

Alternativní materiály v zemních pracích



František Kresta

Alternativní materiály v zemních pracích

Slovo úvodem

V posledních letech se celé stavební odvětví potýká s nedostatkem kvalitních přírodních materiálů, zejména písku, šterku drceného kameniva, lomového kamene, ale i vhodné sypaniny pro zemní konstrukce. Převaha poptávky nad nabídkou bude v dalších letech stoupat, jak se postupně dotěží stávající zdroje a otevírání nových ložisek bude stále obtížnější vzhledem k omezením plynoucím z ochrany životního prostředí a odporu místních obyvatel. Za této situace je logické, že se žádná větší stavba, zejména v oblasti infrastruktury, neobejde bez využití alternativních materiálů. Nejsou to jen obecně známé elektrárenské popílky a vysokopecní strusky, ale celá široká škála tzv. alternativních materiálů, o jejichž existenci mnohý stavební odborník nikdy neslyšel. Doc. RNDr. František Kresta, Ph.D. se více než dvacet let věnuje jak výzkumu, tak praktickému použití alternativních materiálů a s neuvěřitelnou pilí a energií prosazuje jejich využití nejen na stavbách dopravní infrastruktury, ale i v obytné a průmyslové výstavbě. Své široké znalosti zúročil jako předseda pracovní skupiny WG 7 „Alternativní materiály“ při evropské technické komisi CEN TC 396 Zemní práce. Diskusemi s odborníky z různých evropských zemí získal přehled o široké škále různých alternativních materiálů používaných nejen v Evropě, ale i jinde ve světě. Zajímavé jsou i informace o existenci historických alternativních materiálů (např. deponie více než 3 tisíce let staré strusky z tavení měděné rudy v Jordánsku za vlády krále Šalamouna), která byla použita jako stavební plocha pro obytnou výstavbu.

O své široké znalosti se doc. Kresta rozhodl podělit se širokou odbornou veřejností zpracováním jedinečné odborné publikace ALTERNATIVNÍ MATERIÁLY V ZEMNÍCH PRACÍCH. Jedná se, dle mého názoru, o nejrozsáhlejší se-

znam a charakteristiku alternativních materiálů, které byly studovány, případně použity v různých zemích nejen v Evropě, ale i ve světě, včetně tak vzdálených zemí jako Čína, Indonésie, Austrálie, Jižní Afrika nebo Kanada. Tato publikace otevírá před odborníkem na zemní práce širokou škálu možností použití alternativních materiálů a na výsledcích zkoušek a provedených pozorování umožňuje rozhodování o vhodnosti jejich použití pro uvažovaný záměr.

Pro českého odborníka budou zvláště cenné výsledky zkoušek různých lokálně produkovaných alternativních materiálů, které autor provedl v rámci své běžné odborné činnosti ve společnosti SG Geotechnika a.s. Chování některých alternativních materiálů není možné posoudit jen na základě běžných geotechnických zkoušek nebo popisu chemického složení, ale pouze na základě dlouhodobého cíleně orientovaného testování za dobře promyšlených okrajových podmínek. Pokud se k alternativním materiálům bude přistupovat s respektem a dobrými znalostmi o jejich chování, vyhneme se v budoucnu negativním jevům jako jsou např. dlouhodobé deformace násypu a vozovky na dálnici u Ostravy. Příčiny poruch jsou v publikaci podrobně analyzovány.

Publikaci ALTERNATIVNÍ MATERIÁLY V ZEMNÍCH PRACÍCH od doc. Kresty považuji za významný mezník v poznávání vlastností, chování a zpracování alternativních materiálů nejen u nás, ale zejména v Evropě. Překlad do angličtiny by její význam ještě rozšířil do dalších zemí.

V Praze 16. června 2024

Ing. Vítězslav Herle

Obsah

Slovo úvodem	7
1 Úvod	18
1.1 Udržitelný rozvoj a alternativní materiály	18
1.2 Výhody používání alternativních materiálů	20
2 Normativní základna	22
3 Environmentální aspekty	24
3.1 Obecný přístup k environmentálnímu hodnocení	25
3.2 Parametry pro environmentální hodnocení	26
3.3 Hodnocení rizik v místě výstavby a podmínky pro použití	26
4 Přehled alternativních materiálů	28
4.1 Obecné technické požadavky	31
4.2 Průkazní a kontrolní zkoušky	32
4.2.1 Průkazní zkoušky	32
4.2.2 Geotechnické průkazní zkoušky	32
4.2.3 Chemické průkazní zkoušky	32
4.2.4 Kontrolní zkoušky	33
5 Recyklované materiály	34
5.1 Obecné požadavky	34
5.2 Termíny a definice	35
5.3 Recyklovaný asfalt v zemních pracích	37
5.3.1 Recyklovaný asfalt – fyzikálně-mechanické vlastnosti	38
5.3.2 Postup výstavby	39
5.3.3 Zkušenosti z realizace	39
5.4 Recyklát z betonu, recyklát z cihel a zdiva, směsný recyklát	40
5.4.1 Recyklát z betonu a ze směsi betonu	40
5.4.2 Recyklát ze zdiva	41
5.4.3 Recyklát směsný	43
5.4.4 Výroba recyklátů na stavbách	43
5.5 Recyklovaný štěrk kolejového lože	45
5.6 Recyklované materiály – shrnutí	47
6 Produkty spalování uhlí	49
6.1 Úvod a historie	49
6.2 Původ a klasifikace	50
6.2.1 Klasifikace podle technologie spalování	50
6.2.2 Klasifikace podle chemického složení	51
6.3 Materiály pocházející z produktů spalování uhlí	51
6.3.1 Materiály ze starých úložišť	52
6.4 Chemické a mineralogické složení	53
6.4.1 Chemické složení	53
6.4.2 Ztráta žháním	54
6.4.3 Mineralogické složení	55
6.4.4 Popílky po denitrifikaci	59

6.5	Environmentální požadavky	60
6.6	Fyzikálně-mechanické vlastnosti.	61
6.6.1	Zrnitost	61
6.6.2	Vlhkost, objemová hmotnost a zhutnitelnost	62
6.6.3	Smyková pevnost	64
6.6.4	Deformační vlastnosti	65
6.6.5	Okamžitý poměr únosnosti (IBI), kalifornský poměr únosnosti (CBR)	65
6.6.6	Objemové změny (bobtnání)	65
6.6.7	Propustnost	67
6.6.8	Fyzikálně-mechanické vlastnosti popílků po denitrifikaci.	67
6.7	Materiály ze spalování uhlí jako sypanina	70
6.7.1	Požadavky na materiály ze spalování uhlí pro použití jako sypanina.	70
6.7.2	Praktické aplikace	71
6.8	Popílký jako pojivo	73
6.8.1	Požadavky na popílký pro použití jako pojivo	73
6.8.2	Vlastnosti popílků jako pojiva	74
6.8.3	Praktické aplikace	77
6.9	Energosádrovec	79
6.10	Produkty ze spalování uhlí – shrnutí	79
7	Produkty spalování komunálního odpadu.	84
7.1	Škvára ze spalování komunálního odpadu	85
7.1.1	Způsoby nakládání se škvárou v Evropě	85
7.1.2	Environmentální požadavky	87
7.1.3	Technické požadavky	88
7.2	Popílek ze spalování komunálního odpadu (MIFA).	89
7.3	Produkty spalování tuhých alternativních paliv z Teplárny Přerov	90
7.3.1	Chemické složení produktů ze spalování TAP	92
7.3.2	Produkty ze spalování TAP v zemních pracích	92
7.4	Produkty ze spalování komunálního odpadu – shrnutí	93
8	Produkty spalování dalších materiálů.	96
8.1	Produkty ze spalování biomasy	96
8.1.1	Chemické složení produktů ze spalování biomasy	97
8.1.2	Fyzikálně-mechanické vlastnosti produktů ze spalování biomasy	98
8.1.3	Praktické aplikace	99
8.2	Produkty ze spalování papírenských kalů	100
8.2.1	Chemické složení popílků ze spalování papírenského kalu	100
8.2.2	Fyzikálně-mechanické vlastnosti popílků ze spalování papírenských kalů	100
8.2.3	Praktické aplikace.	101
8.3	Produkty ze spalování kalů z čistíren odpadních vod	102
8.3.1	Chemické složení produktů spalování kalů z čistíren odpadních vod.	102
8.3.2	Fyzikálně-mechanické vlastnosti popílků ze spalování kalů z čistíren odpadních vod	103
8.3.3	Praktické aplikace	104
8.4	Produkty ze spalování hořlavých břidlic.	104
8.4.1	Chemické složení produktů ze spalování hořlavých břidlic	104
8.4.2	Fyzikálně-mechanické vlastnosti produktů ze spalování hořlavých břidlic.	105
8.4.3	Praktické aplikace.	107
8.5	Produkty ze spalování dalších materiálů – shrnutí.	108

9	Materiály z výroby železa a oceli	111
9.1	Historie používání materiálů z výroby železa a oceli v zemních pracích.	111
9.2	Původ materiálů z výroby železa a oceli	112
9.2.1	Vysokopecní struska	112
9.2.2	Ocelářská struska	113
9.2.3	Ostatní materiály z výroby železa a oceli	114
9.3	Chemické a mineralogické složení materiálů z výroby železa a oceli.	114
9.4	Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů z výroby železa a oceli.	118
9.4.1	Zrnitost	118
9.4.2	Objemová hmotnost a zhutnitelnost	120
9.4.3	Smyková pevnost	120
9.4.4	Deformační vlastnosti	121
9.4.5	Objemová stálost materiálů z výroby železa a oceli	122
9.4.6	Experimentální zkoušky bobtnání a stanovení bobtnacího tlaku	127
9.5	Požadavky na materiály z výroby železa a oceli pro použití v zemních pracích.	130
9.5.1	Environmentální požadavky.	130
9.5.2	Technické požadavky.	131
9.6	Praktické aplikace	131
9.6.1	Granulovaná vysokopecní struska	132
9.6.2	Vzduchem chlazená vysokopecní struska	132
9.6.3	Ocelářská struska (BOF)	133
9.6.4	Ocelářské strusky z elektrických obloukových pecí a sekundární metalurgie	136
9.6.5	Hutní suť.	136
9.7	Granulovaná vysokopecní struska jako pojivo	138
9.7.1	Ocelářská struska pro úpravu zemin	139
9.8	Materiály z výroby železa a oceli - shrnutí.	140
10	Materiály z výroby neželezných kovů	144
10.1	Strusky neželezných kovů – obecně	144
10.2	Strusky z výroby mědi	145
10.2.1	Chemické a mineralogické složení strusky z výroby mědi	145
10.2.2	Fyzikálně-mechanické vlastnosti strusky z výroby mědi	145
10.2.3	Struska z výroby mědi v zemních pracích	146
10.3	Strusky z výroby ferromolybdenu	147
10.4	Strusky z výroby olova.	148
10.5	Strusky z výroby zinku.	148
10.6	Strusky z výroby ferrochromu	149
10.7	Strusky z výroby niklu	150
10.8	Strusky z výroby cínu	151
10.9	Strusky z výroby fosforu.	152
10.10	Materiály z výroby neželezných kovů – shrnutí	152
11	Materiály ze slévárenství	155
11.1	Slévárenský písek.	155
11.1.1	Zdroje slévárenského písku	155
11.1.2	Chemické a mineralogické složení	155
11.1.3	Fyzikálně-mechanické vlastnosti	156
11.1.4	Praktické aplikace.	156
11.2	Slévárenská kupolová struska.	157

11.3	Materiály ze slévárenství - shrnutí	159
12	Materiály z těžby a úpravy nerostných surovin	160
12.1	Uhelná hlušina	160
12.1.1	Rozdělení uhelné hlušiny	161
12.1.2	Chemické a mineralogické složení uhelné hlušiny	162
12.1.2.1	<i>Uhelná hmota v hlušině</i>	<i>162</i>
12.1.2.2	<i>Náchylnost k samovznícení</i>	<i>163</i>
12.1.2.3	<i>Metody stanovení a klasifikace náchylnosti uhlí k samovznícení</i>	<i>165</i>
12.1.2.4	<i>Samovznícení hlušin</i>	<i>167</i>
12.1.2.5	<i>Chemické a mineralogické složení prohořelé uhelné hlušiny</i>	<i>172</i>
12.1.2.6	<i>Heterogenní intenzita výpalu hlušin na odvalech</i>	<i>175</i>
12.1.3	Fyzikálně-mechanické vlastnosti uhelné hlušiny	175
12.1.3.1	<i>Zrnitost</i>	<i>175</i>
12.1.3.2	<i>Objemová hmotnost a zhutnitelnost</i>	<i>176</i>
12.1.3.3	<i>Smyková pevnost.</i>	<i>179</i>
12.1.3.4	<i>Deformační vlastnosti</i>	<i>180</i>
12.1.4	Používání uhelné hlušiny jako sypaniny	181
12.1.5	Praktické aplikace - dopravní stavby	183
12.1.6	Uhelná hlušina ve vodohospodářských stavbách	185
12.2	Předupravená skrývka z lomu	188
12.3	Odpad z hořlavých břidlic.	192
12.3.1	Chemické vlastnosti	192
12.3.2	Fyzikálně-mechanické vlastnosti	193
12.3.3	Praktické aplikace.	193
12.4	Materiály z těžby a úpravy nerostných surovin – shrnutí	193
13	Vytěžené přírodní materiály.	197
13.1	Materiály z ražeb tunelů	197
13.1.1	Rozdělení materiálů z ražeb tunelů	197
13.1.2	Chemické a mineralogické složení materiálů z ražeb tunelů.	200
13.1.3	Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů z ražeb tunelů.	200
13.1.4	Praktické aplikace.	202
13.2	Materiály těžené z vody	202
13.2.1	Chemické a mineralogické složení	203
13.2.2	Fyzikálně-mechanické vlastnosti	203
13.2.3	Praktické aplikace.	205
13.3	Přírodní zeminy	207
13.3.1	Ervénický koridor.	207
13.4	Vytěžené přírodní materiály – shrnutí.	210
14	Ostatní materiály	212
14.1	Lehké kamenivo vyrobené z expandovaného jílu.	212
14.1.1	Výstavba násypů z lehkého kameniva z expandovaného jílu.	214
14.1.2	Průkazní a kontrolní zkoušky	215
14.1.3	Praktické aplikace.	216
14.2	Pěnové sklo	218
14.2.1	Výstavba násypů z lehkého kameniva z pěnového skla	218
14.2.2	Průkazní a kontrolní zkoušky	220
14.2.3	Praktické aplikace.	220
14.3	Drcené sklo	221

14.4	Odprašky z výroby vápna a cementu.	222
14.4.1	Chemické a mineralogické složení	223
14.4.2	Fyzikálně-mechanické vlastnosti	224
14.4.3	Odprašky z výroby vápna pro úpravu zemin	224
14.4.4	Cementářské odprašky pro úpravu zemin	225
14.4.5	Ověřování vlastností nově připravených hydraulických silničních pojiv s využitím vápenatých popílků a odprašků	226
14.5	Drcené pneumatiky	229
14.5.1	Fyzikálně-mechanické vlastnosti	229
14.5.2	Násyp vylehčený drcenými pneumatikami.	229
14.5.3	Praktické aplikace.	231
14.6	Balíky pneumatik.	232
14.6.1	Fyzikálně-mechanické vlastnosti	232
14.6.2	Výstavba násypu vylehčeného balíky pneumatik	232
14.6.3	Praktické aplikace.	234
14.7	Průmyslové sádrovce	236
14.7.1	Fosfosádrovec	236
14.7.2	Chemosádrovec PRESTAB	237
14.8	Další okrajové materiály.	243
14.9	Ostatní materiály – shrnutí	244
15	Závěry.	247
	Seznam obrázků.	249
	Seznam tabulek	263
	Alternative materials in earthworks – English summary	267
1	Introduction	267
2	Standards and specifications	267
3	Environmental aspects.	268
4	A list of alternative materials	268
5	Recycled materials	270
6	Coal combustion products	271
7	Municipal solid waste incineration products	271
8	Other combustion residues	272
9	Materials from iron and steel production	273
10	Non-ferrous slags.	273
11	Materials from foundry industry	274
12	Materials from mining and processing industry	274
13	Excavated natural materials.	275
14	Miscellaneous materials	276
15	Conclusions.	276

Zkratky

ABS	vzduchem chlazená vysokopeční struska (<i>air-cooled blast furnace slag</i>)
ACFS	vzduchem chlazená slévárenská kupolová struska
AM	průmyslové materiály (<i>manufactured materials</i>) dle ČSN EN 16907-2
AN	přírodní materiály (<i>natural materials</i>) dle ČSN EN 16907-2
AR	recyklované materiály (<i>recycled materials</i>) dle ČSN EN 16907-2
AV	asfaltové vrstvy vozovek pozemních komunikací
BOF	zásaditá ocelářská struska (<i>basic oxygen furnace</i>)
BOS	zásaditá ocelářská struska (<i>basic oxygen furnace slag</i>)
BS	britská norma (<i>British Standard</i>)
C	zásadité (vápenaté) popílky dle ASTM C618
CAI	index abrazivity Cerchar (<i>Cerchar abrasivity index</i>)
CB	cementobetonové kryty vozovek pozemních komunikací
CCC	kontinuální kontrola hutnění (<i>continuous compaction control</i>)
CCP	produkty spalování uhlí (<i>coal combustion products</i>)
CDW	stavebně-demoliční odpad (<i>construction and demolition waste</i>)
CE	jíl s extrémně vysokou plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
CEM I - V	označení cementu pro obecné použití dle ČSN EN 197-1
CEN	Evropský výbor pro standardizaci (<i>European Committee for Standardization</i>)
CG	jíl štěrkovitý (klasifikace dle ČSN 73 6133)
CI	jíl se střední plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
CID	triaxiální zkouška konsolidovaná na izotropně konsolidovaném vzorku, odvozená
CIV	jíl o vysoké plasticitě (klasifikace dle ČSN EN ISO 14688-2)
CKD	cementárenské odprašky (<i>cement kiln dust</i>)
CL	jíl s nízkou plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
CS	jíl písčitý (klasifikace dle ČSN 73 6133)
CSH	kalcium silikát hydrát
CV	jíl s velmi vysokou plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
ČHP	česká část hornoslezské pánve
ČSN	česká technická norma
DOC	rozpuštěný organický uhlík ve vodě (<i>dissolved organic carbon</i>)
DTA	diferenční termická analýza
DTG	diferenční termogravimetrická analýza
EAF	elektrická oblouková pec (<i>electric arc furnace</i>)
EAF S	ocelářská struska z elektrických obloukových pecí (z výroby nerezových / vysoce legovaných ocelí) (<i>electric arc furnace slag from stainless/high alloy steel production</i>)
EAFC	ocelářská struska z elektrických obloukových pecí (z výroby uhlíkaté oceli) (<i>electric arc furnace slag from carbon steel production</i>)
EN	evropská norma
EOX	extrahovatelné organicky vázané halogeny
EPB	tunelovací metoda rovnováhy zemních tlaků (<i>earth pressure balance</i>)
ETA	Evropské technické schválení (<i>European technical assessment</i>)
F	kyselé (křemičité) popílky dle ASTM C618
FBC	ložový popel (<i>fluidized bed combustion</i>)
FBCFA	popílek z fluidního spalování (<i>fluidized bed combustion fly ash</i>)
FGD	odsířování plynů (<i>flue gas desulphurisation</i>)
FL	plovoucí částice ($\leq 1\,000\text{ kg.m}^{-3}$) podle ČSN EN 933-11 - plovoucí dřevo, polystyren apod.
FPC	systém řízení výroby (<i>factory production control</i>)

FTIR	infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
GBS	granulovaná vysokopecní struska (<i>granulated blast furnace slag</i>)
GC	štěrk jílovitý (klasifikace dle ČSN 73 6133)
GCFS	granulovaná slévárenská kupolová struska
GF	štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy (klasifikace dle ČSN 73 6133)
GGBS	jemně mletá granulovaná vysokopecní struska (<i>ground granulated blast furnace slag</i>)
GM	štěrk hlinitý (klasifikace dle ČSN 73 6133)
GP	štěrk špatně zrněný (klasifikace dle ČSN 73 6133)
GW	štěrk dobře zrněný (klasifikace dle ČSN 73 6133)
HA	huminové kyseliny (<i>humic acids</i>)
CH	jíl s vysokou plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
CHSK	chemická spotřeba kyslíku
IEA	Mezinárodní agentura pro energii (<i>International Energy Agency</i>)
IW	průmyslový odpad (<i>industrial waste</i>)
L/S	podíl kapalné a pevné fáze při zkouškách vyluhovatelnosti (<i>liquid /solid</i>)
LKD	odprašky z výroby vápna (<i>lime kiln dust</i>)
ME	hlína s extrémně vysokou plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
MG	hlína štěrkovitá (klasifikace dle ČSN 73 6133)
MH	hlína s vysokou plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
MI	hlína se střední plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
MIBA	škvára ze spalování komunálního odpadu (<i>municipal incinerator bottom ash</i>)
MIFA	popílek ze spalování komunálního odpadu (<i>municipal incinerator fly ash</i>)
ML	hlína s nízkou plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
MS	hlína písčitá (klasifikace dle ČSN 73 6133)
MSW	komunální odpad (<i>municipal solid waste</i>)
MV	hlína s velmi vysokou plasticitou (klasifikace dle ČSN 73 6133)
MZK	mechanicky zpevněné kamenivo
NEL	nepolární extrahovatelné látky
NOx	oxidy dusíku
NSW	New South Wales
OKR	ostravsko-karvinský revír
OC	obchodní centrum
ON	oborová norma (oborové normy byly zrušeny k 31. 12. 1993)
OPC	portlandský cement (<i>Ordinary Portland Cement</i>)
OSN	Organizace spojených národů
OTP	Obchodní technické podmínky (staveb státních drah)
PAU	polyaromatické uhlovodíky
PCB	polychlorované bifenylly
PET	polyetylen
PFA	popílek z rozmělněného uhlí (<i>pulverised fly ash</i>)
PHO	pásmo hygienické ochrany zdroje vody
PM	Proctor modifikovaný
PRESTAB	vedlejší produkt z výroby titanové běloby ve společnosti PRECHEZA a.s. Přerov (chemosádrovec)
PS	Proctor Standard
Q100	úroveň hladiny vody při stoleté povodni
QLD	Queensland
R1 až R6	klasifikační třídy skalních hornin dle ČSN 73 6133

Ra	asfaltové materiály – asfaltové směsi vyfrézované (vybourané) z konstrukčních vrstev vozovek, litý asfalt, hrubé kamenivo obalené asfaltem
Rb	prvky z pálené hlíny, cihly, keramika, střešní tašky, keramické trubky, keramzit, dlažba z cihel, keramických a lehčených materiálů, keramické výrobky (dlaždice, sanitární prvky, sokly), beton z lehčených materiálů, pórobeton, malta ze spár, povrchová omítka, vápenec
Rc1	CB kryty, betonové bloky, kusy drceného betonu, betonové desky, dlažba, betonové cihly, jádrové podlahové desky, betonové střešní tašky
Rc2	betonové konstrukční prvky z pozemních staveb, hrubé kamenivo s nanesenou maltou z betonu, betonová malta, základový beton
REACH	registrace, hodnocení a povolování chemických látek (<i>Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals</i>)
Rg	sklo – okenní sklo, obalové sklo, sklo z FV panelů apod.
Rh	směsi stmelené hydraulickým pojivem (ne betony), betonové potěry z podlah
RID/ADR	Mezinárodní řád pro přepravu nebezpečných věcí po železnici (RID) / Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR)
RL	rozpustné látky
Rn	přírodní kamenivo (např. výzisk nebo nestmelené vrstvy pozemní komunikace)
RSM	použitelný materiálový výstup z recyklačního zařízení splňující požadavky na inertní materiál identifikovaný obsahem složek stanoveným podle ČSN EN 933-11 a splňující legislativní a environmentální požadavky příslušných předpisů a vyhlášek
RTG	rentgen
Ru	recykláty vyrobené ze stmelěných a nestmelených vrstev
S4	předpis státních drah Železniční spodek
SA	Jižní Austrálie (<i>South Australia</i>)
SC	písek jílovitý (klasifikace dle ČSN 73 6133)
SCR	selektivní nekatalytická redukce (denitrifikační metoda)
SDG	cíle udržitelného rozvoje (<i>Sustainable Development Goals</i>)
SDO	odpad vzniklý při odstraňování stavby, provádění stavby nebo údržbě stavby
SF	písek s příměsí jemnozrnné zeminy (klasifikace dle ČSN 73 6133)
SHR	Severočeský hnědouhelný revír
SI	tvarový index (<i>shape index</i>)
SM	písek hlinitý (klasifikace dle ČSN 73 6133)
SMS	ocelářské strusky sekundární metalurgie (<i>secondary metallurgical slags</i>)
SNCR	selektivní nekatalytická redukce (metoda denitrifikace) (<i>selective non-catalytic reduction</i>)
SP	písek špatně zrněný (klasifikace dle ČSN 73 6133)
STP	stavební technické osvědčení
SW	písek dobře zrněný (klasifikace dle ČSN 73 6133)
ŠD	štěrkodrt'
TAP	tuhá alternativní paliva (<i>solid recovery fuels</i>)
TBM	tunelovací stroj (<i>tunnel boring machine</i>)
TC	technický výbor (<i>technical committee</i>)
TKO	tuhý komunální odpad
TKP	Technicko-kvalitativní podmínky Ministerstva dopravy ČR
TOC	celkový organický uhlík (<i>total organic carbon</i>)
TP	Technické podmínky (v resortu Ministerstva dopravy ČR)
TR	Technická zpráva (<i>Technical report</i>)
TZS	technologické zabezpečení skládky
ÚGN AVČR v.v.i.	Ústav geoniky Akademie věd ČR v.v.i.
UIC	Mezinárodní železniční unie (<i>Union Internationale des Chemins de fer</i>)
V	křemičitý popílek (dle ČSN EN 197-1)
VEP	vedlejší energetické produkty (<i>ekvivalent Coal Combustion Products</i>)
VVÚÚ	Vědeckovýzkumný ústav uhelný, později VVÚÚ a.s.
W	vápenatý popílek (dle ČSN EN 197-1)

WA	Západní Austrálie (<i>Western Australia</i>)
X	jiné částice (%hm.) jako hlína, jíl, střešní asfaltové šindele, PVC, pryž, polykarbonát, papír, sádrové zbytky (sádrová omítka), uhlí a uhelné zbytky, kovy (železné a neželezné), lehké kovy, neplovoucí dřevo (dřevovláknité desky), stavební plasty, izolace
Z	zemina odpadní nebo z výkopů určená pro další využití, po úpravě se jedná o homogenizovanou vytríděnou zeminu
ZAS	znovuzískaná asfaltová směs (viz vyhl. 130/2019 Sb.)
ZEVO	zařízení pro energetické využití odpadu
ZTKP	Zvláštní technické kvalitativní podmínky

Veličiny

A ^a	obsah popela (%)
c	měrná tepelná kapacita (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
c	soudržnost (kPa)
c'	efektivní soudržnost (kPa)
C ^a	obsah uhlíku (%)
C ^{at}	obsah atomárního uhlíku (%)
cB	částice s velikostí nad 63 mm (<i>cobbles, boulders</i>)
CBR	kalifornský poměr únosnosti (%) (<i>California Bearing Ratio</i>)
C ^{daf}	obsah celkového uhlíku (%)
D	míra zhutnění (% PS nebo PM)
E	modul přetvárnosti (MPa)
E _{def2}	modul přetvárnosti z druhé zatěžovací větve statické zatěžovací zkoušky deskou (podle ČSN 72 1006) (MPa)
E _{oed}	oedometrický modul přetvárnosti (MPa)
f	částice s velikostí pod 0,063 mm
g	částice s velikostí 2-63 mm
Gv	objemové bobtnání (%)
h	tloušťka vrstvy (m)
H ^{at}	obsah atomárního vodíku (%)
IBI	okamžitý index únosnosti (%) (<i>immediate bearing index</i>)
I _{DG}	index rozpadavosti (<i>degradability index</i>)
I _{FR}	index drtitelnosti (%) (<i>fragmentability index</i>)
I _{om}	obsah organických látek (%)
I _p	index plasticity (%)
k _f	koeficient filtrace (koeficient hydraulické vodivosti) (m.s ⁻¹)
LA	součinitel Los Angeles (%) (viz ČSN EN 1097-2)
LOI	ztráta žíháním (%) (<i>loss on ignition</i>)
Ls	lineární bobtnání (<i>linear swelling</i>) (%)
MCV	okamžitý stav vlhkosti (<i>moisture condition value</i>) (%)
n	pórovitost (%)
N ^{at}	obsah atomárního dusíku (%)
O ^{at}	obsah atomárního kyslíku (%)
pH	záporný dekadický logaritmus koncentrace oxoniových iontů
Q _S ^{daf}	spalné teplo v hořlavině (J.kg ⁻¹)
r ²	koeficient korelace
Rc	pevnost v prostém tlaku (<i>unconfined compressive strength</i>) (MPa)
Ri	pevnost v prostém tlaku po ponoření do vody (MPa)
Ro	odraznost (reflexe) vitrinitu (%)
s	částice s velikostí 0,063 až 2 mm
S ^{daf}	obsah celkové síry (%)

SI	tvarový index (<i>shape index</i>) (%)
Sr	stupeň nasycení (-)
SZa	index náchylnosti k samovznícení (metoda A) ($^{\circ}\text{C}.\text{hod}^{-1}$)
SZb	index náchylnosti k samovznícení (metoda B) ($^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$)
t_{max}	maximální dosažená teplota ($^{\circ}\text{C}$)
UCS	pevnost v prostém tlaku (<i>unconfined compressive strength</i>) (MPa)
V^{daf}	prchavá hořlavina (%) (<i>volatile matter</i>)
w	vlhkost (%)
W^a	vlhkost (tuhá paliva) (%)
WA	nasákavost (<i>water absorption</i>) (%)
w_L	vlhkost na mezi tekutosti (%)
w_n	přirozená vlhkost (%)
w_{opt}	optimální vlhkost dle zkoušky Proctor Standard (%)
w_p	vlhkost na mezi plasticity (%)
z.ž.	ztráta žíháním (%)
β	míra namrzavosti (-)
ε	přetvoření (%)
ϕ	úhel vnitřního tření ($^{\circ}$)
ϕ'	efektivní úhel vnitřního tření ($^{\circ}$)
ρ_{dmax}	maximální suchá objemová hmotnost dle zkoušky Proctor Standard ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$)
ρ_n	objemová hmotnost ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$)
ρ_s	zdánlivá hustota pevných částic ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$)
σ	normálové napětí (kPa)

1 Úvod

V roce 2023 skončila více než pětiletá práce pracovní skupiny při Technickém výboru CEN TC 396 Zemní práce. Úkolem této pracovní skupiny bylo připravit evropský dokument shrnující používání alternativních materiálů (druhotných a recyklovaných materiálů) v zemních pracích. Výsledkem je technická zpráva CEN/TR 16907-8 Alternativní materiály v zemních pracích.

Nebylo ambicí pracovní skupiny připravit evropskou normu, protože v této oblasti se jen obtížně hledá konsensus na evropské úrovni. Technická zpráva CEN/TR 16907-8 je souhrnem dobré praxe jednotlivých zemí, které mají zkušenosti s využíváním jednotlivých alternativních materiálů. Výhodou byl evropský souhrn, protože ne ve všech zemích jsou stejné zdroje a zkušenosti s využíváním těchto materiálů.

Příprava CEN/TR 16907-8 byla hlavní inspirací pro zpracování předkládané publikace. Publikace částečně navazuje na autorovu knihu *Druhotné suroviny v dopravním stavitelství*, která vyšla v roce 2012. Tato předchozí publikace si však všímala jen skupin materiálů, které se využívají v České republice, ke kterým patří uhelná hlušina, produkty z výroby železa a oceli (strusky), vedlejší energetické produkty, recykáty a některé méně běžné suroviny (např. chemosádrovec z výroby titanové běloby pod obchodním názvem PRESTAB).

Oproti předchozí publikaci byl rozsah materiálů rozšířen a uzpůsoben nomenklatuře a klasifikaci z evropské technické zprávy CEN/TR 16907-8 (tabulka 1.1). Byly doplněny novější výsledky výzkumu vlastností jednotlivých materiálů. Týká se to především produktů z výroby železa a oceli. Publikace v roce 2012 vznikala pod vlivem začínajícího sporu ve věci deformací vozovky na dálnici D47. Bohužel, ani po 12 letech není tento spor ukončen a na výzkum nebyly v České republice na rozdíl od právních sporů vynaloženy žádné prostředky. I přesto jsou v předložené publikaci prezentovány výsledky „hobby“ výzkumu společnosti SG Geotechnika a.s.

Pozornost byla věnována především využití alternativních materiálů jako jsou sypaniny. Nebyly však opomenuty ani možnosti využití některých materiálů (popílky, granulovaná vysokopecní struska) pro úpravu zemin ve smyslu ČSN EN 16907-4.

Části publikace, které popisují materiály používané v České republice, mají logicky větší rozsah a obsahují podrobné informace vycházející převážně z poznatků společnosti SG Geotechnika a.s. a autora. U materiálů, které se v České republice nevyskytují, jsou základní informace o nich převzaty z odborné literatury a výsledků mezinárodních projektů, které se věnovaly jejich použití.

Obecně celá publikace důsledně využívá relativně nových evropských norem pro zemní práce řady ČSN EN 16907 přijatých v roce 2018.

tab. 1.1 Přehled zdrojů alternativních materiálů a jejich zařazení podle ČSN EN 16907-2

Skupina	Zdroj	Zařazení podle ČSN EN 16907-2
A	Průmysl recyklace stavebního a demoličního odpadu	AR
B	Průmysl spalování komunálního odpadu	AM
C	Průmysl spalování uhlí pro výrobu energie	AM
D	Průmysl železa a oceli	AM
E	Průmysl neželezných kovů	AM
F	Slévárenský průmysl	AM
G	Těžební průmysl	AN (AM)
H	Vytěžené přírodní materiály	AN
I	Produkty spalování dalších materiálů	AM
J	Ostatní	AM (AR)

Vysvětlivky:
AM – manufactured materials (průmyslové materiály), AN – natural materials (přírodní materiály), AR – recycled materials (recyklované materiály)

Rozdělení jednotlivých alternativních materiálů do skupin podle CEN/TR 16907-8 bylo respektováno i v této publikaci, třebaže pořadí jednotlivých skupin bylo pro potřeby této publikace mírně upraveno. Například produkty spalování všech produktů (uhlí, komunální odpad, biomasa, papírenský kal, kaly z čistíren odpadních vod a hořlavé břídlíce) jsou řazeny za sebou.

Publikace je koncipována tak, aby se zájemce mohl soustředit na konkrétní skupinu materiálů nebo konkrétní materiál bez nutnosti procházet všechny skupiny.

Na závěr by autor chtěl konstatovat, že s ohledem na šíři problematiky nemohl obsáhnout všechny aspekty alternativních materiálů. Stejně tak i výběr citované literatury odpovídá jeho představě a určitě není vyčerpávající. Za nedostatky v této publikaci se autor dopředu omlouvá.

1.1 Udržitelný rozvoj a alternativní materiály

Udržitelný rozvoj (*Sustainable development*) je takový způsob rozvoje lidské společnosti, který uvádí v soulad hospodářský a společenský pokrok s plnohodnotným zachováním životního prostředí. Mezi hlavní cíle udržitelného rozvoje patří zachování životního prostředí budoucím generacím v co nejméně pozměněné podobě. Je postavený na sociálním, ekonomickém a environmentálním pilíři.

Potřeba učinit náš svět udržitelným se v posledních letech stala významnou v Evropě i ve světě. Téměř všechny země světa totiž musí řešit palčivé výzvy, jimiž jsou změna klimatu, demografické změny, ztráta úrodné půdy či prohlubující se nerovnosti. Zrychlující se technologická změna a narůstající propojování současného světa znamená, že je nutné vnímat svět v souvislostech a brát ohled na zodpovědnost každého státu vůči globálnímu společenství. V roce 2015 OSN přijalo 17 cílů udržitelného rozvoje (*Sustainable Development Goals*, SDG), jež navázaly na tzv. Rozvojové cíle tisíciletí zaměřené na problémy rozvojových zemí. Cíle udržitelného rozvoje se týkají všech států a každý může přispět k jejich naplnění.

Českou odpovědí na přijetí globální rozvojové agendy Valným shromážděním OSN v New Yorku v září 2015 je Strategický rámec Česká republika, jenž přenáší do domácího prostředí 17 cílů udržitelného rozvoje. Tento strategický dokument nahradil Strategický rámec udržitelného rozvoje z roku 2010. Cíle udržitelného rozvoje (17 cílů) jsou následující:

- Cíl 1: Vymýtit chudobu ve všech jejích formách všude na světě
- Cíl 2: Vymýtit hlad, dosáhnout potravinové bezpečnosti a zlepšení výživy, prosazovat udržitelné zemědělství
- Cíl 3: Zajistit zdravý život a zvyšovat jeho kvalitu pro všechny v jakémkoli věku
- Cíl 4: Zajistit rovný přístup k inkluzivnímu a kvalitnímu vzdělání a podporovat celoživotní vzdělávání pro všechny
- Cíl 5: Dosáhnout genderové rovnosti a posílit postavení všech žen a dívek
- Cíl 6: Zajistit všem dostupnost vody a sanitačních zařízení a udržitelné hospodaření s nimi
- Cíl 7: Zajistit všem přístup k cenově dostupným, spolehlivým, udržitelným a moderním zdrojům energie
- Cíl 8: Podporovat trvalý, inkluzivní a udržitelný hospodářský růst, plnou a produktivní zaměstnanost a důstojnou práci pro všechny
- Cíl 9: Vybudovat odolnou infrastrukturu, podporovat inkluzivní a udržitelnou industrializaci a inovace
- Cíl 10: Snížit nerovnost uvnitř zemí i mezi nimi
- Cíl 11: Vytvořit inkluzivní, bezpečná, odolná a udržitelná města a obce
- Cíl 12: Zajistit udržitelnou spotřebu a výrobu
- Cíl 13: Přijmout bezodkladná opatření na boj se změnou klimatu a zvládání jejich dopadů
- Cíl 14: Chránit a udržitelně využívat oceány, moře a mořské zdroje pro zajištění udržitelného rozvoje
- Cíl 15: Chránit, obnovovat a podporovat udržitelné využívání suchozemských ekosystémů, udržitelně hospodařit s lesy, potírat rozšiřování pouští, zastavit a následně zvrátit degradaci půdy a zastavit úbytek biodiverzity
- Cíl 16: Podporovat mírové a inkluzivní společnosti pro udržitelný rozvoj, zajistit všem přístup ke

spраведности a vytvořit efektivní, odpovědné a inkluzivní instituce na všech úrovních

- Cíl 17: Oživit globální partnerství pro udržitelný rozvoj a posílit prostředky pro jeho uplatňování

Udržitelný rozvoj je úzce spjatý s cirkulární ekonomikou. Cirkulární ekonomika je koncept, který je integrální součástí udržitelného rozvoje. Zabývá se způsoby, jak zvyšovat kvalitu životního prostředí a lidského života pomocí zvyšování efektivity produkce.

Klíčové je, aby používané materiály byly navzájem odděleny do dvou nezávisle cirkulujících okruhů, jež se řídí rozdílnou logikou. První operuje s látkami organického původu, které jsou snadno odbouratelné a není proto v jejich případě problém navrátit je zpět do biosféry. Druhý operuje se syntetickými látkami, jež by měly být do produktů vkládány tak, aby bylo možné je z nich následně extrahovat a opět použít, a nebylo tak nikdy nutné je do biosféry navracet.



CC 3.0 Cathrine Weetman 2016

obr. 1.1 Srovnání lineární ekonomiky (vlevo) a cirkulární ekonomiky (vpravo) (upraveno podle Weetmanové 2016)

Poznámka:

Kritici však namítají, že z energetického hlediska by to znamenalo porušit druhý termodynamický zákon. Žádný cyklus nemůže být stoprocentně účinný, takže každá cirkulární ekonomika je i trochu lineární ekonomikou.

Základní principy cirkulární ekonomiky jsou:

- Změňme odpady v suroviny.
- V rozmanitosti je síla.
- Energie z obnovitelných zdrojů.
- Harmonický rozvoj sociální, ekonomické a environmentální oblasti.
- Odstraňování negativních externalit (přechod od minimalizace negativních dopadů k optimalizaci dopadů pozitivních).
- Někdy je lepší začít od začátku nebo nedělat nic.

Hned první princip cirkulární ekonomiky je úzce spjatý s používáním alternativních materiálů. Používání alternativních materiálů zapadá do plánů tzv. zelené dohody (*Green Deal*), protože výrazně snižují uhlíkovou stopu a přispívají k dekarbonizaci stavebnictví.

Mnohé země mají používání alternativních surovin a jejich přeměnu na zdroje zakotveno ve svých strategických dlouhodobých programech udržitelného rozvoje. Bohužel,

v mnoha z nich jde pouze o proklamativní texty (např. Politika druhotných surovin České republiky), které nezahrnují podporu těch, kteří alternativní materiály používají. Na rozdíl od Velké Británie, kde se zvyšují poplatky za ukládání inertního odpadu a daně za těžbu přírodních surovin, v České republice žádná podpora používání alternativních materiálů není. Alternativní materiály se používají v České republice především z hlediska snížení nákladů na stavbách.

1.2 Výhody používání alternativních materiálů

Důvody, proč používat alternativní materiály v zemních pracích, jsou zřejmě zejména v kontextu v současné době akcentovaného udržitelného rozvoje. Používání alternativních materiálů zapadá do koncepce cirkulární ekonomiky, kde je jednou ze zásad přeměna odpadů na suroviny. Alternativní materiály mohou úspěšně nahrazovat materiály přírodní, jejichž zásoby výrazně klesají a nelze předpokládat otevírání nových ložisek pro těžbu (Kresta 2022).

Hlavní výhody používání alternativních materiálů jsou především následující:

- ekologické hledisko – používáním alternativních materiálů se snižuje množství odpadů ukládaných na skládky a snižují se tedy i náklady na následnou rekultivaci. U většiny alternativních materiálů se snižují emise CO₂ na realizaci stavby a zvyšuje se úroveň dekarbonizace.
- náklady stavby – většinou jsou alternativní materiály levnější než přírodní suroviny (kamenivo), avšak i zde se mnohdy ceny srovnávají, protože majitelé alternativních materiálů mají zájem na zisku.
- časové hledisko – zemní tělesa z některých alternativních materiálů (uhelná hlušina, vysokopecní a ocelářská struska aj.) lze provádět i ve zhoršených klimatických podmínkách (zimní měsíce).

Výhodám a nevýhodám jednotlivých materiálů se věnují příslušné kapitoly, stejně jako rizikům při jejich používání a způsobům jejich eliminace.

Je nutné si uvědomit, že závěry a doporučení týkající se alternativních materiálů nelze generalizovat a vždy je nutné přistupovat k jejich použití se znalostí konkrétní aplikace a okrajových podmínek.

Aby se z druhotné suroviny nebo recyklovaného materiálu stala adekvátní náhrada přírodní suroviny (a to jak v lokálním, tak globálním měřítku), je nutné splnit následující podmínky, které poprvé formulovali Edil a Benson (1998):

1. Popis suroviny
2. Výběr hlavních užitých vlastností, které musí druhotný materiál splňovat pro danou aplikaci
3. Environmetální vhodnost
4. Průkazní laboratorní zkoušky
5. Modelování chování daného materiálu v inženýrské konstrukci
6. Použitelnost při výstavbě a prokázání využití daného materiálu v praxi
7. Definice okrajových podmínek pro práci s daným materiálem při jeho zabudování do inženýrské konstrukce
8. Znalost vývoje vlastností daného materiálu z dlouhodobého hlediska
9. Standardizace podmínek využití a uvedení technických informací ve známost

Přehled alternativních materiálů, kterým se věnuje tato publikace, nemusí být konečný a jejich struktura se může v budoucnu měnit. Příkladem mohou být produkty ze spalování uhlí, u kterých se předpokládá pokles jejich produkce v souvislosti s útlumem spalování uhlí v elektrárnách a teplárnách zejména ve vyspělém světě. Na druhou stranu vzroste význam starých úložišť a odkališť, která se mohou stát zajímavým zdrojem žádané suroviny nejen pro zemní práce.

Vedle toho bude růst význam zatím jen okrajově využívaných produktů ze spalování komunálního odpadu a dalších surovin (biomasa, papírenský kal apod.). Jejich použití ve stavební praxi je v současné době limitováno s ohledem na některé jejich nepříznivé vlastnosti. Eliminace rizik se stává v současnosti výzvou pro výzkum, aby mohly v blízké budoucnosti alespoň částečně nahradit produkty ze spalování uhlí.

Literatura ke kapitole 1

Cíle udržitelného rozvoje (SDGs): FAKTA. Informační centrum OSN v Praze, on-line <https://osn.cz/osn/hlavni-temata/cile-udrzitelneho-rozvoje-sdgs/>

Edil, T. B. (2006): Green Highways: Strategy for Recycling Materials for Sustainable Construction Practices. 7th International Congress on Advance in Civil Engineering, Istanbul.

Edil, T. B., Benson, C. H. (1998): Geotechnics of Industrial By-Products, Recycled Materials in Geotechnical Application. Geotechnical Special Publication. No. 79, American Society of Civil Engineering, Boston, pp.1-18.

Kresta, F. (2012): Druhotné suroviny v dopravním stavitelství. VŠB Technická univerzita Ostrava, 144 s., ISBN 978-80-248-2890-9.

Kresta, F. (2022): Alternativní materiály v zemních pracích. Stavebnictví, roč. 16, 09/2022, s. 54-57, ISSN 1802-2030.

Politika druhotných surovin České republiky. Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. 2014.

Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Sustainable Development Knowledge Platform, on-line <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Weetman, C. (2016): A circular economy handbook for business and supply chains: repair, remake, redesign, rethink. London, United Kingdom, p. 25. ISBN 978-0-74947675-5.

Normy a předpisy

CEN/TS 17438 Source materials considered in the development of the Aggregate standards of TC 154

ČSN EN 16907-1 Zemní práce – Část 1: Zásady a obecná pravidla

ČSN EN 16907-2 Zemní práce – Část 2: Klasifikace materiálů

ČSN EN 16907-3 Zemní práce – Část 3: Stavební postupy

ČSN EN 16907-4 Zemní práce – Část 4: Úprava zemin vápnem a/nebo hydraulickými pojivy

ČSN EN 16907-5 Zemní práce – Část 5: Kontrola kvality

ČSN EN 16907-6 Zemní práce – Část 6: Rekultivace terénu materiálem těženým z vody

ČSN EN 16907-7 Zemní práce – Část 7: Hydraulické ukládání minerálních odpadů

CEN/TR 16907-8 Earthworks – Part 8: Alternative materials in earthworks

TP 198 Vylehčené násypy pozemních komunikací

TP 210 Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací

TP 268 Alternativní materiály v zemním tělese pozemních komunikací

5 Recyklované materiály

Do skupiny recyklovaných materiálů patří podle CEN/TR 16907-8 a TP 268:

- recyklovaný asfalt,
- recyklovaný beton,
- recyklované cihly a zdivo,
- recyklované hydraulicky stmelené a nestmelené materiály,
- směsné recyklované materiály (asfalt, beton, cihly a zdivo, stmelené a nestmelené materiály),
- recyklovaný štěrk kolejového lože.

Definice jednotlivých materiálů podle CEN/TR 16907-8 jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Používání recyklovaných materiálů v zemním tělese pozemních komunikací v České republice je popsáno v TP 210.

Poznámka

Technické podmínky TP 210 používají mírně odlišné definice recyklovaných materiálů než CEN/TR 16907-8 a TP 268. Není v nich samostatně vyčleněna skupina recyklovaného štěrku kolejového lože, jako v těchto předpisech. Mezi recyklované materiály je v TP 210 zařazena rovněž homogenizovaná a vytríděná zemina, která podle těchto předpisů spadá do skupiny H vytěžené přírodní materiály.

5.1 Obecné požadavky

V případě recyklovaných materiálů se nejčastěji setkáváme s prolínáním jejich použití jako stanovených výrobků (kameniva) a výrobků nestanovených (zemní práce).

Technologie recyklace se v České republice začala nejprve používat na železničních stavbách. Starý štěrk kolejového lože (původně frakce 32/63, po mnohaletém provozu obvykle frakce 0/63) je recyklován na recyklační lince a vyrábí se z něj především recyklovaná štěrkodrt 0/32, která se používá do konstrukčních vrstev. Rozšíření recyklace starého štěrkového

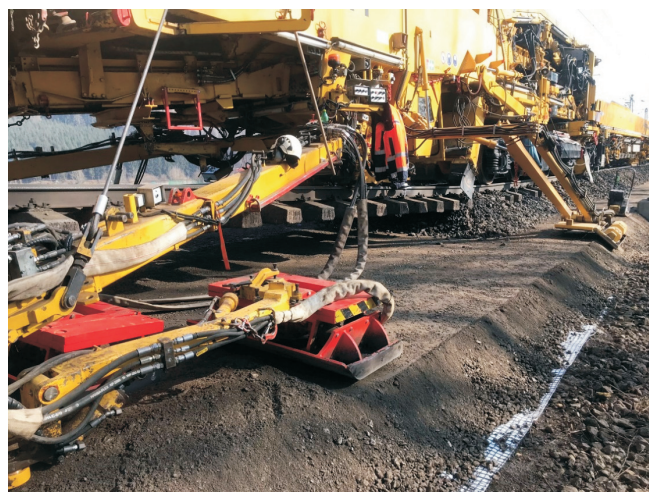


obr. 5.1 Sanace železničního spodku bez snášení kolejového roštu strojem AHM800 (traťový úsek Tlumačov-Hulín, 09/2000)



obr. 5.2 Sanace železničního spodku bez snášení kolejového roštu strojem RPM2002 (traťový úsek Grygov – Brodek u Přerova, 09/2005) (foto P. Vitek)

lože s sebou přinesly technologie sanace železničního spodku technologií bez snášení kolejového roštu s využitím zahraničních strojních sestav AHM 800, RPM 2000 a RPM 2002 (Kresta 2007, Jedlička 2023).



obr. 5.3 Provádění sanace technologií bez snášení kolejového roštu pomocí stroje PM 1000 URM; Ústí n. O. – odb. Bezpráví, kolej č. 1, březen 2023 (foto M. Jedlička)

Použití recyklované štěrkodrti frakce 0/32 mm na železničních stavbách již bylo zakotveno v OTP „Štěrkopísek, štěrkodrt a výzisk z kolejového lože pro konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku“ z r. 1998.

Pod pojmem výzisk ve smyslu OTP z r. 1998 bylo chápáno opětovné použití přírodního hutného kameniva získaného při odtěžení nebo čištění kolejového lože. Charakteristickými znaky výzisku byly zejména nerovnoměrnost a proměnlivost jeho složení vyplývající z různých druhů použitého kameniva, nestejné doby uložení v koleji, a tím i rozdílné doby působení povětrnostních vlivů a zatížení, odlišného vlivu okolí, různosti přepravovaných hmot, způsobu údržby apod.

Po přijetí evropských norem pro kamenivo v roce 2004 byly OTP revidovány. Název platných OTP z r. 2006 je „Štěrk-

kopísek, šterkodrt a recyklovaná šterkodrt pro konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku“. Požadavky na recyklovanou šterkodrt jsou v novém předpisu odlišné od požadavků na šterkodrt novou.

Vedle recyklované šterkodrti umožňují předpisy pro železniční stavby (OTP Kamenivo pro kolejové lože železničních drah) použití i recyklovaného kameniva frakce 32/63 mm do kolejového lože, přičemž recyklované kamenivo není možno použít na stavbách železničních drah s návrhovou rychlostí nad 160 km/h.

Předpis pro použití recyklovaných stavebně demoličních materiálů na stavbách pozemních komunikací byl přijat teprve v roce 2011 (TP 210), třebaže praxe s těmito materiály již byla ověřena a použití recyklovaných materiálů umožňovaly i evropské normy pro kamenivo z r. 2004. V roce 2023 byl předpis TP 210 novelizován.

5.2 Termíny a definice

Termíny a definice v této oblasti úzce souvisí s procesem recyklace a výroby recyklovaných materiálů. Níže jsou uvedeny termíny a definice z předpisu TP 210, které se mohou mírně lišit od termínů používaných v CEN/TR 16907-8 (Stehlík 2024).

Stavební a demoliční odpad je odpad vznikající při stavebních a demoličních činnostech. Jedná se o vymezené vybourané stavební materiály, výrobky a zeminy, které je možné opětovně zpracovat recyklací, nebo stavební a demoliční odpady, které je možné recyklovat na inertní materiál.

Stavební a demoliční odpad je soubor složek, které nemají nebezpečné vlastnosti a u nichž za normálních klimatických podmínek nedochází k žádným významným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám.

Nakládání s využitelnými demoličními materiály a se stavebním a demoličním odpadem je podmíněno splněním požadavků vyhl. č. 273/2021 Sb. a Zákona o odpadech č. 541/2020 Sb., ve znění pozdějších předpisů. Při odstraňování, provádění nebo údržbě stavby se musí se stavebními a demoličními odpady (SDO) obsahujícími nebezpečné látky nakládat takovým způsobem, aby nedošlo ke znečištění ostatních vybouraných stavebních materiálů, vedlejších produktů nebo stavebních a demoličních odpadů určených k recyklaci nebo opětovnému použití. Důležité je stavební a demoliční odpad z hlediska dalšího využití třídít a separovat dle jednotlivého zastoupení recyklovatelných složek.

Stavební a demoliční odpady uvedené v bodě 3, přílohy č. 24 vyhl. 273/2021 Sb., které obsahují nebezpečné složky, nelze k výrobě recyklovaných stavebních materiálů použít.

Vedlejší produkt je movitá věc, která vznikla při výrobě, jejímž prvotním cílem není výroba nebo získání této věci, a nestává se odpadem, ale je vedlejším produktem, pokud

vzniká jako nedílná součást výroby, je zajištěno její další využití, její další využití je možné bez dalšího zpracování způsobem jiným, než je běžná výrobní praxe a její další využití je v souladu se zvláštními právními předpisy a nepovede k nepříznivým účinkům na životní prostředí nebo lidské zdraví.

Recyklace je úprava materiálových vstupů v recyklačním zařízení umožňující znovupoužití materiálu vhodným způsobem. Technická úprava vlastností materiálových vstupů na vlastnosti nové, umožňující jejich opětovné použití ve stavebních konstrukcích.

Recyklovaný stavební materiál (recyklát) je použitelný anorganický materiálový výstup z recyklačního zařízení splňující požadavky na inertní materiál. Jedná se buď o recyklát uvedený na trh jako stanovený výrobek, který je identifikovaný obsahem složek stanovených podle ČSN EN 933-11 a příslušných technických norem pro kamenivo do pozemních komunikací původem ze stavební činnosti, výroby stavebních materiálů a výrobků nebo z demolic. Případně se jedná o homogenizovanou, vytříděnou zeminu a stavební recyklát ve smyslu ČSN 73 6133 jako ostatní výrobek, stavební materiál splňující platné legislativní a environmentální požadavky na použití ve stavebních konstrukcích.

Recyklované stavební materiály se podle TP 210 dále rozdělují na:

- Recyklát z betonu ($Rc1$) získaný drcením a tříděním betonu z cementobetonových krytů vozovek, nosných konstrukcí mostů a konstrukčních betonů.
Obsah: $(Rc + Ru) \geq 90 \text{ \% -hm.}$, $Ra \leq 5 \text{ \% -hm.}$,
 $Rg \leq 1 \text{ \% -hm.}$, $X \leq 3 \text{ \% -hm.}$, $FL \leq 1 \text{ \% -hm.}$
- Recyklát ze směsi betonu ($Rc2$) získaný drcením a tříděním směsi betonu a betonových výrobků z dopravních, pozemních a dalších inženýrských staveb. Obsah složek:
 $(Rc + Ru) \geq 80 \text{ \% -hm.}$, $Ra \leq 10 \text{ \% -hm.}$, $Rb \leq 5 \text{ \% -hm.}$,
 $Rg \leq 1 \text{ \% -hm.}$, $X \leq 3 \text{ \% -hm.}$, $FL \leq 1 \text{ \% -hm.}$
- Recyklát směsný ($Rc + Rb + Ra + Ru$) získaný drcením a tříděním stavebního a demoličního odpadu s max. velikostí zrna 125 mm. Obsah složek: Rc , Ru , Ra , Rg není určen, obsah $Rb < 30 \text{ \% -hm.}$, obsah složek $(X + FL) \leq 10 \text{ \% -hm.}$. Maximální využití tohoto materiálu je v aktivní zóně vozovek a v zemním tělese pozemní komunikace podle ČSN 73 6133. Recyklát získaný drcením a tříděním původního materiálu z konstrukčních vrstev pozemních komunikací. Obsah složek: $Ra < 30 \text{ \% -hm.}$,
 $(Ra + Rc + Ru) \geq 96 \text{ \% -hm.}$, $X \leq 3 \text{ \% -hm.}$, $FL \leq 1 \text{ \% -hm.}$

Poznámka

Jedná se o směsný recyklát z netříděné (neselektivní) demolice celé konstrukce vozovky.

- Recyklát ze zdiva (Rb) získaný drcením a tříděním stavebního a demoličního odpadu s max. velikostí částic $\leq 125 \text{ mm}$, z pálených a nepálených zdicích

6 Produkty spalování uhlí

6.1 Úvod a historie

Používání popílků jako přísady do betonu začalo v USA na začátku 30. let 20. století. První souhrnná studie zabývající se použitím popílků do betonu byla vydána v r. 1937 (Davis et al. 1937).

První masivnější použití popílků jako přísady do betonu bylo na stavbě přehrady Hungry Horse Dam v r. 1948, kdy bylo zabudováno 120 000 t popílku. Vedle ekonomických a ekologických přínosů se použitím popílků do betonu zlepšila jeho zpracovatelnost, snížil se vývoj tepla a propustnost a betony se staly odolnější proti alkalické reakci a působení síranů. V USA činí použití popílků jako přísady do betonu zhruba 20 % celkové jejich produkce.

Používání popílků do násypů pozemních komunikací začalo v USA později než v Evropě. Teprve v 70. letech 20. století začaly ve 14 státech první pokusy s popílkem pro stavbu nebo opravy silničních násypů (FHWA-RD-97-148).

V Evropě začal výzkum potenciálního použití popílků a dalších produktů ze spalování uhlí z tepelných elektráren po 2. světové válce ve Velké Británii spolu s výstavbou tepelných elektráren nové generace. První rozsáhlejší použití popílků ve stavebnictví bylo na stavbách přehradních hrází ve Skotsku (Lednock, Clathworthy a Lubreoch). Na uvedených stavbách byl popílek použit jako přísada do betonu a došlo k úspoře cca 3 000 tun portlandského cementu.

Nedlouho po uplatnění popílků jako přísady do betonu začaly být využívány při výstavbě násypových těles pozemních komunikací. První záznam o použití popílků ve Velké Británii je datován rokem 1952 (Sear et al. 2003).

Smělé plány vyspělého světa (*Green deal, Fit-for-55*) mohou ve svém důsledku změnit i množství alternativních mate-

riálů, které bude možno uplatnit v zemních pracích. Příkladem může být snižování produkce elektrické energie z uhelných tepelných elektráren, což povede ke snižování množství vedlejších energetických produktů (VEP). Tento fakt se již projevil v produkci a spotřebě VEP, kdy se v Evropě spotřebovalo více VEP, než bylo vyprodukováno (především ve výrobě cementu a betonu) (Heidrich – Feuerborn 2021). Rozdíl byl kompenzován využíváním produktů ze spalování uhlí ze starých úložišť, případně dovozem z Turecka a Indie.

tab. 6.1 Produkce VEP a jejich použití ve světě (stav v roce 2019) (upraveno podle Heidricha a Feuerborna 2021)

Země / oblast	Produkce VEP (Mt)	Využití VEP (Mt)	Poměr (%)
Austrálie	12,6	5,9	46,8
Asie			
Čína	585,0	404,0	69,1
Korea	7,5	6,2	82,7
Indie	226,0	191,0	84,5
Japonsko	12,3	12,1	98,4
zbytek Asie	22,4	13,2	58,9
Evropa	103,0		
EU 15	19,4	21,5	110,8
Střední východ a Afrika	33,9	3,9	11,5
Izrael	0,6	0,5	83,3
USA	45,8	27,3	59,6
Brazílie	4,1	1,2	29,3
Kanada	3,2	3,0	93,8
Rusko	30,2	3,1	10,3
Celkem	1 106,0	692,9	62,6

Soustavné studium vlastností elektrárenských popílků, zejména těch, které byly uloženy na odkaliště elektráren, zača-

tab. 6.2 Používání vedlejších energetických produktů v České republice v letech 2013–2021 (zdroj www.asvep.cz)

Použití	Roční spotřeba (t)								
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Výroba betonu a cementu	1 461 857	1 788 270	1 678 298	1 073 947	1 008 162	1 162 582	948 812	1 083 867	1 103 629
Výstavba silnic	196 029	235 276	92 543	84 544	55 199	424 682	488 519	528 753	964 540
Rekultivace povrchových dolů	5 668 680	7 673 768	6 803 639	7 069 635	5 240 694	4 773 309	5 003 936	3 867 918	4 474 821
Zásypy důlních prostor	150 215	303 842	288 497	219 688	30 904	786 850	33 310	42 763	91 982
Terénní úpravy	2 964 905	2 746 454	3 599 116	3 786 097	4 739 612	4 164 805	3 661 833	2 950 831	1 912 873
Sádkarton (z energosádrovce)	483 844	514 736	404 382	467 599	395 256	647 072	765 240	630 190	744 166
Odpad	94 856	73 965	111 992	184 461	151 204	105 455	81 929	112 184	106 847
Skládování energosádrovce	517 947	386 492	99 300	63 934	588 670	490 364	293 289	231 956	101 099
Jiné									631 066
Celkem	11 538 333	13 722 803	13 077 767	12 949 905	12 209 701	12 555 120	11 276 869	9 448 462	10 131 024

lo v bývalém Československu po roce 1956 po tragické havárii odkaliště popílku u elektrárny Nováky. Protržení hráze odkaliště způsobilo ztráty na lidských životech a také velkou ekologickou katastrofu.

V roce 1964 byla vydána první odborná publikace zabývající se problematikou popílku v Československu „Hydraulické odpopelňování“ (Bureš et al. 1964). Na tuto publikaci navázala monografie „Likvidace popelů z energetických výroben“ (Douša – Polický 1977).

Do devadesátých let minulého století se použití popílku do inženýrských staveb omezovalo jen na zásypy a vyrovnávání terénních nerovností v blízkosti zdroje. Od devadesátých let 20. století se v České republice použití vedlejších energetických produktů (především popílků, škváry a elektrárenské strusky) do inženýrských staveb, zejména násypů pozemních komunikací, velmi zvýšilo. Informace o používání vedlejších energetických produktů v České republice v letech 2013–2021 jsou shrnuty v tabulce 6.2.

Používání produktů ze spalování uhlí v zemních pracích je jednodušší než jejich uplatnění v aplikacích s vyšší přidanou hodnotou (cement, beton). Proto i v oblasti zemních prací bude jednodušší využívání starých úložišť.

6.2 Původ a klasifikace

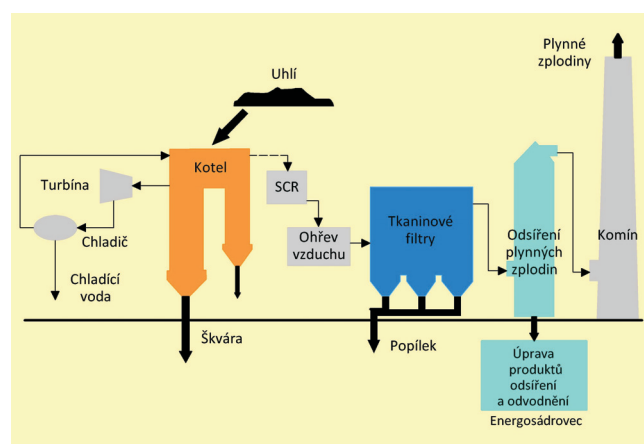
Produkty ze spalování uhlí se rozdělují podle technologie a teploty spalování a pro potřeby stavební praxe podle chemického složení. Kvalitu produktů ze spalování uhlí, jejich složení, podíl sklovité fáze a zrnitost ovlivňuje i technologie jejich zachytu, deponie v suchém či mokřem stavu. Všechny tyto faktory znesnadňují klasifikaci a jednoznačné a jednoduché hodnocení těchto materiálů.

6.2.1 Klasifikace podle technologie spalování

Technologie spalování uhlí a podíl dalších materiálů, které se spolu s uhlím spalují v kotli ovlivňuje vlastnosti výsledných materiálů, které jsou obvykle označovány jako vedlejší energetické produkty (*coal combustion products*).

První skupinou jsou produkty ze spalování v roštových nebo granulačních kotlích při teplotách nad 1 400 °C. V těchto kotlích se mohou spalovat jak kvalitní černá uhlí, tak méně kvalitní hnědá uhlí nebo lignit. Nedílnou součástí technologie spalování jsou odlučovače s tkaninovými filtry, na které se zachycuje úletový popílek. Tato technologie obsahuje samostatnou odsiřovací jednotku a v současné době i jednotku denitrifikační pro eliminaci úniku oxidů dusíku (SCR nebo SNCR) do ovzduší. Schéma spalovacího procesu a lokalizace vedlejších energetických produktů je na obrázku 6.1.

Do druhé skupiny patří produkty fluidního spalování uhlí a spoluspalovaných materiálů. Ve fluidním kotli dochází ke

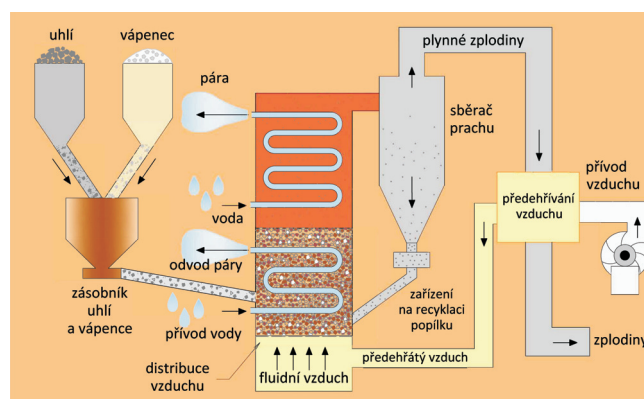


obr. 6.1 Schéma spalovacího procesu v roštových nebo granulačních kotlích spolu s vedlejšími energetickými produkty

spalování při teplotách okolo 850 °C. Obvykle se ve fluidních kotlích spaluje méně kvalitní uhlí nebo směs uhlí se spoluspalovanými látkami. Do kotle se přidává určité množství vápence, jehož hlavní úlohou je vázat na sebe uvolňující se oxidy síry tak, aby nedocházelo k jejich emisím do ovzduší.

Spoluspalovaný materiál je definován v čl. 4.1 ČSN EN 450-1. Mezi spoluspalované materiály patří rostlinný materiál (dřevo, sláma, rostlinná vlákna), surové dřevo a biomasa, masokostní moučka, komunální odpad, papírový odpad, ropný koks, popílek z tekutých a plynných paliv.

Na rozdíl od granulačních nebo roštových kotlů neobsahují fluidní kotle samostatné odsiřovací nebo denitrifikační jednotky. Uvolňující se oxidy síry reagují s vápencem, který je do fluidního kotle přidáván spolu s uhlím a ve formě síranů zůstávají v produktech spalování (především v ložovém popelu). Schéma spalovacího procesu a lokalizace vedlejších energetických produktů z fluidního spalování je na obrázku 6.2.



obr. 6.2 Schéma spalovacího procesu ve fluidních kotlích spolu s vedlejšími energetickými produkty

V tabulce 6.3 jsou shrnuty hlavní rozdíly mezi popílky pocházejícími z roštových a granulačních kotlů a z fluidního spalování (Sulovský 2002).

9.2.3 Ostatní materiály z výroby železa a oceli

K ostatním materiálům z výroby železa a oceli se řadí hutní suť. Hutní suť je heterogenní směs produktů hutní výroby. Jedná se o směs hutnických strusek, slévárenských písků a žáromateriálů – vyzdívky vysokých a ocelářských pecí, které vznikají při výrobě surového železa a oceli (Kratochvíla 1986). V hutní suti je zastoupen zcela podřadně i ostatní materiál (např. dřevo, PVC apod.). Slangově bývala hutní suť označována někdy jako tzv. studený odval.



obr. 9.8 Hutní suť (tzv. studený odval) na odvalu společnosti ArcelorMittal v Ostravě (2016)

9.3 Chemické a mineralogické složení materiálů z výroby železa a oceli

Chemické a mineralogické složení materiálů z výroby železa a oceli závisí na zpracovávaných materiálech a v případě ocelářských strusek na technologii výroby. Rozsah chemického složení vysokopecních a ocelářských strusek z více než 100 analýz z celého světa byl převzatý z Wanga (2016) a je uveden v tabulce 9.1.

tab. 9.1 Rozsah složení čerstvých vysokopecních a ocelářských strusek z více než 100 zdrojů (upraveno podle Wanga 2016) a porovnání se složením čerstvé vzduchem chlazené vysokopecní strusky z ArcelorMittal v Ostravě určené pro stavbu D48 Frýdek-Místek, obchvat (01/2019)

	vysokopecní struska		ocelářská struska		
		ArcelorMittal Ostrava	BOF	EAF	EAF - pánvová
SiO ₂	27-45	35,1	12-17	10-30	2-35
Al ₂ O ₃	7-24	5,83	0,98-3,4	2-9	5-35
Fe ₂ O ₃	0,3-2	0,47			
FeO			10-25	10-30	0-15
CaO	31-50	46,7	35-45	40-60	30-60
MgO	1-18	8,04	3-15	3-8	1-12,6
MnO	0,1-2,3	0,69	5-15	2-5	0-5
SO ₃	0,3-3	1,45	0-0,3	0,1-0,6	0,1-1
P ₂ O ₅	< 0,1	0,01	0,2-4	0-1,2	0-0,4

Vysokopecní struska vzniká po kalcinaci vápence a dolomitu, které se začínají rozkládat při teplotách 800 °C (vápence), resp. 700 °C (dolomit). Při kalcinaci, která je endotermní reakcí, vzniká CaO (v případě dolomitu i MgO) a uvolňuje se CO₂. CaO reaguje s kyselými nečistotami v železné rudě a vytváří roztavnou vysokopecní strusku. Nejdůležitější je reakce CaO s SiO₂ za vzniku kalcium silikátu (CaSiO₃), který tvoří hlavní složku strusky. Vysokopecní struska by měla obsahovat cca 10 % Al₂O₃, aby se struska udržovala v tekuté formě při všech kombinacích obsahu CaO a SiO₂ při teplotě tání 1 400-1 500 °C. Oxid železitý reaguje s CaO a Al₂O₃ při nižších teplotách.

Chemické složení granulované vysokopecní strusky (chlazené ve vodě) a vzduchem chlazené vysokopecní strusky je přibližně stejné, protože při chlazení se základní chemické složení materiálu nemění.

Ocelářské strusky vznikají za vyšších teplot. Při teplotě 1 700 °C probíhají chemické reakce v tavenině. Zásadité ocelářské strusky (BOF) obsahují méně SiO₂ a Al₂O₃ a více CaO a MgO. Pánvové strusky, kterých je produkováno obecně mnohem méně, lze řadit spíše ke kyselým ocelářským struskám.

Chemické složení hutní suti je ovlivněno podílem úlomků vyzdívkových cihel. Obvykle v případě hutní suti (tzv. studeného odvalu) výrazně stoupá podíl MgO (až k 50 %), který pochází z magnazitových nebo chrommagnezitových vyzdívkových cihel, na úkor CaO a případně kyselých oxidů (SiO₂, Al₂O₃). Srovnání složení kameniva vyrobeného z ocelářské strusky a hutní suti z podloží podlahy prodejny Makro v Ostravě je uvedeno v tabulkách 9.2 a 9.3 (Kresta 2019c).

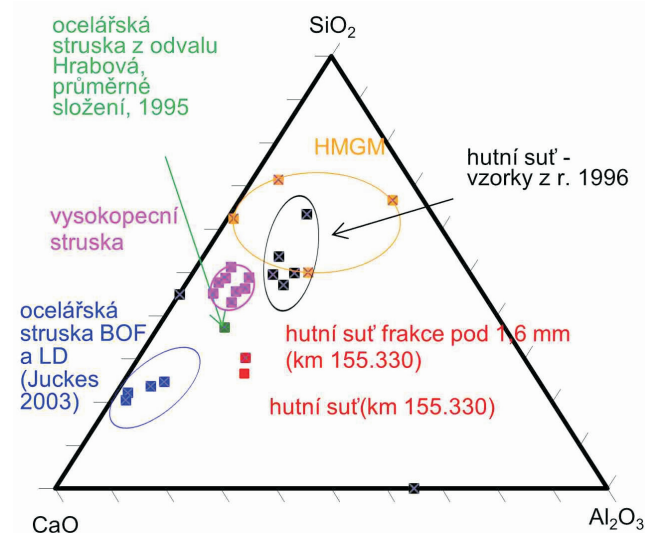
tab. 9.2 Chemické složení vzorků kameniva vyrobeného z ocelářské strusky z podloží podlahy v prodejně Makro v Ostravě

Vzorek	KS2-0,17-0,40 m	KS3-0,17-0,30 m	KS1-0,35-0,80 m	
H ₂ O -	1,80	1,93	1,91	%
H ₂ O +	10,85	10,83	7,33	%
SiO ₂	14,67	15,49	23,70	%
Al ₂ O ₃	4,27	4,65	5,95	%
TiO ₂	0,30	0,26	0,36	%
Fe ₂ O ₃	7,83	5,43	7,65	%
FeO	1,50	1,87	2,85	%
MnO	1,21	1,50	1,48	%
CaO	17,88	20,73	20,95	%
MgO	34,79	30,69	21,77	%
K ₂ O	0,22	0,22	0,40	%
Na ₂ O	0,30	0,23	0,30	%
S	0,00	0,00	0,00	%
SO ₃	0,55	0,58	0,70	%
CO ₂	2,82	4,07	3,06	%
P ₂ O ₅	0,24	0,28	0,32	%
Cr ₂ O ₃	0,84	0,64	0,54	%
Σ	100,07	99,40	99,27	%
Ni	138	92	133	ppm

tab. 9.3 Chemické složení vzorků hutní suť (tzv. studeného odvalu) z podloží podlah v prodejně Makro v Ostravě

Vzorek	KS1-0,80 -1,00 m	KS1-1,00 -1,10 m	KS2-0,50 -1,00 m	KS3-0,50 -1,00 m	
H ₂ O-	1,68	1,55	1,01	1,31	%
H ₂ O+	9,38	9,69	13,06	11,23	%
SiO ₂	15,42	14,65	8,96	12,02	%
Al ₂ O ₃	4,83	4,64	3,30	3,76	%
TiO ₂	0,30	0,32	0,26	0,26	%
Fe ₂ O ₃	6,58	6,27	6,16	5,66	%
FeO	2,11	1,88	1,15	1,38	%
MnO	1,44	1,32	1,01	1,04	%
CaO	18,01	17,69	11,93	15,10	%
MgO	34,47	36,19	49,06	43,19	%
K ₂ O	0,25	0,23	0,13	0,22	%
Na ₂ O	0,24	0,25	0,26	0,25	%
S	0,00	0,00	0,00	0,00	%
SO ₃	0,58	0,58	0,38	0,38	%
CO ₂	2,95	3,04	1,74	3,00	%
P ₂ O ₅	0,28	0,28	0,24	0,26	%
Cr ₂ O ₃	0,86	0,62	0,66	0,67	%
Σ	99,38	99,20	99,31	99,73	%
Ni	108	104	121	89	ppm

Na obrázku 9.9 je srovnání chemického složení materiálů z výroby železa a oceli v ternárním diagramu (SiO₂-Al₂O₃-CaO) a srovnání hutní suť z Ostravska a velmi podobného materiálu (Hüttenmineralstoffgemischen) z Německa.



obr. 9.9 Chemické složení materiálu z výroby železa a oceli, včetně hutní suť (tzv. studeného odvalu) v ternárním diagramu (CaO-SiO₂-Al₂O₃) (HMGM - Hüttenmineralstoffgemischen)

Chemické složení hutní suť je velmi podobné směsi strusek a hutního odpadu z Německa, i když na Ostravsku měla hutní suť větší variabilitu.

Mineralogické složení vzduchem chlazené vysokopecní strusky vychází z fázové rovnováhy systému CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO, který představuje téměř 95 % složení strusky. Běžnými minerály vysokopecních strusek jsou melilit, akermanit a gehlenit.

V případě vysokopecních strusek s nízkým obsahem CaO a vysokým obsahem Al₂O₃ se může vyskytovat anortit. Ve struskách s vysokým obsahem CaO vzniká dikalcium silikát (C₂S). Dikalcium silikát může být příčinou silikátového rozpadu vysokopecních strusek při přechodu z β-fáze na γ-fázi, kdy se může zvýšit objem až o 10 %.

Vysokopecní strusky s vysokým obsahem MgO (nad 16 %) mohou obsahovat periklas. Všechny vysokopecní strusky obsahují sulfid vápenatý ve formě dobře ohraničených malých krystalů, ale častěji ve formě nekystalické hmoty.



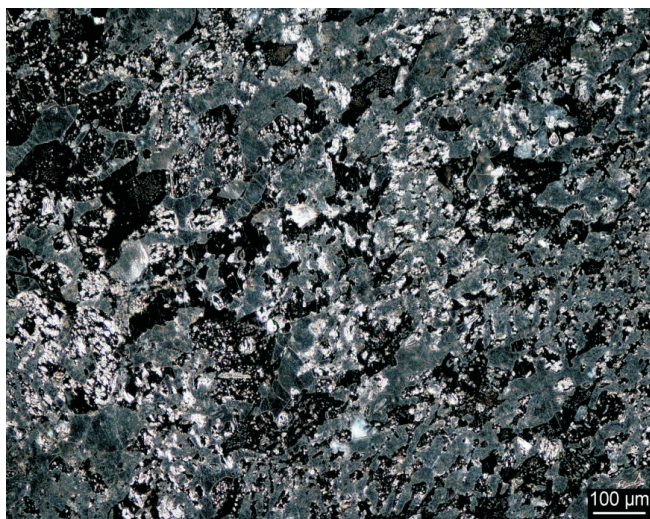
obr. 9.10 Celistvá, krystalická vysokopecní struska (z jádra kusu vysokopecní strusky) bez zjevných známek hydratačních změn. Sonda č. 3, hl. 0,50-0,60 m (IKEA Ostrava). Optická mikroskopie, procházející světlo, zkřížené nikoly. Měřítka na snímku (Foto P. Martinec)

Mineralogické složení ocelářské strusky závisí na procesu výroby oceli a chemickém složení. Zásaditá ocelářská struska (BOF) je složena z dikalcium silikátu (C₂S), trikalcium silikátu (C₃S) a směsi minerálů MgO, FeO a MnO.

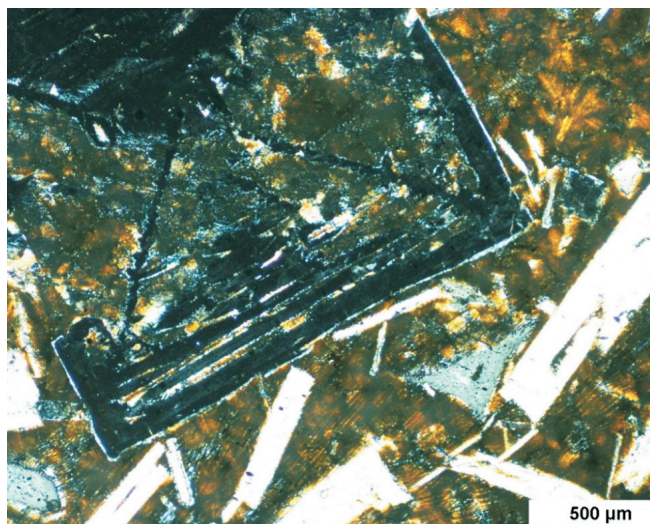
Ocelářská struska velmi často obsahuje v pevném roztoku volné vápno a volné MgO, které mohou způsobovat objemové změny. Na druhou stranu jemné částice volného vápna objemové změny nezpůsobují (Wang 1992).

Volné vápno existuje ve dvou formách – reziduální volné vápno s velikostí zrn 6-10 mm a vysrážené volné vápno (precipitát) s velikostí zrn pod 4 mm.

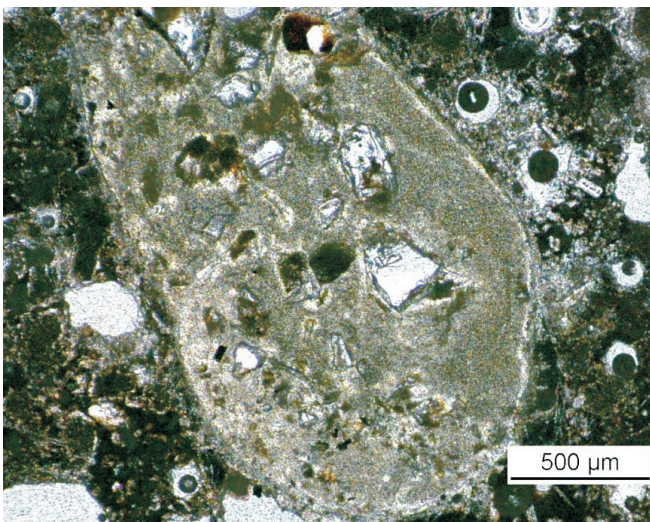
Ocelářská struska uložená na deponii nebo použitá jako materiál v násypu zvětrává působením povětrnostních vlivů. Hydratační povrchu zrn ocelářské strusky vznikají z dikalcium silikátu (C₂S) druhotně CSH hydráty spolu s portlanditem (Ca(OH)₂), méně s brucitem (Mg(OH)₂). Na hydratační procesy navazuje stádium tvorby karbonátu (kalcit-dolomit),



obr. 9.11 Vzorek ze sondy KS2 (TESCO Brezno). Nábrus jádra kusu celistvé, tmavé ocelářské strusky bez známek rozpadu. Jemnozrnné až kostrovité krystaly C_2S -larnitu v tmavé sklovité hmotě pigmentované $wüstitem$ a Fe_3O_4 . Póry jsou uzavřené, drobné, pod 200 μm . Optická mikroskopie v odraženém světle, technika tmavého pole (Foto J. Ščučka)



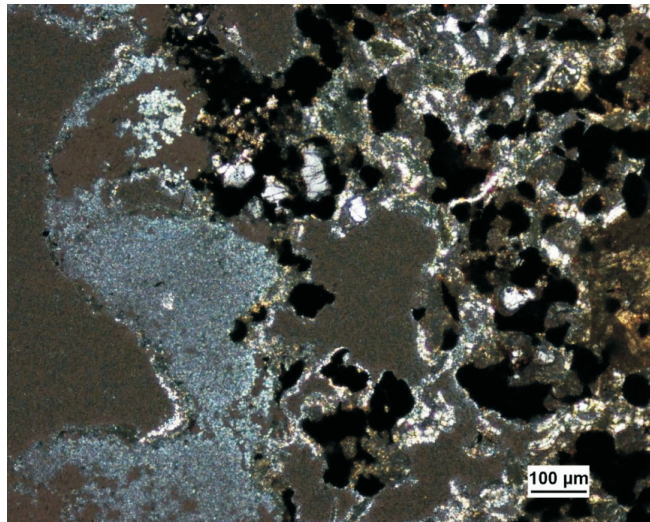
obr. 9.12 Vzorek ze sondy S10 (hl. 1,0 m) v garáži Obchodního centra TESCO Třebovice. Krystalicko-sklovitá ocelářská struska s vyrostlicemi krystalů minerálu skupiny melilitu (gehlenit) v devitifikovaném skle. Optická mikroskopie, procházející světlo, šikmé nikoly. Měřítka na snímku (Foto P. Martinec)



obr. 9.13 Vzorek ze sondy KS1 0,8-1,0 m (Makro Ostrava). Hluboký pór na povrchu zrna ocelářské strusky vyplněný struskovým konglomerátem. Konglomerát je tvořen zrnky různých typů ocelářských strusek pojených sekundárními minerály (především CSH ze sklovité fáze, karbonátem atd.). Optická mikroskopie, procházející světlo (Foto P. Martinec)

který vzniká karbonatací portlanditu z volného CaO nebo brucitu z MgO . Tyto sekundární minerály pak pojí zrna ocelářských strusek ve frakci pod 10 mm. Jádra zrn ocelářské strusky dlouhou dobu známky rozpadu nevykazují (obrázek 9.11, 9.12).

Podíl alterovaných zrn o velikosti nad 10 mm v ocelářské strusce použité na stavbách byl obvykle do 10 %, jak ukazuje materiálové složení ocelářské strusky frakce 0/90 z aktivní zóny dálnice D4708.2, km 151,045, z hloubky 0,8-1,0 m (obrázek 9.15). Na druhou stranu při používání materiálů z více zvětralých částí deponie ocelářské strusky, ve které byly často i příměsi vyzdívek, byl podíl zdravých zrn strusky výrazně nižší (viz vzorek struskového kameniva frakce 0/63 z podloží



obr. 9.14 Vzorek ze sondy KS1, hl. 0,1-0,6 m z Obchodního centra Futurum v Ostravě (2017). Povrchová část kusu ocelářské strusky s oxidovaným povrchem a reakční zónou (krustou) na povrchu tvořenou nově vzniklými hydratačními produkty (amorfni SiO_2 , karbonáty, CSH). Optická mikroskopie v procházejícím světle, šikmé nikoly (Foto P. Martinec)

podlah OC Futurum, sonda KS1 u vchodu do prodejny, hl. 0,3-1,0 m z r. 2015; obrázek 9.16).

Mineralogické složení hutní sutě je velmi variabilní v závislosti na materiálech, které jsou v ní obsaženy. Převažujícím materiálem hutní sutě jsou rozložené hydratované ocelářské strusky, které pojí další zrna strusek, ale i zrna hutní keramiky, případně zrna křemene z písků ze slévarenských forem.

Reaktivní část hutní sutě (tzv. studeného odvalu) tvoří frakce pod 10 mm. Přeměna tohoto materiálu byla na většině staveb na Ostravsku, kde byla hutní suť používána, velmi pokročilá a odpovídala změnám hmot s tvorbou nespecifických fází CSH a převahy portlanditu nad kalcitem.