutí)

# směsi	Poměr hmotností odpad/pojivo	pH	Konduktivita [mS/m]
1	0,00	11,55	122
2	0,15	8,90	129
3	0,30	7,80	150
4	0,40	6,95	169
5	0,50	6,94	166
6	0,60	6,69	195
7	0,70	5,11	586
8	0,90	3,54	724
10	1,20	3,55	757

poměr odpad/pojivo = hmotnost sušiny odpadu ku hmotnosti pojiva.

Vedle výše uvedeného S/S odpadu pomocí úletového FBC-P byla pro srovnání provedena referentní S/S tohoto odpadu pomocí levného komerčního cementu. Vybraná zkušební tělesa, hodnoty konduktivity a pH jejich výluhů jsou uvedeny v **TAB. 8**. Z výsledků je zřejmé, že cementové pojivo stabilizuje zneškodňovaný odpad o něco lépe než FBC-P. Pro dosažení přibližně stejné kvality S/S by bylo možno dávkovat cementového pojiva asi o 20 % méně než FBC-P. To však přesto znamená, s ohledem na o 2 řády rozdílnou cenu cementu a FBC-P, že aplikace úletového popílku pro S/S zneškodňovaného odpadu je ekonomicky daleko výhodnější.



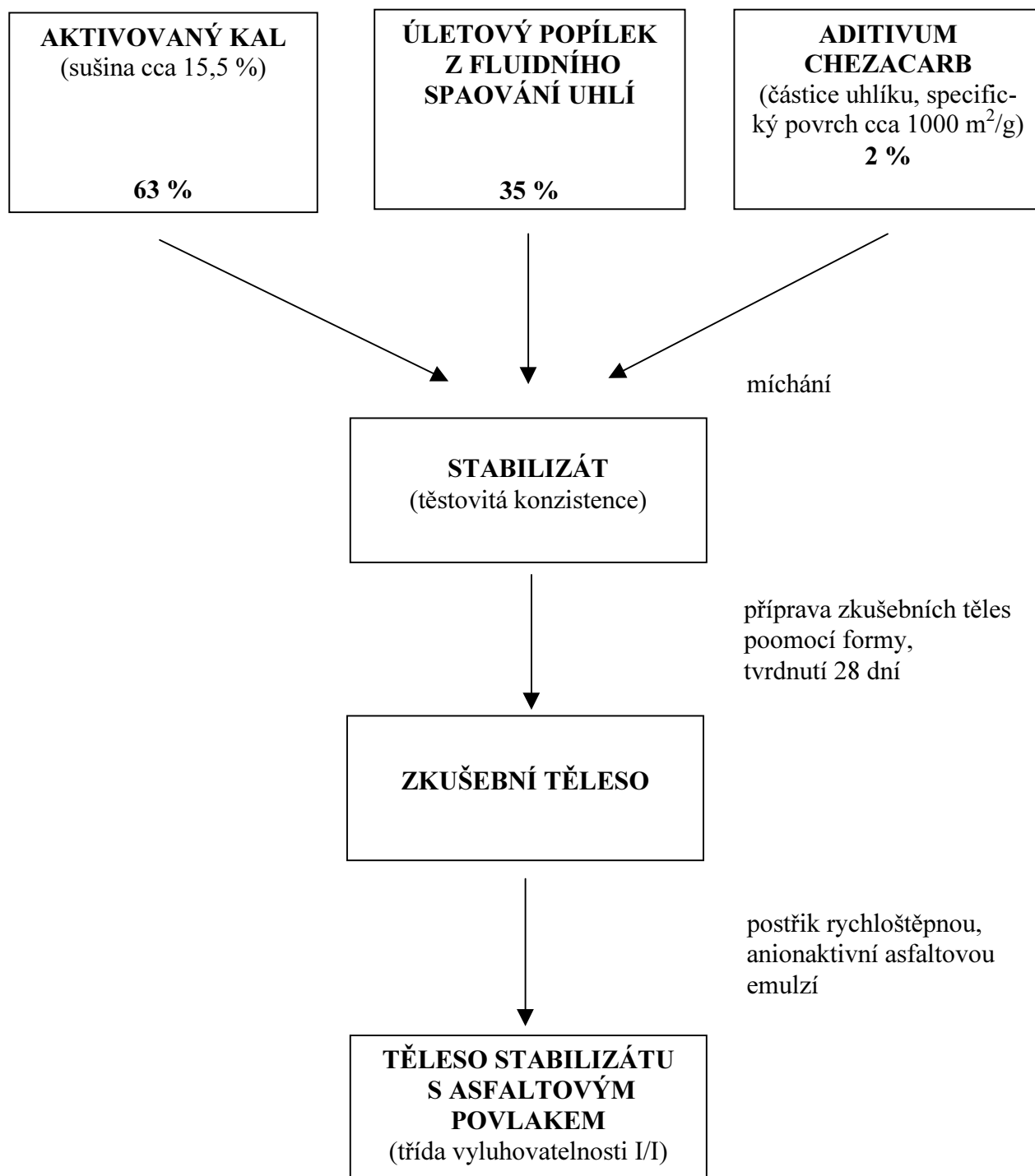
Obr. 9 Potenciometrická titrační křivka vodného výluhu odpadu z výroby titanové běloby; titrováno 20 ml výluhu (1 l vody na 100 g sušiny odpadu; sušina: 64,6 %)

TAB. 8 Základní parametry vodných výluhů zkušebních těles, připravených referentní S/S odpadu z výroby titanové běloby pomocí komerčního cementu.

# směsi	Poměr hmotností odpad/pojivo	pH	Konduktivita [mS/m]
1	0,32	11,42	139,2
2	0,65	10,80	145,2
3	1,29	4,75	344

- a) **S/S aktivovaného kalu** je předmětem našeho současného studia. Je třeba konstatovat, že aplikace samotného úletového popílku z fluidního spalování (bez přidavku dalšího aditiva) vede pouze k solidifikaci kalu, nikoliv však k přesvědčivé stabilizaci. Vodné výluhy stabilizátu vykazují relativně vysoký parametr DOC, konkrétně se pohybuje kolem 150 mg/l, přičemž limitní hodnota pro třídu vyluhovatelnosti II činí 30 mg/l a pro III. třídu tento parametr není stanoven. Dávkování popílku musí dosahovat 55 % hmotnosti stabilizátu už jenom pro vyvázání zmíněného velkého množství obsažené vody. Ve snaze najít úspěšné řešení byla testována celá řada **aditiv**, jejichž výběr sledoval dva účely: a) zvýšení **vázání vody**, b) **adsorpce organických látek** přecházejících do výluhu. Z testovaných aditiv je možno jmenovat karboxymethylcelulosu o různých molárních hmotnostech (polyaniont), mírně zesíťovanou kyselinu polyakrylovou (polyaniont, který je v současné technické praxi používán jako superabsorbent), různé druhy aktivního uhlí, aktivní koks, jemně mleté hnědé uhlí (technické adsorbenty) a dva druhy bentonitů (jeden s vysokými sorpčními účinky a druhý těsnící). Vliv jmenovaných aditiv byl nedostatečný, protože všechna testovaná aditiva snižovala parametr DOC v nejlepším případě zhruba na necelou polovinu.

Jako nejlepší aditivum se ukázal komerční výrobek **CHEZACARB**, což je vedlejší produkt výroby syntetického plynu, firma Chemopetrol Litvínov. Podstatou CHEZACARBU je uhlík ve formě nepravidelných granulí (cca 1 mm) se specifickým povrchem přesahujícím 1000 m²/g a sypanou hmotností 0,115 g/ml. Testování a ověřování vypracovaného postupu S/S není dosud ukončeno. Podstata zamýšlené technologie je znázorněna na **Obr. 10**. Významný je poznatek, že aplikace relativně malého množství (2 %) CHEZACARBU umožňuje snížit potřebnou dávku fluidního popílku o 15 až 20 %, aniž by se snížilo vázání vody. Adsorpční efekt CHEZACARBU je však nedostačující, a proto ověřovaný postup S/S má zařazenu tvorbu sekundární bariery pomocí asfaltové emulze. Dosažené výsledky vyluhovatelnosti řadí stabilizáty aktivovaného kalu opatřené asfaltovým povlakem dokonce do I/I třídy.



Obr. 10 Konceptce technologického postupu S/S aktivovaného kalu z čistírny průmyslových odpadních vod a přípravy zkušebních těles.

3 ZÁVĚR

V úvodní části přednášky byly definovány technologické postupy stabilizace/solidifikace odpadů a bylo ukázáno místo těchto procesů v hierarchii odpadového hospodářství. Na základě **navržené odpadové mapy** byla hledána odpověď na otázku, jaké odpady se zneškodňují, nebo by se měly zneškodňovat pomocí stabilizačních/solidifikačních procesů. Dále byl učiněn **pokus o srovnání a konfrontaci stabilizace/solidifikace se spalováním, popř. přímým skládkováním odpadů.**

V části věnované vlastnímu uskutečňovanému experimentálnímu výzkumu, jeho výsledkům a přínosům byl ukázán vývoj a ověřování stabilizace/solidifikace řady konkrétních průmyslových odpadů. Společným znakem těchto postupů je **odmítnutí komerčních cementů** jako pojiva, jejich **substituce popílkem z fluidního spalování uhlí** a výrazná **preferenze asfaltových pojiv**. Ve vyvíjených technologiích používaná **koncepte stabilizace/solidifikace asfaltovými vodnými emulzemi** představuje **novou strategii zneškodňování odpadů**. Kombinace solidifikace kalových odpadů pomocí fluidního popílku spolu s následnou tvorbou **sekundární bariery** pomocí asfaltových emulzí představuje perspektivní alternativu současným používaným technologiím zneškodňování těchto masově produkováných odpadů.

ABSTRACT

Technological procedures of waste stabilization/solidification have been defined and their position in the hierarchy of waste management has been shown. A waste management map has been suggested and an answer to the question, what wastes are to be disposed by S/S processes, has been searched for. Furthermore, an attempt at comparison and confrontation of S/S technology with waste incineration, eventually with direct waste landfill disposal, has been carried out.

In the part dedicated to the author's experimental research, results and contributions, development and verification of S/S procedures for particular industrial wastes have been outlined. A common sign of these procedures is refusal of the Portland cement as a S/S binder, its substitution by fluidized bed combustion fly ash and an expressive preference of asphalt binders. The used conception of S/S by asphalt aqueous emulsions represents quite a new strategy for waste disposal. The incorporation of sludge waste solidification by fluidized bed combustion fly ash with subsequent asphalt coating formation by asphalt emulsions represents a perspective option to the contemporary used technologies for the disposal of these mass produced wastes.

LITERATURA

- 1 MEANS, J. L. at al: „The Application of Solidification/Stabilization to Waste Materials“, Lewis Publishers: Boca Raton, FL, 1995.
- 2 CONNER, J. R.: „Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes“, Van Nostrand Reinold: New York, 1990.
- 3 SPENCE, R. D. at al: „Chemistry and Microstructure of Solidified Waste Forms“, Lewis Publishers: Boca Raton, FL, 1993.
- 4 Kolektiv autorů: „Výzkum progresivních fyzikálních a chemických postupů zneškodnění toxických a nebezpečných průmyslových odpadů zejména solidifikací“. Závěrečná zpráva úkolu GAČR 104/97/0127, Ústav technologie životního prostředí a chemie, FT Zlín VUT v Brně, 1999.
- 5 VONDRUŠKA, M. at al: „Fixace nebezpečných průmyslových odpadů“. Dílčí zpráva úkolu GAČR 104/99/1565, Ústav technologie životního prostředí a chemie, FT Zlín VUT v Brně, 1999.
- 6 Zákon o odpadech č. 125/1997 Sb., Sběrka zákonů České republiky.
- 7 Anonym: „Emise dioxinů“. Odpady **10** (2000), 5.
- 8 VONDRUŠKA, M. at al: „Stabilization of Incinerator Ash with High Chromium (VI) Content“. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management **2** (1998), p. 158.
- 9 VONDRUŠKA, M. at al: „Stabilization/Solidification of Salt from a Waste Incinerator“. Journal of the Air & Waste Management Association, **50** (2000), p. 453.
- 10 VONDRUŠKA, M. at al: „Stabilization/Solidification of Waste Incinerator Salt and Ash by Asphalt Emulsions“. Environmental Science & Technology, submitted, manuscript #ES 011353G.
- 11 VONDRUŠKA, M. at al: „Stabilization/Solidification of Waste Ferrous Sulphate from Titanium Dioxide Production by Fluidized Bed Combustion Product“. Waste Management **21** (2001), p. 11.
- 12 NICOLLE, H. G. M. – PANKHURST, E. S.: „Bitumen Versus Coal Tar for Pipeline Coatings: Biological Aspects“. 2nd International Conference on the Internal and External Protection of Pipers, University of Kent at Canterbury, 1977.
- 13 BEDNAŘÍK, V. – VONDRUŠKA, M. – ŠILD, M. – VONDRUŠKOVÁ, E.: „Characterization of Product from Fluidized Bed Combustion of Coal“. Journal of the Air & Waste Management Association, **50** (2000), 11.
- 14 VONDRUŠKA, M. at al: „Stabilizace/solidifikace průmyslových kalů pomocí produktů fluidního spalování“. Transfer 99, VUT v Brně.
- 15 BEDNARIK, V. - VONDRUŠKA, M.: „Stabilization/Solidification of Waste Water Activated Sludge“, Journal of Environmental Engineering, submitted, manuscript #EE/2001/022870.
- 16 VONDRUŠKA, M. at al: „Produkty fluidního spalování uhlí“. Energie **IV** (1999), 118.
- 17 Council Directive 92/112/EEC of 15 December 1992 on procedures for harmonizing the programmes for the reduction and eventual elimination of pollution caused by waste from the titanium dioxide industry, Official Journal of the European Communities, L-409, 31. 12. 1992, p. 11.

Představení autora:

Doc. Ing. Milan Vondruška, CSc.

(10. 2. 1944, Městec Králové, okres Nymburk, zástupce ředitele Ústavu technologie životního prostředí a chemie, Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati, 762 72 Zlín, E-mail: vondruska@ft.utb.cz)

Absolvoval Střední průmyslovou školu chemickou v Ústí nad Labem (1958/62) a VŠCHT Pardubice (1962/67), obor „Technická analytická a fyzikální chemie“. V letech 1968–1970 pracoval ve Státním výzkumném ústavu kožedělném Zlín jako výzkumný pracovník v laboratoři fyzikálně chemických metod. V roce 1970 nastoupil na Fakultu technologickou ve Zlíně Vysokého učení technického v Brně jako výzkumný pracovník, kde se v roce 1971 stal odborným asistentem pro předmět analytická chemie. V letech 1973–1977 absolvoval vědeckou aspiranturu na VŠCHT Pardubice a v roce 1977 získal titul kandidáta chemických věd v oboru analytická chemie (disertační práce: „Chromatografická separace a analytické studium polysacharidů aktivovaného kalu“). V letech 1975–1976 absolvoval postgraduální studium vysokoškolské pedagogiky na VUT v Brně. V roce 1980 se habilitoval v oboru analytická chemie (habilitační práce: „Uplatnění kapalinové chromatografie v oboru kožedělné, plastikářské a gumárenské technologie“). V roce 1980 absolvoval dlouhodobou pracovní stáž na Univerzitě Amsterdam v laboratoři kapalinové chromatografie. Je spoluzakladatelem Ústavu technologie životního prostředí a chemie na Fakultě technologické ve Zlíně (1991). V průběhu své pracovní kariéry vedle vyučování předmětu Analytická chemie, Instrumentální analýza a Environmentální analýza se ve své výzkumné práci zabýval chemickou analýzou odpadních vod, čistírenských aktivovaných kalů pomocí kapalinové chromatografie, studiem polyelektrolytů a tvorbou polyelektrolytových komplexů, po roce 1990 se zaměřil na stabilizaci/solidifikaci nebezpečných průmyslových odpadů.