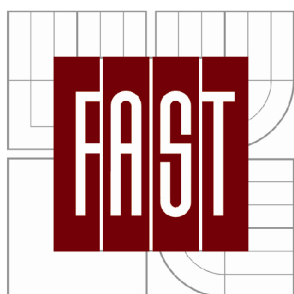


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VYUŽITÍ A APLIKACE VEDLEJŠÍCH ENERGETICKÝCH PRODUKTŮ (VEP) V SILNIČNÍM STAVITELSTVÍ

THE USAGE AND APPLICATIONS OF THE SECONDARY ENERGY PRODUCTS TO
ROADS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VERONIKA IŠTVÁNKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Veronika Ištvanková

Název Využití a aplikace vedlejších energetických produktů (VEP) v silničním stavitelství

Vedoucí bakalářské práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2011

Datum odevzdání bakalářské práce 25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011

.....
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Výzkumné zprávy z let 2000 až 2010

internetové odkazy na www. stránky s informacemi o využití VEP v silničním stavitelství

sborníky zahraničních konferencí s popisem použití VEP do konstrukčních částí pozemní komunikace

Zásady pro vypracování

Základem práce je zpracování řešerše zaměřené na využití vedlejších energetických produktů z průmyslové výroby do konstrukce pozemní komunikace. V praktické části je hlavním cílem práce sledovat vlastnosti nejpoužívanějších VEP v ČR se zaměřením na negativní vlastnosti ovlivňující větší využití těchto druhotných materiálů.

Předepsané přílohy

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Teoretická část - s analýzou používání VEP v ČR a zahraničí
4. Praktická část - zjištění vybraných vlastností některých VEP a jejich dopad na využití v konstrukci vozovky
5. Zhodnocení práce
6. Závěr
7. Literatura

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá sledováním výroby elektrické energie a následným vznikem a vlastnostmi vedlejších energetických produktů, jejich využíváním a aplikací v silničním stavitelství. Praktická část práce je zaměřena na laboratorní zkoušení několika vzorků vyrobených z vedlejších energetických produktů a vyhodnocením problematických vlastností – zejména citlivost na vodu a s tím související objemové změny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pozemní komunikace, vedlejší energetické produkty, elektrárenský popílek, fluidní popílek, energosádrovec, struska

ABSTRACT

This thesis deals with monitoring the production of electric power and consequent formation and properties of the secondary energy products, their usage and applications to roads. The practical part of this thesis is focused on laboratory testing of several samples of the secondary energy products and evaluation of problematic properties – in particular the sensitivity to water and related volume changes.

KEYWORDS

Road construction, secondary energy products, fly ash, fluidized bed ash, gypsum, slag

IŠTVÁNKOVÁ, Veronika. *Využití a aplikace vedlejších energetických produktů (VEP) v silničním stavitelství*. Brno, 2012. 59 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2012

.....
podpis autora

Poděkování:

Ráda bych poděkovala Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D. za pomoc a cenné rady při zpracování této bakalářské práce.

OBSAH:

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
CÍLE PRÁCE.....	12
ÚVOD.....	13
1. VEDLEJŠÍ ENERGETICKÉ PRODUKTY	14
1.1 Zařízení pro výrobu VEP.....	15
2. POPÍLKY	16
2.1 Elektrárenský popílek	16
2.1.1 Původ materiálu	16
2.1.2 Vlastnosti popílku a ložového popela	16
2.2 Fluidní popílek.....	18
2.2.1 Původ materiálu	18
2.2.2 Vlastnosti fluidních popílků.....	19
2.3 Technické požadavky na stabilizovaný a nestabilizovaný popílek a popel.....	19
2.4 Užití popílku v silničním stavitelství.....	21
2.5 Zlepšení zemního tělesa pozemních komunikací	23
2.6 Použití popílku v krytu a podkladních vrstvách	24
2.7 Stav užívání elektrárenských popílků v pozemních komunikacích v ČR	26
2.8 Příklady použití popílků v pozemních komunikacích v ČR.....	29
2.9 Příklady použití popílků v pozemních komunikacích v zahraničí	33
3. ENERGOSÁDROVEC	34
3.1 Původ materiálu	34
3.2 Vlastnosti energosádrovců.....	35
3.3 Využití energosádrovců.....	35
4. STRUSKA	36
4.1 Původ materiálu	36
4.2 Vlastnosti strusky	36
4.3 Využití strusky.....	36
5. ENERGETICKÁ SPOLEČNOST ČEZ.....	38
5.1 Skladba a nabídka VEP v elektrárnách skupiny ČEZ	39
6. VYSOKOPECNÍ STRUSKA	41
6.1 Původ materiálu	41

6.2 Fyzikální a chemické vlastnosti.....	42
6.3 Kontrola kvality materiálů.....	42
6.4 Užití strusek v silničním stavitelství.....	43
6.5 Technologie se struskovým kamenivem.....	44
6.5.1 Asfaltové směsi	44
6.5.2 Nestmelené podkladní vrstvy	44
6.5.3 Stmelené směsi hydraulickým pojivem	44
6.6 Speciální podmínky návrhu použití do konstrukce vozovky.....	44
6.6.1 Kontrola kvality při provádění vrstev ze struskového kameniva.....	45
6.7 Stav užívání struskového kameniva z vysokopecní strusky v ČR.....	45
6.8 Příklady použití vysokopecní strusky v pozemních komunikacích v ČR	46
7. VLIVY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	47
8. PRAKTICKÁ ČÁST.....	49
8.1 Výroba zkušebních těles	49
8.2 Experimentální stanovení nasákavosti a objemového bobtnání	52
ZÁVĚR	55
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2.1 Elektrárenský popílek
- Obr. 2.2 Mikroskopický snímek popílku
- Obr. 2.3 Vzorový řez násypem – varianty při použití popílku a popelů a výrobků z nich
- Obr. 2.4 Mísení zeminy s popílkem
- Obr. 2.5 Hutnění stabilizované zeminy
- Obr. 2.6 Hodnoty CBR a IBI podle ČSN EN 13286-47 – zeminy zlepšené popílkem při zamezení odpařování
- Obr. 2.7 Letecký snímek výstavby komunikace R6
- Obr. 2.8 Nasypání lehčeného tělesa, dole popílek, na něm vrstva Liaporu
- Obr. 2.9 Přetížený násyp
- Obr. 2.10 Stavba cyklostezky
- Obr. 2.11 Hotová cyklostezka
- Obr. 3.1 Schéma odsíření mokrou vápencovou cestou
- Obr. 4.1 Stavba dálnice D11
- Obr. 4.2 Stavba MÚK Opatovice
- Obr. 5.1 Schéma tepelné elektrárny
- Obr. 6.1 Vyprazdňování žhavé strusky
- Obr. 6.2 Struskové kamenivo, frakce 63 – 125 mm
- Obr. 6.3 Zhutnění technologické vrstvy struskového kameniva z vysokopecní strusky po prvním pojezdu
- Obr. 6.4 Zhutnění na požadovanou hodnotu míry zhutnění
- Obr. 6.5 Dálnice D4708 – odtěžování konstrukčních vrstev a svrchní části aktivní zóny, které byly postiženy objemovými změnami
- Obr. 7.1 Skládka popílku u Počerad
- Obr. 8.1 Zařízení Proctor Standard
- Obr. 8.2 Odformování tělesa
- Obr. 8.3 Uložení vzorků ve vlhkém prostředí
- Obr. 8.4 Vážení těles
- Obr. 8.5 Saturační zkouška
- Obr. 8.6 Závislost nasákavosti na čase

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1	Limitní hodnoty výluhu
Tab. 2.2	Srovnání cen druhotných surovin a přírodních materiálů
Tab. 8.1	Klasický popílek
Tab. 8.2	Fluidní popílek
Tab. 8.3	Klasický popílek + 3 % CaO
Tab. 8.4	Fluidní popílek + 3 % CaO
Tab. 8.5	Hmotnosti vzorků při saturaci vodou
Tab. 8.6	Vypočtené nasákavosti v různých časech

CÍLE PRÁCE

Cílem práce je souhrnné rozdělení vedlejších energetických produktů použitelných v silničním stavitelství. Teoretická část se zabývá sledováním výroby elektrické energie a následným vznikem vedlejších energetických produktů, mezi které patří popel a popílek z klasického spalování, popel a popílek z fluidního spalování, struska, škvára, energosádrovec. Tyto produkty vznikají spalováním uhlí v roštových, fluidních a klasických topeništích anebo to jsou tuhé zbytky po odsíření kouřových spalin polosuchou metodou nebo mokrou vápencovou vypírkou. Dále do této práce byla zařazena vysokopecní struska, která mezi vedlejší energetické produkty nepatří, ale jedná se o velmi aktuální a využívanou surovinu v silničním stavitelství. V práci jsem se soustředila především na sledování vlastností vedlejších energetických produktů ovlivňujících výsledné složení stavebních silničních směsí. Především se jedná o limitní hodnoty výluhu, nasákavost, objemové změny, mrazuvzdornost, mechanickou odolnost.

V odborné literatuře jsou VEP popisovány jako materiály s problematickým využitím ve stavebnictví, proto jsem se v praktické části práce detailněji zabývala jejich vlastnostmi. Především se jednalo o experimentální nasákavost a objemové změny stanovené na zhotovených válcových zkušebních tělesech.

ÚVOD

Energetika tvoří neoddělitelnou součást hospodářství každého státu. Předmětem zájmu energetiky jsou energetické suroviny. Energetickými surovinami nazýváme nerosty, z nichž je možno získávat energii. Dělí se na skupinu kaustobiolitů (fosilních paliv) a radioaktivních látek (uran, thorium a radium). Kaustobiolity jsou hořlavé uhlovodíky, které vznikly nahromaděním odumřelé organické substance a patří mezi ně například rašelina, lignit, hnědé a černé uhlí, antracit, ropa, zemní plyn, propanbutan, hydráty methanu, asfalt.

Při spalování uhlí v tepelných elektrárnách a v průběhu odsíření spalin vznikají odpady, které se nazývají vedlejší energetické produkty a je jich celá řada. Patří mezi ně například popel a popílek z klasického spalování, popel a popílek z fluidního spalování, struska, škvára, energosádrovec.

K hlavním celosvětovým problémům současnosti patří vysoká produkce odpadů, která má následně rozsáhlý dopad na životní prostředí. V Evropské unii se vyprodukuje za rok až kolem 1,3 miliardy tun odpadů. Snahou každé vyspělé společnosti by proto měla být minimalizace vzniku odpadů a maximalizace jejich druhotného využití. Situace v České republice je ale zatím jiná. Zde se 70 – 80 % odpadů uchovává na skládkách nebo se spaluje. Naproti tomu například v Nizozemí se využívá nebo vyváží 100 % energetických odpadů.

K využívání odpadů, které energetika produkuje, vytvářejí vlády zemí různé podmínky. Ty producenty odpadů motivují či přímo nutí odpady využívat. Například jak v ČR uvádí zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech: Mezi základní povinnosti producentů odpadů patří jejich přednostní využívání před jejich odstraněním s tím, že materiálové využití vzniklých odpadů má naprostou přednost před jakýmkoliv jiným využitím.

Vedlejší energetické produkty je možné využít jako druhotné suroviny a to v případech, pokud splňují specifické požadavky na jejich vlastnosti, které jsou zakotveny v normách, vyhláškách a zákonech. [1] [2]

V současné době jsou známy možnosti využití odpadních materiálů při výrobě většiny typů stavebních hmot a hledá se způsob, který by vyhovoval požadavkům na budoucí výrobky či stavební hmoty jak z hlediska technologického a ekologického, tak i z pohledu ekonomiky výroby.

Největším uživatelem odpadů, zejména velkoobjemových, je cementářský průmysl, dále pak výroba betonu a pórobetonu, výroba hrubé keramiky, ale také oblast silničního stavitelství, kde se vedlejší energetické produkty dají využít pro násypy a zásypy při stavbě pozemních komunikací a pro konstrukční vrstvy vozovek.

Značnou nevýhodou zpracování odpadů je proměnlivost jejich složení jak z chemického, tak i z mineralogického hlediska. Tato rozmanitost je typická nejen pro různé provozovny, kde odpady vznikají, ale jejich složení je proměnlivé v čase i pro jednu konkrétní provozovnu. Aplikace konkrétního odpadu do stavebního materiálu je třeba vždy experimentálně ověřit a zkušenosti z předchozího použití lze využít pouze jako pojitko, jakými směry se u jednotlivých typů odpadů ubírat. [3]

1. VEDLEJŠÍ ENERGETICKÉ PRODUKTY

Vedlejší energetické produkty jsou odpady z tepelných procesů, tj. především všechny varianty tuhých zbytků po spalování uhlí a tuhé zbytky z odsíření kouřových spalin energetických a teplárenských zdrojů. Z hlediska materiálového využití jsou v České republice vysoce aktuální a významné. Po vytvoření odpovídajících dokumentačních, technických, organizačních a obchodních podmínek se v souladu s právními předpisy stávají tzv. certifikovanými výrobky. Za odpady se považují jen nevyužité vedlejší energetické produkty, které je třeba odstranit uložením na skládky.

Pro následné využívání tuhých zbytků po spalování fosilních paliv jsou nutné znalosti a informace o jejich jakostně - technologických vlastnostech, pro které jsou určující typy spalovacích procesů.

Z hlediska charakteristiky a názvosloví se jedná o:

- Druhy spalovacího procesu:
 - Klasické práškové topeniště – produkce strusky a popílku
 - Roštové topeniště – produkce škváry a popílku
 - Fluidní topeniště – produkce popela a popílků z odsíření spalin tzv. aktivních popelů se zbytkovým obsahem CaO
- Tuhé zbytky (produkty) po spalování uhlí:
 - Popílek – složka tuhých zbytků po spalování uhlí unášená spalinami z ohniště (a zachycená variantními typy odlučovačů)
 - Struska – tuhé zbytky po spalování uhelného prášku ve vzhledu, odloučení přímo v topeništi (ohništi)
 - Škvára – tuhé zbytky po spalování uhlí ve vrstvě odváděné přímo z roštového topeniště (ohniště)
 - Popel – směs složek tuhých zbytků po spalování (část popílku, struska), vznikající obvykle při jejich soustřeďování z jednotlivých výpustí technologického zařízení před společným odsunem
- Druhy technologie odsíření spalin:
 - Mokrý vápencová vypírka – produkt energosádrovec, dihydrát síranu vápenatého $\text{CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
 - Polosuchá metoda odsíření spalin – produkt z odsíření, prachový materiál obsahující reakční produkty odsířování – vápenné soli
- Tuhé zbytky (produkty) odsíření spalin:
 - Energosádrovec – z mokré vápencové vypírky spalin
 - Produkt z odsíření – z polosuché metody odsíření [4]

1.1 Zařízení pro výrobu VEP

Fluidní kotle

Fluidní kotle patří k nejpoužívanějším zařízením zejména ve větších a středních teplárnách a elektrárnách. Dnes se ve fluidních kotlích vyrábí až 50 % světové elektrické energie.

Palivem pro fluidní kotle je jemně rozemleté uhlí (případně i jiné látky) smíšené se vzduchem. Využívá se vznosu, který vzniká vhněním spalovacího vzduchu ze spodu kotle do vrstvy jemných částic paliva. Vznikne tak fluidní vrstva. Ta tvoří disperzní systém, který se vytváří průtokem plynu vrstvou částic nasypných pod pórovité dno – tzv. fluidní rošt. Náplň fluidní vrstvy tvoří palivo, odsiřovací aditivum (většinou vápenec) a aditivum pro stabilitu fluidní vrstvy.

Jemně rozemleté práškové uhlí má daleko větší povrch než stejný objem kusového uhlí, takže rychle a stejnoměrně shoří na jemný popel. Fluidní kotel dosahuje vysoké účinnosti (37 – 48 %) a nízká teplota (700 – 900 °C) – ve srovnání s teplotami klasických spalovacích systémů – významně snižuje tvorbu oxidů dusíku a také redukuje spékání a zanášení ohniště struskou. Na druhou stranu se však jedná o zařízení poměrně složitá, které se musí před spuštěním přehřívat, navíc vyžaduje mlýn na uhlí a další zařízení.

Roštové kotle

V roštovém kotli dochází ke spalování kusových paliv v pevné vrstvě. Dělí se do dvou základních skupin. První skupinu tvoří kotle s pevným roštěm (palivo vyhořívá v původní nasypané vrstvě, zbytky po spalování – škvára a popel se odstraňují ručně). Druhou skupinu tvoří kotle s mechanickým roštěm (palivo se v ohništi posouvá, případně se prohrabuje, postupně vyhořívá a zbytky po spalování jsou vynášeny mechanicky). Spalování probíhá ve dvou fázích, a to ve vrstvě na roštu a v prostoru nad vrstvou paliva.

Práškové kotle

V práškových kotlích se vhně uhlý prach spolu s primárním vzduchem (na rozdíl od roštových kotlů, kde se uhlí sype na rošt). Vzduch se vhně turbodmychadlem pod tlakem pro rychlejší spalování. Současně se vhně i uhlý prach do celého objemu ohniště. Doba spalování je u práškových kotlů 1 až 3 sekundy, zatímco při spalování na roštu bývá v desítkách minut. [1]

2. POPÍLKY

2.1 Elektrárenský popílek

2.1.1 Původ materiálu

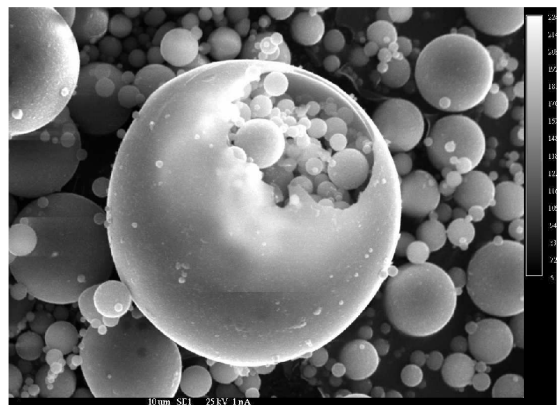
Elektrárenský popílek je produkt získaný spalováním uhlí v tepelných elektrárnách, vyznačující se obsahem velmi jemných stejnozrných částic kulovitého tvaru (viz obr. 2.2). Před spalováním je uhlí rozemleto v mlýnech a vháněno do kotle proudem horkého vzduchu, přitom je spalováno za teploty $(1500 \pm 200) ^\circ\text{C}$. Reakce závisí nejen na teplotě, ale také na typu spalovaného uhlí, velikosti pomletých spalovaných částic a době spalování.

Spalování vytváří dva typy druhotné suroviny:

- klasický úletový (polétavý) popílek (cca 80 % ze vzniklého polétavého druhotného materiálu),
- ložový popel někdy nazývaný jako popelová struska (cca 20 %). [6]



Obr. 2.1: Elektrárenský popílek
[13]



Obr. 2.2: Mikroskopický snímek
popílku [14]

2.1.2 Vlastnosti popílku a ložového popela

Suchý úletový popílek

Suchý úletový popílek má obvykle charakter velmi jemného prachu, měkkého na dotek s více méně čistě šedivou barvou přecházející v některých případech do krémově hnědé až šedo-černé barvy, což způsobuje nevytvořený oxid železa, koncentrace uhlí a obsah vody.

Fyzikální vlastnosti suchého úletového popílku závisí na:

- chemickém složení složek uhlí,
- stupni pomletí uhlí,
- typu kotle,
- teplotě spalování,
- systému dopravy popílku z tepelné elektrárny.

Průměrná zrnitost nemletých elektrárenských popílků je srovnatelná s používaným portlandským cementem a to od 0,2 do 200 μm průměru částic. Specifický povrch (hodnota podle Blaina) je většinou mezi 2200 až 4000 cm^2/g , ale i vyšší od 5000 do 8000 cm^2/g , což závisí na typu elektrárny.

Zdánlivá objemová hmotnost částic je do 890 kg/m^3 a specifická hmotnost částic je 2000 až 2900 kg/m^3 . Objemová hmotnost sušiny zhutněného popílku při optimální vlhkosti je 1100 až 1300 kg/m^3 .

Ložový popel

Ložový popel je zrnitý materiál s porézní povrchovou texturou. Velikost částic je různá a pohybuje se mezi jemnozrnným štěrkem až jemnozrnným pískem s nízkým obsahem částic menších než 0,063 mm. Je to dobře zrněný materiál s hlavní složkou velikosti písku.

Měrná hmotnost ložového popela závisí na chemickém složení. Pokud se zvyšuje obsah uhelných zbytků, snižuje se měrná hmotnost, běžné hodnoty se pohybují do 2100 – 2700 kg/m^3 . Ložový popel s nízkou měrnou hmotností se rychleji rozpadá pod aktivním velkým zatížením.

Mezi základní laboratorní zkoušky určující vhodnost použití připraveného ložového popela do pozemních komunikací patří:

- maximální objemová hmotnost suchého zhutněného materiálu: 1210 až 1620 kg/m^3 ,
- optimální vlhkost: 12 až 24 %,
- odolnost proti drcení (zkouška LA): 30 až 50 %,
- úhel vnitřního tření: 38 až 42°,
- poměr únosnosti CBR: 40 až 70 %,
- koeficient propustnosti: 10^{-2} až 10^{-3} cm/sec .

Chemické složení popílku a ložového popela je velmi variabilní. V podstatě jde o základní složky: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO a uhlí, v menším množství je to MgO , SO_3 , Na_2O a K_2O obvykle do 5 % hm. Jiné složky jako titanium, vanadium, fosfor, germanium, galium, atd. se objevují ve velmi malém množství.

V souladu s chemickým složením a přítomností uhlí, může být popílek klasifikován jako popílek křemičito-hlinitý (s obsahem CaO do 10 %), sírano-vápenatý (s obsahem CaO nad 20 %) a křemičito-vápenatý. Nejdůležitější a nejvýznamnější z hlediska vyrobeného a recyklovaného množství je křemičito-hlinitý popílek.

Klasifikace pro využití popílku jako pojiva má tendenci rozdělovat popílky podle obsahu vápna na „s vysokým obsahem CaO “ a „s nízkým obsahem CaO “. Existující

rozdíly mezi oběma skupinami nepočítají jen s obsahem vápna, ale také s chemickým a minerálovým složením.

Popílek musí mít hydraulický index mezi 0,15 a 0,40, aby mohl zasáhnout do hydraulické reakce jako její účinná složka. Hydraulický index je definován jako poměr mezi množstvím oxidu křemičitého, hlinitého a železitého a množstvím oxidu vápenatého a hořečnatého.

Pucolánová aktivita jako jedna z nejdůležitějších vlastností hodnocení hydraulické reakce je u křemičitano-hlinitých popílků vyšší než u mnohých přírodních a umělých pucolánových materiálů. Závisí na množství rozpustného křemičitano-hlinitého materiálu. Toto je jednou z hlavních příčin užití těchto popílků v cementem zpevněných materiálech. [7]

Vlastnosti pucolánu:

- zvyšuje pevnost a redukuje dávku cementu,
- zvyšuje trvanlivost a odolnost,
- omezuje alkalický rozpad kameniva,
- snižuje rychlost karbonatace povrchových vrstev,
- zlepšuje soudržnost.

Pucolánová aktivita popílku je ukazatelem jeho schopnosti vytvořit zatvrdlý beton za přítomnosti CaO. Přímý vliv na pucolánovou aktivitu mají zrnitost, obsah křemíku a hliníku, ztráta žháním a obsah alkálií. [8]

2.2 Fluidní popílek

2.2.1 Původ materiálu

V dnešní době již některé z elektráren a tepláren používají technologii fluidního spalování za atmosférického tlaku. Účinnost kotlů využívajících tuto technologii je okolo 85 – 88 %, a to i při používání různých druhů paliv.

Mleté palivo s přísadou vápence příp. dolomitu se spaluje v cirkulující vrstvě při teplotě 850 °C. V průběhu disociačního procesu se váže z paliva uvolňovaný SO₂ na CaSO₄, což má značný význam z ekologického hlediska, neboť v opačném případě v důsledku oxidu siřičitého v atmosféře vznikají velmi škodlivé tzv. kyselé deště. Ve zmodernizovaných provozech vnikají pevné odpady v podobě ložového popela a popílků z elektrofiltrů (odlučovačů). Výsledným produktem je pak směs popela z původního paliva, nezreagovaného odsiřovacího činidla (CaO s přidanými zbytky CaCO₃), síranu vápenatého, produktů reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Vzhledem k tomu, že teploty spalování jsou při fluidních procesech nižší než při klasickém spalování, je nezreagovaný CaO přítomen ve formě tzv. měkce páleného vápna, a je tedy reaktivní. Pro fluidní popílků je taktéž charakteristická praktická absence taveniny.

2.2.2 Vlastnosti fluidních popílků

Přestože filtrový i ložový popílek pocházejí z téhož technologického procesu, jejich charakter se výrazně odlišuje ve fyzikálních vlastnostech (granulometrie, měrný povrch, hustota, sytná hmotnost) a kvantitativně i v chemickém a mineralogickém složení. Stejně jako u popílku klasického se u fluidních popílků obou druhů projevuje nevýhoda kolísavých vlastností, zejména chemického složení, měrné hmotnosti a ostatních parametrů, způsobená netabilitou spalovacího procesu a variabilitou vlastností vstupních komponent (uhlí a odsiřovacího činidla). [16]

2.3 Technické požadavky na stabilizovaný a nestabilizovaný popílek a popel

Popílkový stabilizát: zvlhčená směs popílku nebo popela s pojivem (vápno a/nebo cement). Samostatný druh stabilizátu je produkt z fluidního spalování, tj. zvlhčená směs popílku z filtrů a případně ložového popela, která vykazuje samotuhnoucí vlastnosti. Vzniká při spalování směsi mletého uhlí a vápence ve fluidních topeništích. Popílkový stabilizát, v němž je jako aditivum použit energosádrovec, se bez zvláštního ověření objemových změn a pevnosti v pozemních komunikacích neuzívá.

Vrstva ze stabilizovaného popílku nebo popela: vrstva násypového tělesa vybudovaná z popílkového stabilizátu zpracovaná stanovenou technologií.

Popílková suspenze: směs popílku (klasického, fluidního) a vody, popř. pojiva (hydraulické maltoviny, vápenného hydrátu nebo cementu apod.), v tekutém stavu, v přesně stanoveném poměru mísení.

Všeobecné požadavky:

- Popílků a popelů a popílkový stabilizát je možno použít do těch částí konstrukce komunikace (zemní těleso, přechodové oblasti mostů, aktivní zóna, konstrukční vrstvy vozovky), kde splní technická kritéria předepsaná pro příslušný stavební prvek a obecné požadavky na použitelnost. Při tom je nutno dodržet ostatní podmínky – zajištění bezpečnosti za podmínek trvale stabilního zemního tělesa a při zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví pracovníků a ochrany životního prostředí při stavebních pracích i v době trvalého užívání podle platných právních předpisů.
- Popílků a popelů lze rovněž použít pro mechanickou úpravu zemin (vlhkosti, zrnitosti).
- Ekologická vhodnost popílků a popelů a fluidních popelů a popílků se posuzuje:
 - Podle chemických vlastností výluhu (tab. 2.1), který se připraví loužením vzorku smíchaného s vodou v poměru 1:10 (v tab. 2.1 jsou uvedeny mezní hodnoty vyluhovatelných látek).

- Podle REACH (Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals tj. Registrace, Hodnocení a Povolení Chemických látek).
- Podle mezní hodnoty hmotnostní aktivity Ra_{228} (mezní hodnota hmotnostní aktivity Ra_{228} nesmí přestoupit hodnotu 1000 Bq/kg u staveb s neobytným prostorem).

Tab. 2.1: Limitní hodnoty výluhu [9]

Prvek	Maximální přípustné množství (mg/l)
Ag	0,1
As	0,1
Ba	1,0
Be	0,005
Pb	0,1
Cd	0,005
Cr celkový	0,1
Co	0,1
Cu	1,0
Ni	0,1
Hg	0,005
Se	0,05
V	0,2
Zn	3,0
Sn	1,0

- Popílek nebo popel může být v případě splnění požadavku dle platných norem a doložení vhodnosti průkaznými zkouškami použit podle svých vlastností:
 - a) nestabilizovaný
 - b) stabilizovaný
 - c) jako suspenze pro prolití kamenné kostry (kamenivo zpevněné popílkovou suspenzí)
 - d) zpracovaný určitou technologií na parametry vyhovující jejich užití v pozemních komunikacích
- Pojivo se do stabilizovaného popílku a popela přidává mísením v míchacím centru nebo na místě pomocí zemních fréz. Mísení na místě je vhodné použít u popílku a popela těženého za mokra ze složišť.
- Pro výrobu popílkové suspenze pro kamenivo zpevněné popílkovou suspenzí (KAPS) podle platné normy je vhodné použít speciální rozpalovací zařízení s výkonným nuceným mícháním a přesným dávkováním pojiva. [9]

2.4 Užití popílku v silničním stavitelství

Popílek má oproti jiným odpadům určitou výhodu, lze ho na rozdíl od jiných odpadů použít v původní formě bez jakéhokoli zpracování nebo úprav složení. Popílek lze využít nepřímo jako pojivo v podloží a podkladních vrstvách vozovek. Jeho přidáním se tak vyvolají určité chemické reakce ve směsích a také lze snížit spotřebu cementu. Nebo ho lze použít přímo a to jako plnivo (filer) v případech, kde je nutné zlepšit fyzikální vlastnosti směsi zvýšením podílu jemných částic. Dále je možné použití popílku jako jemného kameniva v cementobetonových krytových vrstvách, nestmelených a stmelených podkladních vrstvách a do násypů. [6]

Pojivo

Sírano-vápenatý popílek se obvykle používá jako hydraulické pojivo podobné cementu. Je používán jako příměs do směsí drceného kameniva spodních podkladních vrstev vozovek. V tomto případě bývá drcené kamenivo mícháno s 5,5 % popílku a 5,5 až 6,5 % vody. Dlouhodobé pevnosti jsou různé, maximální hodnoty pevností v prostém tlaku se pohybují od 15 do 18 MPa. V některých případech dochází ke zvětšování objemu (bobtnání), což je pro použití do uvedených vrstev nevyhovující.

Kamenivo

Ve speciálním případě, když je elektrárenský popílek nebo ložový popel používán jako lehké kamenivo obvykle jako granulovaný popílek získaný „spékáním“ a „vytvrzením“. Spékání může být dosaženo setřásáním, drcením při zhutňování; vytvrzení je v současné době dosahováno vypalováním (teplota nad 900 °C), při postupu hypotermickou metodou (teploty mezi 100 až 200 °C) a při studené metodě (teplota pod 100 °C), případně příměsí aktivního pojiva.

Při vysoké teplotě výroby tohoto lehkého kameniva se objemová hmotnost částic pohybuje od 1350 do 1650 kg/m³. Vyznačuje se vysokým obsahem mezer (cca 40 %).

Stmelené vrstvy

Křemičito-hlinitý popílek se používá k výrobě stmelených směsí s hydraulickým pojivem. Ve Španělsku se např. používá směs drceného kameniva s 8 – 12 % popílku, 2 – 3 % vápenného hydrátu a 5 – 7 % vody. Největších pevností je dosahováno s použitím drceného kameniva z přírodního vápence, kde po jednom roce dosahuje pevnost v prostém tlaku hodnot 20 MPa.

Podkladní vrstvy z drceného materiálu smíchaného s popílkem nebo ložovým popelem, vápnem a vodou přinášejí tyto výhody:

- lehčí zhutnění (zpracovatelnost), protože popílek působí jakýmsi „mazivovým efektem“,
- pomalé tuhnutí a tvrdnutí s pomalým nárůstem tuhosti zhutněné vrstvy, což eliminuje vznik možných trhlin,
- možnost pojíždění komunikace téměř okamžitě po zhutnění.

V některých evropských zemích (Dánsko, Španělsko) se popílek používá jako filer do asfaltových směsí. Množství použitého popílku v tomto konkrétním případě nejsou významná. Filer z popílku obvykle splňuje požadavky existujících norem, ale případné dávkování podílu fileru musí být přizpůsobeno specifickým fyzikálním vlastnostem popílku – jiná objemová hmotnost, atd.

Při výrobě do cementobetonových krytů vozovek pozemních komunikací působí příměs popílku jako aktivní část nebo neaktivní (výplňová) část.

Aktivní obsah popílku umožňuje redukci množství cementu, snižuje teploty při hydrataci a tím snižuje riziko vzniku trhlin. Pro tyto betony je také charakteristické zlepšení jejich zpracovatelnosti. Mechanické vlastnosti těchto materiálů se vyznačují nízkými hodnotami počátečních pevností v prostém tlaku, které se ovšem v dlouhodobém srovnání vyrovnají s hodnotami pevností na betonech bez použití popílku.

Delší doba tuhnutí a tvrdnutí betonů s popílkem může způsobovat problémy tam, kde se očekává rychlý nárůst únosnosti betonové konstrukce u extrémně zatížených konstrukcí.

Neaktivní (výplňová) složka popílku se používá tam, kde je potřeba doplnit nebo upravit čáru zrnitosti. V tomto případě popílek ve směsi nahrazuje jemnou frakci drobného přírodního kameniva. Zde není tak důležité složení popílku, jako homogenita a citlivost na vodu plastické části směsi (velikost částic pod 0,5 mm). [10]

2.5 Zlepšení zemního tělesa pozemních komunikací

Popílky do podloží násypu

Pokud se v podloží násypu nebo zásypu vyskytnou nevhodné zeminy, které nelze upravit, musí být nahrazeny vhodnou sypaninou nebo i popílkovým stabilizátem při dodržení podmínek, že do částí násypů a obsypů ve styku s podzemní vodou, a při výšce násypu pod 50 cm je možno používat pouze popílkový stabilizát, u něž je prokázáno, že jeho technické vlastnosti se stykem s podzemní vodou nezhoršují. Pro hutnění této vrstvy platí stejné požadavky jako pro podloží tvořené zeminami, tj. min. 92 % PS pod násypy a min. 100 % PS v přechodové oblasti mostních objektů.

Popílky do násypu

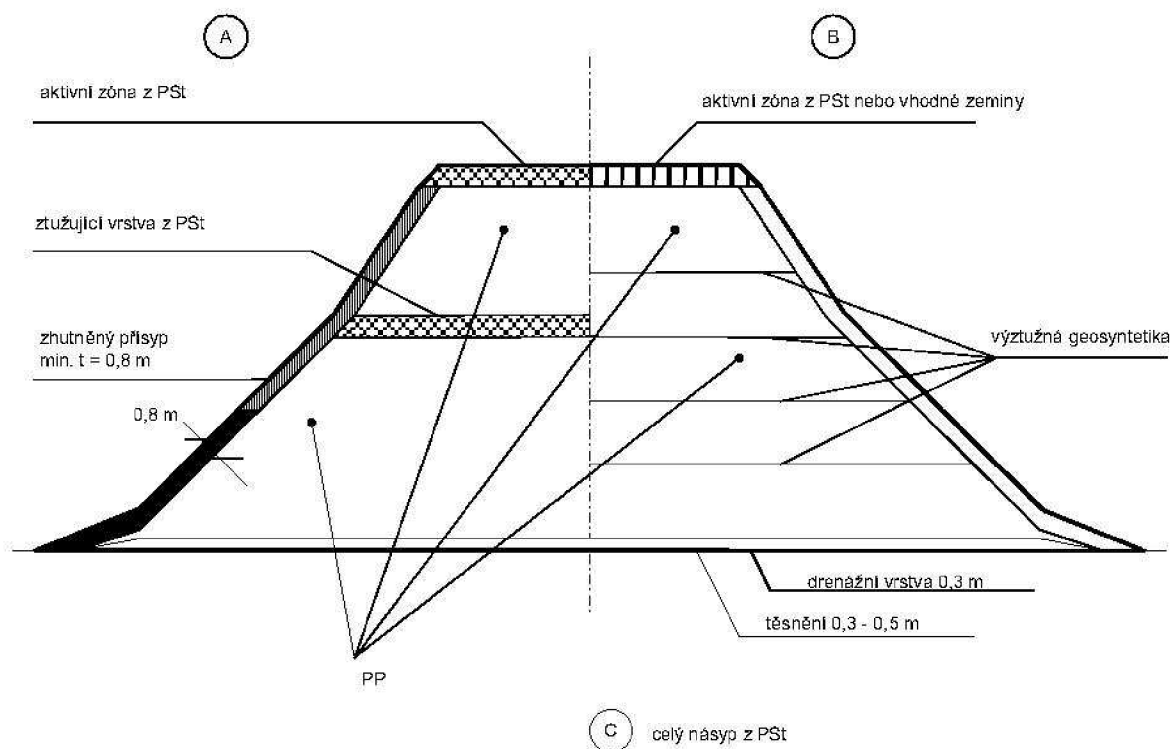
Pokud nestabilizovaný ztuhlý popílek nezaručuje dostatečně stabilní násyp, musí se podle zásad konstrukce vrstevnatého násypu podle ČSN 73 6133 střídat konstrukční vrstvy z popílku s vrstvami ztužujícími z velmi vhodné zeminy charakteru mechanicky zpevněné zeminy podle ČSN 73 6126 anebo s vrstvami popílkového stabilizátu tloušťky cca 0,15 m až 0,20 m, nebo z kameniva prolévaného popílkovou suspenzí. Vzájemný poměr tloušťek vrstev je nutno v návrhu optimalizovat tak, aby byla zaručena stabilita zemního tělesa v každé fázi výstavby.

Místo vrstevnatého násypu je dovoleno použít jiný výztužný systém, např. s tkanou geotextilií nebo jinými vhodnými geosyntetiky podle ČSN 73 6133 (viz obrázek 2.3).

I když je celková stabilita násypu ze ztuhlého popílku dostatečná, doporučuje se nejméně po dosažení výšky násypu cca 4 m vybudovat konstrukční ztužující vrstvu.

Svahy násypu z popílku nebo výrobků z nich musí být opatřeny ochrannou vrstvou ze zeminy proti účinkům povětrnosti (eroze srážkovou vodou, promrzání). Sklon svahu zemního přísypu musí zabezpečit stabilitu proti usmyknutí na styku s popílkovým tělesem.

Nestabilizovaný ani stabilizovaný popílek a popel nelze použít do té části zemního tělesa, do níž zasahuje, nebo může zasahovat hladina podzemní vody. Proti vzlínavosti vody z podloží násypu je nutné násyp z popílku a popela chránit, konečnou úpravu nelze ponechat vystavenou účinkům povětrnosti a musí být chráněna zejména proti působení mrazu a eroze.



Obr. 2.3: Vzorový řez násypem – varianty při použití popílků a popelů a výrobků z nich [9]

Popílký v aktivní zóně

Do aktivní zóny smí být navržen a použit stabilizovaný popílek nebo popel (popř. v kombinaci s jinou vhodnou sypaninou, např. KAPS) nebo výrobky z nich za předpokladu splnění podmínek podle platných norem.

Při provádění aktivní zóny na násypu se ukončí stavba násypu na úrovni parapláně, která je níže oproti niveletě o tloušťku vozovky a předpokládané vrstvy zlepšené zeminy. Paraplán musí být pro odvedení případné srážkové vody provedena v požadované rovinatosti a příčném sklonu.

Při provádění aktivní zóny v zářezu se výkop ukončí na úrovni pláně podle dokumentace stavby zvýšené o příslušné nadvýšení tak, aby po zhutnění zlepšené vrstvy zeminy byla dodržena výška pláně odpovídající niveletě v zářezu. [9]

2.6 Použití popílků v krytu a podkladních vrstvách

Použití popílků do cementobetonových vozovek

Víceleté studie prokázaly, že přidáním popílků jako filerů nebo ve větším měřítku jako náhrady určitého množství cementu do betonové směsi může zlepšit vlastnosti těchto směsí.

Některé z těchto zlepšení vycházejí z fyzikálních vlivů založených na nárůstu podílu jemných částic, zatímco jiná zlepšení jsou vysvětlována chemickým vlivem popílku jako následek jím vyvolaných pucolánových reakcí.

Podíl popílku v pojivu betonové směsi závisí na typu popílku. Popílky s nižším obsahem CaO se většinou používají v množství 15 až 25 % hmotnosti pojiva do cementobetonové vozovky (cement a popílek), zatímco popílky s vysokým obsahem CaO se používají v podílu 20 až 35 % popílku v hmotnosti pojiva.

Přidáním popílku do betonové směsi se snižuje množství vody pro přípravu směsi v porovnání s „klasickými“ cementobetonovými směsmi, čímž se zlepšují inženýrské vlastnosti směsi. To je vysvětlováno tím, že granulometrie kameniva a cementu ovlivňuje mezerovitost a tím i požadavky na množství vody. Přidání popílku může způsobit snížení objemu mezer ve směsi a tím i snížit potřeby vody pro dosažení požadované konzistence směsi.

Přidáním popílku do směsí hubeného betonu se zlepšují reologické vlastnosti takových směsí postrádajících dostatečný podíl jemných částic.

Dalším pozitivním dopadem vycházejícím ze zvýšení podílu jemných částic v betonové směsi přidáním popílku je snížení odlučování vody z čerstvé betonové směsi, tzv. „pocení“ betonu

Navíc přidáním popílku do směsi se zvyšuje její zpracovatelnost, která závisí na soudržnosti a obsahu cementové malty v betonové směsi. Výhodou náhražek cementu v cementobetonových směsích se stejnou hmotností popílku, ale s nižší objemovou hmotností než má beton, je nárůst objemu cementové malty, čímž se zvýší zpracovatelnost směsi.

Přidání popílku do směsi prodlužuje dobu tuhnutí, zejména u popílků s nižším obsahem CaO a vysokým obsahem uhlíku. Okamžitá pevnost betonových směsí je obvykle nižší, ale v pozdějších fázích tuhnutí může být pevnost betonových směsí s popílky ještě vyšší než je pevnost referenční betonové směsi. To je výsledkem pomalé pucolánové reakce popílku a vápna, která vzniká při hydrataci cementu.

Obdobné výsledky pevnosti betonu byly také pozorovány v případě nepropustnosti betonu. Důvodem ke snížení propustnosti směsí obsahující popílek je transformace velkých mezer na menší a zvýšení jejich diskontinuity.

Kromě snížení propustnosti již ztuhnutých směsí se pro zlepšení životnosti takové směsi přidáním popílku zvýší odolnost proti působení síry ve směsi. Konkrétně nahrazením jistého podílu cementu popílkem se sníží podíl volného Ca(OH)_2 a minerálního C_3A ve směsi. Obě sloučeniny jsou důležité pro negativní působení síranů.

Jedním z nejdůležitějších dopadů popílku na betonovou směs je určitě snížení teploty hydratace. Celková teplota směsi i její vývoj jsou sníženy probíhajícími reakcemi popílku pro směs se střední dobou hydratace. Náhradou určitého podílu portlandského cementu, který nejvíce uvolňuje teplo, popílkem snižuje celkový potenciál pro nárůst tepla, neboť je známo, že popílek nevydává teplo při prvních dnech hydratace. Pro stavbu betonových vozovek a tunelů v geotermálních oblastech jsou cementové směsi s popílkem obzvláště vhodné z důvodu omezeného výskytu trhlin způsobených teplem.

Odolnost proti zmrazování betonových směsí s přísadkou popílku je zapříčiněna přítomností ochranných vzduchových mezer a propustností směsi za předpokladu, že se

zvýší diskontinuita mezer a i samotná mezerovitost. S vhodně zvolenou mezerovitostí lze dosáhnout požadované odolnosti směsí proti zmrazování.

Použití popílku do podkladních vrstev vozovky

Zatímco se betonové směsi s popínkem používají do prolévaných vrstev vozovky již po mnoho let, používání směsí pro stabilizace s pojivem z popínku a cementu nemá takovou tradici. Když v sedmdesátých letech minulého století vzrostla cena betonu, byl popílek používán v široké míře jako náhrada za určitý podíl cementu ve směsích pro stabilizace. K výběru popínku jako částečné náhrady cementu vedlo mnoho faktorů, i když ten ekonomický byl nejdůležitějším, neboť cena popínku oproti cementu je zanedbatelná. Z dalších faktorů je především pozitivní dopad přídavku popínku do betonových směsí na vlastnosti směsi, jak vyplývá z mnohaletého zkoušení. Očekávalo se, že obdobný dopad bude mít popílek i na kvalitativně nižší směsi pro stabilizace. [11]



Obr. 2.4: Mísení zeminy s popínkem [21]



Obr. 2.5: Hutnění stabilizované zeminy [21]

2.7 Stav užívání elektrárenských popílků v pozemních komunikacích v ČR

Popílek nebo ložový popel (škvára) je možné použít pro stavbu násypu včetně aktivní zóny za určitých podmínek. Pro stavbu PK lze aplikovat plavený popílek ze složišť po patřičném odvodnění a jen ten, který je těžen nad hladinou vody nebo popílek z odběrných míst v elektrárnách. Pro PK je přípustný pouze zdroj popínku, u něhož jsou po celou dobu odběru garantovány požadované vlastnosti jako např. limitní hodnoty chemických prvků z vodního výluhu prováděného podle metodiky popsané v TP 93. Pórovitost zhutněného popínku při zhutnění hutnicí energií Proctor Standard musí být $\leq 65\%$.

Zemní těleso provedené z popínku nebo popínkového stabilizátu (tj. směsi popínku, vody a pojiva – vápno, cement) by mělo být budováno na voděnepropustném podkladu, popřípadě chráněno těsnicí vložkou tak, aby nedocházelo k vzlínání podzemní vody do tělesa. Boky násypu musí být chráněny min 0,8 m tlustou vrstvou nenamrzavé zeminy chránící zemní těleso z popínku. Poměr únosnosti popínku nebo popínkového stabilizátu

použitého do násypu musí být $CBR_{sat} \geq 2 \%$, výsledná hodnota závisí na vlastnostech popílku a použitého pojiva. Pro popílkový nebo popelový stabilizát do zemního tělesa (mimo aktivní zónu) lze saturaci zkušebního tělesa zaměnit za uložení ve vlhkém prostředí.

V aktivní zóně (pokud je zahrnuta do nenamrzavé tloušťky vozovky) musí popílkový stabilizát splňovat minimálně parametry stabilizovaného podkladu kvality S III (podle ČSN 73 6125:1994).

Při sledování namrzavosti jednotlivých směsí byla zjištěna závislost míry namrzavosti na čase od zhutnění popílkového stabilizátu. Popílkový stabilizát s příměsí 3 % vápna (CaO) zkoušený podle ČSN 72 1191 byl po 90 dnech zrání nenamrzavý. V praxi to znamená, že zabudování (zhutnění) technologických vrstev násypu PK by mělo skončit 3 měsíce před prvními mrazy.

Podle ČSN 73 6133 je umožněno do směsi popílkového stabilizátu použít energosádrovec. Je popisován jako síran vápenatý, vznikající při čištění kouřových plynů mokrou vápencovou vypírkou v elektrárnách a teplárnách. Energosádrovec lze použít pouze v kombinaci s cementem nebo vápnem za podmínek stanovených zvláštním předpisem.

V ČR bylo uskutečněno několik zkušebních úseků a staveb PK, kde byl popílek aplikován do konstrukčních vrstev vozovek. Jednou z nejvýznamnějších akcí bylo využití popílku do výplňové popílkové suspenze (popílek + cement + voda) stmelené podkladní vrstvy KAPS. Po několika zimách byly zjištěny poruchy krytových vrstev vozovky. Jako příčinu těchto poruch označili nezávislí posuzovatelé nepropustnost a nasákavost (60 % hm.) ztvrdlé popílkové suspenze, která vyplňuje kamenný skelet podkladní vrstvy. Krátkodobý mráz okolo -10 až -15 °C stačí k tomu, aby po nasycení došlo k destrukci vazby mezi jednotlivými částicemi vytvrzené popílkové suspenze, a vrstva rychle ztrácí požadovanou únosnost. Plně nebo částečně nasycená cementopopílková vrstva umožní sycení povrchu vrstvy pod asfaltovými vrstvami vodou a vytváření vrstvy ledu, která způsobí mrazový zdvih asfaltových vrstev. Po tání ledu ztrácí asfaltové vrstvy podepření. Byly tak naměřeny mrazové zdvihy dosahující výšky až 43 mm a bylo zaznamenáno úplné prolomení asfaltových vrstev. Z tohoto důvodu v ČR nepanuje ohledně použití popílku jako skeletového materiálu do podkladních vrstev pozemních komunikací velký optimismus.

Pro ověření uvedených nepříznivých vlastností popílkového stabilizátu byly na Ústavu pozemních komunikací provedeny návrhy vhodných receptur pro použití popílkového stabilizátu (směsi vápna a popílku, s přídavkem cementu, energosádrovce a ložového popela - škváry). Po zhodnocení výsledků bylo doporučeno využití směsí do podkladních vrstev a zemního tělesa pozemních komunikací.

Čtyři navržené receptury dosáhly nejlepších výsledků:

- P1 Směs 3 % CaO (Kotouč Štramberský), 92 % popílku (ECHVA) a 5 % energosádrovce (ECHVA)
 $R_{c1} = 2,74$ MPa; $R_{c2} = 1,98$ MPa; $R_{c3} = 1,67$ MPa; $n = 37,7 \%$
- P2 Směs 3 % CaO (Kotouč Štramberský), 1 % CEM II B/S 32,5 R – Mokrý, 71 % popílku (ECHVA) a 25 % energosádrovce (ECHVA)
 $R_{c1} = 3,06$ MPa; $R_{c2} = 1,98$ MPa; $R_{c3} = 2,29$ MPa; $n = 47,5 \%$

P3 Směs 3 % CaO (Kotouč Štramberk), 5 % CEM II B/S 32,5 – Mokrý, 67 % popílku (ECHVA) a 25 % energosádrovce (ECHVA)

$R_{c1} = 4,88$ MPa; $R_{c2} = 4,00$ MPa; $R_{c3} = 4,89$ MPa; $n = 44,9$ %

P4 Směs 5 % CaO (Kotouč Štramberk), 87 % popílku (ECHVA), 5 % energosádrovce (ECHVA) a 5 % ložové škváry (ECHVA)

$R_{c1} = 5,23$ MPa; $R_{c2} = 3,14$ MPa; $R_{c3} = 2,97$ MPa; $n = 41,5$ %

Pozn.: ECHVA – Elektrárna Chvaletice ČEZ, a.s.

R_{c1} ... pevnost v prostém tlaku za sucha po 28 dnech zrání

R_{c2} ... odolnost proti mrazu a vodě po 60 dnech zrání a 7 dnech mrazových cyklů při -10 °C

R_{c3} ... pevnost v prostém tlaku po 28 dnech a 5 hodinové saturaci vodou

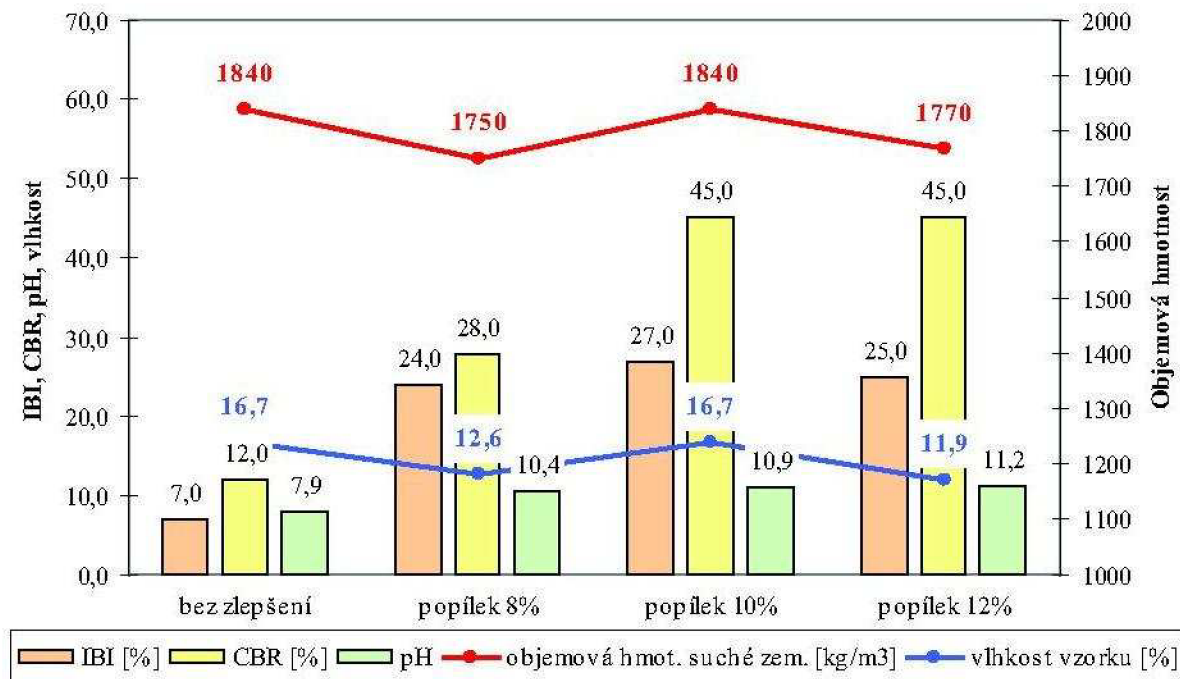
n ... nasákavost v % hm.

Výsledky pevností v prostém tlaku u směsi P2 a P3 splňují požadavky pro stabilizované podklady, což je způsobeno směsným pojivem z cementu, vzdušného vápna a energosádrovce.

Možné použití uvedených receptur podle výsledků zkoušek pevností v prostém tlaku:

- stmelené spodní podkladní vrstvy (použití jako stabilizace S III) s tím, že není vhodné vrstvu vystavovat přílišnému syčení vodou a promrzání, což vychází z měřených pevností po saturaci a mrazových cyklech,
- násypy zemního tělesa,
- aktivní zóna zemního tělesa,
- obsyp inženýrských staveb.

Pro ověření možností využití popílku jako pojiva do nevhodné zeminy v podloží vozovky pozemní komunikace byly výzkumné práce na Ústavu pozemních komunikací zaměřeny na zkoušení poměru únosnosti CBR a namrzavosti přímou metodou. Výsledky, tak jak jsou uvedeny na obrázku 2.6, vypovídají o zvýšení únosnosti jemnozrné zeminy s příměsí popílku.



Obr. 2.6: Hodnoty CBR a IBI podle ČSN EN 13286-47 – zeminy zlepšené popílkem při zamezení odpařování [10]

Pozn.: CBR – poměr únosnosti stanovený na zhuťněném materiálu při optimální vlhkosti zhuťnění ponechaný 4 dny při této vlhkosti;

IBI – okamžitý index únosnosti, stanovený bez zrání a bez přitížení zkušebního tělesa závažím ihned po zhuťnění. [10]

2.8 Příklady použití popílků v pozemních komunikacích v ČR

Silniční obchvat Louny

Jednou z prvních větších dodávek stabilizátu popílku bylo využití na stavbu silničního obchvatu Louny (1995). Jednalo se zde o náhradu chybějící kubatury násypového zemního materiálu z výkopů stabilizátem.

Použit byl popílek z elektrárny Počerady s 3 % CaO. Míchání popílku s vápnem bylo prováděno přímo v elektrárně. Tento stabilizát byl použit do násypů, obsypů přesypaných objektů, do přechodových oblastí mostů a na jednom z úseků hlavní trasy byl použit do aktivní zóny silničního tělesa. Vzhledem k nižší specifické hmotnosti tohoto materiálu v porovnání se zeminou bylo možné při aplikaci popílku mostní objekty konstrukčně odlehčit. Celkové množství uloženého popílku bylo cca 35 až 40 tisíc m³. [18]

Rychlostní komunikace R6

Zajištění vhodnosti materiálu získaného na stavbě pro další použití do násypů bylo zcela klíčovým úkolem pro zhotovitele. Při odkopávkách se ukázalo, že zhruba 500 000 m³ zeminy je nevhodné do násypů. Ukládat takový objem na skládky a nakupovat vhodný materiál by bylo velmi finančně náročné. Navíc převozy tohoto množství zeminy by zatížily okolí stavby nákladní dopravou na mnoho měsíců zcela neúnosným způsobem. Jiným vedlejším efektem by bylo zlikvidování mnoha kilometrů silnic v okolí stavby těžkými nákladními auty a opravy těchto silnic by přinesly další nemalé náklady.

Vzhledem k dlouholetým zkušenostem zhotovitele v oblasti zlepšování zemin popílkem (z elektrárny Tisová hned vedle stavby) byl ve spolupráci s geotechniky a projektanty vypracován podrobný geotechnický průzkum a v každé lokalitě byl určen způsob zlepšování zemin. Laboratorní výsledky prokázaly, že zdejší zemina se dá optimalizovat popílkem, což bylo zapracováno do projektové dokumentace včetně technologických postupů.

Finanční náklady nebyly zanedbatelné, ale ve srovnání s nákupem nového materiálu a skládkováním šlo o zlomek. Další finanční výhodou při zlepšování popílkem je jeho cena, je asi stokrát levnější než vápno, které se v takových případech používá, a popílek byl na rozdíl od vápna k dispozici v místě stavby. [19]



Obr. 2.7: Letecký snímek výstavby komunikace R6 [19]



Obr. 2.8: Nasypávání lehčeného tělesa, dole popílek, na něm vrstva Liaporu [19]



Obr. 2.9: Přitížený násyp [19]

Tab. 2.2: Srovnání cen druhotných surovin a přírodních materiálů [19]

Surovina	Cena za 1 t
Netříděné materiály (pro násypová tělesa)	
odval přírodního kameniva (např. lom Jakubčovice) frakce 0-300 mm	130 Kč
uhelná hlušinová sypanina (dval Heřmanie, odval Paskov D) frakce 0-300 mm	30 Kč
netříděná vysokopecní struska (odval TŽ Třinec) frakce 0-250 mm	130 Kč
netříděná ocelářská struska (odval TŽ Třinec) frakce 0-250 mm	90 Kč
tzv. studený odval frakce 0-300 mm	50 Kč
Vedlejší energetické produkty (VEP)	
popílek (úletový, suchý)	40 - 100 Kč
popílek upravený (stabilizovaný) vápnem	60 - 150 Kč
struska, škvára	20 - 60 Kč
energósádrovec	50 - 120 Kč
fluidní popílek	40 - 90 Kč
Tříděné materiály (pro aktivní zónu, případně konstrukční vrstvy)	
kamenivo přírodní frakce 0-63 mm (např. lom Jakubčovice)	150 Kč
vysokopecní struska frakce 0-63 mm (TŽ Třinec)	130 Kč
ocelářská struska frakce 0-63 mm	90 Kč
propálená uhelná hlušina frakce 0-63 mm (z odvalu Heřmanice)	150 Kč

Pozn.: Jedná se o ceny orientační.

Ceny tříděné vysokopecní strusky z odvalu Hrabová dosahují vzhledem k jejímu nedostatku až 250 Kč/t.

Cyklostezka Horní Počaply – Vlíněves – Zelčín

V průběhu stavby cyklostezky vedoucí po břehu Labe a Vltavy v okolí Mělníka se objevily nečekané problémy s málo únosným podloží na velké části této stavby. Cyklostezka se nachází v bezprostřední blízkosti Elektrárny Mělník, která byla schopna v krátké době připravit pro stavbu více než 12 tisíc tun speciálního stabilizátu – směs popílku s cementářským slínkem. Podkladní vrstva ze stabilizátu tak umožnila vytvořit vozovku i v těch nejproblematičtějších úsecích. [20]



Obr. 2.10: Stavba cyklostezky [20]



Obr. 2.11: Hotová cyklostezka [20]

2.9 Příklady použití popílků v pozemních komunikacích v zahraničí

Chorvatsko

První studie o směsích pro stabilizace vyráběných z místních zdrojů (jemnozrnné těžené kamenivo z řeky Drávy) s hydraulickým pojivem z cementu a popílku byla v Chorvatsku provedena fakultou stavební v Osijeku v roce 1996. Jediným domácím producentem popílku byla elektrárna Plomin, jejíž popílek nedosahoval příslušné kvality, proto byl pro zkoušení použit popílek z maďarské elektrárny v Pešti (Peczs). Svým složením ($\text{CaO} = 2,5\%$) spadal tento popílek do kategorie bez schopnosti samostatné vazby a mohl být použit pouze v kombinaci s jiným hydraulickým pojivem.

Množství pojiva (specifický podíl cementu s popínkem) ve zkoušených směsích byl 6 %, 9 %, 12 % a 15 % celkové hmotnosti směsi. V každém z těchto podílů byl podíl popílku zvýšen z 0 % na 15 %, 20 %, 25 % a 30 % vzhledem k podílu cementu.

Mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku a příčném tahu) byly měřeny na každém vzorku směsi pro stabilizace. Tato studie byla zaměřena na stanovení chování popílku a jeho vztahu k cementu ve směsi pro stabilizace.

Bylo zjištěno, že může být částečně nahrazena jistá část cementu, a pevnosti v tlaku a příčném tlaku se budou stále nacházet v uspokojivých limitech pro použití směsi do podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací.

Výsledky naznačily, že podíl popílku v pojivu by měl být 15 až 25 % ve směsi pro stabilizace za předpokladu příslušného podílu pojiva v celkové hmotnosti směsi.

Popisovaná studie směsí pro stabilizace těžného kameniva, cementu a popílku byla rozšířena a pokračovalo se v ní v roce 2004. Komplexní laboratorní studie byla prováděna na 600 vzorcích směsí pro stabilizace včetně zkoušení mechanických a elastických vlastností: pevnosti v tlaku a příčném tahu, dynamický modul pružnosti, dynamický modul ve smyku a Poissonovo číslo.

Množství pojiva (jistý podíl cementu a popílku) ve zkoušených směsích byl 10 a 14 % z celkové hmotnosti směsi a u každého z nich byl podíl popílku zvýšen z 0 %, 25 %, 50 % a 75 % k podílu cementu.

Výsledek potvrdil, že použitý popílek může nahradit podíl cementu (maximálně 25 % hmotnosti pojiva) a že pevnost v tlaku směsi pro stabilizace zůstává v rámci předepsaných hodnot požadovaných pro její použití do podkladních vrstev vozovky stabilizovaných hydraulickým pojivem. Minimální množství pojiva ve směsi pro stabilizace bylo omezeno na 12 % celkové hmotnosti směsi.

Výsledky směsí s nižším podílem cementu pro stabilizace, s podílem popílku v pojivu 50 a 75 %, nesplnily požadavky na použití do stabilizovaných vrstev vozovky a hodnota minimální pevnosti v tahu byla podstatně nižší než požadovaná.

Obě výše popisované studie využily pro své účely popílek z maďarské elektrárny v Pešti. Důvody pro výběr tohoto popílku byly blízkost zdroje popílku, dobré zkušenosti maďarské strany s používáním tohoto popílku a nedostatečná kvalita popílku domácího producenta. Při řešení studie však tento producent, elektrárna v Plominu, začal spalovat nové uhlí, a proto fakulta stavební v Osijeku plánuje opakovat své studie i s chorvatským popínkem. [11]

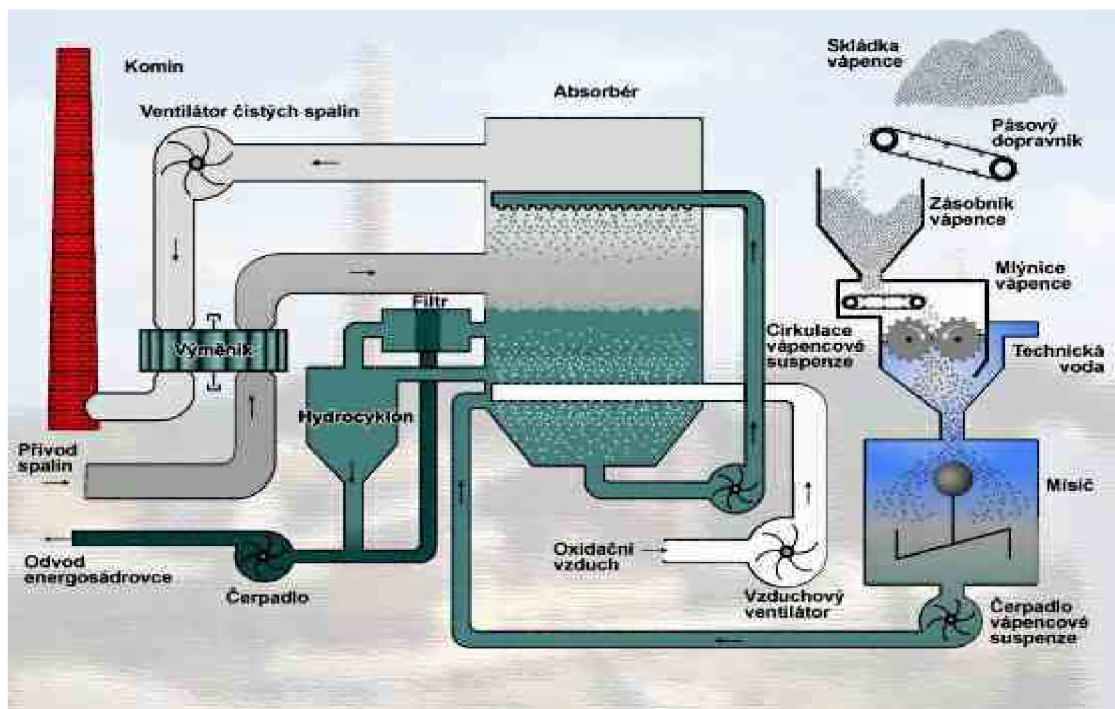
3. ENERGOSÁDROVEC

3.1 Původ materiálu

Velký rozsah spalování fosilních paliv k energetickým účelům hlavně ve 2. polovině 20. století má za následek emise značného množství oxidu siřičitého vznikajícího ze síry obsažené v palivech, a to zejména černého a hnědého uhlí, topných olejů a ropy. Snahy o snížení následků dopadu tohoto spalování vedly již dříve v řadě vyspělých zemí mimo jiné i k vývoji metod odsiřování spalin.

Druhotná surovina, která je získávána odsiřováním spalin uhelných elektráren metodou mokré vápencové vypírky je odpadní síran vápenatý tzv. energosádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Vyniká vysokou čistotou a vysokým obsahem dihydrátu síranu vápenatého, zejména se to týká sádrovců získaných z elektráren spalujících černé uhlí. Existuje hned několik odsiřovacích postupů, v současné době je známo více než 200 způsobů odsiřování spalin, z nichž zejména tzv. mokrá vápencová vypírka patří mezi nejvíce užívané.

Energosádrovec je surovina stejně hodnotná jako přírodní sádrovec, a to jak po stránce chemického a mineralogického složení, tak po stránce ekologické. Proto byl energosádrovec v EU vyjmut z katalogu odpadů a je pokládán za surovinu (výrobek) pro různé aplikace. V rámci EU však nebyl doposud vypracován a předložen návrh příslušné EN. Norma by měla zahrnovat požadavky jak na energosádrovec, tak na přírodní sádrovec. Vztahy mezi producenty a odběrateli energosádrovce se proto řídí podnikovými normami. Náhrada přírodního sádrovce energosádrovcem znamená také omezení devastace cenných přírodních lokalit v důsledku těžby sádrovce.



Obr. 3.1: Schéma odsiřování mokrou vápencovou cestou [26]

3.2 Vlastnosti energosádrovců

Energosádrovec odpadá z běžného odsiřovacího procesu mokřím způsobem jako vlhký, jemnozrnný prášek s obsahem povrchové vlhkosti 8 – 12 %. Tím se podstatně odlišuje od přírodního sádrovce, který je dodáván jako suchý, drcený materiál. Hlavní rozdíl mezi energosádrovcem a přírodním sádrovcem však spočívá ve fyzikálních vlastnostech – velikost zrna, tvorba krystalů a technicky důležitá sypná hmotnost.

Energosádrovec kromě $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ obsahuje nečistoty, které se v přírodních sádrovcích běžně nevyskytují. Jedná se hlavně o chloridy, fluoridy, rozpustné Mg a Na soli, siřičitan vápenatý a nezreagovaný CaCO_3 (vliv použitého paliva, vápence a dalších přísad). Energosádrovec ze spalování hnědého uhlí má oproti energosádrovci ze spalování černého uhlí výrazně tmavší barvu. Oba typy energosádrovce se rovněž liší tvarem a velikostí krystalů. Krystaly energosádrovce z černého uhlí jsou menší a oválnější.

3.3 Využití energosádrovců

Energosádrovec jako surovina je využíván hlavně při výrobě sádry, sádrokartonových desek a cementu. Další uplatnění má jako regulátor doby tuhnutí a při výrobě omítkových směsí. Náhradní možnost, která má jen charakter likvidace odpadu bez ekonomického efektu, je ukládání suspenze sádrovce promíchané s popelem, škvárou, případně s vápnem a vodou na skládkách. Zmíněná směs chemickými reakcemi ztverdne a vytvoří vodou nevyluhovatelnou hmotu, tzv. stabilizát, který lze případně užít i jako umělé kamenivo, materiál k rekultivacím apod. [17]

V silničním stavitelství lze energosádrovec použít pouze v kombinaci s cementem nebo vápnem za podmínek stanovených zvláštním předpisem.

4. STRUSKA

4.1 Původ materiálu

Spalováním pevných paliv v tepelných elektrárnách a spalovnách odpadů vzniká jako zbytkový produkt popel. Aby se zamezilo vytváření struskového kamene ve spalovacím prostoru, jsou tato topeniště zpravidla teplotně řízena tak, aby byl popel roztaven a mohl být odveden jako tavenina. Takto vzniklá struska je potom vedena do vodou chlazených komor, kde se granuluje.

4.2 Vlastnosti strusky

Struska odpovídá svým zrnitostním složením a mechanickými vlastnostmi slabě zahliněným, špatně zrněným pískům. Struska je dobře zpracovatelná vibračními hutnicími prostředky. Pevnost CBR splňuje požadavky Technických podmínek „Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů“ TP 93 a ostatních technických předpisů.

4.3 Využití strusky

Strusku lze využívat do násypů zemních těles pozemních komunikací, zásypů rýh a kanalizačního potrubí, obsypů mostních opěr apod. Nízká objemová hmotnost strusky je velmi výhodná zejména při stavbách násypových těles na málo únosném podloží. Výhodně lze strusku využít vzhledem k její vysoké smykové pevnosti i pro zásypy opěrných konstrukcí. [22]

Dálnice D11 - Osičky – Hradec Králové

- Do zemního tělesa dálnice byla použita elektrárenská struska z elektrárny Opatovice
- Délka úseku dálnice vystavěného z popelu byla 1,5 km
- Výška násypu dosahovala více než 10 m, byly použity ztužující vrstvy zeminy po cca 1 m strusky
- Do zemního tělesa bylo uloženo cca 500 000 m³ strusky



Obr. 4.1: Stavba dálnice D11 [18]

R35 – mimoúrovňová křižovatka Opatovice

- Do zemního tělesa mimoúrovňové křižovatky byl použit popílkový stabilizát z elektrárny Opatovice
- Popílkový stabilizát byl tvořen úletovým popílkem + 2 % CaO, skladovány na deoponii, případně v silech
- Množství uloženého stabilizátu: 124 000 m³
- Množství uložené strusky: 44 000 m³ [18]



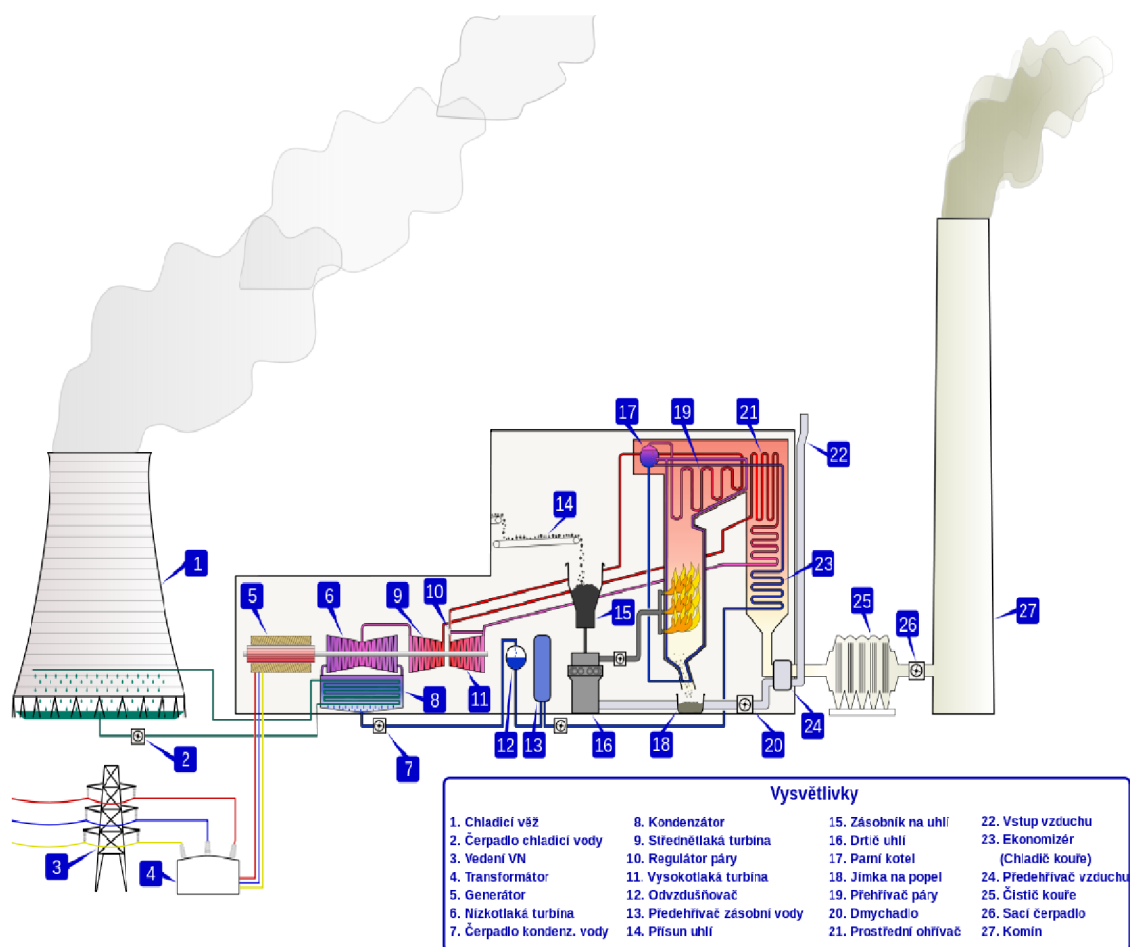
Obr. 4.2: Stavba MÚK Opatovice [18]

5. ENERGETICKÁ SPOLEČNOST ČEZ

Majoritní výrobu elektrické energie a část dodávek tepla v České republice zajišťuje státní energetická společnost ČEZ a zbytek regionální, podnikové (závodové) a ostatní nezávislé elektrárny a teplárny. Téměř veškerá dodávka tepla, tj. 95 % je založena na kombinované výrobě elektrické energie a tepla.

V období 1995 – 1998 byly všechny elektrárny společnosti ČEZ odsířeny v převážné míře technologií mokré vápencové vypírky kouřových spalin s výstupním odpadním produktem energosádrovec. Fluidní kotle a polosuchá metoda odsíření kouřových spalin jsou ve společnosti ČEZ využity v malém rozsahu.

Naopak ve větších regionálních, podnikových (závodových) a ostatních nezávislých elektrárnách a teplárnách jsou využívány zejména technologie fluidního spalování nebo klasické spalování v práškových topeništích s odsířením spalin polosuchou metodou. Menší teplárny pak využívají při spalování nízkosíraté nebo aditivované uhlí (produkt vyrobený na bázi prachového uhlí, zušlechtěný aditivací vápenným hydrátem se zvýšenou vlastností vázání spalitelné síry do popelovin) a nemají instalovanou žádnou odsiřovací technologii.



Obr. 5.1: Schéma tepelné elektrárny [12]

Elektrárenská společnost ČEZ v posledních letech produkuje v průměru ročně celkem 9 100 tis. t pevných produktů po spalování – strusky, popelů a popílků, energosádrovec a produktu z polosuché metody odsíření v členění:

- **struska, popely a popílků z klasického spalování** 7.230 tis. t
z toho:
 - fluidní popely a popílků 600 tis. t
 - energosádrovec 1.810 tis. t
 - produkt z polosuché metody odsíření 60 tis. t

Regionální, podnikové (závodové) a ostatní nezávislé elektrárny a teplárny v České republice v současné době produkuje celkem cca 5 500 tis. t odpadních produktů v členění:

- **struska, popely a popílků z klasického spalování** 5.300 tis. t
z toho:
 - fluidní popely a popílků 1.000 tis. t
 - produkt z polosuché metody odsíření 225 tis. t. [4]

5.1 Skladba a nabídka VEP v elektrárnách skupiny ČEZ

Elektrárny Tušimice – deponát je dopravován do vytěžených prostor k revitalizaci krajiny po důlní činnosti, certifikovaná VEP-struska bude využívána i k asanaci bývalého složiště Tušimice a samotný certifikovaný popílek je nabízen ke komerčnímu využití.

(Pozn.: VEP-struska – označení pro strusku z elektráren, aby nedocházelo k záměně za strusku vysokopecní a ocelářskou.)

Elektrárna Mělník – hlavní část VEP slouží především při výrobě sádkokartonových výrobků např. desek (energosađrovec) a dále jako surovina při výrobě stavebních hmot (popílek) a jako alternativní materiál pro spodní stavbu silnic a zpevněných dopravních ploch (aglomerát). Mezi výrobky Elektrárny Mělník počítáme energosađrovec, popílek, aglomerát a v blízké budoucnosti i VEP-strusku.

Elektrárna Tisová – v současnosti disponuje platnými certifikáty na stabilizát z fluidního popela k vyplňování vytěžených povrchových důlních prostor, na stabilizát z popela a energosađrovec a na stabilizát z fluidního popela k užití pro zemní konstrukce a pojivo pro podkladní vrstvy a podloží staveb pozemních komunikací.

Elektrárna Počeradý – z energosádrovce produkuje briketovaný sádrovec, který se prodává do cementáren pro výrobu cementu, a sypaný sádrovec, který je možné použít také pro výrobu cementu a navíc probíhá testování jeho využití při výrobě průmyslových hnojiv. Dalším produktem je sádra, ze které se vyrábějí ve společném podniku s firmou KNAUF sádrokartonové desky. Dále se sádra ve velké míře přidává do omítkových směsí. Popílek je základní surovinou pro výrobu stabilizátu a granulátu, který se využívá k rekultivaci odkaliště a dále se odváží do Mostecké uhelné, a. s., která ho využívá jako výplňový materiál do vyuhlených šachet. Popílek v menší míře slouží i jako přísada při výrobě betonových směsí.

Elektrárna Hodonín – vznikají zde tři druhy vedlejších energetických produktů, z toho dva certifikované. Prvním certifikovaným produktem je suchý ložový popel, který pod názvem RESAN EHO částečně nahrazuje písek a zeminu a dá se využít pro zásypy výkopů, obsypy inženýrských sítí, podkladní vrstvy komunikací, výrobu betonových směsí a jako přídavek rekultivačního substrátu. Druhým certifikovaným produktem je stabilizát REHAS EHO a REHAS II EHO. Jde o popelovou maltu (zvlhčená popelová směs), kterou lze využít pro výstavbu hrázových těles, vyrovnávání terénních nerovností před rekultivací skládek, jako podložní materiál silnic, umělé kamenivo, přídatná směs pro výrobu cihel a podkladní materiál pod základy při stavbě domů. Dosud necertifikovaným produktem, i když zcela bezpečným, je úletový popílek; ten je možné využít pro výrobu betonových směsí, cemento-popílkové suspenze a jako přídavek do surovin k výrobě hrdisek.

Elektrárna Chvaletice – nabízí VEP jako materiál pro základy staveb, silnic a železnic, pro úpravy krajiny, terénů a stavby protizáplavových valů. Stabilizát je ukládán na složiště, kde je rozhrnován a hutněn. Nepropustnost a nízká vyluhovatelnost stabilizátu umožňuje jeho ekologické ukládání v rámci vlastního projektu „Krajinotvorba“, který vrací krajinu, zdevastovanou těžbou pyritu v Mangano-kyzových závodech ve Chvaleticích, do původní podoby.

Elektrárna Ledvice – produkuje stabilizát využitelný zejména ve stavebnictví. Kromě jiného slouží i pro rekultivaci vytěženého lomu Fučík.

Elektrárny Poříčí – certifikovaný stabilizát se zde používá pro tvarové úpravy krajiny.

Elektrárna Dětmárovice – vyprodukuje ročně cca 250 tis. tun vedlejších energetických produktů. Z tohoto množství je 80 % jemného popele, který je certifikován a ze 70 % využíván ve stavebnictví jako přísada do cementu nebo betonu. Zbytek je ukládán na úložiště jako odpad. VEP-struska, které je z celkové produkce popelovin okolo 10 %, je využívána k výrobě cihel a přebytky jsou rovněž ukládány, stejně jako energosádrovec.

Energetika Vítkovice – držitel certifikátu pro využití popílku a škváry ke stavebním účelům. Splavovaný popílek kanály (tzv. hydrosměs) je čerpán do popílkových nádrží mimo areál teplárny a po odvodnění je popílek těžen a využíván odběrateli k rekultivační činnosti nebo ukládán do odvalu. [5]

6. VYSOKOPECNÍ STRUSKA

Vysokopecní struska mezi vedlejší energetické produkty nepatří, je to vedlejší produkt z hutního průmyslu, ale byla zařazena do této práce, jelikož se jedná o významnou druhotnou surovinu často používanou v silničním stavitelství.



Obr. 6.1: Vyprazdňování žhavé strusky [25]



Obr. 6.2: Struskové kamenivo, frakce 63 – 125 mm [25]

6.1 Původ materiálu

Vysokopecní struska vzniká ve vysoké peci při tavení železné rudy, uhlénoho koksu a dalších přísad. Po prohoření spalitelných látek zůstane ve spodní části pece roztavené železo a struska.

Struska, která vytéká ze spodní části pece při teplotě okolo 1500 °C, může být podle způsobu chlazení různého typu:

- Vzduchem chlazená vysokopecní struska. Proces krystalizace je způsoben pomalým ochlazováním na vzduchu. Obvykle se tato úprava druhotného materiálu označuje jako CBFS (Crystallized Blast Furnace Slag), krystalická vysokopecní struska.
- Granulovaná vysokopecní struska. Proces ochlazování řízen, je náhlý a rychlý a ve většině případů se provádí vodou. Běžné označení je VBFS (Vitrified Blast Furnace Slag), slinutá vysokopecní struska.

- Mletá granulovaná vysokopeční struska (GGBS) je druhotný materiál vycházející z rychlého ochlazení vodou a následným drcením, případně mletím.
- Expandovaná struska.

Materiál **CBFS** má podobné charakteristické vlastnosti jako vulkanická vyvřelá hornina: drsnou texturu, tmavošedou barvu, výrazně kubický tvar zrn. Na rozdíl od vyvřelin má strukturu s mnoha vnitřními a vnějšími póry.

VBFS je sklovitý materiál, který se běžně používá ve frakci 0/6. Množství jemnozrnných částic menších než 0,08 mm je okolo 5 až 10 %. Částice s velikostí nad 5 mm jako inertní materiál mají tmavou barvu a vysokou tvrdost v krystalickém stavu.

6.2 Fyzikální a chemické vlastnosti

Měrná hmotnost částic menších jak 0,08 mm se u CBFS pohybuje od 2940 kg/m³ do 2980 kg/m³. Zdánlivá pórovitost je deklarována 8,8 – 9,8 %. Skutečná pórovitost 20,5 %. Objemová hmotnost vysokopeční strusky je průměrně okolo 2600 kg/m³. Hodnota otlukovosti LA 35 – 45 %. Interval hodnot poměru únosnosti CBR dosažený na vzorcích zhutněného struskového kameniva z vysokopeční strusky je široký: 56 až více než 200.

Chemické složení strusky závisí na přítomných minerálech, popelu z koku použitého jako palivo a vytavených oxidů. Homogenita materiálů je závislá na fungování vysoké pece. Podle intenzit a doby tavení železa se mění chemické vlastnosti strusky. Obvyklé hodnoty základních minerálů jsou:

- Oxid vápenatý	CaO	35 – 45 %
- Oxid křemičitý	SiO ₂	31 – 35 %
- Oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	15 – 20 %.

6.3 Kontrola kvality materiálů

Vysoká pórovitost krystalické strusky způsobuje rychlé změny vlhkosti a chemickou reaktivnost. Je důležité kontrolovat vlastnosti jako je mrazuvzdornost kameniva, mechanické vlastnosti.

Mechanická pevnost krystalické strusky je různá v přímé závislosti na pórovitosti strusky, která je závislá na metodě ochlazování tavené strusky.

GGBS má nízkou odolnost proti otěru, to znamená, že se používá jako výplňové kamenivo nebo pojivo. Reaktivnost strusky jako pojiva se stanovuje výpočtem koeficientu reaktivity (α). Proces tuhnutí a tvrdnutí GGBS jako pojiva musí být nastaven stejnoměrně ve vztahu k použitému cementu. Rozpad sklovité fáze strusky a vytvoření vhodných hydraulických vlastností závisí na použitém plnivu – např. CaO, Ca(OH)₂.



Obr. 6.3: Zhutnění technologické vrstvy struskového kameniva z vysokopecní strusky po prvním pojezdu [23]



Obr. 6.4: Zhutnění na požadovanou hodnotu míry zhutnění [23]

6.4 Užití strusek v silničním stavitelství

Krystalickou vysokopecní strusku lze použít jako „umělé kamenivo“ do pozemních komunikací. V nestmelených podkladních vrstvách a podloží se tento typ strusky používá v celé Evropě a USA zejména kvůli dobré drenážní schopnosti.

Ve stmelených podkladních vrstvách působí jemnozrná část vysokopecní strusky jako pojivo, které během hutnění vyplní mezery ve zhutněné vrstvě a vytvoří vazbu mezi většími částicemi.

V krytových vrstvách se struskové kamenivo z vysokopecní strusky používá jen v některých evropských zemích a v USA.

Ve Velké Británii se v devadesátých letech zpracovávalo okolo 4 000 000 t struskového kameniva za rok. Velká část byla použita do násypů a podkladních vrstev pozemních komunikací.

Ve Francii se běžně používá vzduchem ochlazená vysokopecní struska v současné době v množství nad 3 000 000 t/rok. Základní velikost se pohybuje do $D = 300$ mm (do podloží násypů apod.), běžná zrnitost směsi používaná pro konstrukční vrstvy vozovek je 0/50.

Ve východní Francii se drcené struskové kamenivo z vysokopecní strusky používá dlouhodobě do asfaltových vrstev. Pórovitost struskového kameniva má všeobecně za následek zvýšení obsahu asfaltu o 0,1 až 0,3 % hm. ve srovnání s klasickým návrhem asfaltové směsi z přírodního kameniva.

6.5 Technologie se struskovým kamenivem

6.5.1 Asfaltové směsi

Ve srovnání s výrobními předpisy se v praxi doporučuje zvýšení obsahu asfaltu, aby se zabránilo jevu, kdy se asfaltová směs stává „hubenější“ na asfalt a tím náchylná na tvorbu poruch. Tento jev je dlouhodobý – pórovitá zrna sorbují asfalt a způsobují tak jeho snížení ve směsi. Doporučuje se zvýšení obsahu min. o 0,5 % hm. Pro další asfaltovou úpravu – mikrokoberec, lze použít hrubé struskové kamenivo. U této technologie se nepředpokládá sorbce vzhledem k používání modifikovaného asfaltu nebo modifikovaných asfaltových emulzí. Pro nátěry vozovek se používá struskové kamenivo a asfaltová emulze z modifikovaného asfaltu pro vozovky dopravního zatížení třídy I až IV z důvodu vysokých hodnot součinitele ohladitelnosti kameniva.

6.5.2 Nestmelené podkladní vrstvy

Nejběžněji se používá frakce struskového kameniva 0/32, 0/45, 0/63. Je důležité dodržet čáru zrnitosti, především dostatečné množství jemnozrnných částic směsi, protože u špatně vyplněných mezer ztuhlé vrstvy ze struskového kameniva nedochází, nebo jen v omezené míře, k „pucolánové reakci“, čímž dochází k ovlivnění únosnosti vrstvy ze struskového kameniva. Při dodržení předepsaných zrnitostí se hodnota optimální vlhkosti struskového kameniva pohybuje v rozmezí 5 až 8 %.

6.5.3 Stmelené směsi hydraulickým pojivem

Při návrhu se postupuje v souladu s platnými předpisy pro návrh stmelených směsí s přírodním kamenivem. Důležité je vhodné ztuhnutí stmelené vrstvy (v tloušťkách max. 300 mm) vibračním válcem, které zabezpečí dokonalé zavibrování zrn struskového kameniva. Hodnoty pevností v prostém tlaku na stmelených vrstvách se pohybují okolo 5 MPa při použití 6 % cementu CEM II/R-S jako pojiva. Pokud se jako pojiva použije vzdušné vápno (4 % hm.), hodnota pevností v prostém tlaku je 2 MPa.

6.6 Speciální podmínky návrhu použití do konstrukce vozovky

Granulovaná vysokopecní struska se ve většině zemí EU dodává do směsi s přírodním kamenivem v množství 15 až 20 %. Ztuhlá směs s hydraulickým pojivem (GGBS) vykazuje nízké počáteční pevnosti. Hodnoty pevnosti a únosnosti se zvyšují v čase při

zkoušení po 7 a 90 dnech od ztuhnutí. Úprava se obvykle používá jako spodní podkladní vrstva, případně jako horní vrstva podloží vozovky.

V některých případech, což závisí do značné míry na chemickém složení vysokopecní strusky, dochází ve ztuhnutých vrstvách ze struskového kameniva ke ztrátě trvanlivosti, rozpínání a následné rozpadavosti zrn. V Belgii, Francii nebo ve Velké Británii (i v nových předpisech EU pro „silniční kamenivo“) jsou zpracovány dodatečné specifikace, které popisují tento jev v závislosti na chemickém složení a pečlivě sledují obsah CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃ a celkové síry S, stejně tak jako obsah oxidů železa, které způsobují objemové změny (rozpínání) vlivem oxidace.

6.6.1 Kontrola kvality při provádění vrstev ze struskového kameniva

Britské normy jsou dobrým příkladem kontroly kvality pro vzduchem chlazenou vysokopecní strusku používanou do pozemních komunikací. Normy popisují požadavky na minimální velikost zrn struskového kameniva pro užití do betonu, objemovou hmotnost, stabilitu, obsah síry, absorpci vodou, tvarový index, mechanické vlastnosti a zrnitost. Britské normy uvádí, že celková hodnota obsahu síry nesmí být větší jak 2,75 %, u nestrávených materiálů pak koncentrace vodou rozpustných síranů nesmí překročit hodnotu 2,0 g/l.

6.7 Stav užívání struskového kameniva z vysokopecní strusky v ČR

V ČR se vysokopecní struska běžně používá do násypů, zejména vrstevnatých jako ztužující vrstva, do podloží a podkladních vrstev pozemních komunikací. Problematika je řešena v TP 138 Užití struskového kameniva do pozemních komunikací.

Hlavní lokalitou, kde je struskové kamenivo používáno, je moravskoslezský kraj, ostravsko-karvinský region, kde mají s používáním těchto materiálů velké zkušenosti.

Tak jak bylo naznačeno v předchozích odstavcích, problémy s rozpadavostí a rozpínáním strusky v Evropě se vyskytly i v ČR. V TP 138 jsou tyto problémy popsány s návrhem kontroly a způsobu odstranění. Při použití CBFS pro výrobu kameniva se požaduje prokázání obsahu volného vápna a rozpadavosti strusky v autoklávu. Obsah volného vápna ve struskovém kamenivu se stanoví podle ČSN EN 451/1. Prokázání obsahu volného vápna a rozpadavosti struskového kameniva není požadováno, pokud CBFS byla uložena na skládce min. 1 rok a jsou doloženy případy ověřeného použití struskového kameniva ze stejného zdroje. V ČR se podle TP 138 deklaruje množství síry v elementární formě v rozsahu 0,5 až 1 % nebo ve formě SO₃ v rozsahu 0,8 až 3 %. Pro stavbu zemního tělesa PK je předepsána max. hodnota obsahu SO₃ 2 %.

Zmíněná vysoká pórovitost struskového kameniva použitého do obrusných asfaltových vrstev je obdobně jako v některých jiných evropských zemích řešena zvýšením množství asfaltu. Vlastnosti asfaltové směsi se musí ověřit v 5 sadách zkušebních vzorků

s různým množstvím asfaltu. Ještě před zhutněním zkušebních těles se asfaltové směsi vystaví působení teploty zhutňování po dobu 4 hodin, tak se simuluje adsorpce asfaltu do pórů struskového kameniva před položením a zhutněním vrstvy. Doporučené zvýšení obsahu asfaltového pojiva a další zkušební postupy jsou uvedeny v TP 138. [23]

6.8 Příklady použití vysokopecní strusky v pozemních komunikacích v ČR

Silnice I/11 Jablunkov – obchvat – použití vysokopecní strusky z TŽ Třinec v aktivní zóně.

Silnice I/56 Ostrava – Prodloužená Místecká – použití vysokopecní strusky z odvalu Hrabová v aktivní zóně.

Silnice I/48 Dobrá – Tošanovice – použití vysokopecní strusky z TŽ Třinec v násypovém tělese – vrstevnatý násyp.

Silnice I/48 Tošanovice – Žukov – použití vysokopecní strusky z TŽ Třinec.

Dálnice D4708.2 Ostrava, Rudná – Hrušov – vzhledem k nedostatku vysokopecní strusky zde byla použita struska ocelářenská, která způsobila zdvihy komunikace vlivem objemových změn. [24]



Obr. 6.5: Dálnice D4708 – odtěžování konstrukčních vrstev a svrchní části aktivní zóny, které byly postiženy objemovými změnami [24]

7. VLIVY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Samotná tepelná elektrárna s vysokými komíny, chladicími věžemi a skládkami uhlí narušuje přírodní ráz krajiny, ale daleko závažnější než vizuální vliv na krajinu a životní prostředí je likvidace odpadů. Největší množství odpadů tvoří produkty spalování, tj. popílek a popel. Dříve prováděné mokré ukládání popílku a škváry do odkališť negativně ovlivňovalo životní prostředí. Při nedostatečném zaizolování podloží odkališť docházelo ke znečišťování podzemních vod a následně povrchových vod průsaky škodlivých látek.

Častá snaha využívat elektrárenský popílek a škváru k výrobě stavebních materiálů vedla bohužel ke zjištění, že škodlivé látky, které přešly v procesu spalování z uhlí do druhotného produktu, způsobují nadměrné emise radonu v interiérech budov. Z těchto důvodů se ve vyspělých státech používá suchá ukládka produktů spalování a tyto jsou poté využívány pomocí vhodných technologií ke stavbě nejčastěji násypů, zpevňování nevhodných zemín v podloží atd. Technologie je výhodná, protože nevznikají problémy s odkališti a zároveň se rekultivuje těžbou zdevastované prostředí. [10]



Obr. 7.1: Skládka popílku u Počerad [15]

Dopad použití vysokopecní strusky a struskového kameniva z vysokopecní strusky na životní prostředí má být analyzován způsoby:

- při vzniku strusky – sledování zátěže vysoké pece a produkce strusky na životní prostředí (emisní limity obsahu prachu a nebezpečných látek v ovzduší),
- sledování při skladování a dopravě (odběrem pravidelných vzorků se sledují změny vlastností),
- konečného užití strusky a struskového kameniva před zabudováním do vrstvy PK – výluh z použitého druhotného materiálu, sledování změn fyzikálních a chemických vlastností.

Mezi dvě hlavní výhody použití vysokopecní strusky do pozemních komunikací z hlediska ochrany životního prostředí patří:

- částečné nebo úplné odstranění existujících velkoobjemových skládek (hald) s využitím materiálu do násypových těles pozemních komunikací nebo podkladních vrstev vozovek,
- snížení spotřeby přírodních zdrojů. [23]

8. PRAKTICKÁ ČÁST

Náplní praktické části bakalářské práce byla výroba zkušebních těles z klasického a fluidního popílku, jejich saturace ve vodě a stanovení objemového bobtnání a experimentální nasákavosti.

8.1 Výroba zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vyrobena ve čtyřech sadách po třech vzorcích – celkem bylo vyrobeno 12 vzorků zkušebních těles. Jako materiál byl použit klasický (elektrárenský) popílek a fluidní popílek z Elektrárny Tisová.

Do naváženého množství daného popílku se pomalu vlévala voda a promíchávala se s popílkem až do dosažené optimální konzistence na zpracování. Po tomto promíchání popílku s vodou (případně s přidaným CaO) se zhotovila ztuhnutá tělesa pomocí zařízení Proctor Standard:

- válcová tělesa o průměru 100 mm, výška 100 mm,
- váha dopadajícího pěchu 2500 g,
- výška dopadu pěchu 305 mm,
- hutnění probíhá ve 3 vrstvách,
- na každou vrstvu 25 úderů.

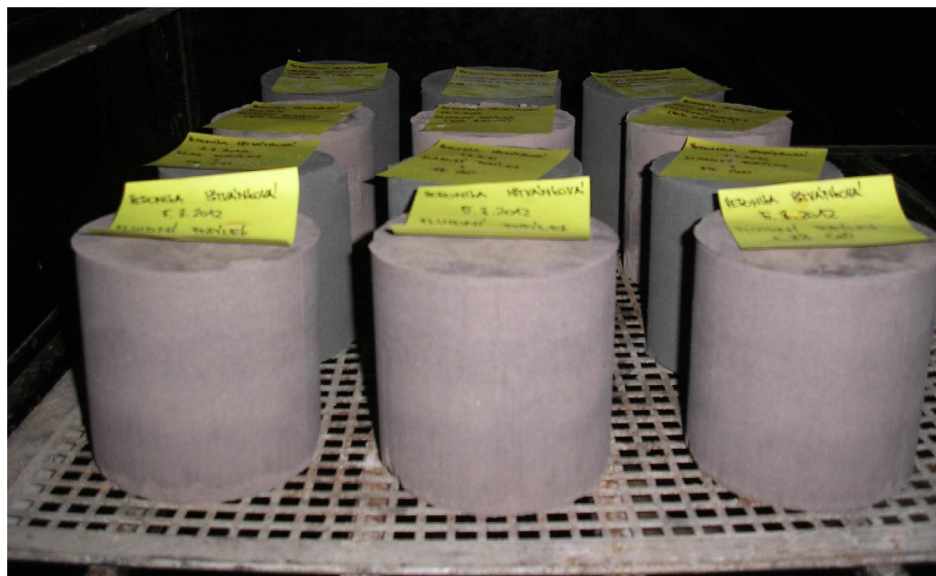


Obr. 8.1: Zařízení Proctor Standard

Po ztuhnutí se provedlo odformování a tělesa byla uložena ve vlhkém prostředí po dobu 28 dní. Po vyzrání se tělesa zvážila a byla proměřena jejich výška a průměr na čtyřech místech.



Obr. 8.2: Odformování tělesa



Obr. 8.3: Uložení vzorků ve vlhkém prostředí

Zhotovené vzorky:

I. Klasický popílek, vlhkost 25 %

Tab. 8.1: Klasický popílek

vzorek č.	hmotnost [g]	výška [mm]	průměr [mm]
1	1083,3	100,4	100,0
		100,9	100,0
		101,9	100,0
		101,5	100,0
2	1092,3	100,7	100,0
		101,1	100,5
		101,0	100,7
		100,4	100,0
3	1062,2	100,7	99,9
		101,8	100,0
		100,6	100,0
		100,7	99,9

II. Fluidní popílek, vlhkost 40 %

Tab. 8.2: Fluidní popílek

vzorek č.	hmotnost [g]	výška [mm]	průměr [mm]
4	977,6	102,4	100,5
		102,1	100,3
		101,7	100,1
		99,8	100,0
5	936,6	101,5	100,5
		101,4	100,0
		101,7	100,0
		100,9	100,4
6	951,6	100,4	100,3
		100,3	100,2
		99,9	100,0
		100,0	99,9

III. Klasický popílek + 3 % CaO, vlhkost 25 %

Tab. 8.3: Klasický popílek + 3 % CaO

vzorek č.	hmotnost [g]	výška [mm]	průměr [mm]
7	1122,2	103,0	100,2
		102,0	99,9
		100,8	100,0
		102,0	100,0
8	1144,4	101,0	100,2
		100,7	100,6
		100,8	100,3
		101,1	100,0
9	1104,1	101,0	100,2
		101,2	100,0
		101,0	100,4
		99,9	100,3

IV. Fluidní popílek + 3 % CaO, vlhkost 52 %

Tab. 8.4: Fluidní popílek + 3 % CaO

vzorek č.	hmotnost [g]	výška [mm]	průměr [mm]
10	1050,5	102,0	101,2
		102,0	101,4
		103,0	100,6
		102,5	100,7
11	1052,9	102,5	101,0
		103,2	100,6
		102,5	100,2
		102,4	100,6
12	1078,7	102,3	101,2
		103,2	100,8
		103,0	100,8
		102,8	101,0

8.2 Experimentální stanovení nasákavosti a objemového bobtnání

Experimentální stanovení nasákavosti

Po 28 denním vyztáčení bylo všech 12 vzorků vloženo do velké nádoby napuštěné vodou tak, aby byly celé ponořené. V určitých časových intervalech se vzorky vytáhly z vody ven, nechaly se krátce okapat a zvažily se (viz tab. 8.5).

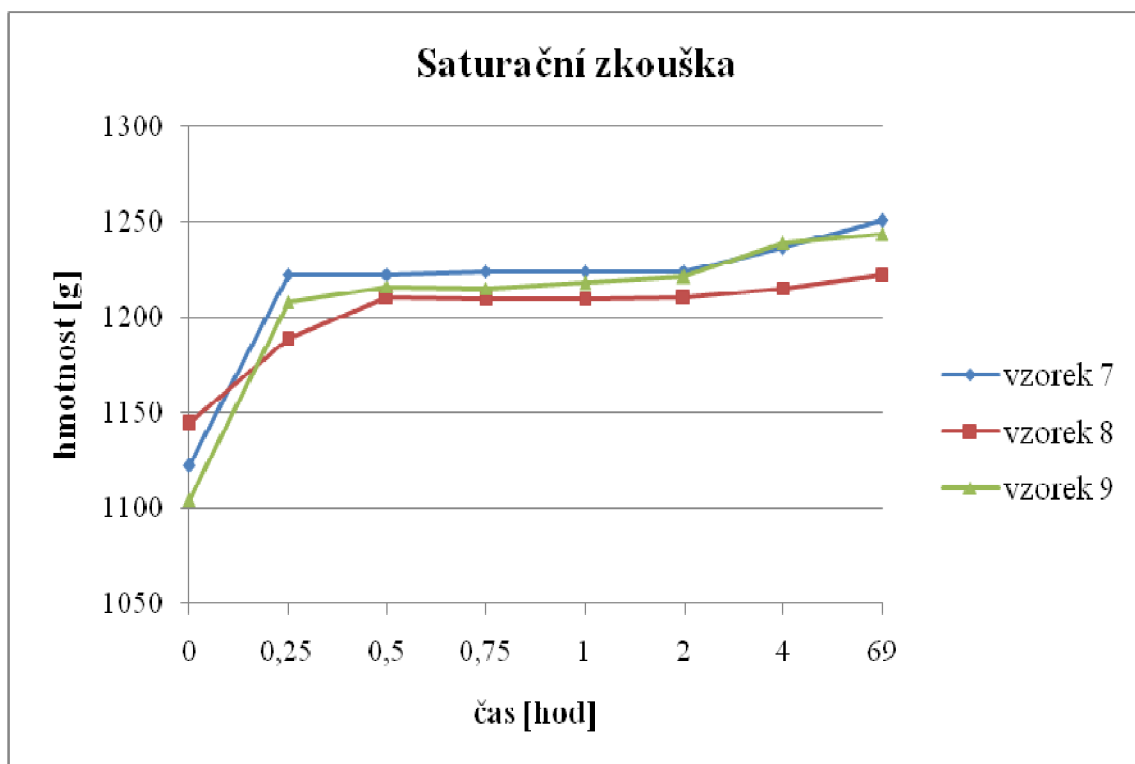


Obr. 8.4: Vážení těles

Popílký, které nebyly stabilizovány vápnem, se téměř ihned po ponoření do vody rozpadly. Podobně na tom byly i fluidní popílký s přidáním CaO, které se asi po půl hodině začaly také pomalu rozpadat. Zkouška tedy byla dokončena jenom na třech vzorcích z klasického popílký stabilizovaného vápnem (vzorky č. 7, 8 a 9).

Tab. 8.5: Hmotnosti vzorků při saturaci vodou

vzorek č.		čas [hod]						
		0,25	0,5	0,75	1	2	4	69
7	hmotnost [g]	1222,2	1222,5	1223,9	1223,9	1224,1	1236,1	1250,3
8		1188,8	1210,0	1209,7	1209,5	1210,1	1215,4	1222,1
9		1208,1	1216,1	1215,1	1218,0	1221,0	1238,7	1243,2



Obr. 8.5: Saturační zkouška

Na vzorcích č. 7, 8 a 9 byla experimentálně stanovena nasákavost s vypočtenými hodnotami uvedenými v tabulce 8.6 a hodnotami graficky znázorněnými na obrázku 8.6.

Výpočet nasákavosti:

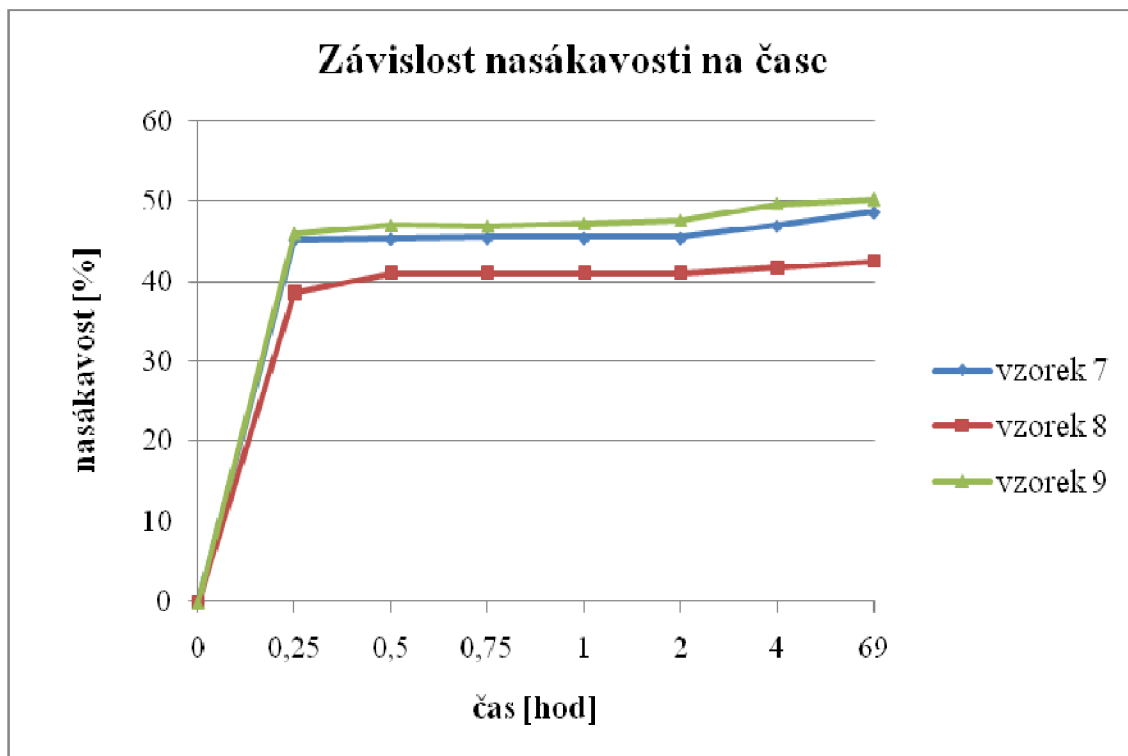
$$N = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100\%,$$

kde m_n je hmotnost nasáklého vzorku v určitém čase [g],

m_s je hmotnost suchého vzorku [g].

Tab. 8.6: Vypočtené nasákavosti v různých časech

vzorek č.	nasákavost [%]	čas [hod]						
		0,25	0,5	0,75	1	2	4	69
7		45,2	45,3	45,4	45,4	45,4	46,9	48,6
8		38,5	41,0	41,0	41,0	41,0	41,6	42,4
9		45,9	46,9	46,8	47,1	47,5	49,6	50,1



Obr. 8.6: Závislost nasákavosti na čase

Stanovení objemového bobtnání

Pro stanovení objemového bobtnání byly nasáknutým vzorkům přeměřeny rozměry (průměr a výška). Naměřené hodnoty se shodovaly s hodnotami naměřenými na nesaturovaných vzorcích po 28 denním zrání. K objemovému bobtnání tedy nedošlo.

ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce jsem popsala vedlejší energetické produkty, ke kterým jsem zařadila i vysokopecní strusku. Zaměřila jsem se zejména na jejich vznik a rozhodující vlastnosti pro použití v silničním stavitelství. Všechny tyto materiály při použití v pozemních komunikacích musí splňovat podmínky uvedené v konkrétních předpisech (ČSN EN, TP). Proměnlivost vlastností VEP je typická nejenom pro různé provozovny, ale složení je různé v čase i v jedné konkrétní provozovně. Z tohoto důvodu je třeba materiál před použitím do jakékoliv konstrukce vždy experimentálně ověřit.

Při praktické části bakalářské práce jsem pracovala se dvěma typy VEP. Jednalo se o klasický popílek a o fluidní popílek z Elektrárny Tisová. Z uvedených materiálů bylo zhotveno 12 zkušebních válcových vzorků o průměru 100 mm a výšce 100 mm v souladu s ČSN EN 13286-2. Na zhotovených tělesech jsem provedla stanovení objemového bobtnání. Po 69 hodinách, kdy byly zhotovené vzorky ponořené do vody, objemové bobtnání nenastalo ani u klasického popílku ani u fluidního. Další experimentální zkouškou bylo stanovení nasákavosti zhutněných těles v závislosti na čase. Při této zkoušce došlo k rozpadu části zhutněných vzorků, které byly po 28 denním zrání ponořeny do vody. Experimentální saturační zkoušku vydržela pouze tělesa zhotovená z klasického popílku s příměsí vápna. Výsledkem je nasákavost v hodnotách 42 %, 49 % a 50 % stanovená na tělesech po 69 hodinách ponoření vzorků do vody.

Zejména podle výsledků experimentální saturační zkoušky je patrná velká citlivost VEP na vodu. Pokud hodnota nasákavosti zhutněné vrstvy z VEP bude převyšovat 25 %, je zde velké riziko ztráty požadované únosnosti, objemových změn nebo zdvihů v důsledku působení mrazu na vodou nasáknutou vrstvu. Z těchto důvodů musí být při použití popílků do násypů zemního tělesa tyto násypy opatřeny dostatečnou tloušťkou ohumusování, případně je třeba zabezpečit je jiným způsobem, aby ochranná vrstva byla vodotěsná.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JOZÍFKOVÁ, Z.: Využití kontaktních testů fytotoxicity při hodnocení vedlejších energetických produktů [online]. Brno, 2011 [cit. 2012-02-25]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=36909. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Vedoucí práce MVDr. Helena Zlámalová Gargošová, Ph.D.
- [2] Vedlejší energetické produkty. In: *Vodní a tepelné elektrárny* [online]. 2009 [cit. 2012-02-25]. Dostupné z: <http://www.vodni-tepelne-elektrarny.cz/vedlejsi-energeticke-produkty.htm>
- [3] PAVLITOVÁ LETKOVÁ, Z.: *Ekotoxikologické hodnocení vybraných průmyslových odpadních materiálů a anorganických kompozitů s jejich obsahem* [online]. Brno, 2011. [cit. 2012-02-25]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=36001. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Vedoucí práce prof. RNDr. Milada Vávrová, CSc.
- [4] Autor neznámý. In: *Analýza využívání stavebních odpadů, odpadů z těžby a energetických odpadů, predikce poptávky po jejich využití* [online]. 2003 [cit. 2012-03-04]. Dostupné z: http://www.kr-ustecky.cz/VismoOnline_ActionScripts/File.aspx?id_org=450018&id_dokumenty=1643058
- [5] SCHREIER, M.: Přichází století velmi cenných odpadů. *Odpadové fórum* [DVD]. 2010, č. 4, s. 19-36 [cit. 2012-04-01]
- [6] PAVLIČÍK, P.: *Využití druhotných surovin v silničním stavitelství*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus
- [7] KUDRNA, J.: *Recyklace a využití druhotných surovin při stavbě a opravě pozemních komunikací*. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. 2006. ISBN 80-214-3178-4
- [8] PAVLÍKOVÁ, M.: *Směsné cementy, pucolánově aktivní materiály* [online]. 2009 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/CHS/prednaska_5.pdf
- [9] TP 93. *Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů*. Praha: ARCADIS Geotechnika, a.s., 2011
- [10] STEHLÍK, D.: Využití elektrérenských popílků v PK. *Recyklace a využití druhotných surovin při stavbě a opravě pozemních komunikací* [online]. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. 2004 [cit. 2012-03-24]. ISBN 80-214-3178-4. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/PKO/vav/1Seminar2006/Seminar.pdf>
- [11] DIMTER, S., RUKAVINA, T., MINAZEK, K.: *Použití popílku v cementobetonovém krytu pozemní komunikace* [online]. 2007 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://silmos.cz/file.php?id=1064>

- [12] Tepelná elektrárna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 27. 2. 2012 [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelná_elektrárna
- [13] Fly ash. In: *NOACIM* [online]. 2009 [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: http://www.noacim.com/Products/Fly_Ash.aspx
- [14] Secondary electron images. In: *New Mexico tech* [online]. 2007 [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: <http://geoinfo.nmt.edu/labs/microprobe/description/sem.html>
- [15] Skládka popílku u Počerad. In: *Aktuálně.cz* [online]. 2010 [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: <http://aktualne.centrum.cz/domaci/fotogalerie/2010/12/13/skladka-popilku-u-pocerady/foto/335557/>
- [16] STACHOVÁ, J.: *Fluidní popílek jako jedna ze složek surovinové moučky pro výpal portlandského slínku* [online]. 2007 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <http://www.fsv.cvut.cz/svoc/2010/registerd.php?Akce=SHOW&SID=34>
- [17] BIBORA, P.: Energosádrovec, anhydrit a možnosti jejich využití. *Odpadové fórum [DVD]*. 2010, č. 4, s. 27-28 [cit. 2012-04-06]
- [18] HERLE, V. *Aktualizované technické podmínky TP 93 pro využití popílků v pozemních komunikacích s příklady* [online]. 2011 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: http://www.arcadisgt.cz/_public/upload/datastorage/092011/e3320/olsanka-11-herle-tp93.pdf
- [19] BURIÁNEK, T.: Stavba komunikace se zlepšováním zeminy. In: *Rychlostní silnice R6* [online]. 2010 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.komunikace-r6.cz/index.php?t=article&n=clanek-stavba-komunikace-se-zlepsovanim-zeminy-243>
- [20] PELÁK, J. Nová cyklostezka Horní Počaply - Vlíněves - Zelčín. In: *Mělníček.cz* [online]. 2010 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://melnicek.cz/cyklostezka-horni-pocaply-vlineves-zelcin>
- [21] Fly ash fact for highway engineers. In: *Pavements* [online]. 2011 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fach07.cfm>
- [22] Struska. In: *ČEZ energetické produkty* [online]. 2009 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.cezep.cz/zakaznicky-modul/prispevek/55870.html>
- [23] STEHLÍK, D.: Využití vysokopeční strusky v PK. *Recyklace a využití druhotných surovin při stavbě a opravě pozemních komunikací* [online]. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. 2004 [cit. 2012-03-24]. ISBN 80-214-3178-4. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/PKO/vav/1Seminar2006/Seminar.pdf>
- [24] KRESTA, F. *Aktualizované TP 138 „Užití struskového kameniva do PK” – zemní těleso* [online]. 2011 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.arcadisgt.cz/_public/upload/datastorage/092011/1642e/olsanka-11-kresta-struska.pdf
- [25] *Steel division* [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.voestalpine.com/stahl/en/products/industrial_mineral_products/metallurgical_by_products/blastfurnace_slag.html

- [26] Mokr vpencov vypírka spalin. *EnergyWeb* [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z:
http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=2.5.6

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

VEP	Vedlejší energetické produkty
PK	Pozemní komunikace
KAPS	Kamenivo prolévané popílkovou suspenzí
CBR	Poměr únosnosti
IBI	Okamžitý poměr únosnosti
EU	Evropská unie
CBFS	Krystalická vysokopeční struska
VBFS	Slinutá vysokopeční struska.
GGBS	Mletá granulovaná vysokopeční struska
N	Nasákavost
m_n	Hmotnost nasáklého vzorku
m_s	Hmotnost suchého vzorku