



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební  
Katedra silničních staveb**

**Navrhování a hodnocení recyklovaných a emulzních asfaltových  
směsí s využitím vedlejších energetických produktů**

**Design and evaluation of recycled and emulsion asphalt mixtures  
utilizing energy by-products**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Ing. Jan Suda**

Doktorský studijní program: SI

Studijní obor: KD

Školitel: Ing. Jan Valentin, Ph.D.

**Praha, 2017**



## PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Jan Suda

Název disertační práce: Navrhování a hodnocení recyklovaných a emulzních asfaltových směsí s využitím vedlejších energetických produktů

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele Ing. Jana Valentina, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

TE01020168, Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu, Centra kompetence

SGS12/039/OHK1/1T/11, Návrhové parametry a vybrané funkční charakteristiky asfaltových směsí prováděných za studena

SGS10/142/OHK1/2T/11, Experimentální návrhy a analýza chování stmelěných směsí s uplatněním vedlejších produktů a alternativních pojiv v dopravním stavitelství

TH02020163, TAČR Epsilon, Vývoj a průmyslová optimalizace výrobních postupů stavebních hmot s využitím vysokého obsahu popílku

TA04031256, MACRec, Rozvoj mechanicky aktivovaných materiálů na bázi recyklovaného betonu pro progresivní stabilizované a za studena recyklované konstrukční vrstvy

ROZVOJOVÉ PROJEKTY MŠMT 2015 - Rozvojové projekty mladých týmů (RPMT), Metoda digitální obrazové korelace

SGS13/125/OHK1/2T/11, Experimentální hodnocení vybraných funkčních parametrů směsí recyklace za studena

V Praze dne 15.12.2017

.....  
podpis



## Poděkování

---

Tímto bych rád poděkoval zejména mému školiteli, Ing. Janu Valentinovi, Ph.D. za jeho cenné rady, vedení, připomínky a ochotu během zpracování této disertační práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině, zejména mámě, tátovi a babičce, za neutuchající podporu při studiu.

V neposlední řadě bych rád poděkoval celému osazenstvu silniční laboratoře FSv ČVUT v Praze (Ing. Petru Mondscheinovi Ph.D., paní Evě Fiedlerové, Ing. Ondřeji Rynešovi, panu Jaroslavu Kasalickému, panu Ladislavu Hájkovi, doc. Ing. Františku Luxemburkovi CSc., Ing. Zuzaně Čížkové Ph.D. a Mgr. Václavu Mrázovi Ph.D.) za jejich zkušené rady, velikou ochotu a pomoc při jakémkoliv problému, zvláště pak mé poděkování patří Ing. Josefu Žákovi Ph.D.

Také bych rád poděkoval ostatním doktorandům a studentům za vytvoření příjemného kolektivu a přátelského prostředí při studiu.



## Anotace

Oblast technologií a pracovních postupů recyklace vozovek představuje nejen jedno z aktuálně diskutovaných témat, nýbrž současně se stává nezbytností moderního silničního stavitelství. Důvodem není pouze úsilí a směřování evropské legislativy a celková strategie bezodpadové společnosti s definovanými kritérii konce odpadu, ale i postupně chápaná nutnost efektivního vícenásobného využití přírodních surovin při současném snižování energetické náročnosti a zlepšování užitných vlastností vozovek. Recyklaci vozovek je v ČR pozornost věnována postupně od druhé poloviny osmdesátých let, kdy se začaly uplatňovat první výkonné silniční frézy a byly realizovány první úseky, u kterých vznikal frézovaný materiál. V zahraničí je samozřejmě technologie recyklace vozovek starší. Rozvoj recyklace za horka v Německu a ve Francii lze datovat sedmdesátými lety minulého století, technologie recyklace za studena, respektive principy využití obalení kameniva vhodným pojivem na bázi asfaltu bez potřeby jeho obvyklého ohřevu, jsou známé již z počátku šedesátých let minulého století. Prvními průkopníky v tomto ohledu byly pěnoasfaltové směsi, jejichž výroba sice na počátku byla energeticky značně neefektivní, postupným rozvojem více jak tří desetiletí, nicméně vedla k postupné standardizaci zcela nových principů. Recyklační technologie se dále obohatily o aplikace především kationaktivních asfaltových emulzí, přičemž jejich použitím bylo umožněno dále rozvíjet potenciál recyklační technologie.

Současný trend trvale udržitelného rozvoje, jako dlouhodobé strategie údržby či nové výstavby dopravní sítě v ČR, klade důraz na technologický rozvoj a aplikace inovačních technologií, které umožňují snižování energetické náročnosti a zároveň snižují náklady na novou výstavbu či rekonstrukce specificky obrusných či ložných vrstev pozemních komunikací. Na toto reflektuje technologie studených, respektive emulzních asfaltových směsí. Asfaltová směs hutněná za studena je směs těžného nebo drceného kameniva odpovídající frakce a specifické asfaltové emulze, která se, oproti standardně používaným asfaltovým směsím, při kterých dochází k ohřevu pojiva a kameniva (směsi hutněné za horka), míchá a hutní při teplotách okolního prostředí. V České republice se v současnosti technologie emulzních asfaltových směsí hutněných za studena nepoužívá, a proto zde nejsou dostatečné laboratorní a praktické zkušenosti s použitím těchto směsí, přičemž není dosud opora ani v technických předpisech.

V posledních letech dochází ve všech technicky vyspělých zemích k intenzifikaci výzkumu a k rozvoji využití všech nejrůznějších druhů odpadů jako sekundárních surovinových zdrojů. Tento trend se týká také odpadů z energetického průmyslu, neboť vznikají jako tuhé zbytky po spalování uhlí a z čištění spalin v elektrárnách, teplárnách či výtopnách. Tyto materiály jsou označovány jako vedlejší energetické produkty (VEP). Patří mezi ně např. popílek, struska, škvára, ložový popel, energosádrovec. V zemích, kde je energetická politika založena především na získávání energie z tepelných elektráren, se zkoumají možnosti, jak VEP zpracovat a následně efektivně využít. Doposud se praktické využití orientuje především na oblast stavebnictví. Jednou z možných cest se ukazuje aplikace VEP do zemních konstrukcí dopravních staveb (silnic, železnic, letišť), neboť je zde předpoklad pro zpracování většího množství VEP. Ovšem v případě některých VEP je potencionálně možná sofistikovanější aplikace, v návaznosti na specifické vlastnosti, a to v podobě substituentu hydraulického pojiva. Dosavadní zkušenosti s použitím VEP jako pojiva nebo součástí pojiv nejsou tak rozsáhlé, aby bylo možno zobecnit závěry jejich využití. Proto byly sledovány možnosti jeho aplikace jako náhrady tradičně používaných pojiv v kombinaci s vhodnou technologií. Na základě těchto poznatků existuje potenciál dále rozvíjet výzkum druhotných materiálů.



Tato práce se zabývá studiem uplatnitelnosti vybraných VEP, konkrétně fluidních popelů a popílků, včetně jejich úprav v podobě mechanické aktivace ve směsích recyklace za studena. Dále se tato práce zaměřuje na laboratorní návrh a hodnocení emulzních asfaltových směsí. Dosažené výsledky by měli sloužit jako podklad pro návrh technických podmínek. Pro tento typ směsi byla také sledována možnost aditivace mechanicko chemicky aktivovaných VEP.



## Annotation

The field of technologies and techniques for road pavement recycling represents only one of the current quite oftenly discussed topics, but at the same time has become a necessity of modern civil engineering. This is due to not only the effort and direction of European legislation and the overall waste management strategy which includes end of waste criteria, but also the need to provide effective multiple uses of natural raw materials while reducing energy intensity and improving utility of pavement properties. Attention has been being paid to road pavement recycling in the Czech Republic since the second half of the eighties, when Czech Republic began to apply the first high performance road milling-machines and the first trial sections were executed with produced milled material. Recycling technologies abroad, of course, are older. The development of hot recycling in Germany and France can be dated back to the 1970s. Cold recycling technology, specifically the principle of using aggregate coating with a suitable bituminous binder without the need of usual heating, have been known since the early 1960s. The first innovations in this regard were foamed bitumen mixtures, whose production was energy inefficient in the beginning. The gradual development over more than three decades nevertheless led to the gradual standardization of entirely new principles. Recycling technology has been further enriched with the application of mainly cationic bitumen emulsions, enabling them to further develop the potential of recycling technology.

The current trend of sustainable development as a long-term maintenance strategy, or a new construction of the transport network in the Czech Republic places emphasis on the technological development and application of innovative technologies that reduce the energy intensity while reducing the costs of new construction or reconstruction, specifically the surface course or binder course of road pavements. This reflects the technology of cold recycling or emulsion asphalt mixes. The cold asphalt mixture is a mixture of corresponding fractions of mined or crushed stone and specific bitumen emulsion, which is mixed and compacted at ambient temperatures, compared to those normally used in hot asphalt mixes. Currently, in the Czech Republic, this cold emulsion asphalt mixes technology is not used. Therefore there is not sufficient laboratory and practical experience with the use of these mixtures and there is no support for technical standards.

In recent years, in all technically advanced countries, there has been an emphasis placed on intensifying research in to the development of uses for all sorts of waste as a secondary products of material sources. This trend also applies to waste from the energy industry do to the production of solid residues after coal combustion and from flue gas desulfurization in power plants, heat stations or heating plants. These materials are referred to as energy by-products. These include, for example, fly-ash, slag, bottom ash, energo-gypsum. In countries where energy policy is primarily based on the acquisition of energy from thermal power plants, opportunities are explored to process and then efficiently use energy by-products. Up to now, practical use has mainly been focused on civil engineering. One of the ways is the application of energy by-products into the sub-grade of road constructions (roads, railways, airports), as there is a prerequisite for processing larger quantities of energy by-products. However, in some energy by-products, potentially more sophisticated applications are possible, for example in the form of a hydraulic binder substitutes depending on the specific properties. Experience with using energy by-products as binders or binder components are not extensive enough to generalize findings concerning their use. Therefore, potential applications of substitutes for conventional binders, in combination with a suitable technology, were monitored. Based on these findings, there is a potential to further develop research on secondary materials.



This Ph.D. thesis focuses on the study of the applicability of selected energy by-products in cold recycling mixtures and cold emulsified asphalt mixtures, with attention being paid to the design and evaluation of these new mixtures in the laboratory.





## Obsah

Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek.....	11
Seznam použitých zkratk.....	13
1. Úvod.....	14
2. Základní cíle disertační práce.....	16
3. Metodika disertační práce.....	16
3.1. Recyklace za studena.....	16
3.2. Emulzní asfaltové směsi.....	17
4. Rozbor problematiky vstupních materiálů.....	20
4.1. Vedlejší energetické produkty.....	20
4.2. Klasifikace popelů a popílků.....	21
4.3. Fluidní popely a popílký (FPP).....	22
4.4. Specifikace základních hydratačních procesů ve FPP.....	24
4.5. Rizikové faktory.....	25
4.6. Teorie bobtnání fluidních popelů a popílků.....	25
4.7. Právní úpravy vztahující se k využití FPP ve stavebnictví.....	26
4.8. FPP pro stavební účely dle technických předpisů.....	28
5. Proces mletí.....	30
5.1. Mechanická aktivace.....	31
5.2. Vysokoenergetické/vysokorychlostní mletí.....	33
6. Zpěněný asfalt.....	35
7. Teoretický úvod do problematiky emulzí.....	38
7.1. Obecné vlastnosti emulzí.....	41
7.1.1. Barva a vzhled.....	41
7.1.2. Viskozita.....	41
7.1.3. Stabilita.....	42
7.1.4. Elektrické vlastnosti.....	43
7.2. Povrchově aktivní látky (surfaktanty).....	44
7.2.1. Tvorba micel.....	46
7.2.2. Příprava emulzí.....	46
7.2.3. Emulgace.....	46
7.2.4. Homogenizace.....	47
7.2.5. Stabilizace.....	47
7.2.6. Způsoby stabilizace emulzí.....	47
7.3. Rozrážení (zánik) emulzí.....	48
7.4. Rozpad emulzí.....	48
7.4.1. Krémování a sedimentace.....	49
7.4.2. Flokulace.....	49
7.4.3. Ostwaldovo zrání.....	50
7.4.4. Koalescence.....	50
7.4.5. Fázová inverze.....	50
8. Asfaltové emulze.....	52
8.1. Historie.....	52
8.2. Složení asfaltové emulze.....	53
8.3. Emulgátory.....	53
8.4. Asfaltové pojivo.....	54
8.4.1. Reologické vlastnosti asfaltových pojiv.....	55
8.5. Vedlejší složky asfaltové emulze.....	56



8.6.	Proces štěpení asfaltové emulze .....	57
8.7.	Štěpení kationaktivní emulze .....	58
8.8.	Štěpení anionaktivní emulze .....	59
8.9.	Výroba asfaltové emulze .....	59
8.10.	Stabilita asfaltové emulze .....	62
8.11.	Důležité vlastnosti asfaltové emulze pro použití v dopravním stavitelství .....	63
9.	Technologie recyklace za studena .....	66
9.1.	Recyklace za studena na místě .....	68
9.2.	Recyklace za studena v centru .....	69
9.3.	Recyklace za studena v technických předpisech .....	69
9.4.	Pojiva v recyklaci za studena .....	70
10.	Emulzní asfaltové směsi .....	72
10.1.	Emulzní asfaltové směsi v technických předpisech .....	73
10.2.	Metodika návrhu a hodnocení emulzních asfaltových směsí uplatňovaná ve Francii .....	74
10.3.	Asfaltový beton obalovaný za studena (BBF - Béton bitumineux á froid) .....	75
10.4.	Asfaltovou emulzí obalené kamenivo (GE - Graves émulsion) .....	79
10.5.	Modifikovaná Duriezova zkouška .....	81
10.6.	Výroba zkušebních těles gyrátorem (PCG) .....	81
11.	Zkušební postupy - teorie a měření .....	84
11.1.	Stanovení pevnosti v příčném tahu - ITS .....	84
11.2.	Stanovení modulu tuhosti – zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY) .....	85
11.3.	Lomová houževnatost - zkouška půlkruhového ohybu (Semi-Circular Bending test) .....	87
11.3.1.	Digitální obrazová korelace (Digital image correlation) .....	92
11.4.	Cyklické dotvarování - cyklická zkouška v tlaku .....	92
11.5.	Měření komplexních modulů tuhosti .....	94
11.5.1.	Měření komplexních modulů v tlaku .....	96
11.5.2.	Komplexní modul tuhosti v tahu za ohybu .....	99
11.5.3.	Faktory ovlivňující měření přístrojem 4PB-PR .....	101
11.6.	Časově teplotní superpozice .....	102
11.7.	Únavové vlastnosti asfaltových směsí .....	103
11.7.1.	50% pokles modulu tuhosti .....	103
11.7.2.	Disipace energie .....	104
11.7.3.	Hopman-Pronk metoda .....	104
11.7.4.	Rowe-Bouldin metoda .....	105
11.7.5.	Poměr změny disipované energie (RDEC) .....	106
11.7.6.	Měření únavové životnosti metodou 4PB-PR .....	107
11.7.7.	Vyhodnocení únavových parametrů .....	107
12.	Studie uplatnitelnosti FPP ve směsích recyklace za studena .....	111
12.1.	FPP Tisová .....	112
12.2.	FPP Hodonín .....	113
12.3.	FPP Počeradý .....	114
12.4.	FPP Ledvice .....	114
12.5.	Mechanická aktivace testovaných fluidních popelovin .....	115
12.5.1.	FPP Plzeň .....	115
12.6.	Chemická analýza stopových prvků vybraných fluidních popelovin .....	117
12.7.	Recyklace za studena - použité materiály .....	118



12.8. Složení směsí recyklace za studena.....	119
12.9. Metodika přípravy, testování a podmínky zrání zkušebních těles.....	120
12.10. Výsledky experimentu .....	121
12.10.1. Permeabilita testovaných směsí .....	128
12.10.2. Výluhové testy .....	129
12.10.3. Další analýzy chemických vlastností VEP.....	131
12.10.4. Objemové změny .....	132
12.10.5. Chemická analýza po zkoušce bobtnání.....	135
12.10.6. Ramanova spektroskopie .....	135
12.11. Použití mechanicko-chemicky aktivovaných fluidních popelů a popílků u slabě stabilizovaných směsí recyklace za studena .....	138
12.11.1. Specifikace použitých materiálů.....	138
12.11.2. Navržené složení směsí.....	139
12.11.3. Metodika přípravy, testování a podmínky zrání zkušebních těles .....	140
12.11.4. Výsledky laboratorního testování .....	140
12.12. Aplikace mikromletých materiálů v recyklovaných směsích stmelých hydraulickými pojivy.....	142
12.12.1. Specifikace použitých materiálů.....	143
12.12.2. Složení recyklovaných směsí stmelých hydraulickými pojivy .....	143
12.12.3. Metodika přípravy a hodnocení zkušebních těles .....	143
12.12.4. Výsledky experimentu - CSM.....	143
12.13. Poznatky z praktického použití studené recyklace s využitím popelovin ze zahraničí .....	144
12.14. Závěr .....	146
13. Emulzní asfaltové směsi .....	148
13.1. Uplatnitelnost reaktivních aditiv .....	158
13.2. Zkušební úsek .....	160
13.2.1. Materiály .....	161
13.2.2. Laboratorní návrh EAC směsí.....	162
13.2.3. Výroba in-plant.....	165
13.2.4. Pokládka a hutnění .....	167
13.2.5. Provedení kontrol hotového úseku včetně celkového vyhodnocení.....	168
13.3. Experimentální testování EAC 11 .....	172
13.4. Porovnání energetické náročnosti vybrané studené technologie.....	189
13.5. Uplatnitelnost reaktivních aditiv .....	191
13.6. Závěr .....	192
14. Závěrečné resumé .....	194
Reference .....	196
Příloha A.....	208
Příloha B.....	212

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Produkce vybraných surovin, odpadů a výrobků .....	15
Obrázek 2: Struktura popílku z klasického a fluidního spalování [Frýzová 2012] .....	23
Obrázek 3: Účinky mletí vzhledem k mechanismu zatížení částic [Tavares 1998 - přeloženo do češtiny] .....	30
Obrázek 4: Vysokorychlostní impaktní mlýn použitý v rámci dále popsaných experimentů .....	34
Obrázek 5: Emulze dle polárnosti disperzního podílu a prostředí .....	40
Obrázek 6: Zředěné, koncentrované a gelovité emulze [Bartovská 2012] .....	40
Obrázek 7: Elektrický potenciál .....	43
Obrázek 8: Tvorba micel .....	45
Obrázek 9: Klasifikace dle charakteru hydrofilní složky .....	46
Obrázek 10: Schéma fázového rozhraní $\gamma_{Af} > \gamma_{Bf}$ .....	48
Obrázek 11: Procesy rozpadu emulzí .....	49
Obrázek 12: Ostwaldovo zrání .....	50
Obrázek 13: Produkce asfaltové emulze ve vybraných zemích .....	52
Obrázek 14: Molekula emulgátoru .....	54
Obrázek 15: Schéma koloidní struktury (destilovaného a oxidovaného) asfaltu .....	55
Obrázek 16: Produkce asfaltu ve vybraných státech .....	56
Obrázek 17: Postup štěpení kationaktivní asfaltové emulze .....	59
Obrázek 18: Koloidní mlýn a schéma uspořádání kontinuálního míchacího zařízení .....	60
Obrázek 19: Emulgační stanice Eurovia-Kolín - a) zásobník asfaltového pojiva, b) zásobníky s vodou, c) emulgační zařízení, d) koloidní mlýn, e) Laboratoř Eurovia - laboratorní emulgační zařízení .....	61
Obrázek 20: Výsledná interakční energie mezi kulovitými částicemi .....	63
Obrázek 21: Stavební a demoliční odpad v ČR (zdroj ČSÚ, ARSM, MPO) .....	67
Obrázek 22: Koncepční vlastnosti materiálů používaných v konstrukčních vrstvách vozovek .....	70
Obrázek 23: Produkce horkých a studených asfaltových směsí v evropských státech .....	72
Obrázek 24: Obecný postup pro návrh asfaltových směsí obalovaných za studena .....	75
Obrázek 25: Příklad výroby asfaltové směsi obalované za studena .....	78
Obrázek 26: Gyrátor PCG 3 - LCPC .....	82
Obrázek 27: Teoretické rozdělení napětí při stanovení pevnosti v příčném tahu .....	84
Obrázek 28: Typy porušení .....	85
Obrázek 29: Zkušební zařízení / zatěžovací pulz .....	86
Obrázek 30: Příklad zkušebního rámu a zkušebního tělesa při zkoušce půlkruhového ohybu (mm) a) zatěžovací sestava b) detail zkušebního rámu .....	88
Obrázek 31: Rozměry zkušebního tělesa pro standardní zkoušku .....	89
Obrázek 32: Základní lomové módy .....	90
Obrázek 33: Pracovní diagram při zkoušce půlkruhového ohybu .....	91
Obrázek 34: Křivka dotvarování .....	93
Obrázek 35: Parametry zatěžovacího pulzu (zařízení UTM) .....	93
Obrázek 36: Napětí a deformace při dynamickém sinovém zatížení .....	95
Obrázek 37: a) zajištění sousého umístění LVDT držáků b) umístění axiálních LVDT sond c) testovací sestava při měření dynamického komplexního modulu v tlaku .....	96
Obrázek 38: Typický záznam měřené deformace s následnou sinovou regresí .....	99
Obrázek 39: Přístroj 4PB-PR .....	100
Obrázek 40: 50% pokles modulu tuhosti .....	104
Obrázek 41: Metoda Hopman-Prong .....	105
Obrázek 42: Rowe-Bouldin metoda .....	106
Obrázek 43: Metoda RDEC .....	106



Obrázek 44: Parametry únavy dle ČSN EN 12697-24 a dle regresní analýzy .....	109
Obrázek 45: Fluidní popely a popílky a) úletový Ledvice b) ložový Ledvice c) mechanicko chemicky aktivovaný Plzeň d) ložový Počerady e) úletový Tisová f) úletový Hodonín ....	111
Obrázek 46: Difraktogram - FPP Tisová .....	112
Obrázek 47: Difraktogram - FPP Hodonín .....	113
Obrázek 48: Difraktogram - FPP Počerady .....	114
Obrázek 49: Diskový vysokorychlostní mlýn .....	116
Obrázek 50: Difraktogram - mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň .....	116
Obrázek 51: Zrnitostní složení jednotlivých šarží odebraného R-materiálu 0/11 .....	119
Obrázek 52: Stanovení optimální vlhkosti směsi recyklace za studena - REF .....	119
Obrázek 53: Zkušební vzorky - příklady .....	121
Obrázek 54: Volumetrické parametry směsi recyklace za studena - neupravený FPP ...	122
Obrázek 55: Volumetrické parametry směsi recyklace za studena - mechanicky aktivovaný FPP .....	122
Obrázek 56: Krabicový graf (Box Whisker plot) - mezerovitost .....	123
Obrázek 57: Pevnostní a deformační parametry směsi recyklace za studena - FPP .....	123
Obrázek 58: Pevnostní a deformační parametry směsi recyklace za studena - mechanicky aktivovaný FPP .....	124
Obrázek 59: Krabicový graf (Box Whisker plot)- ITS .....	125
Obrázek 60: Krabicový graf (Box Whisker plot) - modul tuhosti IT-CY .....	125
Obrázek 61: Krabicový graf (Box Whisker plot) - obsah FPP ve směsích recyklace za studena .....	125
Obrázek 62: Vodní citlivost - FPP .....	126
Obrázek 63: Vodní citlivost - mechanicky aktivovaný FPP .....	127
Obrázek 64: Parametry odolnosti vůči vodě a mrazu, teplotní citlivost .....	128
Obrázek 65: Filtrační součinitel směsi recyklace za studena .....	129
Obrázek 66: Zkušební vzorky ponořené v destilované vodě .....	130
Obrázek 67: Sestava pro měření objemových změn - recyklovaná směs (sycení zdola) /popílkový stabilizát (sycení zdola i zhora) .....	132
Obrázek 68: Průběh objemových změn v závislosti na čase .....	133
Obrázek 69: Zkušební vzorky po zkoušce bobtnání (145 dní) - a) recyklace za studena 10 %-hm. FPP Ledvice b) recyklace za studena 10 %-hm. FPP Tisová c) popílkový stabilizát FPP Ledvice d) popílkový stabilizát FPP Tisová .....	134
Obrázek 70: Pevnostní (ITS) a deformační (modul tuhosti) parametry recyklovaných směsí před a po ukončení bobtnání .....	134
Obrázek 71: Ramanovo spektrum z ložového FPP Ledvice .....	137
Obrázek 72: Ramanovo spektrum z úletového FPP Tisová .....	138
Obrázek 73: Zrnitost R-materiálu 0/22 .....	139
Obrázek 74: Mezerovitost slabě stabilizovaných směsí recyklace za studena .....	140
Obrázek 75: Pevnostní a deformační parametry slabě stabilizovaných směsí recyklace za studena .....	141
Obrázek 76: Lomová houževnatost slabě stabilizovaných směsí recyklace za studena .....	142
Obrázek 77: Pevnostní parametry recyklovaných stabilizovaných směsí CSM .....	144
Obrázek 78: Wisconsin a) CTH v roce 2002 b) CTH v roce 2003 .....	145
Obrázek 79: Křivka zrnitosti navrženého kameniva .....	149
Obrázek 80: Komplexní (směrná) křivka a Blackův diagram asfaltového pojiva 70/100 .....	150
Obrázek 81: Základní volumetrické, mechanické a deformační vlastnosti emulzní asfaltové směsi dle obsahu zbytkového pojiva .....	152
Obrázek 82: Modifikovaná Proctorova zkouška - EAC 11 .....	153
Obrázek 83: Zhutnitelnost EAC směsi .....	154
Obrázek 84: Hloubka vyjeté koleje na malém zkušebním zařízení .....	156
Obrázek 85: Vyhodnocení únavové zkoušky .....	157



Obrázek 86: Vyhodnocení $\varepsilon_6$ pro $10^6$ zatěžovacích cyklů na základě regresní analýzy ..	157
Obrázek 87: Zrnitostní křivky navržených EAC směsí .....	161
Obrázek 88: Proctorova modifikovaná zkouška - stanovení optimální vlhkosti emulzních asfaltových směsí .....	163
Obrázek 89: Hloubka vyjeté koleje na malém zkušebním zařízení .....	165
Obrázek 90: a) výrobní zařízení Wirtgen KMA-200 / nežádoucí předeřtání kameniva - odpařování vody ze směsi b) emulzní asfaltová směs - výroba v laboratoři c) emulzní asfaltová směs - in plant d) emulzní asfaltová směs - pokládka in situ .....	166
Obrázek 91: a, d) pokládka a hutnění EAC směsi - úsek č. 5 .....	168
Obrázek 92: Ukázky jádrových vývrtů a) úsek č. 1 b) úsek č. 5 .....	168
Obrázek 93: Zrnitostní složení EAC směsí .....	170
Obrázek 94: Porovnání zhutnění - hydraulický lis x gyrátor x in-situ .....	173
Obrázek 95: Vliv podmínek zrání směsi EAC 11 .....	174
Obrázek 96: Vývoj vlhkosti směsi EAC 11 .....	175
Obrázek 97: Empirické vlastnosti pojiva v průběhu zrání .....	176
Obrázek 98: Komplexní (směrná) křivka - elastický a ztrátový modul, ztrátový úhel, $T_{ref}=15$ °C .....	177
Obrázek 99: Blackův a Cole-Cole diagram .....	178
Obrázek 100: Komplexní (směrná) křivka - elastický a ztrátový modul, ztrátový úhel, $T_{ref}=10$ °C .....	180
Obrázek 101: Blackův a Cole-Cole diagram .....	181
Obrázek 102: Pracovní diagram - Odolnost vůči šíření trhliny EAC 11 .....	182
Obrázek 103: Parametry lomové houževnatosti směsi EAC 11 .....	183
Obrázek 104: Ilustrace sledovaného rastru deformací a posunutí v rámci zatěžování při zkoušce odolnosti proti šíření trhliny / úprava zkušebního tělesa .....	184
Obrázek 105: Výsledný rastr deformací a posunutí - EAC 11 (-10°C, 5 mm/min., 5d@85°C) .....	185
Obrázek 106: Zkušební sestava - cyklická zkouška v tlaku .....	186
Obrázek 107: Cyklické dotvarování EAC 11 - axiální deformace a míra dotvarování .....	187
Obrázek 108: Hloubka vyjeté koleje na malém zkušebním zařízení .....	188
Obrázek 109: Vyhodnocení únavové zkoušky .....	188
Obrázek 110: Vyhodnocení $\varepsilon_6$ pro $10^6$ zatěžovacích cyklů na základě regresní analýzy ..	189
Obrázek 111: Situační plán - výstavby zkušebního úseku silnice III/44441 .....	190
Obrázek 112: Energetická náročnost vybraných technologií .....	191
Obrázek 113: Funkce poddajnosti $D(t)$ .....	215



## Seznam tabulek

Tabulka 1: Vybrané klasifikační systémy .....	22
Tabulka 2: Přehled surovin užívaných při fluidním spalování .....	23
Tabulka 3: Limitní hodnoty ve vodném výluhu (TP 93), podzemní a pitné vodě (mg/l) .....	28
Tabulka 4: Minimální kvalitativní parametry asfaltové pěny .....	37
Tabulka 5: Typy disperzních soustav dle typu fází .....	39
Tabulka 6: Porovnání spotřeby paliva pro výrobu asfaltu a asfaltové emulze .....	62
Tabulka 7: Technické předpisy pro stmelené směsi ve vrstvách vozovky .....	69
Tabulka 8: Přehled pojivové složky ve směsích recyklace za studena dle TP 208 .....	71
Tabulka 9: Požadavky na fyzikální vlastnosti drobného a hrubého kameniva .....	76
Tabulka 10: Požadavky na filerovou složku kameniva .....	76
Tabulka 11: Teoretická čára zrnitosti směsi 0/10 mm a 0/14 mm .....	77
Tabulka 12: Mechanické odolnosti asfaltového betonu obalovaného za studena dle NF P98-139 .....	79
Tabulka 13: Mezerovitost asfaltového betonu obalovaného za studena dle NF P98-139 .....	79
Tabulka 14: Dopravní zatížení .....	79
Tabulka 15: Požadavky na fyzikální vlastnosti drobného a hrubého kameniva .....	80
Tabulka 16: Fyzikální požadavky na jemnozrnnou složku kameniva .....	80
Tabulka 17: Teoretická čára zrnitosti směsí GE .....	80
Tabulka 18: Obsah zbytkového pojiva v GE .....	80
Tabulka 19: Volumetrické a mechanické parametry směsi GE S .....	81
Tabulka 20: Hodnoty statického zatížení dle módu při výrobě zkušebních těles .....	81
Tabulka 21: Doporučený počet zkušebních vzorků .....	97
Tabulka 22: Úrovně napětí .....	97
Tabulka 23: Minimální počet měření při zatěžovací sekvenci .....	97
Tabulka 24: Vyhodnocení fázového složení vzorku FPP Tisová na základě XRD záznamu .....	112
Tabulka 25: Vyhodnocení fázového složení vzorku FPP Hodonín na základě XRD záznamu .....	113
Tabulka 26: Vyhodnocení fázového složení vzorku FPP Počerady na základě XRD záznamu .....	114
Tabulka 27: Vyhodnocení fázového složení vzorku FPP Ledvice (ložový popel) na základě XRD záznamu .....	115
Tabulka 28: Vyhodnocení fázového složení mechanicko chemicky aktivovaného FPP Plzeň na základě XRD záznamu .....	117
Tabulka 29: Celková analýza vzorku – makro .....	118
Tabulka 30: Celková analýza vzorku – mikro .....	118
Tabulka 31: Složení směsí recyklace za studena .....	120
Tabulka 32: Zkoušky prováděné na zkušebních tělesech dle doby a prostředí zrání .....	121
Tabulka 33: Teploty zmrazování a počty cyklů zmrazování .....	127
Tabulka 34: Hodnoty výluhu testovaných směsí recyklace za studena .....	130
Tabulka 35: XRD fázové složení fluidního úletového popílku Tisová po zkoušce objemové stálosti .....	135
Tabulka 36: Fázové složení fluidního ložového popela Ledvice po zkoušce objemové stálosti .....	135
Tabulka 37: Obsah zbytkového pojiva v R-materiálu .....	139
Tabulka 38: Charakteristika asfaltového pojiva a množství přidávané vody při výrobě zpěněného asfaltu .....	139
Tabulka 39: Složení směsí recyklace za studena .....	140
Tabulka 40: Složení směsí CSM .....	143
Tabulka 41: Zrnitostní složení recyklovaného materiálu .....	145
Tabulka 42: Příklady provádění směsí recyklace za studena s využitím popelovin .....	146



Tabulka 43: Charakteristiky kameniva .....	148
Tabulka 44: Parametry asfaltové emulze Katebit C60B7 .....	149
Tabulka 45: Parametry použitého asfaltového pojiva 70/100 .....	150
Tabulka 46: Volumetrické vlastnosti EAC směsí .....	154
Tabulka 47: Pevnostní parametry a vodní citlivost EAC směsi .....	155
Tabulka 48: Základní deformační parametry EAC směsi .....	155
Tabulka 49: Parametry zkoušky pojížděním kolem .....	156
Tabulka 50: Vyhodnocení únavových parametrů na základě regresní analýzy .....	158
Tabulka 51: Vyhodnocení únavových parametrů dle ČSN EN 12697-24 .....	158
Tabulka 52: Složení EAC směsí .....	158
Tabulka 53: Základní deformační parametry EAC směsi .....	159
Tabulka 54: Pevnostní parametry a vodní citlivost EAC směsi .....	159
Tabulka 55: Základní deformační parametry EAC směsi .....	159
Tabulka 56: Skladba konstrukce vozovky zkušebního úseku .....	160
Tabulka 57: Parametry kameniva .....	161
Tabulka 58: Vlastnosti asfaltové emulze .....	162
Tabulka 59: Charakteristiky navržených emulzních směsí .....	164
Tabulka 60: Parametry zkoušky pojížděním kolem .....	165
Tabulka 61: Výsledky kontrolních rozborů v rámci výroby .....	167
Tabulka 62: Výsledky kontrolních rozborů směsí jádrových vývrtů (odběr 04.09.2014) ..	169
Tabulka 63: Parametry asfaltového pojiva po 2 měsících zrání (úsek č. 1) .....	169
Tabulka 64: Výsledky kontrolních rozborů směsí jádrových vývrtů (odběr 04.09.2014) - 2 měsíce zrání .....	170
Tabulka 65: Vizuální kontrola zkušebního úseku .....	171
Tabulka 66: Parametry směsi EAC 11 v závislosti na použité asfaltové emulzi .....	172
Tabulka 67: Porovnání parametrů směsi EAC 11 s odlišným způsobem zhutnění .....	173
Tabulka 68: Parametry posunu v horizontální rovině dle WLF .....	176
Tabulka 69: Parametry posunu v horizontální rovině dle WLF .....	176
Tabulka 70: Parametry posunu v horizontální rovině dle WLF směsi $E_{CZ}$ .....	179
Tabulka 71: Parametry posunu v horizontální rovině dle WLF směsi EAC 11 .....	179
Tabulka 72: Modul dotvarování směsi EAC 11 .....	187
Tabulka 73: Parametry zkoušky pojížděním kolem .....	188
Tabulka 74: Vyhodnocení únavových parametrů na základě regresní analýzy .....	189
Tabulka 75: Vyhodnocení únavových parametrů dle ČSN EN 12697-24 .....	189
Tabulka 76: Pevnostní parametry a vodní citlivost EAC směsi .....	191
Tabulka 77: Základní deformační parametry EAC směsi .....	192
Tabulka 78: Diskrétní relaxační spektrum materiálu .....	215





## Seznam použitých zkratk

VEP .....	vedlejší energetické produkty
SDO .....	stavební a demoliční odpady
FPP .....	fluidní popely a popílký
CPR .....	nařízení o stavebních výrobcích (construction products regulativ)
CPD .....	směrnice o stavebních výrobcích (construction products directive)
REACH .....	registrace, hodnocení, autorizace a omezování chemických látek (registration, evaluation and authorisation of chemicals)
MD .....	ministerstvo dopravy
ERm .....	expanzní poměr (expansion ratio)
HLT .....	poločas poklesu (half-life time)
FWC .....	obsah vody ve zpeňném asfaltu (foam water content)
pH .....	potenciál vodíku (potential of hydrogen)
KMK .....	kritická micelární koncentrace
HLB .....	hydrofilně-lipofilní rovnováha (hydrophilic-lipophilic balance)
CPI .....	katastrofická fázová inverze (catastrophic phase inversion)
TPI .....	přechodná fázová inverze (transitional phase inversion)
DLVO .....	B. Derjaguin, L. Landau, E. Verwey, T. Overbeek theory
ISAP .....	international society for asphalt pavements
ITS .....	pevnost v příčném tahu (indirect tensile strength)
BBF .....	asfaltový beton obalovaný za studena (béton bitumineux á froid)
GE .....	kamenivo obalené asfaltovou emulzí (grave emulsion)
PCG .....	rotační smykový zhuťovač - gyrátor (presse à cisaillement giratoire)
LCPC .....	laboratoire central des ponts et chaussées
IT-CY .....	příčný tah - válcová zkušební tělesa (indirect tension - cylindrical specimen)
LVDT .....	lineární induktivní snímač (linear variable differential transformer)
DIC .....	digitální obrazová korelace (digital image correlation)
UTM .....	univerzální testovací zařízení (universal testing machine)
4PB-PR .....	čtyř-bodový ohybový test - zkušební těleso tvaru trámečku (four point bending test - prismatic specimen)
RDEC .....	míra změny disipované energie (rate of dissipated energy change)
XRD .....	rentgenová difrakce (X-ray diffraction)
ITMR .....	poměr modulu tuhosti (indirect tensile modulus ratio)
ITSR .....	poměr pevnosti v příčném tahu (indirect tensile strength ratio)
CSM .....	cement stabilized material
CTH .....	silnice I. třídy (county trunk highway)
FWD .....	rázový deflektometr (falling weight deflectometer)
EAC .....	emulzní asfaltový beton (emulsion asphalt concrete)
VOC .....	obsah těkavých organických látek (volatile organic compound)
LELM .....	lineárně elastická lomová mechanika
CAEM .....	emulzní asfaltová směs (cold asphalt emulsion mixes)



## 1. Úvod

Ve výzkumu a v praxi silničního stavitelství je patrné rostoucí zaměření na aspekty ochrany životního prostředí spojené především s potřebou omezit spotřebu přírodních surovin, redukovat objem odpadů ukládaných na skládky a současně s tím identifikovat vhodné technologie redukce energetické náročnosti při realizaci dopravních staveb. V případě odpadů je celoevropským cílem pro stavební a demoliční odpady dosažení jejich recyklovatelnosti na úrovni 70 % a to do roku 2020, přičemž obdobná kritéria lze nalézt nebo je vhodné je prosazovat i pro další odpadní materiály [Piau 2006]. Současně s tím vznikly v uplynulých letech v rámci EU iniciativy a programy (zejména činností Evropského centra pokročilých studií), jejichž cílem je vymezit vhodná kritéria konce odpadu, což má z ekonomického hlediska velmi významný dopad na snazší uplatnění takového materiálu ve výrobě. Jednou z oblastí, které je v této souvislosti věnována pozornost, představuje tzv. „minerální“ odpad, kam lze zařadit i popely a popílky či pevné reaktivní produkty z procesu odsíření spalin. Z tohoto hlediska se v rámci experimentální činnosti FSv ČVUT řešená problematika snaží reflektovat tyto aspekty.

Navzdory VaV aktivitám v oblasti využití popelovin jako možného pojiva či geopolymery v betonech, čemuž byla ve výzkumu v posledních letech poměrně úspěšně věnována pozornost i v ČR [Ledererová 2008, Škvára 2007], umožňují tyto rozvíjené trendy jejich využití v omezeném množství. To je limitováno vlastním složením směsi a funkcí popelovin v této směsi coby pojiva. Z hlediska situace u producentů pevných produktů po spalování uhlí, však nedochází k významnějšímu řešení přetrvávajícího problému s potřebou skládkování velkého množství těchto vedlejších energetických produktů (dále VEP). Uvedené dosavadní výsledky probíhajícího výzkumu v tomto ohledu proto cílí jak na možnost využití popelovin jako alternativního pojiva ve směsi recyklace za studena, tak především na možnost náhrady části asfaltového R-materiálu nebo jako doplnění chybějící filerové složky. Ačkoli je reálné využití jen 3,0 - 15,0 %-hm. tohoto materiálu, představuje i tato úroveň nezanedbatelný podíl využití především pro problematičtější fluidní popely a popílky (dále FPP) ze spalování uhlí. V této oblasti se přitom Česká republika dělí o první příčky v celosvětovém srovnání.

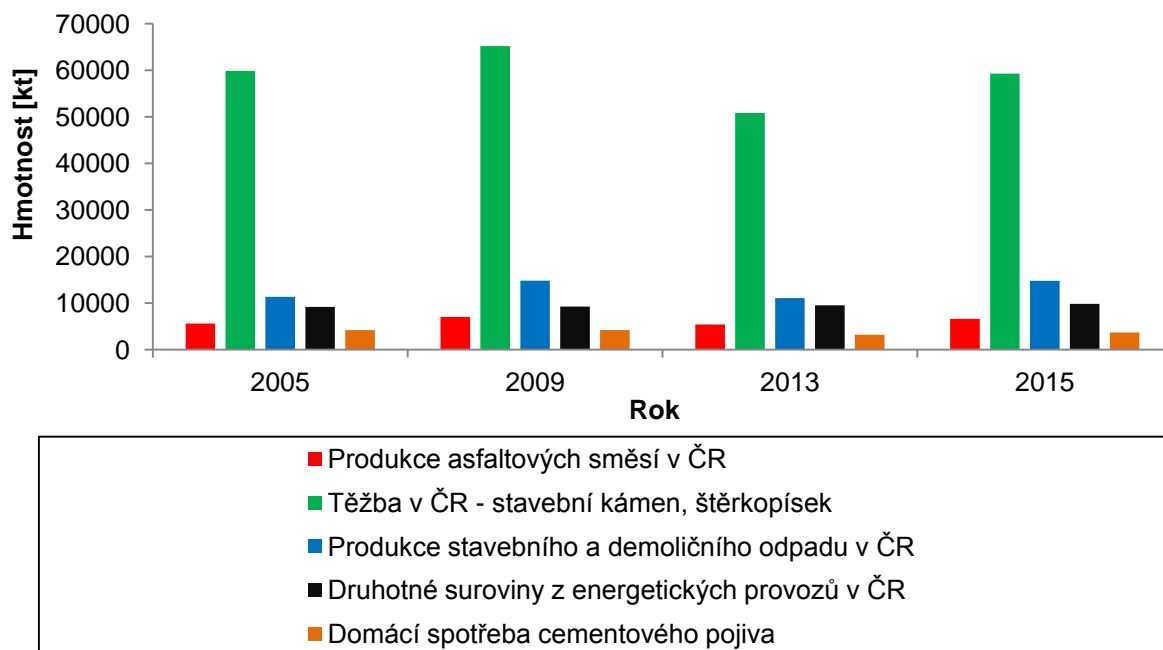
Hlavními energetickými zdroji v České republice jsou tuhá paliva, zejména pak hnědé uhlí. V ČR je 69 % uhlí (černé a hnědé) použito na výrobu elektrické energie. Uhlé elektrárny vyprodukovaly v ČR v roce 2000 cca 9,1 milionů tun pevných produktů po spalování uhlí (pro srovnání v roce 2000 tvořily pevné produkty po spalování uhlí v EU 15 cca 59,0 mil. tun) a z toho tvořily FPP 600 tis. tun (1 121 tis. tun v EU 15). Toto množství se v ČR do roku 2015 zvýšilo až na cca 15,0 milionů tun pevných produktů po spalování uhlí ročně, z čehož FPP tvoří cca 1,41 mil. tun [Stehlík 2008, Dhir 2002, [www.asvep.cz](http://www.asvep.cz), [www.cezep.cz](http://www.cezep.cz)]. Některé z těchto tuhých zbytků po spalování lze pokládat za kvalitní druhotné produkty. Tyto produkty se liší vlastnostmi a možnostmi využití. Z hlediska šancí využití plného potenciálu těchto odpadních materiálů v dopravním stavitelství je nutné důkladně identifikovat parametry a vlastnosti nově vzniklých směsí. Dalším směrem vývoje zlepšování vlastností zkoumaných směsí je v oblasti mikrofilérů, který má obrovský potenciál nejen pro recyklační technologie, ale i pro emulzní asfaltové směsi, zejména při počátečním zrání.

Stavební a demoliční odpady (dále SDO) v zemích EU tvoří cca 25-35 % všech produkováných odpadů, což je značná část vzhledem k tomu, že tyto materiály pocházejí z neobnovitelných zdrojů. Přírodní kamenivo zabudované do konstrukce nepodléhá degradaci, proto je možnost tento materiál efektivně použít při rekonstrukcích, jako plnohodnotný stavební materiál. Jiný pohled na původní konstrukci vozovky je jako na potencionální ložisko přírodních surovin. Pro opětovné a plnohodnotné využití recyklovatelných stavebních materiálů je nezbytné zajištění jejich kvality tak, aby mohly

nahradit, pro daný účel použití, přírodní nerostné materiály. V tomto ohledu je celoevropským cílem dosáhnout recyklovatelnosti stavebních a demoličních odpadů na úroveň 70 % do roku 2020, [Regionální rozvojová agentura 2005, Škopán 2010]. V ČR se relativní podíl produkce recyklovatelného materiálu na celkovém množství vytěženého přírodního kameniva od roku 2003 trvale mírně snižuje.

Pro zajímavost jsou na obrázku 1 uvedeny produkce vybraných surovin či výrobků. Z obrázku je patrné, že možnosti recyklace a znovuvyužití především SDO a její potenciální vliv na snížení spotřeby základních surovinových zdrojů, specificky stavební kámen, je v současnosti poměrně marginální, jak z pohledu kvantity, tak i z finančního hlediska. Nicméně dle bilančních prozkoumaných volných zásob a úbytku vlivem těžby lze dovodit, že životnost průmyslových zásob stavebního kamene je cca 90 let a štěrkopísků cca 110 let (hrubý odhad). Je nutno dodat, že tento údaj může být značně zkreslený řadou faktorů zejména v evidenci, nehledě na to, že u řady evidovaných ložisek jsou nadhodnocené objemy „zásob“ a z nich vyplývající nereálně vysoké životnosti ložisek většiny výhradních a nevýhradních ložisek, vedených ve státních surovinových bilancích jako jeden ze základních podkladů pro tvorbu surovinové politiky na úrovni státu a krajů. Dále je nutno uvažovat, že značná část bloků zásob ložisek, zejména nevyužívaných, je výrazně limitována zákonnými prvky ochrany životního prostředí) [Surovinové zdroje České republiky Nerostné suroviny 2005, geologie.vsb.cz].

V případě možnosti náhrady či částečné substituce cementu druhotnými materiály s podobnými vlastnostmi v rámci použití ve specifických technologiích, konkrétně u recyklace za studena, je z kvantitativního pohledu potenciálně možné, ale i přínosné, jak ekonomicky, tak i z environmentálního hlediska [aswep.cz, EAPA Asphalt in figures, csu.cz, MPO - Surovinová politika České republiky v oblasti nerostných surovin a jejich zdrojů - 2017, svcement.cz].



Obrázek 1: Produkce vybraných surovin, odpadů a výrobků



## 2. Základní cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je provést výzkum uplatnitelnosti vybraných VEP, specificky fluidních popelů a popílků, ve směsích recyklace za studena a emulzních asfaltových směsích. Druhým cílem je formulovat a ověřit laboratorní metodiku návrhu emulzních asfaltových směsí včetně hodnocení vlastností těchto směsí v průběhu zrání (laboratoř x in-situ).

V rešeršní části práce budou rozebrány jednotlivé vstupní komponenty zkoumaných směsí a okrajové podmínky v podobě technických předpisů a požadavků. Obecně bude řešena problematika disperzních soustav - se zaměřením na asfaltové emulze. Dále bude v širším spektru věnována pozornost VEP, specificky FPP, včetně procesu úpravy VEP v podobě mechanické aktivace. Dále bude obecně popsána návrhová metodika pro emulzní asfaltové směsi dle francouzských technických předpisů.

V první praktické části je kladen důraz na zpracování analýzy uplatnitelnosti VEP ve směsích recyklace za studena dle TP 208. Uplatnitelnost bude hodnocena ze tří stěžejních hledisek:

- fyzikálně-mechanické
- environmentální
- stabilitní.

Na základě těchto tří hledisek budou diskutovány vhodná doporučení z hlediska praktické aplikace v podkladních vrstvách vozovek. Další fází vývoje postupujícího výzkumu bude ověřit a vyhodnotit potenciál mechanicky aktivovaných FPP a jejich vliv ve směsích recyklace za studena.

V případě emulzních asfaltových směsí bude návrh proveden dle metodiky laboratorního návrhu a technických požadavků dle francouzského přístupu a TP 208, přičemž výstupy a zkušenosti budou zohledněny při návrhu technických podmínek „Asfaltové směsi za studena“. Následně tyto technické podmínky budou laboratorně a in-situ ověřeny v rámci realizace zkušebního úseku. V návaznosti budou analyzovány možnosti uplatnění mechanicky aktivovaných VEP v těchto typech směsí za účelem zlepšení mechanických vlastností v počátečních zráních. Otázky uplatnitelnosti a specifika zkoumaných směsí budou stanoveny na základě laboratorního zkoumání a testování.

## 3. Metodika disertační práce

Vlastní práce je rozdělena na dva tematické celky. Prvním tematickým celkem je výzkum uplatnitelnosti FPP ve směsích recyklace za studena. Druhý tematický celek klade důraz na ověření návrhové metodiky emulzních asfaltových směsí včetně sledování uplatnitelnosti mechanicky aktivovaných FPP v těchto směsích.

### 3.1. Recyklace za studena

FPP byly vybrány ze současného elektrárenského provozu a vybraných teplárenských provozů, které používají fluidní kotle. V rámci této disertační práce byly vybrány úletové popílků a ložové popely z elektráren ČEZ a.s. Tisová, Hodonín, Počeradý, Ledvice a teplárenského provozu Plzeňské teplárenské v Plzni. Pro vybrané zástupce fluidních popelů a popílků budou provedeny chemické analýzy za účelem stanovení fázového složení a stanovení obsahu analytů jako podklad pro výluhové testy.

Z důvodů potřeby speciálních zkušebních přístrojů pro zmíněné testy, tyto byly zajištěny externě ve specializovaných laboratořích v rámci souvisejících výzkumných projektů.

V recyklovaných směsích je jako plnivo použit pouze asfaltový tříděný R-materiál. Ostatní druhy recyklovaného kameniva nebyly použity, přičemž k tomuto kroku lze uvést dva důvody. Jednak použitím tříděného R-materiálu je z praktického hlediska dosaženo



maximální možné homogenity recyklovaného materiálu tak, aby bylo možno kvalitativně porovnávat jednotlivé směsi mezi sebou. Současně je předpokládán funkčním důvodem skutečnost, že v kombinaci s asfaltovou emulzí se umožní ve větší míře zamezit výluhu potenciálně nebezpečných látek z FPP.

Specifikace materiálů a výrobní postupy testovaných směsí v této práci se týká těchto směsí tří:

- Směs stmelená asfaltovou emulzí v kombinaci s FPP (Bitumen-FBC Stabilized Material – Bitumen Emulsion) dle TP 208,
- Slabě stabilizovaná směs s využitím zpěněného asfaltu v kombinaci s cementem a mechanicky aktivovaným fluidním popílkem (Bitumen-Cement-FPP Stabilized Material – Foamed Bitumen) dle TP 208,
- Cementem a mechanicky aktivovaným FPP stmelená směs (Cement-FPP Stabilized Material) dle TP 208.

V první fázi vyhodnocení probíhalo v rámci klasifikace dle příslušných technických předpisů TP 208. Byly stanoveny základní volumetrické, pevnostní a deformační parametry recyklovaných směsí v průběhu zrání dle příslušných technických předpisů. V tomto bodě se stanovily základní rozsah uplatnitelnosti zkoumaných FPP. Dále byly provedeny experimentální testy, které ohodnotily riziko vlivu na životní prostředí, respektive cílem bylo dle možnosti provést i difuzní a výluhové testy, které sledují dlouhodobý vliv působení vody z hlediska chemického (obsah analytů ve výluhu) a mechanického (obsah odloučeného pevného podílu). Výsledky bylo snahou porovnat s dosud známými limity pro výluh pro podkladní vrstvy vozovky.

V druhé fázi na definovaných směsích byly sledovány parametry stability, respektive odolnost proti mrazu a vodní citlivost. Dále byla sledována potenciální rizika vzniku objemových změn. Výzkum mineralogických vlastností VEP je velmi složitý, a proto nemůže být snadno kvantifikován. Proto existuje relativně málo studií, které sledují fázové změny pomocí mineralogického přístupu, který se spoléhá na rentgenové difrakční metody pro hodnocení změny fázového složení. K popisu příčin vzniku poruch byla provedena analýza fázového složení metodou RTG difrakční analýzy. Nežádoucí objemové změny se vyskytují u popílkových stabilizátů, které jsou sledovány u stejných FPP v paralelním výzkumu na katedře silničních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze. I když je v rámci recyklace uvažováno uplatnění FPP 3,0 - 15,0 %hm. ve směsi, mohou procesy růstu novotvořených minerálů (především ze skupiny ettringitu) působit negativně v podobě snížené životnosti a je nutné tento zásadní vliv ověřit a posoudit.

Další fází bylo porovnat účinek úpravy FPP v podobě mechanické aktivace. Všechny provedené experimentální testy by měly poskytnout obrázek o chování směsi v konstrukci vozovky, přičemž v rámci reálného uplatnění a konečného hodnocení této technologie v praxi byl realizován zkušební úsek (druhá polovina roku 2017). V rámci této disertační práce nemohou být výsledky z tohoto zkušebního úseku z časových důvodů přiloženy.

V závěru této studie jsou specifikovány a diskutovány doporučení z hlediska aplikovatelnosti FPP ve směsích recyklace za studena v podkladních vrstvách vozovek v rámci potenciálního rozšíření a doplnění stávajících technických podmínek.

### 3.2. Emulzní asfaltové směsi

Emulzní asfaltové směsi jsou materiály, jejichž konečné vlastnosti se významným způsobem mění a dotvářejí v čase, zvláště v jejich počátečním stádiu je soudržnost nízká a vytváří se postupně. Charakteristiky studených emulzních asfaltových směsí se vzhledem ke svým specifickým vlastnostem (chemické reakce mezi kamenivem a asfaltovou emulzí, přítomnost vody, mezerovitost, doba zrání apod.) liší od vlastností a



chování asfaltových směsí hutněných za horka. Obecně jsou posuzované emulzní asfaltové směsi vícefázovým systémem mnoha komponent, z nichž některé mají komplikovanou vnitřní strukturu s vysokou teplotní citlivostí. V základu se jedná o komponenty nepravidelných zrn kameniva s mírně vyšším obsahem pojiva a vyšším podílem objemu vyplněnými vzduchovými mezerami. V současné době ve světě neexistuje žádná "všeobecně přijímaná" návrhová metoda pro studené asfaltové směsi. Vycházet lze z poznatků amerického přístupu formulovaného v tzv. Cold Mix Design Manual nebo z národních technických předpisů (norem) využívaným například ve Francii. Kromě toho, vzhledem k nedostatku jednotnosti laboratorních postupů a jejich hodnocení, zejména v rané fázi zrání, je obtížné tvořit spolehlivé korelace mezi výsledky experimentů, které jsou popsány v literatuře od různých odborníků a expertních týmů.

V první fázi byla navržena jedna emulzní asfaltová směs pro obrusné vrstvy. Tato směs byla připravena dle francouzských zkušeností a technického předpisu NF P98-139 (Couches de roulement: bétons bitumineux á froid) včetně souvisejících předpisů s přihlédnutím k českým předpisům ČSN EN 13108-1 a TP 208 z důvodů porovnatelnosti s podobnými technologiemi v ČR zavedenými. Na této směsi byly stanoveny základní návrhové prvky, respektive optimální zrnitostní skladba kameniva, optimální množství pojiva a vlhkosti, způsob hutnění. Následně po optimalizaci směsi, jak z hlediska složení tak i způsobu výroby, byly stanoveny základní volumetrické, pevnostní a deformační parametry dle příslušných technických předpisů. V rámci testování se nejprve použila pomaluštěpná kationaktivní asfaltová emulze standardně používaná pro recyklace za studena. Avšak vhodný návrh a nastavení asfaltové emulze je pro tento typ směsi zásadní, proto ve spolupráci s evropským zastoupením společnosti MeadWestVaco (dnes Ingevity) v Lille byla zároveň připravena asfaltová emulze pro specifické parametry použitého kameniva. Taktéž byla s takto připravenou asfaltovou emulzí analogicky navržena směs BBF (Béton bitumineux à froid) pro porovnání s návrhem provedeným na ČVUT v Praze. Získané výsledky slouží jako podklad pro doporučení pro připravované TP Asfaltové směsi za studena.

Tento typ směsi se navrhl pro použití v obrusných vrstvách vozovek. Proto byl aplikován takový experimentální přístup, který hodnotí tyto směsi v celém spektru okrajových podmínek působících v konstrukci vozovky. Z tohoto důvodu byly v rámci této práce podrobně zmapovány reologické vlastnosti za pomoci dynamických zkoušek dle příslušných technických předpisů včetně modifikovaných postupů. Studium dynamických mechanických charakteristik zkoumaných nových směsí doplnilo poznatky o viskoelastickém chování a současně přispělo k hlubšímu pochopení souvislostí mezi strukturou a mechanickými vlastnostmi těchto směsí. Dlouhodobé účinky dynamického působení jsou přitom odlišné od účinků zatěžování statického, a proto je problematika dynamického namáhání významná také při aplikacích tohoto materiálu v praxi. Dalším důležitým parametrem pro hodnocení zkoumaných nových směsí a jejich využitelnost v konstrukci vozovky je proces degradace s postupujícím časem v závislosti na opakovaném zatížení reprezentovaný únavovými charakteristikami materiálu.

V druhé fázi byl realizován projekt zkušebního úseku „Ověření nové technologie emulzních asfaltových směsí za studena“. Jednotlivé směsi byly navrženy dle připravovaných TP „Asfaltové směsi za studena“. Výstupem realizace zkušebního úseku byly přímo v praxi ověřené proveditelnost technologie a životnost provedené vozovky, což je nezbytným předpokladem pro následný rozvoj jakékoli nové technologie nejen v ČR. Konkrétní cíl se tedy skládají z následujících dílčích etap:

- laboratorní návrh emulzních asfaltových směsí pro ložnou a obrusnou vrstvu zkušebního úseku,



- ověření funkčních charakteristik emulzní směsi v laboratoři,
- sledování technologie výroby, pokládky a hutnění, zdokumentování všech důležitých poznatků,
- provedení kontrol hotového úseku včetně celkového vyhodnocení,

Získané poznatky z experimentálního laboratorního výzkumu umožňují doplnit či rozšířit připravované technické předpisy.

V rámci metodiky ověřování uplatnitelnosti mechanicky aktivovaných FPP se laboratorně prověřila možnost aditivace emulzních asfaltových směsí v podobě aktivního mikrofileru s cílem zlepšení vybraných vlastností zejména v počátečních zráních směsí.



#### 4. Rozbor problematiky vstupních materiálů

Pro plné pochopení chování sledovaných typů studených technologií s využitím FPP je nutné znát především vlastnosti vstupních materiálů. V této části práce je provedena rešerše v oblasti VEP, FPP, teorie mechanické aktivace, zpěněného asfaltu a teorie o disperzních soustavách, specificky věnovaná asfaltovým emulzím.

##### 4.1. Vedlejší energetické produkty

Tuhé produkty po spalování uhlí jsou obvykle kvalifikovány jako odpady. Lze však tyto obtížně uplatnitelné materiály použít jako druhotné suroviny [Vrbová a kol. 2011]. Pro vlastnosti VEP, jsou určující především vlastnosti uhlí, z kterého VEP vznikají, ale také teplota a podmínky spalování paliva (uhlí) a způsob odlučování ze spalin. Teplota spalování je přitom vázána na technické parametry spalovacího zařízení, přičemž podmiňuje vznik různých minerálních produktů. Jednotlivé druhy VEP se liší chemickým, mineralogickým i granulometrickým složením, což ovlivňuje jejich použití.

Z technologií spalování a odsíření užívaných v elektrárnách a teplárnách v ČR vznikají níže uvedené VEP:

- při mokré vápencové vypírce: škvára (v případě roštových kotlů), struska (v případě granulačních kotlů), popelové frakce a energosádrovec;
- při polosuché absorpční metodě: škvára (v případě roštových kotlů), struska (v případě granulačních kotlů), popelové frakce a produkt odsíření;
- při fluidním spalování: filtrový popel, ložový popel a v menší míře popel z cyklonů.

VEP patří k lehkým stavebním hmotám. Suchá objemová hmotnost dosahuje 650-900 kg.m<sup>-3</sup>. Dobře ztuhlý VEP s optimální vlhkostí (20–35 %) dosahuje objemové hmotnosti 1 100–1 200 kg.m<sup>-3</sup> [Frýzová 2012, Fečko 2005, Vrbová a kol. 2011].

V České republice se vyprodukuje každý rok okolo 15 mil. tun vedlejších energetických produktů. Z této produkce je pouze 20-30 % využito ve stavebnictví. Většina produktů je deponována nebo použita k zavážení vytěžených prostor po důlní činnosti [Fečko 2005].

Hlavními energetickými zdroji v České republice jsou tuhá paliva, zejména hnědé uhlí. V ČR je 69 % uhlí (černé a hnědé) použito na výrobu elektrické energie. Spalování tuhých paliv může probíhat v různých typech topenišť, které mají odlišné spalovací podmínky, ty pak ovlivňují vlastnosti vzniklého produktu po spalování (VEP) [Koloničný 2011, Venhoda 2012, Polach 2012, Teyssler 1988]. Rozlišujeme přitom následující tři typy topenišť:

- roštová topeniště (1350 °C - 1450 °C)
- prášková topeniště (1100 °C - 1500 °C)
  - granulační
  - výtavná
- cyklónové ohniště (1100 °C - 1500 °C)
- fluidní topeniště (850 °C - 900 °C)
  - atmosférické fluidní kotle se stacionární fluidní vrstvou (AFBC)
  - tlakové fluidní kotle se stacionární fluidní vrstvou (PFBC)
  - fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou (CFBC)

Při spalování uhlí v tepelných elektrárnách či teplárenských provozech vznikají VEP, specificky elektrárenské popely a popílky [Medvecová 2004]. Jedná se o heterogenní materiál tvořený částicemi, jejichž rozdílné vlastnosti (fyzikální, chemické, mineralogické, morfologické i technologické) jsou určovány a ovlivňovány řadou faktorů, především kvalitou spalovaného uhlí a technologií spalovacího procesu.

Produktem fluidního spalování je směs tuhých zbytků složená ze zbytků nespáleného paliva a produktů odsíření. Chemické a zejména fázové složení těchto tuhých zbytků po





spalování, které tvoří popel z lože a popílky z odlučovačů, je díky nízké provozní teplotě fluidního spalování (850°C) výrazně odlišné od klasických vysokoteplotních popílků. Jedná se zejména o vyšší obsah  $\text{SO}_3$  a  $\text{CaO}$ , jejich formy (vysoký podíl amorfní fáze) a velké kolísání obsahů jednotlivých složek popílků [Fečko et al., 2005]. Odlišují se i jejich mechanické a fyzikální vlastnosti.

#### 4.2. Klasifikace popelů a popílků

Základní a nejjednodušší rozdělení popelů a popílků vychází z chemického složení nebo dle obsahu  $\text{CaO}$ . Takto se popeloviny dělí na [Frýzová 2012]:

- Popely a popílky, které obsahují vysoký podíl oxidu vápenatého  $\text{CaO}$  (15 až 40 % hmotnosti), oxidu železitého  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2$ .
- Popely a popílky, jejichž obsah oxidu vápenatého je zanedbatelný (méně než 5 %) a typicky je přítomen vysoký podíl oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2$ .

První uvedenou klasifikací je rozdělení popílků a popelů dle ASTM C618 (2015) do dvou tříd [Hemalatha 2017, Frýzová 2012, Rashad 2015, Fečko et al. 2005 ]:

Třída C:

Tyto popílky obsahující 50 - 70 hm. %  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , vyznačují se vysokým obsahem vápna, mají cementové vlastnosti (samovolně tuhnou a tvrdnou při reakci s vodou). Obecně obsahují více než 20 %  $\text{CaO}$ . Mají vysoký obsah alkalických a síranových složek. Třída C pochází především ze spalování lignitu a subbituminózního (nízkohodnotného) uhlí.

Třída F:

Tyto popílky obsahují více než 70 hm. %  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  s nízkým obsahem vápna. Tyto popílky se vyznačují pucolánovými vlastnostmi (tuhnou a tvrdnou při reakci s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a vodou). Vznikají obvykle spalováním kvalitnějších uhlí (bituminózního černého uhlí nebo antracitu).

Hlavní rozdíly mezi těmito dvěma třídami spočívají v rozdílném množství vápence, oxidů křemíku a hliníku a rovněž v obsahu železa. V popílcích třídy F se obsah vápna ( $\text{CaO}$ ) pohybuje v rozmezí 1 – 12 %, většinou ve formě hydroxidu vápenatého  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4$  a skelných fází, v kombinaci s oxidem křemičitým  $\text{SiO}_2$  a hlinitým  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Zatímco v popílcích třídy C se obsah vápna  $\text{CaO}$  může vyskytovat až v rozmezí kolem 30 – 40 %. Mezi další rozdíly patří odlišné množství alkálií (sodíku, draslíku) a síranů, která jsou obecně vyšší u popílků třídy C.

Druhý systém klasifikace člení popeloviny dle mezinárodního klasifikačního systému popílky do čtyř základních skupin dle obsahu  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [Fečko et al. 2005].

Další systém klasifikace dle CSA A3001 (2008) pro použití popílků v cementu využívá rozdělení popílků do tří typů založených na obsahu vápna. Dle [Thomas 1999] je nejvhodnějším způsobem jak posoudit předpokládané chování popílku v betonu, i když jiné sloučeniny, jako jsou alkálie  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{K}_2\text{O}$  a sulfáty  $\text{SO}_3$  mohou také ovlivnit výsledné vlastnosti. Nízkoalkalický popílek (<8%  $\text{CaO}$ ) pochází především z antracitu nebo bituminózního uhlí a je převážně složené z aluminosilikátového skla a různého množství krystalického křemene, mulitu, hematitu a magnetitu. Takové popely a popílky jsou pucolánové a nemají významné hydraulické vlastnosti. Vysoce vápenatý popílek (> 20%  $\text{CaO}$ ) může být vyroben z lignitu nebo subbituminózního uhlí a je složen z kalcium-aluminosilikátového skla a navíc obsahuje širokou škálu krystalických fází. Tento popel a popílek má pucolánové a hydraulické vlastnosti [Cross 2005, Alaa 2015, Fečko et al. 2005, Frýzová 2012]. Nejpoužívanější klasifikace produktů po spalování uhlí je uvedena v tabulce 1.



Klasifikace dle ASTM C618				
třída	popílek	Ca, Fe, $\Sigma$ oxidů (%)	CaO (%)	
F	kyselý	velmi málo Ca značné množství Fe ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}$ ) > 70	< 10	10 - 20
C	alkalický	značné množství Ca ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}$ ) > 50	> 20	
Klasifikace dle CSA A3001				
typ	popílek podle obsahu Ca	CaO (%)	ztráta žiháním (%)	
F	nízký	< 8	< 8	
CI	střední	8 - 10	< 6	
CH	vysoký	> 20	< 6	
Mezinárodní klasifikační systém				
skupina	popílek	$\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{SO}_3$
I.	Alumosilikátový	> 2	< 15	ndf.
II.	Silikátoaluminátový	< 2	< 15	< 3
III.	Sulfátoalkalický	ndf.	> 15	> 3
IV.	jiný (vápenatý)	ndf.	> 15	< 3

Tabulka 1: Vybrané klasifikační systémy

Samozřejmě existuje celá řada dalších způsobů klasifikace popílků např. dle původu paliva, dle pucolánové reaktivity, dle obsahu vápna a alumosilikátů, atd. [Fečko et al. 2005].

### 4.3. Fluidní popely a popílky (FPP)

Od roku 1996 některé elektrárny či teplárny postupně přecházejí na fluidní spalování. Energetické podniky využívající fluidní kotle jsou např. elektrárny Ledvice, Poříčí, Hodonín, Počerady a Tisová, či teplárny Dvůr Králové, Plzeň, Kladno a další. Všechny tyto závody pak využívají fluidní popel a popílek ve větší míře pro rekultivaci skládek, případně jej skládkují nedaleko závodů či jinak zpracovávají nebo upravují dále, [Vehovská, Čmiel 2010]. Účinnost kotlů využívajících fluidní technologii je okolo 85 - 88 %, a to i při používání různých druhů paliv. Mleté palivo (viz tabulka 2) s přísadou vápence příp. dolomitu (aditivum) se spaluje v cirkulující vrstvě při teplotě 750-850°C. V průběhu disociačního procesu se váže z paliva uvolňovaný  $\text{SO}_2$  na  $\text{CaSO}_4$ , což má značný význam z ekologického hlediska, neboť v opačném případě v důsledku  $\text{SO}_2$  v atmosféře vznikají velmi škodlivé „kyselé“ deště. Existuje přitom několik metod odsířování spalin [Honskus 2015, Frýzová 2012]:

- Suchá aditivní vápencová metoda  
Jedná se o metodu, kde se aditivum (vápenec) v suchém stavu přidává do ohniště nad zónu plamene. Při teplotě cca 900°C dochází ke kalcinaci vápence. V další fázi dochází k reakci vápna a oxidů síry za vzniku anhydritu.
- Fluidní spalování s aditivu  
Tato metoda odsíření je založena na stejném principu jako u suché aditivní metody, pouze fluidní kotle mají vyšší účinnost při samotném odsíření, protože aditivum setrvává dostatečnou dobu.
- Suchá aditivní metoda  
Metoda, při které dochází k rozprašování vody v odsířovací komoře, kde vzniká hydroxid vápenatý, který na sebe váže oxidy síry za vzniku anhydritu. Tyto reakce tvoří suché produkty. Je možné recyklovat nezreagované vápno mokrou anebo suchou cestou.
- Polosuchá (polomokrá) vápenná metoda

Metoda, při níž se využívá tzv. rozprašovací sušárna. Podstata této metody spočívá v nástřiku vodní suspenze hydroxidu vápenatého, čímž dochází k adiabatickému odparu vody a ochlazení spalin.

- Mokrý vápencová vypírka

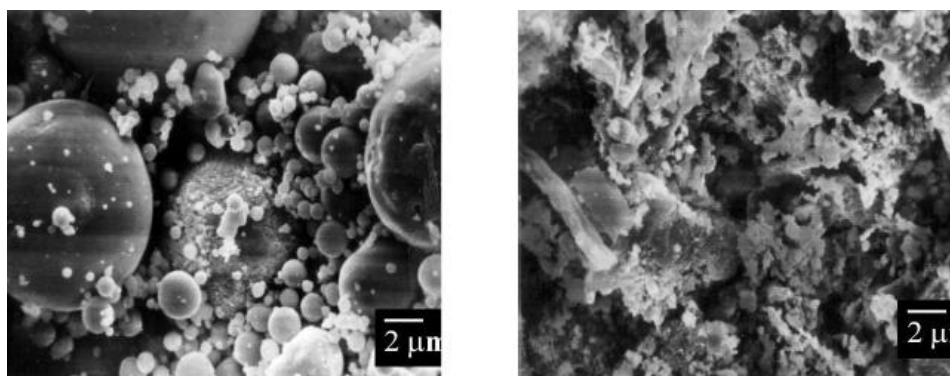
Tato metoda odsíření je v současnosti nejrozšířenější metodou při odsiřování velkých zdrojů. Při tomto postupu se SO<sub>2</sub> vypírá ve vodní suspenzi Ca(OH)<sub>2</sub> nebo CaCO<sub>3</sub> za vzniku vápenné soli, která dále reaguje s oxidy síry za vzniku kalcium hydrogensulfátu. Dále nadchází oxidace CaSO<sub>3</sub> a Ca(HSO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> za optimálního pH = 5-6 a vzniku anhydritu. Účinnost tohoto odsiřování je 95 % a vyšší.

Výsledným produktem spalování je pak směs popela z původního paliva, nezreagovaného odsiřovacího činidla (CaO s případnými zbytky CaCO<sub>3</sub>), 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 popely a popílky je též charakteristická praktická absence taveniny. V důsledku transportu kouřových plynů z prostoru ohniště dochází k separaci jednotlivých frakcí této směsi, jemné podíly jsou odnášeny spalinami ve formě úletu a hrubší zůstávají ve spalovacím prostoru. Úlet tuhých látek je z kouřových plynů odstraňován běžnými technologickými postupy (cyklóny, filtry). Každá fluidní spalovací jednotka proto zpravidla produkuje fluidní popeloviny dvojího druhu: popel z prostoru ohniště (označovaný jako ložový) a popílek získaný z úletu (označuje se cyklónový, filtrový apod.). Vlastnosti obou těchto produktů po spalování se výrazně liší jak ve fyzikálních vlastnostech (granulometrie, měrný povrch, hustota, sypná hmotnost), tak v chemickém a mineralogickém složení, i když pocházejí z téhož technologického procesu fluidního spalování a odsiřování [Medvecová 2004].

Technologie spalování	Surovina						
	hnědé uhlí	černé uhlí	hnědé a černé uhlí	hnědé uhlí s biomasou	hnědé a černé uhlí s biomasou	černé uhlí a biomasa	lignit a biomasa
Fluidní	1,8 %	0 %	38,6 %	28,8 %	25,2 %	0 %	5,6 %

Tabulka 2: Přehled surovin užívaných při fluidním spalování

Obecně se popeloviny skládají z velmi jemných částic, snadno roznášených větrem, se strukturou písčitého prachu. Nejvíce částic bývá v rozmezí 0,01-0,2 mm. Fyzikálně je popílek velmi jemným prachem o zrnitosti 1 až 400 mikronů, sklovité struktury a ve většině případů oblých až nepravidelných tvarů zrn, světle hnědé až tmavě šedé barvy (viz obrázek 2) [Vehovská 2007].



Obrázek 2: Struktura popílku z klasického a fluidního spalování [Fryzová 2012]



Krystalickou fázi tvoří především následující mineralogické novotvary: anhydrit  $\text{CaSO}_4$ , portlandit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sádrovec  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , kalcit  $\text{CaCO}_3$ , křemen  $\text{SiO}_2$ , hematit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , bazanit  $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , ettringit  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , hanebachit  $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , thaumazit  $\text{Ca}_6\text{Si}_2(\text{SO}_4)_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ , tobermorit  $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  [Medvecová 2004]. Obecně popeloviny můžeme dělit dle hydraulicity jednotlivých složek na aktivní a neaktivní:

Aktivní složky:

- hydraulické amorfní (amorfní bazické strusky s vysokým obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , aktivní  $\text{SiO}_2$ ),
- hydraulické krystalické (metakaolinit, hlinitany),
- nehydraulické (CaO, MgO, anhydrit),
- budiče (sulfidy, alkalické soli).

Neaktivní složky:

- nespálené uhlí,
- struska s vysokým podílem  $\text{SiO}_2$
- krystalické složky (křemen, mullit)

Velikostní složení částic se však může u jednotlivých elektráren značně lišit, záleží na kvalitě spalovaného uhlí, na jemnosti mletí uhlí i na způsobu odlučování popílku z kouřových plynů. Zřejmě nejrozšířenější jsou filtry (s vláknitou vrstvou s automatickým oklepem, s vláknitou vrstvou, ze slinutých porézních vrstev, se zrnitou vrstvou) a elektrostatické odlučovače, které mají účinnost 99 % a dokáží zachytit i nejjemnější frakci pod  $10^{-5}$  mm. Dále existují odlučovače mechanické (mokrá - vírový jednočlánekový cyklon, multicyklon, žaluziový cyklon, suchý - pěnový, vírový, hladinový, proudový, rotační), jejich účinnost je 60-80 % [Polach 2012].

Popely a popílky značně sesedají a v některých případech vytváří těsně pod povrchem tvrdou vrstvu. Sorpční schopnost popelovin pro vodu je vysoká, kapilární vztlakovost je značná, přičemž v sorpci vody předčí většinu půd. Po chemické stránce je popel či popílek bazický materiál s pH 7,0-10,5, je dobře zásoben vápníkem a přiměřeně draslíkem, obsahuje určité množství fosfátů. Existují však popely a popílky, především pocházející z některých hnědouhelných elektráren, jejichž charakter je zcela jiný. Jsou kyselé, obsahují velmi málo draslíku, fosforu, vápníku a hořčíku. Stopové prvky jsou přítomny ve vysokých koncentracích např. hliník, mangan, železo, nikl a především bór. Jeho množství závisí na druhu uhlí, zpracování a především na stupni zvětrání. Popeloviny postupem času zvětrávají a jejich toxicita pro rostliny se snižuje. K hodnocení vlivu na životní prostředí se stanovují ekotoxikologické charakteristiky pomocí kontaktních a vodných (výluhových) testů. Důležité kontaminanty, které sledujeme, jsou Al, As, Ag, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Sn, V, Zn, Tl. [Medvecová 2004, Veverková 2009, Faltus 2009].

#### 4.4. Specifikace základních hydratačních procesů ve FPP

Vlastnosti FPP pro stavební účely, především závisí na druhu spalovaného uhlí, zrnitosti a podmínkách spalování a stejně tak i na chemickém a mineralogickém složení paliva. Specifikace FPP kladou důraz na dvě vlastnosti, které určují jejich použitelnost ve stavebnictví: zrnitost a obsah pucolánově aktivních  $\text{SiO}_2$  a CaO. Bylo zjištěno, že menší velikost zrna, např. 20 mikronů pozitivně ovlivňuje pucolánové vlastnosti popelu a popílku, proto jsou jemné frakce cennější než hrubší frakce.

Pucolánové a samo-vazné hydratační vlastnosti FPP jako neslínkového pojiva jsou charakterizovány [Sheng 2012] třemi základními reakcemi. První je charakterizována vznikem micel portlanditu letným hašením reaktivního vápna vodou. Dále reakcí portlanditu, sádry a aktivní aluminosilikátové fáze za vzniku ettringitu. Třetí reakce je



charakterizována vznikem nerozpustných krystalických či amorfních kalcium silikát hydrátů (C-S-H).

Během disociačního procesu odsiřovacího činidla (vápenec) a oxidů síry je na povrchu částičky CaO vytvořena vrstva bezvodného anhydritu CaSO<sub>4</sub>, která brání hydrataci. Nicméně tato vrstva je nestejnorodá, takže voda může procházet skrz a reagovat tak s reaktivním CaO za vzniku portlanditu. Tento proces má poměrně výrazný vliv na tuhnutí a tvrdnutí pasty. Zároveň je vrstva CaSO<sub>4</sub> v průběhu 4-5 hodin rozpouštěna, přičemž čas tohoto procesu je závislý na tloušťce, hustotě a integritě CaSO<sub>4</sub> vrstvy. V důsledku rozpouštění vrstvy anhydritu, vstupuje také množství Ca<sup>2+</sup> a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iontů do vody. Anhydrit nejen hydratuje za vzniku sádry, ale také reaguje s aktivním oxidem hlinitým a hydroxidem vápenatým za vzniku ettringitu. Tyto procesy mají za následek objemovou nestálost materiálu, [Zhang 2012]. Mezitím, narůstá rychle hodnota pH roztoku, přibližně na hodnotu >11 při hašení volného vápna. Hašení vápna urychluje proces tuhnutí a tvrdnutí, vzhledem k přitažlivosti mezi kladně nabitými micelami Ca(OH)<sub>2</sub> a záporně nabitými částicemi popílku. Vyšší hodnota pH také podporuje rozpuštění aktivního Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a aktivního SiO<sub>2</sub>, který urychluje vznik ettringitu a kalcium-silikát-hydrátu C-S-H, které jsou hlavními nositeli výsledné pevnosti. Navíc, teplo uvolněné z hašeného vápna zlepšuje rozpuštění aktivního Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a SiO<sub>2</sub>. Když je voda plně nasycena rozpuštěným CaSO<sub>4</sub>, začne krystalizovat ve vodě na sádru, přičemž anhydrit pokračuje dále v rozpouštění. Tento proces probíhá v 3–7 dnech hydratace a má zásadní vliv na pevnost popílkové pasty [Sheng 2007, Sheng 2012]. Nicméně je důležité zmínit vliv na vývoj pevnosti pasty, zejména poměr aluminosilikátových složek a poměr síranu vápenatého vůči ostatním aktivním složkám obsaženým ve FPP [Blanco 2006, Faltus 2009].

Používání fluidních popelovin a dalších tuhých produktů po spalování a odsíření má dobré předpoklady pro využití do zemních konstrukcí dopravních staveb, včetně konstrukčních vrstev vozovky v podobě pojiva nebo aktivní filerové složky.

#### 4.5. Rizikové faktory

Použití fluidních popelovin přináší však také zásadní problémy spojené s objemovými změnami [Yoon 2007]. Při dlouhodobém kontaktu, zejména fluidních popílků s vodou vznikají novotvořené sekundární minerály, především ettringit Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub>·26(H<sub>2</sub>O) a Ca karbonáty, které mohou být příčinou objemové nestálosti, která se může projevit následnými poruchami konstrukčních vrstev vozovky. Z hlediska rizika ztráty mechanické pevnosti a posléze i celkové stability je nejnebezpečnější vznik a růst minerálů skupiny ettringitu [Dermatas 1995]. Dalším rizikovým faktorem použití fluidních popelovin v konstrukci vozovky je jejich relativně malá odolnost při opakovaném kontaktu s vodou a mrazem [Chen 2009, Sear 2011] a riziko částečně nevyhovujících hygienických a ekologických parametrů [Vaniček 2003].

#### 4.6. Teorie bobtnání fluidních popelů a popílků

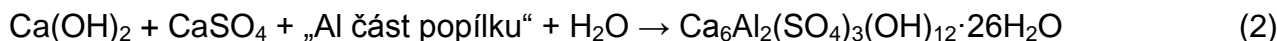
Při smíšení FPP s vodou dochází k průniku vody do porézní struktury popílku. Při hydrataci nejprve dochází k rychlé reakci vody s CaO:



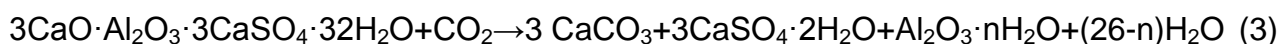
V důsledku většího molárního objemu Ca(OH)<sub>2</sub> než CaO dochází uvnitř částice k expanzi a k vzniku trhlin. Vrstva CaSO<sub>4</sub> se trhá a umožňuje další přístup vody. Reakce CaO s vodou je rychlá, neboť CaO ve fluidních popílcích je svým charakterem měkce pálené vápno.



V další fázi reaguje vzniklý  $\text{Ca(OH)}_2$  s  $\text{CaSO}_4$  a s částí popílku obsahující hlinitany za vzniku ettringitu (starší označení ettringitu je  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ ):



Tato reakce je spojena s expanzí, která zřejmě končí v okamžiku, kdy je veškerý vzniklý  $\text{Ca(OH)}_2$  spotřebován na ettringit. Ettringit se v pozdějších fázích částečně přeměňuje na komplexní Ca, Al karbonátohydráty nebo na složitější sloučeniny jako je woodfordit  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4, \text{SiO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{OH})_{12}\cdot26\text{H}_2\text{O}$ . Ettringit se také může působením vzdušného  $\text{CO}_2$  rozkládat na vápenec, dihydrát síranu vápenatého,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gel a vodu podle reakce [Škvára 2015]:



Pro potencionální možnost použití fluidních popelovin v konstrukci vozovky má sledování objemových změn zásadní význam pro ověření trvanlivosti konstrukce vozovky. Objemové změny se mohou projevit smršťováním nebo roztažností a následně vést k poklesu hodnot technických i ekologických parametrů. Mnohdy tento proces může vést až k úplné destrukci.

Vznik objemových změn, obecně u VEP, dále ovlivňuje kromě chemických a fyzikálních vlastností vstupních surovin, též obsah rizikových složek a jejich variabilita, technologický proces výroby a dále prostředí, ve kterém je VEP zabudován (např. vlhkostní a teplotní parametry, tlak a kombinace těchto faktorů), příp. další specifické faktory [Oprailová 2013].

#### 4.7. Právní úpravy vztahující se k využití FPP ve stavebnictví

Dosud nejsou stanovena obecně závazná environmentální kritéria pro stavební výrobky nezískávané těžbou nerostných surovin a uvolňované do prostředí. V rámci harmonizace uvnitř Evropské unie byla již v roce 2005 založena technická komise CEN/TC 351. Tato komise zpracovává metody stanovení pro přístup k uvolňování regulovaných nebezpečných látek obsažených ve výrobku během jeho používání.

Rámcová směrnice o odpadech 2008/98/ES stanovuje prostřednictvím tzv. kritérií konce odpadu, za jakých podmínek přestává být odpad odpadem a stává se produktem příp. druhotnou surovinou. Tyto podmínky budou postupně stanoveny pro všechny materiály za účelem ochrany životního prostředí a hodnocení ekologických a ekonomických přínosů. Jejich cílem je podporovat recyklaci v EU tím, že vytvoří právní jistotu a rovné podmínky, jakož i odstranění zbytečné administrativní zátěže.

Dalším nařízením Evropského parlamentu a Rady EU č. 305/2011 je CPR (Construction Products Regulation), které stanovuje harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh. Tento předpis se týká stavebních výrobků označených CE značkou. Zavedením tohoto předpisu se ruší dříve platná Směrnice Rady 89/106/EHS Construction Products Directive (CPD). Adaptace CPR do českého právního řádu byla provedena zákonem č. 100/2013 Sb. CPR předepisuje vydávat prohlášení o vlastnostech výrobku (byla opuštěna koncepce prokazování shody s harmonizovanou technickou specifikací), přičemž pro materiály používané v silničním stavitelství je vedle technických aspektů podstatná především problematika výskytu a eliminace škodlivých či nebezpečných látek. Je zapotřebí prověřovat tzv. ekologickou kompatibilitu výrobku, která souvisí do velké míry s riziky uvolňování nebezpečných látek do okolního prostředí. Další evropská strategie v oblasti chemických látek a přípravků vešla v platnost 1. 6. 2007. Jedná se o nařízení



Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1907/2006 o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek známé pod zkratkou „REACH“ a o zřízení Evropské agentury pro chemické látky.

V rámci problematiky nebezpečných látek ve stavebnictví jsou důležité tyto právní úpravy právě z pohledu možného použití VEP. V zákoně č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky je upraven způsob stanovování technických požadavků na výrobky, které by mohly ohrozit zdraví nebo bezpečnost osob, majetek nebo životní prostředí. V nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky a v nařízení vlády č. 190/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na stavební výrobky označované CE, eventuálně zákon č. 102/2001 Sb., o obecné bezpečnosti výrobků. Dále směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/12/ES o odpadech (rámcová směrnice o odpadech), zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých zákonů včetně jejich prováděcích vyhlášek a směrnice 89/106/EHS o stavebních výrobcích.

Z hlediska ochrany vod a vodního hospodářství je možné vycházet ze zákona č. 254/2001 Sb., vodní zákon, díl 5, Ochrana jakosti vod, § 38 Odpadní vody. V rámci národní právní úpravy je kvalita vody, která je považována za neznečištěnou stanovena v následujících předpisech:

- vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody
- nařízení vlády č. 61/2003 Sb. o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod
- metodický pokyn Ministerstva životního prostředí České republiky, Kritéria znečištění zemin a podzemní vody (Věstník MŽP č. 8/1996)

Problematika kontaminace půdy je zmíněna v nařízení vlády č. 163/2002 Sb. a v nařízení vlády č. 190/2002 Sb., je vázána na umístění stavby na půdě (zemědělské, nezemědělské).

Metodika hodnocení výrobků z vedlejších energetických produktů používaných jako stavební výrobky (např. ČSN 72 2072 Popílek pro stavební účely – Část 11: Popílek pro ostatní využití). Limitní hodnoty stanovené v technických normách pro výrobky s vyšším stupněm bezpečnosti, než srovnatelné hodnoty pro odpady při jejich využití na povrchu terénu (vyhláška č. 294/2005 Sb.). Hodnocení výrobků určených jako stavební výrobky pro vytváření vnitřního prostředí staveb je v technických normách zpracována podrobněji, než pro stavební výrobky určené pro použití ve volném – nechráněném – životním prostředí.

U odpadů i u výrobků uvolňovaných do nechráněného životního prostředí je v uvedených předpisech (technických normách řady ČSN 72 2071, ČSN P 72 2080, vyhlášce č. 294/2005 Sb.) vyžadována zkouška ekotoxicity na čtyřech organismech, stanovení vyluhovatelnosti škodlivých látek, stanovení škodlivých látek v sušině, případně i stanovení hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů.

Jmenované technické normy vyžadují u výrobků z vedlejších energetických produktů uváděných na trh ověřování ukazatelů: pH, vodivost, obsah chloridů a síranů, Al, As, Ag, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Sn, V, Zn, Tl, ve výluhu. Pro některé uvedené ukazatele nejsou stanoveny limitní hodnoty a pro vyhodnocení vhodnosti výrobku pro konkrétní stavbu má být využita srovnávací metoda, [Veverková 2009, Regionální rozvojová agentura, [www.asvep.cz](http://www.asvep.cz)]. Ve vztahu k výše uvedeným informacím je nutné upozornit na zákon č. 167/2008 Sb., o předcházení ekologické újmě a o její nápravě a o změně některých zákonů, které mohou být významnou změnou v rámci stávající praxe uvádění výrobků s obsahem VEP do životního prostředí.

#### 4.8. FPP pro stavební účely dle technických předpisů

Klasické nebo fluidní popely a popílky musí vyhovovat základním technickým požadavkům, které jsou popsány v ČSN 72 2071 a ČSN 72 2080. Při posuzování vlastností popílků používáme chemické a fyzikálně-chemické a fyzikální postupy. Technické podmínky TP 93 - Návrh a provádění staveb PK s využitím popílků a popelů, upravují použití popílků a popelů, fluidních popílků ze zbytků po spalování uhlí a výrobků z nich na stavbu pozemních komunikací. Stanovují podmínky pro návrh, provádění a kontrolu zemního tělesa, podkladních vrstev a popř. krytu vozovky a podmínky pro bezpečnou práci a ochranu životního prostředí v souvislosti se stavební výrobou i s užíváním stavby.

VEP přirozeně obsahují celou řadu látek nežádoucích pro životní prostředí. Jedná se zejména o těžké a toxické kovy. Koncentrace kontaminantů je zpravidla vyšší než u běžných stavebních materiálů, případně vyšší než přirozené pozadí v zeminách a horninách, které jimi nahrazujeme [Veverková 2009]. Pro použití VEP bez ohledu na jeho původ a druh jsou stanovena legislativní a normová kritéria. V případě použití do zemních konstrukcí silničních staveb lze využít „Technické podmínky pro návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popelů a popílků schválené MD ČR“ (dále TP 93). Ekologická vhodnost popílků a dalších vedlejších produktů se posuzuje:

- podle chemických vlastností výluhu
- podle REACH
- podle mezní hodnoty hmotnostní aktivity  $Ra^{226}$ .

Upustilo se mj. od povinného stanovení ekotoxicity, protože při výrazně alkalické reakci výluhu v případě vápnem stabilizovaného VEP není zkouška vhodná. Podle chemických vlastností výluhu, který se připraví loužením vzorku, smíchaného s vodou v poměru 1 : 10 dle ČSN EN 12457/1-4 jsou mezní hodnoty vyluhovatelných látek následující (viz tabulka 3):

Prvek	TP 93 (mg/l)	Indikátory znečištění MŽP (mg/l)	Limity pro pitnou vodu (mg/l) vyhláška č. 252/2004 Sb.	Vyluhovatelnost odpadů - třída I (mg/l) vyhláška č. 294/2005 Sb.	Kritérium pro znečištění zemin a podzemní vody (mg/l)
Ag	0,1	0,071	0,05	-	-
As	0,1	0,000045	0,01	0,05	0,005
Ba	1	2,9	-	2	0,05
Be	0,005	0,016	0,002	-	0,0002
Pb	0,1	0,01	0,01	0,05	0,02
Cd	0,005	0,0069	0,005	0,004	0,0015
Cr <sub>celk.</sub>	0,1	-	0,05	0,05	0,003
Co	0,1	0,0047	-	-	0,02
Cu	1	0,62	1	0,2	0,02
Ni	0,1	0,3	0,02	0,04	0,02
Hg	0,005	0,00063	0,001	0,001	0,0001
Se	0,05	0,078	0,01	0,01	-
V	0,2	0,063	-	-	0,05
Zn	3	4,7	-	0,4	0,15
Sn	1	9,3	-	-	-

Tabulka 3: Limitní hodnoty ve vodném výluhu (TP 93), podzemní a pitné vodě (mg/l)

Pro porovnání jsou uvedeny hodnoty dle metodického pokynu MŽP „Indikátory znečištění (2013) a limity pro pitnou vodu dle vyhlášky 252/2004 Sb. Vzhledem k specifickým odlišnostem koncentrací přirozeného pozadí některých ukazatelů v ČR (zejména arsen)





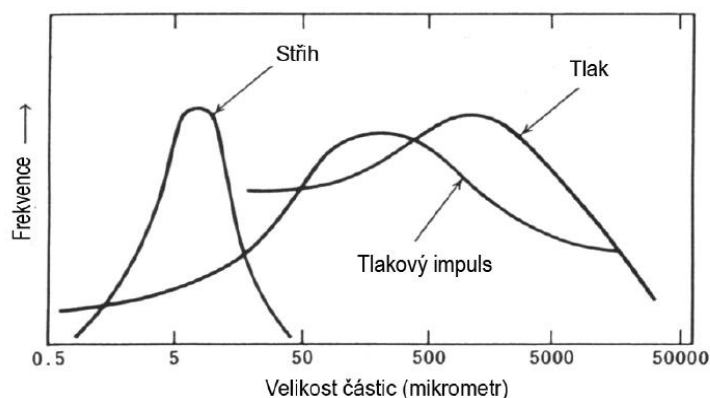
má přednost limit pro pitnou vodu. Z tabulky je patrné, že limitní hodnoty pro vodní výluhy dle TP 93 v části ukazatelů překračují porovnávané hodnoty. Výluhy ze zemních konstrukcí s využitím VEP tak mohou kontaminovat podzemní vodu, přestože jednotlivé koncentrace vyhovují TP 93. Samostatnou otázkou je šíření kontaminace od zdroje v prostoru a čase. Vzhledem ke značným objemům a liniovému charakteru zemních konstrukcí se však může jednat o významný zdroj kontaminace podzemních, případně i povrchových vod.

## 5. Proces mletí

Mletí je běžně chápáno jako proces zjemňování zrnitosti a zvětšování měrného povrchu materiálu. Tento nárůst měrného povrchu je zpravidla dramatický. Například jestliže se pevná látka tvaru krychle rozloží na menší kostky, každá o straně velikosti  $1/n$  strany původní krychle, tak se specifický povrch zvýší  $n$ -násobně, ale rozložená hmota obsahuje  $n^2$ -krát původní délku hrany a  $n^3$ -násobek počtu rohů [Baláž 2008]. Mletí je nezbytné z důvodu zpřístupnění či oddělení jednotlivých složek materiálu, či jako mezistupeň pro další zpracování nebo jako finální úprava. Zjemnění zrnitosti a zvětšení (či modifikace) povrchu je pak nezbytné pro dosažení požadovaných chemických nebo fyzikálních vlastností upravovaného materiálu. Dále při mletí dochází k homogenizaci heterogenních materiálů, jako jsou třeba cementářské suroviny nebo směsi pro práškovou metalurgii, keramiku, potravinářství a zemědělství [Faltus a Valentin 2013].

Zjednodušeně k procesu mletí dochází obecně tehdy, pokud je částicám upravovaného materiálu dodávána energie dostatečně vysoká k překonání jejich vnitřní soudržnosti. Nejběžněji se používá mechanického předávání kinetické energie částicám upravovaného materiálu, potom hovoříme o mletí mechanickém. Existují ale i jiné způsoby předávání energie upravované látce, například ultrazvukové, šokové termické, elektrické či elektrohydraulické. I tyto mechanismy jsou využívány v omezené míře k rozrušování látek a ke zjemňování zrnitosti pevných látek. V mechanických zařízeních (mlýnech), je ke zjemnění zrnitosti – mletí – využíváno několika základních mechanismů, kterými jsou: tlak, stříh, tlakový impuls (impakt), volný úder, ohyb, tah, zkroucení, štípání a řezání, [Faltus a Valentin 2013, Tavares 1998].

Nejčastějšími silami, kterými jsou částice vystaveny v nejvíce používaných mlýnech, jsou tlak, tlakový impuls a stříh. Vlastnosti mletých látek, jako je velikost, tvar a rozložení velikosti částic, závisí na povaze materiálu, který je rozdrčen. Tyto vlastnosti jsou také citlivé na působení mlýna, které určuje druhy namáhání, které se aplikují, a to i tehdy, když se stejná látka mele. Obecné účinky tří hlavních mechanismů mletí, ke kterým dochází během mletí, jsou uvedeny na obrázku 3. Jemně rozemleté částice s úzkým rozložením částic se vytvářejí, když jsou namáhání aplikována především stříhem. Je obtížné vytvářet jemné částice mletím, když jsou aplikována pouze tlaková napětí. Nárazové (impaktové) zatížení poskytuje výsledky střední hodnoty mezi těmi, které vzniká použitím stříhových a tlakových napětí. Použití stříhového namáhání při mletí je neúčinnější způsob produkce jemných částic a běžně způsobuje, že fyzikálně-chemické vlastnosti pevných částic se mění vzhledem k účinkům stříhu na strukturu krystalické mřížky [Faltus a Valentin 2013].



Obrázek 3: Účinky mletí vzhledem k mechanismu zatížení částic [Tavares 1998 - přeloženo do češtiny]



Existují však problémy spojené s mletím, jako je kontaminace povrchu částic atmosférickými plyny a materiály používané při konstrukci mlýna. Nejmenší částice, která může být vyráběna mletím, je rovněž omezena tendencí mletého produktu reagovat. Velikost, tvar, rozdělení velikosti a hranice mletí jemných částic produkovaných technikami mechanické redukce zrnitosti jsou velmi závislé na podmínkách mletí a typu použitého mlýnu [Tavares 1998].

Ve většině klasických mlýnů (kulových, prstencových, tyčových, kolových, válcových, kotoučových, vibračních, diskových, planetových atd.) dochází v různé míře ke kombinaci mechanismů tlak, stříh a tlakový impuls, kde je působeno na částice či na vrstvu částic mezi pracovními tělesy. Mechanizmy tlaku, stříhu a tlakového impulsu jsou z energetického hlediska obvykle málo efektivní, protože před rozmělněním částic upravované látky, musí být překonána adheze mezi mlecím tělesem a částicemi látky nebo mezi částicemi látky ve vrstvě. Pak musí částice projít fází plastické deformace, a protože ke kontaktu mlecích těles a částic upravovaného materiálu dochází při relativně malých rychlostech, dokáže vnitřní struktura část energie vykompenzovat (pružnost, dvojčatění atd.). Další nevýhodou těchto mechanismů je relativně malý kontakt povrchu pracovních těles s částicemi upravovaného materiálu. Proto mají tyto mlýny, vzhledem ke své produktivitě velký objem a velmi vysokou hmotnost. I v modernějších mlýnech, jakými jsou kulové planetární mlýny nebo vibrační mlýny, převládají mechanismy tlak a stříh oproti mechanismům tlakového impulsu, volného úderu a tahu či ohybu. K těmto procesům dochází pouze při vyšších rychlostech a tedy s vyšší energetickou účinností [Snow 1999, Faltus a Valentin 2013]. Na mechanismech, které dané mlecí zařízení používá, a na jeho dalších konstrukčních parametrech také ve značné míře závisí efektivita zjemnění materiálu - mletí. Tuto efektivitu se pokoušejí kvantifikovat některé základní teorie, používající jako kritérium účinnosti množství spotřebované práce na jednotku nově vytvořeného povrchu, rozměru či hmotnosti částic zjemňovaného materiálu nebo na kombinaci těchto dvou veličin. Na mechanismech, které dané mlecí zařízení používá, a na jeho dalších konstrukčních parametrech také ve značné míře závisí efektivita mletí [Faltus a Valentin 2013].

### 5.1. Mechanická aktivace

Mechanická aktivace může být možným řešením pro hrubé zbytky ze separačních procesů spalování uhlí. Proces mletí způsobuje rozpad velkých plerosfér (porézní částice) a snižuje drsnost částic. Toto snížení spolu s vyšší reaktivitou popílku zvyšuje pevnost. Mletí cenosfér (dutých kulových částic) zvyšuje hustotu a jemnost, což vede k vyšší pucolánové reaktivitě popílku. Doba mletí ovlivňuje velikost částic, jejich tvar a v důsledku toho i potřebu vody pro průběh hydratačních procesů [Hela 2013].

Mechanickou aktivaci lze rozdělit na dva procesy. První je rozměňování, tzn. vícenásobné porušení částic, které vedou ke snížení jejich velikosti a současnému zvýšení specifické povrchové a povrchové energie v systému.

Teorie vzniku a šíření trhlin byla poměrně dobře popsána mnoha autory, například Griffithem, Smekalem, Rumpfem, Schonertem a Weichertem [Tavares 1998, Baláž 2008]. Předpokládá se, že pro vznik trhliny či možnosti šíření trhliny nebo stavu, který by měl vést k celkovému prasknutí materiálu, je nutné vytvoření určité minimální délky mikrotrhlin či diskontinuit. Obecně reálné pevné látky vykazují deformace, poruchy ve formě trhlin, mikro a makropórů, či defekty krystalové mřížky. Podle [Tavares 1998] se mikrotrhliny a dislokace mohou spojovat na rozhraní krystalů nebo v průsečiku dvou dislokací nebo v případě mozaikové struktury, na hranicích bloků. V počáteční fázi namáhání částice tlakovým impulsem dochází k elastické deformaci, přičemž energie je uložena právě ve



formě elastické deformační energie. Tento druh energie není distribuován po celém povrchu, ale je soustředěn kolem rohů, otvorů a trhlin jednotlivých zrn či částic [Juhász 1998, Baláž 2008]. Malé množství plastické deformace na zatížených místech je obecně považováno za nevýznamné. Deformace částice je obecně popsána dle Hertzova modelu, během této počáteční fáze namáhání. Pokud je překročeno kritérium pro vytvoření trhliny v částici nebo na povrchu částice, dojde k jejímu nestabilnímu růstu, eventuelně i ke vzniku a růstu sekundárních trhlin. Počet a velikost odštěpených částic závisí na velikosti a umístění počáteční poruchy a na rozsahu sekundárních poruch či trhlin. Okamžitý zlom, pro velmi krátký čas (v rámci nanosekund) uvnitř velmi tenké povrchové vrstvy (asi 10 nm) vyvolá tepelný ráz, který může způsobit tání nebo strukturální změny v nově utvořené povrchové vrstvě v okamžiku zlomu. Defekt, či zlom částic předchází tvoření poruch a mikrotrhlin, které se začnou rozšiřovat při dosažení kritické velikosti napětí, respektive do překročení molekulární pevnosti v tahu. Toto napětí má zvláštní význam z energetického hlediska. V tomto ohledu je efektivita mlecího zařízení nejvyšší, přičemž závisí na technologii mletí a částečně na jednotlivých vlastnostech materiálu. Okamžitý zlom vytvoří v systému nové povrchy, což má za následek zvýšení volné energie systému, ovšem je nutné uvažovat i problematiku energetických ztrát v průběhu plastické deformace. Základní charakteristikou tohoto modelu lomu částice či zrna materiálu je, že energie potřebná k růstu trhlin pochází zcela z uložené elastické energie, která je přítomna při zahájení růstu trhliny. Nezbytným důsledkem je to, že uložená energie při lomu částice musí být alespoň tak velká jako celková energie, která se pak rozptýlí při růstu trhliny. Obecně energie lomu částic překročí volnou energii o významné množství a nepoužitá energie je rozdělena po dokončení lomu či odštěpení, většinou jako kinetická energie porušených fragmentů, které mohou vést k dalšímu poškození v závislosti na konfiguraci částic a na mechanismech zatížení. Přebytečná energie se také rozptýlí jako přebytečná energie při nárazu mlecích částí mlýnu, který je primární příčinou nežádoucího otěru kontaktních mlecích částí mlýnu v průmyslu. Během této fáze mletí se energetická náročnost na drcení zrn neustále zvyšuje, a proto v počáteční fázi mletí je vložena energie většinou použita na odštěpení či lámání zrn. V průběhu mletí se tedy míra schopnosti disperze zvyšuje a množství poruchových míst snižuje [Juhász 1998, Baláž 2008, Tavares 1998].

Druhým procesem je disperze, tj. míchání částic v disperzním médiu, které je možná ukončeno změnou stavu disperze (filtrace, sedimentace atd.). Již dříve bylo známo, že mechanické účinky, vyskytující se během suchého mletí pevných částic, mohou vyvolat významné strukturální změny a dokonce i chemické reakce v materiálu. Teorie rozmělnování, která předpokládá pouze rozptýlení, by proto měla doplnit výše zmíněné jevy. Podle koloidních aspektů teorie mletí se v rámci mechanické chemie jedná o změny ve fyzikálně-chemických vlastnostech a chemické reaktivitě aerosolů, suspenzí, xerosolů<sup>1</sup>, xerogelů<sup>2</sup> a porodiových (porézních) systémů, ke kterým dochází při deformaci, porušení a mechanickou disperzi pevných složek mikroskopických a submikroskopických systémů přímo mechanickým účinkem nebo v jejich důsledku. Na druhou stranu zde zkoumá podmínky, které přímo ovlivňují mechanickou disperzi a mechanické vlastnosti těchto disperzí. Mletí lze tedy považovat za mechano-chemickou aktivaci, jestliže změny napětí a

<sup>1</sup> Ztuhlý sol, neagreguje (pevná matrice to znemožňuje), nemá žádnou skeletovou strukturu mezi dispergovanými částicemi / kapkami / bublinami. Není to gel.

<sup>2</sup> Systém obsahující pouze zesíťovaný disperzní podíl. Vzniká vysušením lyogelu, tj. odstraněním disperzního prostředí (tzv. suchý gel).



disperzního stavu zahrnují také změny v struktuře materiálu, chemické složení a chemické reaktivitě [Faltus a Valentin 2013].

Teorie procesu mletí přitahuje poměrně dlouhou dobu pozornost k měření nebo stanovování potřebné energie při mletí a určitě si zaslouží být zmíněna.

Vztah mezi velikostí částic a potřebnou energií pro jejich zlomení je důležitým aspektem procesu mletí minerálů a věnuje se mu spousta experimentálních a teoretických výzkumných prací. Ve skutečnosti existují dva různé přístupy. Prvním přístupem je Kickova teorie, která vymezuje vztahy energie potřebné pro zlomení částice dané hmoty a dané velikosti. Uvádí, že energie potřebná k zlomení částice určitého materiálu je úměrná jeho hmotnosti, nebo jinými slovy se jedná o specifickou energii (energie na jednotku hmotnosti) potřebnou pro zlomení, která je konstantní. Toto dle [Stamboliadis 2007] ovšem platí pro částice nad cca 5 mm.

Druhým přístupem je Rittingerova metoda a vztahuje se ke spotřebované energii na velikostní rozložení částic. Podle toho je vytvořená nová plocha úměrná energii spotřebované ke zlomení částice. Tato teorie vystihuje absorpci energie při jemném mletí pro zrna menší než cca 0,05 mm. Tyto dvě teorie mohou být současně pravdivé, respektive zároveň se nevylučují [Stamboliadis 2007, Faltus a Valentin 2013].

## 5.2. Vysokoenergetické/vysokorychlostní mletí

Jedním ze směrů, který se v posledním období intenzivně rozvíjí, je vysokoenergetické mletí nebo vysokorychlostní mletí. Vysokorychlostní mletí lze chápat jako jeden z typů vysokoenergetického mletí, které se vyznačuje velkým množstvím předané energie na jednotku upravovaného materiálu v rámci procesu mletí. S mletím v klasickém pojetí má společné všechny základní vlastnosti, tedy zjemnění zrnitosti, zvětšení měrného povrchu.

Na rozdíl od klasického mletí při vysokoenergetickém či vysokorychlostním mletí dochází k určitým jevům (efektům), které nebyly pozorovány u běžného mletí. A právě na tyto efekty je přeměněna určitá část vynaložené energie. Tyto jevy jsou u anorganických materiálů například:

- mechano-chemická (mechanická) aktivace,
- tvorba vyšších podílů mikronových částic a nanočástic,
- v některých případech vyšší efektivita využití spotřebované energie na tvorbu nových povrchů.

Právě efekt mechano-chemické aktivace umožňuje mnohem efektivnější využití energie, vynaložené na úpravu – mletí látky, díky akumulaci její části v podobě zvýšené entalpie upravované látky. Efekt mechano-chemické aktivace umožňuje ve vysokorychlostních mlecích zařízeních:

- uskutečnění chemických reakcí v pevném stavu při mletí (např. oxidace či výměnné reakce),
- iniciaci fázových změn (ne pouze amorfizace) v různých látkách,
- průběh katalytických reakcí v organických i anorganických systémech v procesu mletí.

Mechano-chemickou aktivací se zabývá obor zvaný mechanochemie (mezioborová vědní disciplína). Pokud se dopustíme určitého zjednodušení, zabývá se tato disciplína iniciací a zefektivněním chemických a fyzikálně chemických procesů, prostřednictvím fyzikálních (především mechanických) vlivů. Pojem „mechano-chemická aktivace“ není přesně definován, ale obecně jej lze chápat jako zvýšení chemické reaktivity látek, které je způsobené mechanickým zásahem. Ve srovnání s klasickým mletím, kdy se zvýšení chemické reaktivity dosahuje zejména zvětšením velikosti měrného povrchu látek, zde

zaznamenáváme další mechanismy, které ke zvýšení reaktivity přispívají [Faltus a Valentin 2013, Sekulić 1999, Blanco 2006, Valentin a kol. 2013].  
Na obrázku 4 jsou zobrazeny impaktivní vysokorychlostní mlýny (desintegrátory), které byly použity při mechanické aktivaci vybraných FPP v této práci.



Obrázek 4: Vysokorychlostní impaktivní mlýn použitý v rámci dále popsaných experimentů



## 6. Zpěněný asfalt

Pěnoasfaltová technologie zažívá ve světě renesanci a poměrně značný rozvoj inovativních přístupů jak v oblasti praktického použití, tak i ve výzkumu. Zpěněný asfalt může být použit ke stmelení různých zrnitých materiálů, včetně materiálů z původní vybourané konstrukce vozovky (asfaltový recyklát; R-materiál). Úspora energie, rozvoj udržitelné výstavby silniční sítě a materiálově úsporné využití zejména asfaltového pojiva jsou nejdůležitější otázky v silničním stavitelství. Tyto aspekty představují silnou pobídku k používání pěnoasfaltové technologie po celém světě, jak z hlediska ekonomického, tak z hlediska ekologického [Iwański 2013]. Pěnoasfaltové technologie nelze již mnoho let považovat za opravdovou inovaci. Technologie řízené výroby zpěněného asfaltu byla patentována již v roce 1956 profesorem L. H. Csaniy z Engineering Experiment Station of Iowa State University a to původně jako vylepšené pojivo pro stabilizaci zemin při výstavbě silnic americké armády na tichomořských ostrovech s využitím pouze vulkanického popelu jako minerální složky. Technologie byla po několika letech opuštěna, následně odkoupena společností Mobil Oil Australia, která navrhla zásadní vylepšení, se kterým tato technologie funguje do současnosti. Významného rozšíření především v Austrálii dosáhly pěnoasfaltové směsi již v sedmdesátých letech minulého století jako důsledek ropné krize a výrazného růstu cen ropných produktů, který vedl k hledání alternativních a ekonomicky více přijatelných technologií pro výstavbu a obnovu vozovek. Až do roku 1993 byl tento postup chráněn patentem a zájemci mohli od společnosti Mobil Oil koupit pouze licenci na technologický postup. Po uplynutí tohoto období, během něhož byl technologický postup chráněn patentem, následovalo rychlé rozšíření využití technologie výroby asfaltové pěny v řadě zemí. Z hlediska technického rozvoje provádění pěnoasfaltové technologie zejména v oblasti recyklace za studena se na rozšíření vlastní technologie nejvíce podílela společnost Wirtgen [Wirtgen 2012], která se v určující míře zasadila o využití této technologie v oblasti recyklace vozovek za studena na místě. Vedle toho však našly uplatnění i alternativy, které dnes můžeme zařadit do skupiny teplých asfaltových směsí využitelných i na klasických obalovnách (aplikace známé z Norska, Velké Británie, Nizozemí či USA). Vzhledem ke skutečnosti, že tato technologie postupně našla uplatnění při obnově vozovek v řadě vyspělých zemí, došlo k vyvrácení mýtu, podle kterého jsou technologie využívající zpěněný asfalt použitelné pouze pro konstrukce vozovek v rozvojových zemích.

Obecně jakékoliv asfaltové pojivo, které v horkém stavu přijde do kontaktu s vodou, začne pěnít a několikanásobně zvětší svůj objem. Ve většině případů však takový jev není žádoucí. Princip výroby zpěněného asfaltu tedy spočívá ve vhánění vzduchu pod tlakem cca 10 barů a vody (2-5 %-hm. při teplotě 15-25 °C) pod tlakem 4-5 barů do horkého asfaltového pojiva (běžně pojiva 50/70 - 160/220 při teplotě 160-190 °C) [Jenkins, Groot a Van de Ven, 1999]. Voda se při kontaktu s horkým asfaltovým pojivem přeměňuje na vodní páru. Ta je postupně zachytávána a uzavírána do drobných bublin zpěněného asfaltu a poté, co se přemění ve vodní páru, pěna expanduje a zvětší několikanásobně svůj objem. V tomto stavu je pak asfaltová pěna dávkována ke kamenivu. Celý proces napěnění, probíhá v expanzní komoře, do které je přiváděno horké asfaltové pojivo a kam jsou vodní pára a vzduch přidávány tryskami. Následně je výsledná směs vstříkována pod vysokým tlakem ke kamenivu. Po dosažení maximálního napěnění dochází postupně ke kolabování bublin asfaltové pěny, které se svým povrchem snaží těsně přilnout především k jemným částicím kameniva, čímž vytvoří kapičky asfaltového pojiva, které se postupně spojují v tenký asfaltový film, jenž obaluje větší částice zrn kameniva. Zpěněný asfalt má v porovnání s asfaltovým pojivem či asfaltovou emulzí mnohem větší povrch a povrchové napětí, což umožňuje dostatečné obalení zejména drobných zrn kameniva s menším



množstvím asfaltu. V tomto ohledu je důležitý obsah jemných částic v navrhované směsi, jelikož směs funguje na principu obalení těchto částic pěnou a vzniklá malta následně bodově stmelí větší zrna kameniva. Část pojiva je samozřejmě zachycena i na povrchu větších zrn kameniva.

Kvalita asfaltové pěny je obecně vyjádřena jako poměr maximálního dosaženého objemu zpěněného asfaltu a objemu původního asfaltového pojiva při napěnění, tedy expanzním poměrem ( $ER_m$ ). U zpěněného asfaltu vyšší kvality by expanzní poměr měl dosáhnout nejméně hodnoty 8-15. Další kvalitativní parametr je definován jako poločas usazení pěny (HLT), což je doba v sekundách, za kterou u zpěněného asfaltu dojde ke snížení maximálního objemu o 50 %. Čím delší je poločas usazení pěny, tím kvalitnější je zpěněný asfalt, přičemž za vyšší kvalitu se považuje doba delší než 15 sekund (standardně by se hodnota  $t_{1/2}$  měla pohybovat v rozmezí 8-15 sekund). Poločas usazení pěny vyjadřuje stabilitu zpěněného asfaltu a je nepřímo úměrný k expanznímu poměru [Mofreh 2007, Iwański 2013, Jenkins 1999, Sunarjono 2008].

Expanzní poměr  $ER_m$  a poločas poklesu pěny HLT jsou závislé parametry, které jsou ovlivněny obsahem vody (FWC) dávkované do asfaltového pojiva, respektive typem pojiva a teplotou [Brennen et al., 1983], a také nastavením zařízení na výrobu pěny, tedy voda, tlak vzduchu, a velikost trysky [Castedo Franco a Wood, 1983]. [Ruchel a kol. 1982] uvedl, že velikost měřicí nádoby tvaru válce také ovlivňuje parametry zpěněného asfaltu. Měkčí asfalt a vyšší teplota obecně produkují lepší kvalitu pěny. [Abel 1978] dodává, že přijatelného pění je dosaženo pouze při teplotách nad 149 °C. Nicméně, dle [Ruenkrairergsa et al. 2004], měkčí asfalty a vyšší teplota ne vždy zaručí lepší kvalitu pěny, respektive pěna s nižší viskozitou a relativně nízkým povrchovým napětím bude s větší pravděpodobností náchylnější k předčasnému zhroucení před dosažením maximálního objemu, než pěna s vyšší viskozitou [He a Wong, 2006]. Dle [Jenkins 2000] kolabování pěny v závislosti na čase a snížené teplotě v důsledku kontaktu bublinek s okolním vzduchem či kamenivem je jedním z faktorů, které ovlivňují takový proces. Intenzita a účinnost efektu napěnění může být ovlivněna regulací základních fyzikálních podmínek jako je teplota, vlhkost a tlak [Iwański 2013]. Z hlediska dostatečně homogenní směsi je proto vedle expanzního poměru důležitá velikost a uspořádání mísícího zařízení (např. velikost vstřikovací zóny).

Typické vlastnosti zpěněného asfaltu, který ovlivňuje obsah zpěňující vody (FWC -% hmotnosti asfaltu), respektive maximální expanzní poměr  $ER_m$  a poločas poklesu pěny HLT [Jenkins et al, 1999]. Je možno zobecnit, že  $ER_m$  se zvyšuje se zvýšením FWC, zatímco hodnoty HLT mají tendenci klesat. Zpěněný asfalt, který dosahuje vyšší  $ER_m$  a delší HLT, představuje lepší vlastnosti takového pojiva.  $ER_m$  a HLT hodnoty vykazují vzájemně opačné trendy, a proto je obtížné stanovit optimum dávkované vody FWC. Dle [Sunarjono 2009], má kvalitní pěna obvykle expanzní poměr  $ER_m$  mezi 10 a 15. Existují různé empirické přístupy k návrhu pěny, jak je uvedeno v tabulce 4, které udávají limitní hodnoty  $ER_m$  a HLT. Tyto metody jsou především vhodné pro aplikace v terénu, ale jako nástroj pro výzkum výběru nejlepší kvality pěny na bázi optima FWC (mezi minimálními hodnotami  $ER_m$  a HLT) není přesný, respektive vzhledem k těmto parametrům není přímo úměrný. Dalším vhodným parametrem pro specifikaci zpěněného asfaltu je ten, který odráží schopnost pěny smíchat se s minerálním materiálem. Tento parametr byl definován jako Index napěnění FI (sec) [Jenkins 1999]. Expanzní poměr je měřítkem viskozity pěny, zatímco hodnoty, při níž se pěna zhroutlí je definována poločasem poklesu, což je indikace času, který je k dispozici pro míchání. Index FI je stanoven jako plocha pod křivkou představující expanzní poměr v čase, přičemž tato plocha může korelovat s povrchovou energií pěny. Nicméně, FI koncepce nelze použít pro všechny typy asfaltů, protože



s rostoucím  $ER_m$ , asfalty ne vždy vykazují stále snižující se HLT [Lesueur et al. 2004 a Wong 2006, Suda 2015], což znamená, že FI hodnoty se zvyšují při zvyšujícím se FWC. Dle [Jenkins K.J. 2000] by pěnový index by měl být  $>125$  sekund.

Zdroj	Limit pro expanzní poměr (-)	Limit pro poločas poklesu (s)
CZ (TP208)		
TRL Report 386 (Milton & Earland, 1999)	10	10
Wirtgen (Wirtgen Cold Recycling Technology 2012)		
Asphalt Academy (TG2) 2009	8	6
Asphalt Academy (TG2) 2002	7	7
CSIR (Muthen 1998)	10	12
(Ruckel et al,1983)	10 - 15	20
Austroroads (Austroroads technical report AP-T178/11)	15	30 - 45
(Chiu and Huang 2002)	8	8
(Sunarjono 2009)	10	6
(Maccarrone, 1994) - pro aktivovaná pojiva	15	60

Tabulka 4: Minimální kvalitativní parametry asfaltové pěny



## 7. Teoretický úvod do problematiky emulzí

Chemické látky dělíme na chemicky čisté látky a směsi. Směs je soustava složená z několika různých chemicky čistých látek. Vlastnosti směsí závisejí na jejich složení, dále na velikosti jednotlivých částic a na jejich vzájemném rozmístění. Obsahuje-li směs jednu látku, která je spojitá v celém objemu soustavy, v níž jsou ostatní látky rozptýleny, jedná se o disperzní soustavu. S disperzními soustavami se setkáváme v běžném životě prakticky neustále (např. kouř, mléko, krev, máslo, inkoust, ...). Jde o takové typy dvoufázových a vícefázových soustav, kde jedna či více fází je rozptýlena v disperzním prostředí. Disperzní prostředí tvoří spojitou část disperzní soustavy, v níž je rovnoměrně rozptýlena disperzní fáze. Obsahuje-li disperzní soustava dvě fáze, z nichž jedna tvoří disperzní fázi a druhá disperzní prostředí, pak nazýváme takovou soustavu heterogenní (nestejnorodou). Příkladem může být směs vody a menšího množství oleje. Protřepáním této směsi se kapičky oleje tvořící disperzní fázi rozptýlí ve vodě tedy disperzním prostředí. Mezi částicemi dispergované fáze a disperzním prostředím, které je obklopuje, existuje určitá hranice nazývaná fázové rozhraní. Obsahuje-li disperzní soustava dvě složky a jen jednu fázi, tvoří jedna složka opět disperzní fázi a druhá disperzní prostředí. Takový systém se nazývá homogenní, respektive stejnorodý. Složka disperzní fáze je ve složce tvořící disperzní prostředí rozptýlena v tak drobných částicích (atomy, molekuly, ionty), že zde neexistuje rozhraní mezi těmito částicemi a disperzním prostředím (například rozpuštěný cukr ve vodě).

Disperzní soustavy lze třídit dle různých kritérií, jako je velikost či tvar dispergovaných částic nebo dle skupenství disperzního prostředí a disperzní fáze. Částice disperzní fáze mohou být odlišně velké. Velikost částic disperzní soustavy vyjadřujeme tzv. stupněm disperzity, což je převrácená hodnota lineárního rozměru částice (průměr, délka hrany apod.). Je-li tedy disperzní fáze rozptýlena jemněji, říkáme, že má vyšší stupeň disperzity. Mají-li všechny částice disperzní fáze stejnou velikost, pak takové soustavy nazýváme monodisperzní. Vyskytují-li se naopak v soustavě částice s odlišnou velikostí, jedná se o soustavu polydisperzní. Pokud soustava obsahuje částice několika diskrétních velikostí, jedná se o soustavu paucidisperzní. Homodisperzní soustavy obsahují částice stejného tvaru, soustavy s částicemi různých tvarů se označují jako heterodisperzní soustavy. Podle velikosti dispergovaných částic disperzní fáze, lze disperzní soustavy rozdělit na disperze analytické ( $< 10^{-9}\text{m}$ ), koloidní ( $10^{-9}\text{m} - 10^{-6}\text{m}$ ) a hrubé ( $> 10^{-6}\text{m}$ ), s poznámkou, že tyto hranice jsou pouze orientační. Hrubé disperzní soustavy se ještě dále dělí podle velikosti částic na mikrodisperzní a makrodisperzní. Pro charakteristiku disperzních soustav dle velikosti se také používá kritérium podle Staudingera. Další možností je klasifikovat disperzní soustavy podle tvaru částic dispergované fáze na soustavy obsahující izometrické disperzní částice, které mají přibližně stejné všechny rozměry (korpuskulární). Dále soustavy obsahující anizometrické částice s jedním (fibrilární) nebo dvěma (laminární) převládajícími rozměry. Disperzní soustavy lze klasifikovat také podle skupenství dispergované a dispergující fáze. Mikrodisperzi může tvořit nejen kombinace pevné fáze s kapalnou, ale i jiné dvojice fází, s výjimkou plyn-plyn (v tomto případě vždy jde o molekulární disperzi neboli pravý roztok). Základní rozdělení disperzních soustav podle fází je uvedeno v tabulce 5, [Gruner 2007, Bartovská 2005, Kvítek 2007, Zatloukal 2011, Ševčíková 2010, Everret 1992].



	fáze dispergovaná	plyn	kapalina	pevná látka
fáze dispergující				
Plyn		Pravý roztok	Aerosol	Aerosol
Kapalina		Pěna	Emulze	Sol <sup>3</sup>
Pevná látka		Tuhá pěna	Tuhá emulze	Tuhý sol

Tabulka 5: Typy disperzních soustav dle typu fází

Emulze jsou heterogenní disperzní soustavy, které vznikají dispergováním vzájemně nesmíselných kapalin. Emulze je tedy dvoufázový systém, ve kterém jedna fáze existuje ve formě malých částic, pokrytých povrchově aktivní látkou, rozptýlených v celém objemu kontinuální druhé fáze. V soustavě bývají přítomny látky, schopné zabránit slévání dispergovaných kapiček, tzv. koalescenci (shlukování drobných kapek ve větší, případně až ve spojitou fázi). V praxi se setkáváme s přirozenými i uměle připravenými emulzemi, jak v potravinářském průmyslu, v průmyslu plastických (umělých) hmot, ve farmacii a kosmetice, ve stavebnictví, jakož i v mnoha dalších oblastech. Slovo emulze vzniklo z latinského slova *mulgeo* „dojit“, což je příhodné, protože typickou emulzí, se kterou se běžně setkáváme, je kravské mléko.

Emulze se obecně rozdělují dle polaritý disperzního podílu a prostředí, dle koncentrace disperzního podílu a dle velikosti částic disperzního podílu.

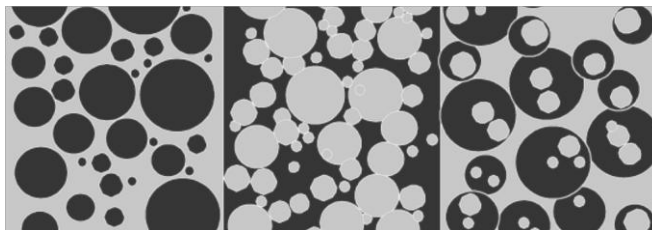
Dle polárnosti disperzního podílu a prostředí se emulze dělí na:

- Emulze přímé (prvního druhu)  
Disperzním prostředím je polární kapalina (obvykle voda). Jsou označovány jako emulze o/v (olej ve vodě).
- Emulze obrácené (druhého druhu)  
Disperzním prostředím je nepolární kapalina. Ty jsou označovány jako emulze v/o (voda v oleji).
- Emulze vícenásobné (multiple emulze)  
Mohou to být emulze typu O/V/O nebo V/O/V, popřípadě složitější. Emulze tvořící disperzní podíl je označována jako primární emulze a surfaktant použitý při její přípravě jako primární surfaktant. Tyto emulze jsou obvykle připravovány ve dvou krocích za použití dvou typů surfaktantu (hydrofilního a hydrofobního), mohou vznikat i inverzí fází. Tyto emulze se nejčastěji používají v potravinářském průmyslu.

Principiálně je možno připravit i emulze typu o/o (olej v oleji), tato možnost je však omezena značnou mísitelností organických kapalin, dále skutečností, že existuje jen málo látek, které jsou povrchově aktivní na rozhraní dvou organických kapalin, aby mohly působit jako stabilizátory těchto emulzí.

K odlišení výše uvedených typů emulzí je možno využít měření elektrické vodivosti emulze, která je dána vodivostí jejího disperzního prostředí nebo schopnosti emulze smáčet hydrofilní a hydrofobní povrch. Dále je možné emulze určovat dle schopnosti rozpouštět polární nebo nepolární barviva nebo pozorováním v ultrafialovém světle (olejová fáze fluoreskuje) [Kvítek 2007, Zatloukal 2011, Kvítek 2006, Ševčíková 2010, Everret 1992].

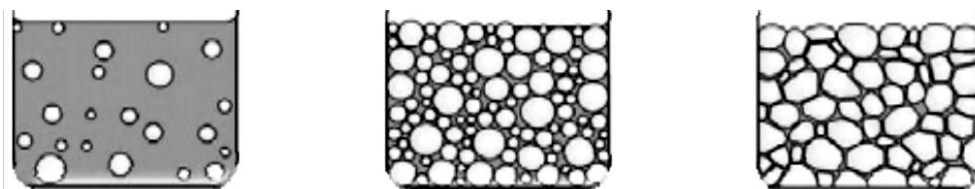
<sup>3</sup> Sol – označují se tak systémy obsahující kapalně disperzní prostředí (suspenze, koloidní roztok). Kapalně koloidní soustavy se nazývají soly. Soly se za jistých podmínek přecházejí na rosolovité útvary nazývané gely.



Obrázek 5: Emulze dle polárnosti disperzního podílu a prostředí [Solomon 2006]

Podle koncentrace disperzního podílu se dělí emulze na:

- Zředěné emulze  
Disperzní podíl zaujímá maximálně 2 % celkového objemu, velikost částic je zpravidla řádově  $10^{-7}$  m.
- Koncentrované emulze  
Disperzní podíl je tvořen nedeformovanými sférickými částicemi. V monodisperzních systémech může koncentrace disperzního podílu dosáhnout max. 74,02 % objemu, což odpovídá nejtěsnějšímu geometrickému uspořádání kulovitých částic. Polydisperzní emulze, kde malé částice mohou vyplnit prostory mezi velkými lze připravit i koncentrovanější emulzi.
- Gelovité (vysoce koncentrované) emulze  
Jsou částice disperzního podílu uloženy tak těsně, že se vzájemně deformují a nabývají tvaru mnohostěnu oddělených od sebe tenkými filmy koloidních rozměrů - vrstvičkami disperzního prostředí a surfaktantu. Koncentrace může dosáhnout až 99 % objemu.



Obrázek 6: Zředěné, koncentrované a gelovité emulze [Bartovská 2012]

Zvláštním druhem emulze je tzv. „kritická emulze“. Tato soustava tvoří obvykle dvě omezeně mísitelné kapaliny při teplotě blízké kritické rozpouštěcí teplotě, kdy mezifázové napětí na rozhraní fází je velmi malé ( $10^{-5}$  N.m<sup>-1</sup>) a k dispergování jedné kapaliny druhou stačí jen tepelný pohyb molekul. Tyto emulze mohou existovat jen v úzkém teplotním intervalu a jsou velmi nestabilní.

Dále se mohou emulze rozdělovat dle velikosti dispergovaných částic:

- Makroemulze  
Velikost částic se pohybuje v rozsahu  $2 \cdot 10^{-5}$  -  $10^{-7}$  m, jsou to neprůhledné termodynamicky nestabilní disperze. Jsou stabilizovány kineticky, což v důsledku znamená, že stabilita je ovlivněna především složením emulze, velikostí částic a způsobem jejich přípravy.
- Mikroemulze  
Mikroemulze tvoří přechod mezi emulzemi a micelárními koloidy. Velikost částic mikroemulzí se udává v rozmezí  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  m. Na rozdíl od většiny běžných emulzí jsou mikroemulze průhledné. Jsou to termodynamicky stabilní izotropní dispersní systémy. Mohou vznikat samovolně při vyšších koncentracích povrchově aktivní látky



a při velkém obsahu solubilizátu<sup>4</sup> v micelle. Jejich tvorbu usnadňuje přítomnost kosurfaktantu (polárně-nepolární organické látky, jejíž uhlovodíkový řetězec není dost dlouhý na to, aby mohla samostatně asociovat v micely, ale může vstupovat do struktury micel asociativních koloidů), který způsobuje další snížení mezifázového napětí. Tyto systémy se vyznačují slabou difundací a osmózou, dochází zde také k rozptylu světla (tzv. Tyndallův efekt).

#### - Nanoemulze

Emulze s typickým rozsahem velikostí molekul  $2 \cdot 10^{-7}$  –  $5 \cdot 10^{-8}$  m. Na rozdíl od mikroemulzí, které jsou také průhledné nebo průsvitné a jsou termodynamicky stabilní, nanoemulze jsou pouze kineticky stabilní a metastabilní. Nanoemulze lze ředit vodou, aniž by se změnila velikost dispergovaných částic. Vlastnosti nanoemulzí jako je dlouhodobá stabilita, textura a vzhled jsou z velké části ovlivněny velikostí částic olejové fáze. Výhody nanoemulzí ve srovnání s běžnými emulzemi jsou především malá velikost dispergovaných částic, která způsobuje značné snížení vlivu gravitační síly působící destabilizaci nanoemulzí. Brownův pohyb částic je potom dostatečný pro překonání gravitační síly a díky tomu v nanoemulzích dochází pouze omezeně k sedimentaci a krémování. V těchto emulzích se projevuje též osmotický tlak. Malá velikost dispergovaných částic také zabraňuje flokulaci, což zajišťuje, aby dispergované částice zůstaly v systému rozptýleny a nedocházelo k jejich separaci. Malé částice omezují rovněž možnost koalescence částic. Navíc tloušťka filmu povrchově aktivní látky (v poměru k velikosti dispergovaných částic) zabraňuje ztenčování nebo porušení filmu kapaliny vytvořeného mezi částicemi. Na rozdíl od tvorby malých částic submikronové velikosti v mikroemulzích, které vyžadují velké množství surfaktantu (20 % a více), postačuje pro přípravu nanoemulzí 5 – 10 % surfaktantu. Nevýhody těchto disperzních systémů jsou poměrně vysoké náklady na výrobu a problém se stabilizací vlivem Ostwaldova zrání, [Kvítek 2007, Zatloukal 2011, Kvítek 2006, Ševčíková 2010].

## 7.1. Obecné vlastnosti emulzí

### 7.1.1. Barva a vzhled

Barva a vzhled emulze závisí na koncentraci a velikosti částic disperzního podílu a na indexu lomu obou kapalných fází. I když obě složky, olej i voda, jsou před emulgováním čiré a bezbarvé, emulze jsou většinou kalné a opaleskující, koncentrovanější emulze jsou neprůhledné. Pouze při stejném indexu lomu obou fází jsou emulze průsvitné. Zákal je způsoben tím, že složky emulze mají různé indexy lomu. Zákal je tím intenzivnější, čím více se indexy lomu obou složek od sebe liší. Čím je emulze koncentrovanější a čím jemněji je vnitřní fáze rozptýlena ve fázi vnější, tím je zákal silnější. [Bartovská 2005, Kvítek 2006]

### 7.1.2. Viskozita

Z reologických vlastností je pro technické použití emulzí nejdůležitější jejich viskozita. Viskozita emulze je vlastnost hotové připravené emulze jako celku a je nutno ji odlišovat od viskozity jednotlivých složek. Viskozita emulze je na viskozitě jejích součástí závislá pouze částečně. Hlavními činiteli, které mají vliv na viskozitu hotové emulze, jsou:

---

<sup>4</sup> Solubilizace - proces, při němž jsou do micel surfaktantu včleňovány molekuly další látky (solubilizátu).



- viskozita vnější fáze,
- poměr množství obou fází,
- způsob přípravy, druh a účinek použitého surfaktantu, koncentrace a vzájemné působení částic,
- zdánlivý objem částic,
- vliv náboje částic.

V případě viskozity koncentrovaných emulzí závisí na poměru objemu obou kapalných fází než pouze na viskozitě disperzního prostředí, uplatňuje se také viskozita surfaktantu a vzájemné mezimolekulární interakce<sup>5</sup> (viz dále). Koncentrované emulzní systémy často vykazují neneutonské chování.

Obecně viskozita zředěných emulzí je vyjádřena Einsteinovou rovnicí, která je funkcí objemového zlomku disperzního podílu a nezávisí na stupni disperzity, [Bartovská 2005, Janalík 2002, Furlongs 1999].

### 7.1.3. Stabilita

Stabilita je ovlivněna reologickými parametry, závisícími na vlastnostech fázového rozhraní, viskozitě disperzního prostředí, dispergované fáze, hustotě, polaritě a pH, od kterého je odvislý elektrický náboj částic, které tvoří emulzi. Dalšími faktory je koncentrace částic, jejich distribuce, velikost a vzájemné mezimolekulární interakce. Stabilita závisí především na reologii fázového rozhraní. Tuhé viskózní filmy přitom poskytují emulzím vysokou stabilitu. Vlastnosti a koncentrace emulgátoru jsou hlavní faktory, které poskytují

---

<sup>5</sup> Mezimolekulární interakce se dělí [Bartovská 2012, Bartovská 2005]:

**Elektrostatické interakce** patří do skupiny silných mezimolekulárních interakcí. Elektrostatické interakce jsou určeny dle náboje, buďto přitažlivé či odpuzivé síly. Síla interakce se zmenšuje oddělováním atomů a může mít poměrně krátký či dlouhý dosah záležící na iontovém základě. Síla interakcí je proporcionální s rozměrem emulgovaných částic.

**Sterické interakce** jsou silné interakce mezi náboji při krátkých distancích mezi povrchy, které jsou pokryté dlouhými lineárními molekulami. Škála sterických interakcí vzrůstá s tloušťkou adsorbované vrstvy. Síla sterických interakcí vzrůstá s velikostí atomů a závisí na přesné molekulové charakteristice, tedy podpovrchové vrstvy.

#### **Hydrofobní interakce**

Při vysokých koncentracích elektrolytů je možné, že skupiny povrchových iontů specificky vážou ionty na své povrchy. Některé z těchto iontů obsahují velké množství vody a mohou proto způsobovat silné odpuzivé hydrofobní interakce. Specifické vázání závisí na poloměru a valenci zapojeného iontu. Ionty s malým poloměrem a vysokou valencí mají tendenci vázat méně silně, protože jsou obklopeny relativně silnou vrstvou těsně vázaných molekul vody a některé z nich se musí odstranit před tím, než může být iont adsorbován.

**Van der Waalovy síly** jsou přitažlivé nebo odpuzivé interakce mezi molekulami. Vznikají převážně v nepolárních molekulách, které neobsahují stálé dipóly, respektive jejich vazby nejsou polarizované. Interakce mezi dvěma kapkami oleje (nebo vody) je vždy přitažlivá, roste se vzrůstající velikostí kapky, závisí na fyzikálních vlastnostech kapek, na tloušťce a složení adsorbované vrstvy emulgátoru. Mezimolekulární van der Waalovy síly působí mezi všemi rozličnými druhy molekul v disperzních a kontinuálních fázích emulzí, což představuje síť koloidních van der Waalových sil mezi kapkami emulze.

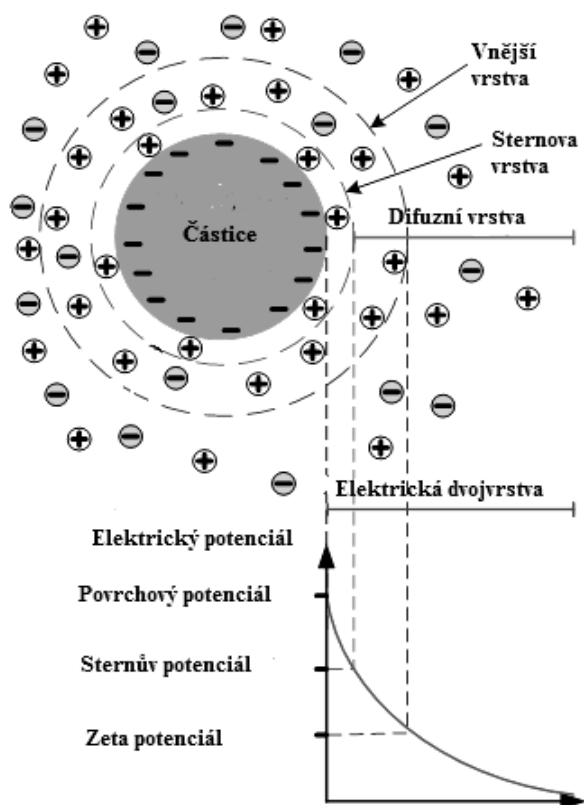
Existují tři typy:

- **Coulombická síla** je způsobená polaritou molekul, které se orientují tak, aby se přiblížily opačně nabitými póly.
- **Indukční síla** potřebuje ke svému vzniku trvale polarizovanou molekulu, která v nepolární molekule indukuje dipól, který pak působí na polární molekulu.
- **Disperzní (Londonova) síla** je nejvýznamnější z van der Waalových sil. Kmitáním elektronového obalu vzhledem k jádru vznikají dipóly, které přitahují nepolární molekuly.

emulzím dlouhodobou stabilitu, [Gruner 2007, Bartovská 2005, Kvítek 2007, Bartovska 2012].

#### 7.1.4. Elektrické vlastnosti

Většina heterogenních systémů s vodním prostředím nese na fázovém rozhraní elektrický náboj, který je odvislý na pH prostředí. Molekuly povrchově aktivní látky se svojí hydrofobní částí se uzavrou uvnitř částice a hydrofilní část vytvoří fázové rozhraní s určitým nábojem. Tento nabitý povrch přitahuje protionty. Náboje se navzájem neutralizují, přičemž vzniká útvar vytvořený z opačně nabitých vrstev (podobné kondenzátoru) - tzv. elektrickou dvojvrstvu (viz obrázek 7) [Kvítek 2007, Bartovska 2012, Everret 1992].



Obrázek 7: Elektrický potenciál

[[http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=electric\\_double\\_layer.png](http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=electric_double_layer.png) - překlad do češtiny]

Mezi nabitým povrchem částice a kontinuální fází je rozdíl elektrických potenciálů. Vnitřní vrstva přitahuje opačně nabité ionty, které vytvoří vnější (kluznou) vrstvu, ale s opačným znaménkem. Tyto vrstvy jsou k sobě přitahovány elektrostatickými a adsorpčními silami (těsně přiléhající vrstva, tzv. Sternova vrstva je tvořena pouze ionty vázanými adsorpčními silami o nižší plošné hustotě náboje  $Q/A$ ). Zbytek plošného náboje vnitřní vrstvy je neutralizován ionty, které jsou vázány elektrostatickými silami a tvoří difuzní vrstvu. Potenciál klesá nejprve prudce na hodnotu potenciálu Sternovy vrstvy a pak pozvolna k nule. Představy o struktuře elektrické dvojvrstvy, formulované na základě analýzy elektrostatických interakcí a tepelného pohybu iontů v elektrické dvojvrstvě, jsou formulovány několika modely (Helmholtzův model, Gouyův-Chapmanův model, Sternův

model), ovšem jen do určité míry. Za předpokladu, že ionty jsou elektricky nabitě body bez vlastních rozměrů, kde jejich koncentrace ve vnější vrstvě plynule klesá se vzdáleností od nabitého povrchu. Stav této vrstvy je dán rovnováhou mezi elektrostatickými silami a tepelným pohybem iontů. Potom je změna potenciálu rovna:

$$V = V_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{l}\right) \quad (4)$$

kde

$$l = \left(\frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot k_B \cdot T}{e^2 \cdot \Sigma(z_i^2 v_{i0})}\right)^{1/2} = \frac{\text{konst}}{I^{1/2}} \quad (5)$$

$e$	elementární náboj [C]
$z_i$	počet elementárních nábojů nesených iontem $i$
$v_{i0}$	koncentrace iontů $i$ v objemové fázi [mol/m <sup>3</sup> ]
$I$	iontová síla roztoku [-]
$k_B$	Boltzmannova konstanta [JK <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_0$	permitivita vakua [C <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> J <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_r$	relativní permitivita prostředí [-]
$V_0$	potenciál nabitého povrchu [V]
$V$	změna potenciálu se vzdáleností $x$ od povrchu částice [V]

Pokud se elektrická dvojrivrstva ocitne v oblasti rychlostního gradientu, dvojrivrstva se rozdělí a vnitřní plusová část vnější vrstvy vázaná adsorpčními silami spolu s některými ionty, které patří k difuzní části dvojrivrstvy, zůstávají na povrchu částičky, přičemž zbytek difuzní vrstvy se pohybuje s kontinuální fází. Potenciál na pohybovém rozhraní se nazývá zeta potenciál (viz níže). Elektrická dvojrivrstva přitom úzce souvisí se stabilitou emulze. [Bartovská 2005, Hefer 2005, Bartovská 2012, Everret 1992]

## 7.2. Povrchově aktivní látky (surfaktanty)

Surfaktanty jsou povrchově aktivní látky (dříve nazývané též povrchově aktivní látky PAL či tenzidy). Tyto látky snižují povrchovou či mezifázovou energii, a proto se samovolně koncentrují ve fázovém rozhraní. Surfaktanty mění energetické poměry na fázovém rozhraní, což se projevuje snížením povrchového napětí kapalin v důsledku adsorpce surfaktantu na fázovém rozhraní. Surfaktanty snižují napětí už v nízkých koncentracích. Jejich molekula má difilní charakter. Tyto molekuly (uhlíkatý řetězec o vhodné délce) obsahují hydrofilní (lipofilní) část a hydrofobní (lyofobní) část. Tyto látky mají asociační schopnosti, při určité, tzv. kritické micelární koncentraci (KMK), jejich molekuly asociují za vzniku větších agregátů (micel)<sup>6</sup>. Surfaktanty se vyznačují dispergační schopností, rozumíme tím např. emulgační a suspenzační vlastnosti. Základní vlastností surfaktantů jsou dány jejich hydrofilně – lipofilní strukturou s asymetrickým dipolárním charakterem. V molekule surfaktantu je vždy lokalizována polární a nepolární část různého charakteru. Z těchto základních vlastností surfaktantů vyplývají další vlastnosti a účinky, jako jsou

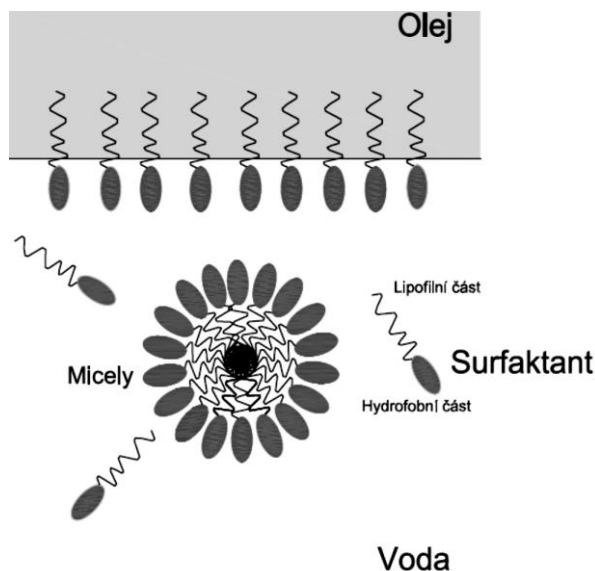
<sup>6</sup> Micely jsou shluky molekul surfaktantů dispergované v kapalném médiu. Typická micela ve vodném roztoku vytváří agregáty s hydrofilní částí molekuly orientovanou do vodného prostředí a hydrofobní částí skrytou uvnitř. Nejčastěji mají micely přibližně kulovitý tvar. Tvar a velikost micely jsou ovlivněny jak geometrií molekuly surfaktantu, tak i vlastnostmi roztoku.



detergentní (čistící), emulgační, pěnicí, smáčecí, solubilizační, suspenzační nebo stabilizační vlastnost.

Surfaktanty lze klasifikovat podle řady kritérií, například dle:

- charakteru hydrofilní složky,
- hydrofilně-lyofilní rovnováhy (HLB) v molekule surfaktantu,
- původu.



Obrázek 8: Tvorba micel

Podle charakteru hydrofilní složky se dělí surfaktanty na:

Iontové – ve vodě disociují na příslušný povrchově aktivní iont a malý protiiont. Rozlišujeme potom:

- **anionické (anionaktivní)** - Aktivní složku surfaktantů tvoří anionty, které mohou vytvářet ve vodných roztocích hydrofilní části molekul. Jejich hydrofobní část je tvořena uhlovodíkovým řetězcem mastné kyseliny, hydrofilní část pak může být tvořena disociovanou karboxylovou, sulfátovou a sulfonovou skupinou. Anionaktivní surfaktanty - jsou nejpoužívanější a nejrozšířenější. Patří mezi ně i nejstarší a dosud používané surfaktanty - mýdla (např. soli mastných kyselin, sírany mastných kyselin, sulfonové deriváty a organofosfáty).
- **kationické (kationaktivní)** - Je to povrchově aktivní látka, která ve vodném roztoku disociuje za vzniku kladně nabitých iontů (např. soli alkaminů, alkylované kvarterně amoniové soli, heterocyklické kvarterně amoniové soli, oxidy aminů, petrochemické deriváty, nedusíkaté deriváty).
- **amfolytické** - ve vodě podle hodnoty pH získávají kladný nebo negativní náboj, také ale mohou být elektricky neutrální (např. deriváty betainu, deriváty imidazolu, deriváty aminokyselin).

Neiontové (neionogenní) - nedisociují ve vodě, nemají výrazně lokalizovaný náboj hydrofilní skupiny. Její polární část je zde dána například větším počtem kyslíkových atomů v molekule. Aby mohl být surfaktant aplikovaný ve vodném prostředí, musí být hydrofilní část dostatečně polární a velká (např. estery glykolu nebo polyethylenglykolu, estery sacharózy, estery sorbytu, estery mastných kyselin, alkylnolpolyoxyethyleny, alkanolamidy a kopolymery oxidů).



Obrázek 9: Klasifikace dle charakteru hydrofilní složky

Způsob kvantitativního popisu schopnosti surfaktantu stabilizovat určitý typ emulze je dán hodnotou hydrofilně - lipofilní rovnováhy molekuly surfaktantu. Hodnota HLB charakterizuje poměr vlivu hydrofilní a lipofilní části molekuly surfaktantu na její vlastnosti. Je úměrná poměru rozpustností surfaktantu ve vodné a v olejové fázi. Vysoké hodnoty HLB mají hydrofilní surfaktanty s velkou rozpustností ve vodě, které obvykle dobře stabilizují emulze O/V, zatímco surfaktanty s nízkou hodnotou HLB jsou málo rozpustné ve vodě a dobře stabilizují emulze typu V/O. Nejvyšší hodnoty HLB odpovídají surfaktantu, které vytvářejí micely. Podle HLB hodnot lze rozdělit surfaktanty na:

- emulgátory [v/o] (HLB 2-6),
- smáčedla [o/v] (HLB 8-10),
- detergenty [o/v] (HLB 12-14),
- solubizátory [o/v] (HLB 16-18).

Hodnoty HLB mohou být počítány podle různých empirických vztahů a jsou vyjadřovány čísly v nastavitelných stupnicích. [Gruner 2007, Solomon 2006, Zatloukal 2011, Ševčíková 2010]

### 7.2.1. Tvorba micel

Při vzniku micely se molekuly surfaktantu orientují svými hydrofilními částmi molekuly k molekulám vody, hydrofobní části se uzavírají uvnitř micely. Primární tvar micel při jejich vzniku je kulovitý. Micely mohou vznikat až od určité koncentrace surfaktantu v roztoku. Aby tedy vznikla micela, musí být rozpustnost surfaktantu vyšší než kritická micelární koncentrace (KMK). Některé surfaktanty jsou však za laboratorní teploty málo rozpustné a koncentrace surfaktantu v roztoku nedosahuje hodnoty KMK. Proto je u nich nutné zvýšením teploty zvýšit rozpustnost nutnou pro dosažení tvorby micel. Teplotu, při které rozpustnost surfaktantu dosáhne KMK, označujeme jako Krafftův bod. Při vzniku micel se velmi výrazně mění některé fyzikálně-chemické vlastnosti roztoku surfaktantu [Zatloukal 2011, Ševčíková 2010].

### 7.2.2. Příprava emulzí

Emulze se obecně připravují mechanickou dispergací disperzního podílu v disperzním prostředí, za přítomnosti příslušného emulgátoru tzv. emulgací. Provádí se často třístupňově. Při primární emulgaci se vytvoří hrubá emulze s relativně velkými částicemi dispergované fáze, na kterou navazuje emulgace sekundární, při které dochází k úpravě velikosti částic. Druhý krok neboli úprava původní hrubé emulze se označuje též jako homogenizace. Homogenizace značně ovlivňuje stálost emulze. Třetím krokem je proces zajišťující stabilitu emulze - stabilizace [Zatloukal 2011, Ševčíková 2010].

### 7.2.3. Emulgace

Důležitým faktorem ovlivňujícím účinnost emulgace je teplota při míchání. Minimální teplota je dána bodem tání olejové fáze, při emulgaci musí být dispergovaná fáze v tekutém stavu. Při vyšší teplotě se snižuje mezifázové napětí a snižuje se i viskozita obou fází. Maximální teplota je dána vlastnostmi emulgátoru. Emulgace je velmi snadná, poklesne-li mezifázové napětí [Zatloukal 2011, Ševčíková 2010].



#### 7.2.4. Homogenizace

Pojem homogenizace představuje jednu nebo více následujících operací - směšování, mixování, dispergaci, míchání atd. Stávající postupy nebo metody homogenizace je možné rozdělit do tří hlavních kategorií, a to na ultrazvukové, tlakové a mechanické [Zatloukal 2011, Ševčíková 2010].

#### 7.2.5. Stabilizace

Všechny emulze jsou agregátně nestálé. Aby byla zajištěna dostatečná životnost emulze, je zapotřebí systém stabilizovat. V případě emulzí se rozlišuje stabilita termodynamická a kinetická. Termodynamická stabilita emulze je v přímé souvislosti s pravděpodobností, že daný proces rozpadu emulze proběhne, zatímco kinetická stabilita vyjadřuje stálost, jakou systém zachovává rozdělení koncentrace kapek, respektive rychlost vlastního rozpadu emulze. Stabilita emulzí je ovlivněna vnějšími vlivy. Destabilizace je spojena s poklesem volné entalpie, respektive Gibbsovy energie [Zatloukal 2011, Ševčíková 2010].

#### 7.2.6. Způsoby stabilizace emulzí

Aby byla zajištěna dostatečná životnost emulze, je zapotřebí vhodným způsobem systém stabilizovat. Způsob stabilizace závisí na koncentraci emulze.

Stabilizace elektrickou dvojrstvou

- Stabilizace elektrickou dvojrstvou přichází v úvahu pouze u zředěných emulzí, kde srážky částic nejsou příliš časté. Rozpustnost kationtů a aniontů je různá ve vodné a olejové fázi - obvykle jsou anionty více rozpustné v olejové, kationy zase více ve vodné fázi. Odpudivé síly mezi kapičkami brání koalescenci tím účinněji, čím větší je tloušťka dvojrstvy a čím větší je náboj kapky.

Stabilizace pomocí emulgátoru

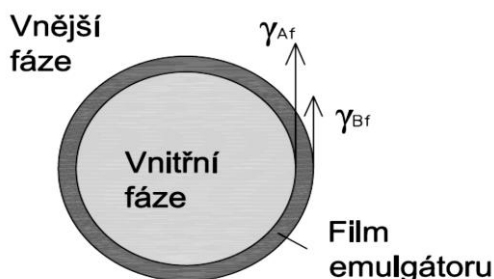
- V koncentrovaných emulzích, kde stabilizace kapek pouhým elektrickým nábojem nepostačuje, je třeba stabilitu emulzí zajistit přidáním vhodné třetí složky, tedy emulgátoru. Ten vytváří na povrchu kapek ochrannou vrstvu, která při tepelné nebo sedimentační srážce dvou kapiček zabrání jejich koalescenci. Emulgátor proto musí splňovat tyto požadavky:
  - hromadit se na rozhraní obou fází;
  - vytvářet na rozhraní soudržný, elastický film, který však nejeví adhezi k filmům vytvořeným okolo jiných kapiček.

Povaha emulgátoru určuje nejen stabilitu, ale i typ emulze. Pro všechny kategorie emulgátorů platí obecné, tzv. Bancroftovo pravidlo, které říká, že ve stabilizované emulzi je spojitě disperzní prostředí tvořeno tou fází, k níž má použitý emulgátor za daných podmínek větší afinitu. Většina používaných emulgátorů může být zařazena do jedné ze tří skupin:

- Asociativní (micelární) koloidy, tj. mýdla a smáčedla (např. soli vyšších mastných kyselin - alkalické, rozpustné ve vodě, soli vícemocných kovů a stříbra, ve vodě nerozpustné, ale rozpustné v nepolárních kapalinách, alifatické sulfonové kyseliny)
- Makromolekulární koloidy - hydrofilní (např. proteiny, polysacharidy) i rozpustné v nepolárních rozpouštědlech.
- Jemné nerozpustné prášky, částečně smáčené oběma fázemi; hydrofilní, více smáčené vodou (např. alkalické sírany železa, mědi, niklu, síran olovnatý, oxid

železitý, hlinitokřemičitany) a hydrofobní (např. saze, uhelný prach, PbS, HgS, AgI, HgI<sub>2</sub>).

Spektrum emulgátorů je široké a jejich funkční vlastnosti jsou definovány hodnotou HLB a to v rozmezí od 1 do 14. Nízkou hodnotu HLB mají emulgátory pro vytváření emulzí typu v/o, vysokou hodnotu HLB mají zase emulgátory pro vytváření emulzí typu o/v. Emulgátory jsou molekuly složené z hydrofilní a hydrofobní části. Tvoří ochranný film bránící koalescenci kapek olejové fáze, spojují obě složky (olej a vodu) a emulzi tak stabilizují. [Bartovská 2005, Zatloukal 2011, Ševčíková 2010, Bartovská 2012]



Obrázek 10: Schéma fázového rozhraní  $\gamma_{Af} > \gamma_{Bf}$

### 7.3. Rozrážení (zánik) emulzí

K zániku emulzí se používá různých postupů, které lze rozdělit na metody [Zatloukal 2011, Ševčíková 2010]:

- Mechanické  
Odstředování, šlehání, rytmické vibrace, filtrace materiálem, který smáčí jen disperzní prostředí.
- Tepelné  
Zahříváním emulzí na vysoké teploty pod tlakem, nebo naopak vymrazováním.
- Chemické  
Vysolení emulgátoru, to znamená snížení jeho rozpustnosti přidáním velkého množství roztoku elektrolytu<sup>7</sup>.  
Přidáním emulgátoru pro podporu vzniku emulze opačného typu - je-li přidán ve správném množství, nenastane inverze, ale vznikne nestabilizovaný samovolně se rozrušující systém.
- Elektrické  
Stejnoseměrné napětí (220 - 600V) - vhodné pro emulze typu o/v; kapénky se oddělují od vodné fáze elektroforézou.  
Střídavé napětí (11000V) - změny směru elektrického pole vyvolávají prudké srážky kapének a tím dojde k zániku emulze typu v/o.

### 7.4. Rozpad emulzí

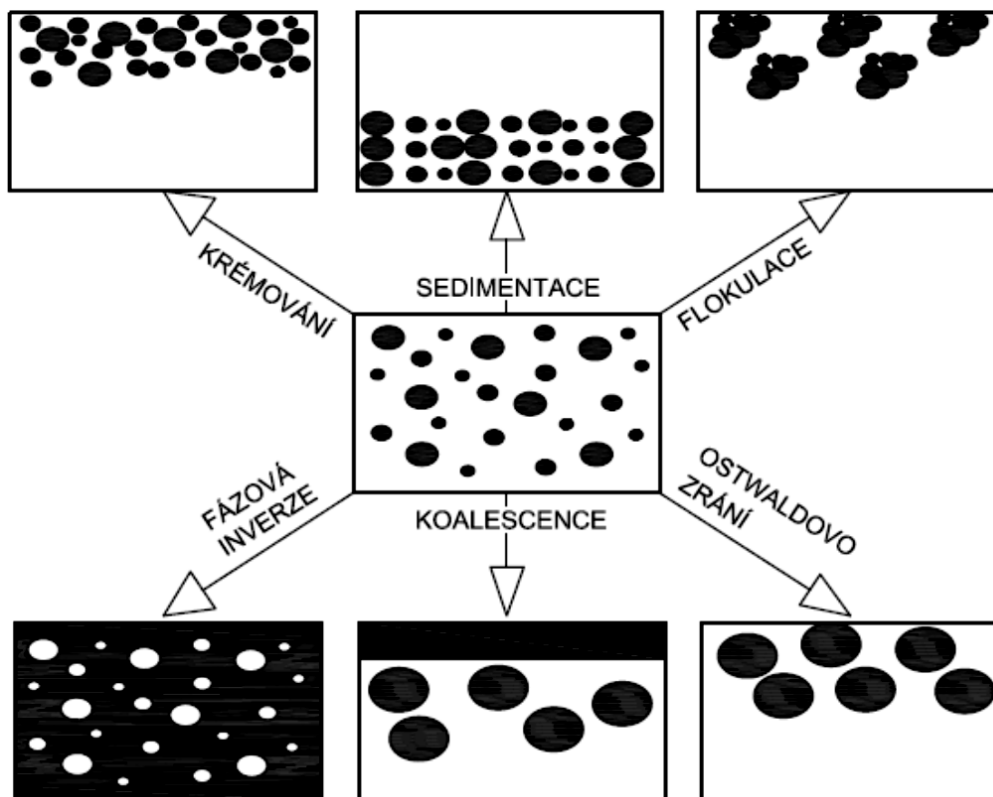
Rozpad emulzí závisí na několika dále uvedených faktorech:

- rozdílná hustota, velikost částic, disperzní podíl a disperzní prostředí;
- velikost přitažlivých sil působící proti silám odpuzivým;
- rozpustnost rozptýlených kapiček;
- stabilita tenkých tekutých vrstev mezi disperzním podílem, které určují srůstání;

<sup>7</sup> Elektrolyt - roztok, který vzniká disociací iontových sloučenin v polárním rozpouštědle.

- fázová inverze;
- způsob skladování a teplota.

Zánik emulze, tj. separace na mikroskopické fáze je proces spontánní, spojený s poklesem volné entalpie. Souběžně i zde může probíhat několik různých pochodů např. koagulace, opalescence, sedimentace apod. Procesů týkajících se rozpadu emulzí je několik, jak uvádí obrázek 11 [Bartovská 2005, Solomon 2006, Zatloukal 2011, Ševčíková 2010, Bartovská 2012, Tharwat 2009].



Obrázek 11: Procesy rozpadu emulzí [Tharwat 2009 - překlad do češtiny]

#### 7.4.1. Krémování a sedimentace

Tento proces vychází z působení vnějších sil, což jsou obvykle síly gravitační a odstředivé. Může dojít k tomu, že se tyto síly převyšují. V tom případě se tepelný pohyb dispergovaných částic (Brownův pohyb) a koncentrační gradient hromadí v systému a to má za následek, že se větší částice začnou pohybovat rychleji a to směrem buď k vrcholu, nebo na dno nádoby. Krémování lze charakterizovat jako shromažďování dispergovaných částic v horní části systému z důvodu jejich nižší hustoty, zatímco sedimentace je opačný děj zapříčiněný vyšší hustotou částic, než je hustota spojité fáze. Rychlost usazování je vysvětlena Stokesovým zákonem, [Bartovská 2005, Solomon 2006, Zatloukal 2011, Ševčíková 2010, Bartovská 2012].

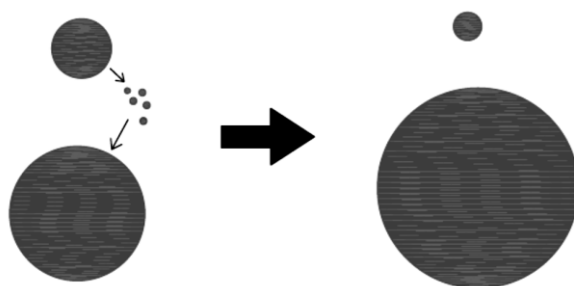
#### 7.4.2. Flokulace

Podstatou tohoto procesu je shlukování částic disperzního podílu do větších celků, přičemž jednotlivé částice neztrácejí svou integritu (svůj individuální charakter) - depleční flokulace. Je to výsledek působení van der Waalsových a sterickejších sil. Velikost těchto sil nám určuje charakter flokulace, která může být buď pevná, nebo křehká. K flokulaci může dojít tehdy, je-li odpor mezi kapkami malý a není tudíž schopen je udržet v takové

vzdálenosti, ve které je van der Waalsova přitažlivost slabá. Flokulaci ovlivňuje míra gravitační separace ve zředěných emulzích, což snižuje jejich trvanlivost. Způsobuje také výrazné zvýšení viskozity emulze, [Bartovská 2005, Solomon 2006, Zatloukal 2011, Ševčíková 2010, Bartovská 2012].

#### 7.4.3. Ostwaldovo zrání

Tento efekt je založený na konečné rozpustnosti kapalně fáze. Rychlost celého procesu závisí na rozpustnosti disperzního podílu v disperzním prostředí, na difúzním koeficientu a na mezifázovém napětí. Kapaliny, které jsou označovány, jako nemísitelné bývají často vzájemně rozpustné. Emulze bývají obvykle polydisperzní a obsahují menší kapičky, které jsou daleko více rozpustné než kapičky větší. Časem menší kapičky zanikají a jejich molekuly jsou rozptýlené do objemu, kde se stanou součástí větších kapek, [Bartovská 2005, Solomon 2006, Zatloukal 2011, Ševčíková 2010, Bartovská 2012].



Obrázek 12: Ostwaldovo zrání [autor: Bfigura 02:07, 14 November 2007 (UTC)]

#### 7.4.4. Koalescence

Souvisí s tzv. řídnutím a narušením tekutého filmu mezi kapkami, až dojde k přímému kontaktu částic. Výsledkem je fúze dvou či více částic, čímž dojde k vytvoření větší částice o větším průměru a tedy nižší povrchové energii a to má za následek rychlejší sedimentaci nebo krémování emulze. Ve výjimečných případech tzv. srůstání dojde k úplnému rozdělení emulze na dvě oddělené kapalně fáze. Závisí spíše na silách kratšího dosahu a dochází buď k srůstání povrchu, nebo kolísání tenké vrstvy, což má za následek přiblížení kapek. Van der Waalsovy síly jsou silné a zabraňují rozdělování kapek. Kinetiku koalescence lze popsat pouze pro monodisperzní systémy. Koalescenci lze měřit řadou technik, které jsou buďto časově náročné (klasické počítání částic v mikroskopu) nebo náročné na měřicí techniku (rozptyl světla, NMR, ultrazvuková spektrometrie, měření elektrických pulzů atd.).

Poměrně jednoduché metody jsou založeny na měření rozptylu světla emulzí, respektive jejich turbidity. Tyto techniky vycházejí ze skutečnosti, že s postupující koalescencí dochází ke změně turbidity. V určitém časovém intervalu je časová změna turbidity lineární, [Bartovská 2005, Solomon 2006, Zatloukal 2011, Ševčíková 2010, Bartovská 2012].

#### 7.4.5. Fázová inverze

Je proces, v němž dochází k výměně mezi disperzní fází a disperzním prostředím. Například se může emulze typu O/V časem nebo změnou podmínek přeměnit na emulzi typu V/O. V mnoha případech je fázová inverze přechodný stav při výrobě násobných emulzí. Existují dva typy inverzí [Bartovská 2005, Solomon 2006, Zatloukal 2011, Ševčíková 2010, Bartovská 2012]:

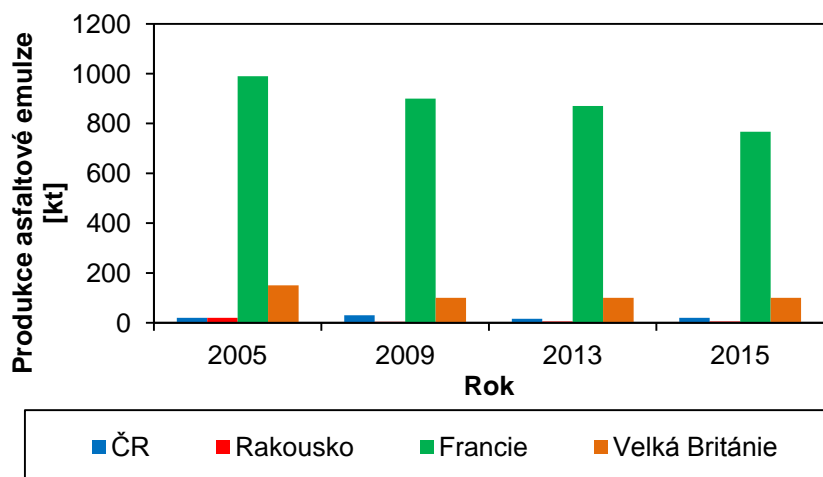


- Katastrofická fázová inverze (CPI) - je navozena zvýšením podílu dispergované fáze a tento děj je okamžitý.
- Přechodová fázová inverze (TPI) - dochází k ní, když afinita surfaktantu vodné fáze se vyrovná s afinitou k fázi olejové. Změny v hodnotě hydrofilně lipofilní rovnováhy je možné vyvolat změnou teploty nebo přidavkem surfaktantu s jinou hodnotou HLB.

## 8. Asfaltové emulze

### 8.1. Historie

První pokusy použití asfaltové emulze, respektive disperze těžkého ropného oleje a vody proběhly na začátku 20. století ve Francii. Uvádí se, že v 1903 ve městě Beaulieu-sur-Mer se použil těžký petrolejový olej zmýdelněný čpavkovou vodou a v roce 1904 byl použit „emulgovaný petrolejový olej“ na závodním okruhu v Ardenes, aby se zabránilo víření prachu na dráze. Dalším krokem k vývoji asfaltových emulzí bylo využití anionického surfaktantu - mýdla<sup>8</sup>. První patent na výrobu asfaltových emulzí získal anglický chemik Hugh Alan Mackay v roce 1922. Do konce druhé světové války byly tyto anionaktivní emulze používány především jako nátěry prováděné za studena, které měly nahradit dehtové nátěry. Emulzní technologie však byla citlivá na povětrnostní podmínky (děšť), a proto byly asfaltové emulze jen málo používány. Anionaktivní asfaltové emulze a asfalt obalovaný za horka do roku 1953 zaujímaly přibližně 50 % celkové výroby asfaltových pojiv. Nejvíce byl používán ředěný asfalt<sup>9</sup>. V roce 1954 se staly dvě důležité technologické události v oblasti asfaltových pojiv. Na trhu se objevila kationaktivní asfaltové emulze a ve větší míře se začaly používat asfaltové hutněné směsi prováděné za horka. Kationaktivní asfaltové emulze prakticky nahradily v dalším průběhu času zcela anionaktivní asfaltové emulze, zejména z důvodu stejných výrobních nákladů (i když v počátcích tomu bylo naopak a kationaktivní emulze se vyznačovaly zvýšenými náklady na výrobu) a lepšího přizpůsobení klimatickým podmínkám. Anionaktivní emulze od roku 1973 nezaznamenaly prakticky žádný technický rozvoj, na druhé straně se kationaktivní asfaltové emulze do současnosti s výbornými výsledky zařadily mezi nejrozšířenější technologie údržby povrchu vozovek, čímž také vytlačily ředěné asfalty. Od 80. let minulého století se technologie nátěrů zdokonalovala, ale také se nacházely další možnosti využití asfaltové emulze pro stavební úpravy, jako jsou směsi obalované za studena, recyklační technologie prováděné za studena, emulzní kalové vrstvy „Slurry Seal“, postřiky (regenerační, infiltrační, spojovací), stabilizace, či nástřiky pro uchycení osiva na svazích, [Gruner 2007, James 1988].



Obrázek 13: Produkce asfaltové emulze ve vybraných zemích [zdroj: EAPA - Asphalt in figures]

<sup>8</sup> Mýdlo - směs hydratovaných alkalických solí vyšších alifatických karboxylových kyselin (mastných kyselin).

<sup>9</sup> Ředěný asfalt - asfalt, jehož viskozita je upravena přidáváním zpravidla organickým ředidlem.





Na obrázku 13 jsou uvedeny hodnoty produkce asfaltové emulze, přičemž v současnosti dochází k mírné stagnaci produkce asfaltových emulzí. Největšími producenty asfaltových emulzí jsou USA a Francie. První výroba asfaltových emulzí (kationaktivních) v Československu začala v roce 1969 v PARAMO Pardubice, [Cizmar 2009].

## 8.2. Složení asfaltové emulze

Asfaltové emulze jsou, dle polárnosti, emulze typu o/v s obsahem 40 - 75 % asfaltu, 0,1 - 2,5 % emulgátoru, 25 - 60 % vody plus vedlejší přidávané složky (chlorid vápenatý, fosforečnan sodný, adhezivní přísady, peptizační činidla, latex a zahušťovadla), které ovlivňují požadované vlastnosti. Asfaltové emulze jsou hrubé heterogenní disperzní systémy, které mají hnědou barvu s konzistencí podobné šlehačce podle množství a velikosti částic asfaltu. Kapky asfaltu jsou v rozsahu od 0,1-20  $\mu\text{m}$  v průměru a některé kapky mohou obsahovat menší kapičky vody uvnitř. Proto je lépe asfaltové emulze popisovat jako emulze typu V/O/V. Tato uzavřená voda může ovlivňovat fyzikální vlastnosti emulze, [Gruner 2007, James 1998, Solomon 2006].

## 8.3. Emulgátory

Emulgátory jsou látky, které umožňují nebo ulehčují tvorbu asfaltové emulze. Většina asfaltových emulgátorů je vyráběna z obnovitelných zdrojů jako přírodní tuky, oleje a dřevo z papírenského průmyslu (talový olej). Jakmile se vytvoří asfaltové částice, musejí se tyto částice stabilizovat. Částice asfaltu se stabilizují přidáním emulgátoru. Hlavní skupiny emulgátorů jsou spojené s párovými ionty jako je chlorid či sodík, [Gruner 2007]. Velikost a znaménko náboje na kapce může být měřeno a je vyjádřeno jako zeta potenciál. Emulgátor adsorbovaný na povrchu kapek poskytuje elektrickou a sterickou energetickou bariéru, která odpuzuje jiné částice asfaltu a pomáhá tak předejít přiblížení těchto částic. I když tato energetická bariéra bude překonána a kapky začnou flokulovat, film emulgátoru na povrchu zabrání jejich sloučení. Flokulace a srůstání asfaltových částic může také vyplývat ze sedimentace, ohřívání či zmrazování asfaltové emulze. Obecně je větší množství emulgátoru v emulzi příhodnější, aby poskytovalo dobrou stabilitu při skladování a dopravě, ovšem větší množství emulgátoru negativně ovlivňuje vlastnosti emulze. Dle druhu emulgátoru rozeznáváme asfaltové emulze kationaktivní (asfaltové částičky mají kladný náboj), anionaktivní (asfaltové částičky mají záporný náboj) a neiontové (asfaltové částičky nenesou náboj). Dle tohoto vyplývá, že anionaktivní a kationaktivní emulze se v žádném případě nesmějí smíchat, poněvadž by došlo k rozdělení fází. Typický emulgátor má hydrofilní hlavu a lipofilní ocas zahrnující 12-18 atomů uhlíku. Vlastní volba emulgátoru je odvislá od požadované stability asfaltové emulze. Emulgátory jsou často dodávány ve vodě nerozpustné formě, proto výrobce musí použít kyselinu (HCl, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) nebo zásadu (NaOH, KOH), přičemž tak umožní vzniku vodorozpustného mýdla. Volba kyseliny nebo zásady ovlivňuje pH a další vlastnosti emulze. Kationaktivní emulze mají kyselé pH a anionaktivní emulze mají zásadité pH, [James 1998, Solomon 2006, Dybaiski 1976].

V případě anionaktivních emulzí se nejčastěji používají alkalické soli mastných a živcových kyselin. Všeobecný vzorec pro tato mýdla je potom [Gruner 2007, James 1988]:



kde,

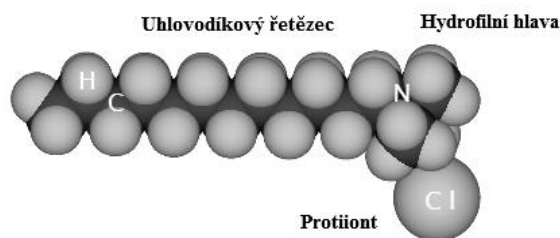
- R charakteristický uhlovodíkový řetězec, který vytváří nepolární lipofilnou část molekuly emulgátoru  
 COO polární hydrofilní část molekuly  
 Na protiiont

V kationaktivních emulzích se používají soli mastných dlouhořetězcových amínů, polyamínů či imidazolů a kvartérně amoniových solí. Kationtová mýdla jsou nejčastěji připravované z amínů a kyseliny:



kde,

- R charakteristický uhlovodíkový řetězec, který vytváří nepolární lipofilnou část molekuly emulgátoru  
 NH<sub>3</sub> polární hydrofilní část molekuly  
 Cl protiiont  
 HPO<sub>3</sub> protiiont



Obrázek 14: Molekula emulgátoru

[[www.onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec102.pdf](http://www.onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec102.pdf)]

#### 8.4. Asfaltové pojivo

Asfalty jsou tmavé plastické až tuhé podíly, koloidního charakteru, pocházející ze zpracování ropy. Obsahují asfalteny, ropné pryskyřice a nejtěžší ropné olejové podíly - malteny, karbidy a karbeny. Z chemického hlediska je asfalt směs vysokomolekulárních uhlovodíků a heterosloučenin, které obsahují vedle vodíku a uhlíku v menší míře i síru, kyslík, dusík a některé kovy. Nejjednodušším způsobem získání asfaltů z ropy je odpaření těkavých podílů. Proběhne-li tento proces samovolně v přírodě, vznikají přírodní asfalty. Podle způsobu výroby se rozlišují destilační asfalty, získané jako destilační zbytky při vakuové destilaci ropy. Velmi rozšířené jsou také (polofoukané - semi-blown) asfalty získávané oxidační dehydrogenací vakuových zbytků nebo různých směsí vakuových zbytků a vakuových destilátů vzdušným kyslíkem. Mezi další typy asfaltů patří krakovací asfalty z krakovacích procesů nebo propanové asfalty získávané extrakcí z těžkých podílů ropy. Vlastnosti takto získaných asfaltů je možné dále upravovat navazujícími procesy a technologiemi jako jsou: modifikace polymery, rozpouštění a emulgování. Nejrozšířenějšími asfalty podle způsobu použití jsou silniční asfalty, používané na stavbu a údržbu vozovek v dopravním stavitelství. Takto se spotřebují až tři čtvrtiny zpracovávaných asfaltů. U silničních asfaltů záleží na vlastnostech pojiva i kameniva, zejména na jejich vzájemné přilnavosti.

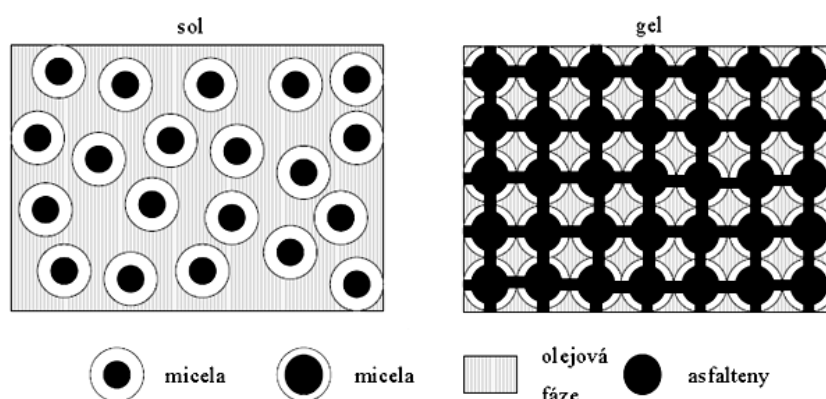
Při výrobě asfaltových emulzí se používá silniční, ředěný, fluxovaný či polymerem modifikovaný asfalt. Vhodný výběr asfaltu má za cíl přizpůsobit asfaltovou emulzi

požadavkům a potřebám, účelu, použití a vlastní technologii zpracování. Vlastní výběr je víceméně ponechán na výrobcí. Pro výrobu emulze se nejčastěji používá asfalt gradace 35/50, 70/100, 160/220 mm<sup>-1</sup>. K vytvoření asfaltové fáze ve výrobním zařízení se k asfaltu přidávají ztekucovače (asfalty o nízké viskozitě) a ředidla (oleje z destilačního zbytku), které umožní snížit kinematickou viskozitu asfaltu, která při výrobě musí být menší než 200mPa.s, [Gruner 2007, Erbitu 2002].

#### 8.4.1. Reologické vlastnosti asfaltových pojiv

Asfalt jako celek představuje koloidní systém skládající se z micel asfaltenů přibližně sférického, plochého či válcovitého tvaru, které jsou dispergovány v ropných uhlovodících. Asfalteny, jsou látky s velkou molekulovou hmotností a polaritou, tvořící jádra micel, které tvoří shluky. Méně aromatické a méně polární pryskyřice s menší molekulovou hmotností než asfalteny, jsou na těchto jádrech adsorbovány. Vnější obal těchto micel tvoří uhlovodíky a micely pak bez ostrého rozhraní přecházejí v disperzní olejové prostředí. První popis koloidní struktury asfaltu je obecně přisuzovaný Nellensteynovi v roce 1923. Nellensteyn říká, že asfalteny jsou uzavřené struktury volných uhlovodíků, přičemž tvoří koloidní suspenzi uvnitř maltenové fáze. To bylo podporované Tyndallovým efektem a pozorováním Brownova pohybu asfaltenů v roztoku [Erbitu 2002, Lesueur 2009].

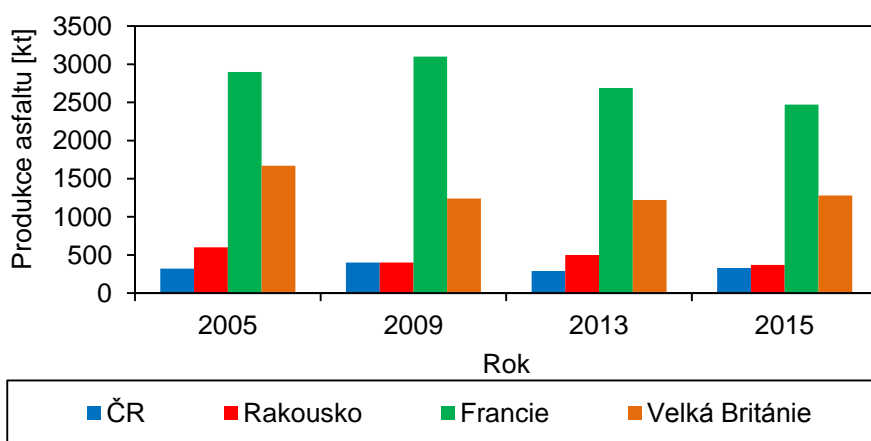
Vlastnosti asfaltu se dají odvodit od jeho koloidní struktury, např. obsah asfaltenů je určitým kritériem pro bod měknutí. Konzistenci asfaltu zase vyjadřuje velikost micely, přičemž čím je micela menší, tím je asfalt méně viskózní. I olejová fáze maltenů tu hraje svou roli. Když například malteny obsahují kromě cykloalkanických uhlovodíků hodně aromátů, pak se svými vlastnostmi přibližují aromatickým asfaltenům. Asfalteny jsou v takovém případě rozpuštěné v maltenové fázi. Vzniká tak koloidní roztok solového typu. K uvedenému solovému typu patří např. všechny destilované asfalty, které konzistenčně odpovídají malému obsahu asfaltenů. V důsledku malého obsahu asfaltenů se tyto asfalteny volně pohybují v olejové fázi. Bod měknutí solových asfaltů je ovlivněn hlavně tuhostí olejové fáze (maltenů). S jinou situací se setkáváme u oxidovaných asfaltů, u kterých mají oleje převážně parafinický a cykloalkanický charakter. Asfalteny zde už nejsou rozpustné v olejové fázi. Je to důsledkem přeměny původně přítomných aromatických uhlovodíku na pryskyřice a pryskyřic na asfalteny oxidací vzduchem. Zbytkový obsah pryskyřic už nepostačuje na tvorbu ochranné vrstvy asfaltenů. V důsledku toho dochází ve větší míře k interakcím mezi jednotlivými částicemi asfaltenů, vytváří se vnitřní síťová struktura a koloidní systém asfaltu přechází postupně ze solu na gel (obrázek 15).



Obrázek 15: Schéma koloidní struktury (destilovaného a oxidovaného) asfaltu [Erbitu 2002].

S tímto přechodem dochází ke změně užitečných vlastností asfaltu. Olejová fáze, která je především alkanického a cykloalkanického charakteru a řídké konzistence, vyplňuje mezery mezi síťovým seskupením asfaltů. Vysoký bod měknutí oxidovaného asfaltu je dán hlavně velkým obsahem asfaltů. Při porovnávání tažnosti destilovaného a oxidovaného asfaltu bylo zjištěno, že destilovaný asfalt tvoří velmi dlouhé vlákno, zatímco oxidovaný asfalt vykazuje velmi malé, případně žádné vlákno. Tuto skutečnost lze vysvětlit různým charakterem stavby micely. U oxidovaných asfaltů velké molekuly asfaltů odolávají přetváření, [Erbitu 2002].

Ovšem je nutné si uvědomit, nakoľik lze poznatky o reologických vlastnostech pojiva použít k předpovědi mechanických vlastností asfaltových směsí. Asfaltové pojivo má velký vliv na vlastnosti asfaltových směsí. Nesmí se však přeceňovat, protože podíl pojiva ve směsi je nízký, přičemž proměnlivé vlivy mezi kamenivem a asfaltem, zpracovatelnost a kvalita zhutnění jsou též velmi důležité parametry pro studium reologických vlastností asfaltových směsí.



Obrázek 16: Produkce asfaltu ve vybraných státech [zdroj EAPA]

### 8.5. Vedlejší složky asfaltové emulze

Při výrobě asfaltové emulze nebo se přidávají přísady, které zlepšují zpracovatelnost nebo výsledné vlastnosti asfaltové emulze.

#### Chlorid vápenatý, Chlorid sodný

Chlorid vápenatý je součástí kationaktivních emulzí pro snížení osmózy vody do asfaltu a minimalizace změn viskozity emulze. Obvykle se dává v množství 0,1 - 0,2 % hm. Obecně asfalty obsahují malé množství soli, což může vést k osmotickému bobtnání kapiček asfaltu v emulzi. Tento proces má za následek zvýšení viskozity emulze, často následovaný snížením při úniku soli z asfaltu. Chlorid vápenatý může také snížit sedimentaci emulzí zvýšením hustoty vodní fáze.

#### Tripolyfosforečnan sodný

Anionaktivní emulze mohou být citlivé na tvrdou vodu. Přidáním tripolyfosforečnanu sodného se změkčí voda a tím se získá kvalitnější emulze.

#### Zahušťovadla

Ve vodě rozpustné zahušťovadlo používané v množství 0,02 - 0,2 % může zvýšit viskozitu emulze a také může snižovat stékavost u mezerovitých asfaltových směsí.

#### Adhezivní přísady

Odolnost proti vodě je důležitou vlastností směsí. Tyto přísady se používají do anionaktivních i kationaktivních emulzí ke zvýšení přilnavosti asfaltu ke kamenivu.



### Peptizační činidla

Kvalitu emulze můžeme zlepšit peptizačním (plastifikačním) činidlem. Zlepšení zahrnuje lepší adhezi, menší velikost asfaltových kapek, což vede ke snížení sedimentace a zvýšení viskozity.

### Rozpouštědla

Rozpouštědla mohou být zahrnuta do emulze pro zlepšení emulgace.

### Latex

Modifikace polymery může zlepšit vlastnosti asfaltu z hlediska soudržnosti (koheze), dále zlepšuje odolnost vůči lámání při nízkých teplotách a odolnost proti tečení při vysokých teplotách. Latex je vodní disperzí polymeru (v podstatě přírodní nebo syntetický kaučuk), který se může použít k modifikaci emulzí. Latex existuje v kationtové, neionogenní a aniontové formě, přičemž je důležité, aby typ latexu byl v souladu s typem emulzí, [Gruner 2007, James 1998, Salomon 2006].

## 8.6. Proces štěpení asfaltové emulze

Asfaltová pojiva se upravují na emulze, zejména z důvodu zlepšení zpracovatelnosti. Ovšem asfaltová emulze se při aplikaci musí přeměnit zpět na souvislý asfaltový film, který plní úlohu pojiva. Emulze, po styku s kamenivem, vyloučí asfaltové pojivo, které na kamenivu vytvoří asfaltový film, který má tmelící a lepící funkci. Proces vylučování dispergované fáze se nazývá štěpení. Štěpení je nevratný proces, kterým se asfaltová fáze odděluje od vodní fáze. Jinými slovy je to konečná destabilizace emulze, při které nastává úplné rozdělení disperze na původní složky (asfalt a vodu). Tento proces začíná v okamžiku, kdy se asfaltová emulze dostane do styku s kamenivem a končí zbytkovým pojivem tvořícím neprchavé uhlovodíky. Štěpení můžeme zjednodušeně rozdělit na dvě základní fáze:

- Tuhnutí
  - Dekantace - adsorpce asfaltových částic na povrchu kameniva je velmi intenzivní vlivem elektroforézy, přičemž se vytlačuje voda z povrchu kameniva v důsledku vnitřní koheze pojiva, ke které dochází při slévání kapek asfaltu.
  - Flokulace
  - Koalescence
- Zrání - tímto se myslí vytvoření zcela slitého asfaltového filmu na povrchu kameniva, zrání je závislé na odpařování vody.

Některé tyto fáze mohou zahrnovat tyto procesy:

- Adsorpce emulgátoru na povrchu kameniva, respektive volný emulgátor (surfaktant) se adsorbuje rychle, ale emulgátor na rozhraní voda-asfalt se může oddělovat pomaleji. Snižování množství volného emulgátoru, který stabilizuje emulzi, způsobuje koalescenci, ale také zmenšení, či obrácení povrchového náboje na povrchu kameniva, které může zpomalit usazování.
- Pohyb kapek asfaltu k povrchu kameniva, respektive kapky asfaltu v emulzi mají svůj náboj a jsou přitahovány k povrchu kameniva s opačným nábojem (elektroforéza). Toto vede k usazování kapek asfaltu na povrchu kameniva, kde se kapky spojují, což vede k flokulaci a koalescenci, přičemž se vytváří na kamenivu asfaltový film.
- Změna pH, respektive některé druhy zásaditého plniva či pojiva (cement) mohou neutralizovat kyseliny v kationaktivní asfaltové emulzi, čímž dojde k destabilizaci. V jiných případech může kamenivo adsorbovat vodíkové ionty, což vede jen k méně výraznému nárůstu pH, ale dostatečně k destabilizaci emulze.



- Odpařování vody, respektive odstraňování vody ze shluku asphaltových kapek usazujících se na povrchu kameniva vede ke koalescenci [Gruner 2007, Solomon 2006, James 1988, Cyna 2006].

Rychlost štěpení určují fyzikálněchemické vlastnosti emulze a kameniva. Z hlediska emulze je rychlost štěpení závislá především na chemické povaze emulgátoru (zeta potenciál<sup>10</sup>), na míře dispergace asfaltu (s vyšší jemností je štěpení pomalejší) a na hodnotě pH vodní fáze (čím kyselejší nebo zásaditější emulze tím je štěpení pomalejší).

Asfaltové emulze se v dopravním stavitelství rozdělují dle štěpitelnosti a v souladu s ČSN EN 13808 na:

- rychloštěpné
- středněštěpné
- pomaluštěpné
- stabilní

Možnost regulace štěpení asfaltové emulze se v praxi dosahuje při přípravě asfaltového kalu přidáním regulátoru do záměsové vody. Regulátor je surfaktant přizpůsobený svojí koncentrací látek pro snadnou rozpustnost ve vodě. Přítomností regulátoru štěpení se zvyšuje množství volných iontů obklopující zrna kameniva. Zpočátku jsou volné ionty, které nejsou vázané na kapky asfaltového pojiva, adsorbovány na povrchu zrn, přičemž tímto se zpožďuje uvolňování iontů spoluvytvářející elektrickou dvojvrstvu micely, respektive obalu asfaltové kapky. Toto zpoždění má za následek prodloužení doby štěpení emulze. Dávkování regulátoru je závislé na teplotě a množství jemných zrn v kamenivu, [Gruner 2007, Solomon 2006].

### 8.7. Štěpení kationaktivní emulze

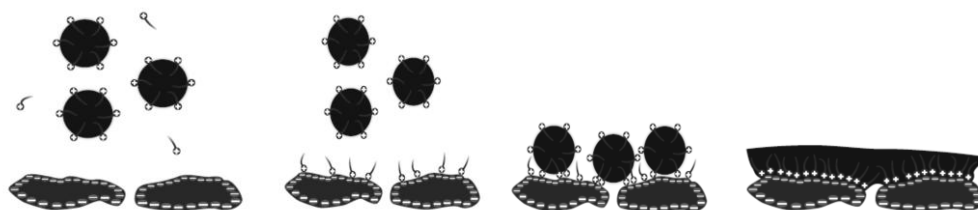
Stabilní kationaktivní emulze obsahuje ionty emulgátoru soustředěné na povrchu asfaltové fáze, které tvoří elektrickou dvojvrstvu. Ostatní molekuly emulgátoru se vyskytují v disperzním prostředí, přičemž v celém systému existuje rovnováha. Jakmile se emulze dostane do styku s látkou, která kladně nabitě ionty adsorbuje, naruší se rovnováha systému. Stejný případ nastane i v případě, pokud se emulze dostane do styku s látkou, která má záporně nabitý povrch. Nejdříve se adsorbují volné ionty emulgátoru z kontinuální fáze. S pokračující adsorpcí se uvolňují ionty z asphaltových kapek, čímž nastane počátek destabilizace elektrické dvojvrstvy, respektive začátek vlastního štěpení emulze. Pokud elektrická dvojvrstva obsahuje značný přebytek disociovaných molekul emulgátoru, celkově se proces štěpení zpomalí. Adsorpce kladných iontů záporně nabitým povrchem kameniva je z počátku kryta úbytkem iontů z kontinuální fáze. Až později nastává uvolňování iontů z povrchu asphaltových kapek. Jakmile se kapka asfaltu s kladným iontem přiblíží k povrchu kameniva vlivem silového působení, začne se opačným směrem přemísťovat voda obsahující ionty. Je důležité, aby se kapky asfaltu vybíjely jen při styku

---

<sup>10</sup> Zeta potenciál - charakteristika surfaktantu závislejší na koncentraci a pH. Při emulgaci se lipofilní část emulgátoru vetkne do povrchu asfaltové částičky a hydrofilní část zůstane na povrchu. Tato část má svůj určitý náboj, který získává i povrch asfaltové částičky. Naproti hydrofilní části emulgátoru je ve vodní fázi protiiont (párový iont), který má opačný náboj. Tento útvar se nazývá micela (viz výše). Kolem asfaltové částičky se vytvoří tzv. elektrická dvojvrstva. Takový obal má značnou viskozitu, pružnost a pevnost. Vznik takové micely je velmi důležitý pro stabilitu vlastní emulze. Mezi obalem povrchové vrstvy a Sternovou vrstvou existuje rozdílný potenciál, označovaný jako zeta. U kationaktivních emulzí bývá tento potenciál v intervalu 15 - 150 mV. Místo, kde je nulový potenciál se nazývá izoelektrický bod, přičemž je zde disperzní systém nejméně stabilní.

s povrchem kameniva a ne dřívě, jinak se voda uzavře pod asfaltovým filmem a dojde k pasivní adhezi. Dále pokud bude emulze obsahovat nedostatečné množství emulgátoru, či veliké kapky asfaltu může se zpomalit nebo naopak urychlit proces štěpení, což je nežádoucí.

Z hlediska chemických reakcí při štěpení kationaktivní emulze probíhá adsorpce polárních částí molekuly emulgátoru  $\text{NH}_3^+$  na povrchu zrna kameniva za tvorby soli nerozpustné ve vodě, která způsobí okamžitou adhezi na kamenivu, přičemž se současně vytlačuje a odpařuje voda. Na kyselém kamenivu vytváří ionty  $\text{NH}_3^+$  s ionty  $\text{SiO}^-$  ve vodě nerozpustné soli, čímž zaručuje použití na každém kamenivu. U zásaditého kameniva k tomu dochází s ionty  $\text{CO}_3^{2-}$ , [Gruner 2007, James 1988, Cyna 2006].



Obrázek 17: Postup štěpení kationaktivní asfaltové emulze [James 1998]

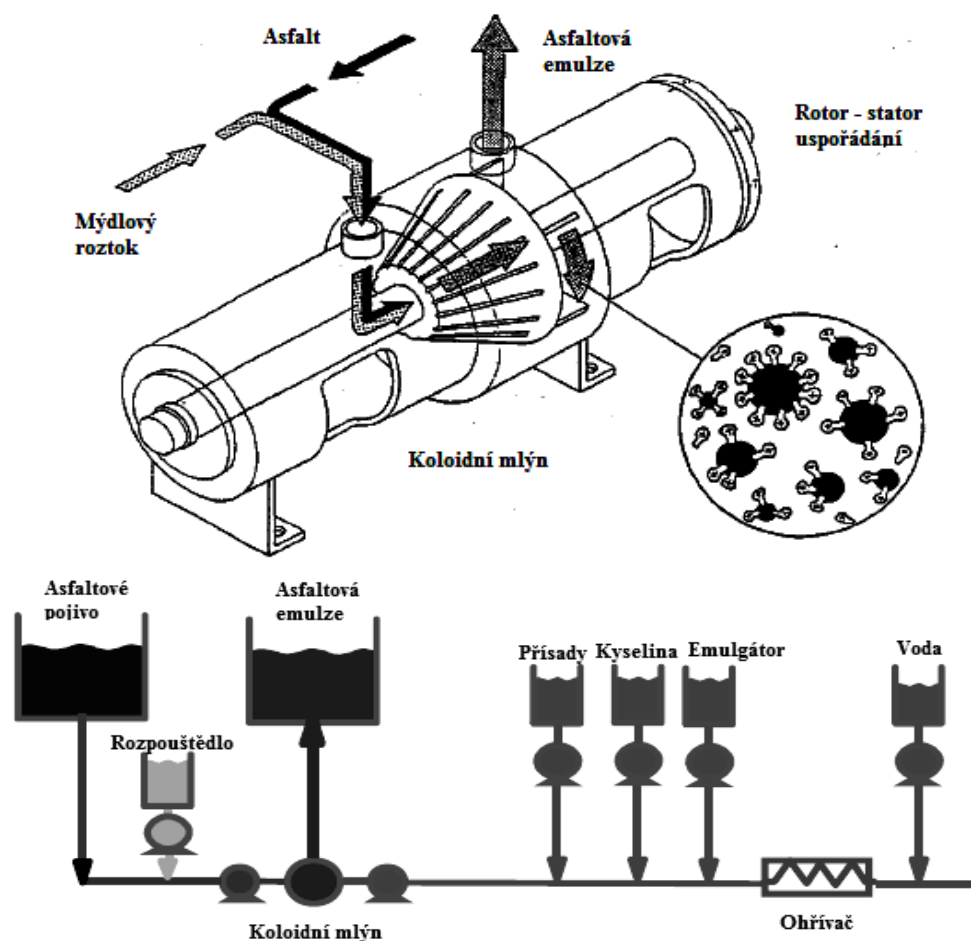
### 8.8. Štěpení anionaktivní emulze

V tomto případě proces štěpení začíná adsorpcí kontinuální fáze na povrchu kameniva. Na zásaditém kamenivu (kladně nabitý povrch) reagují polární části emulgátoru  $\text{COO}^-$  s ionty  $\text{Ca}^{2+}$ , čímž se tvoří ve vodě nerozpustná alkalická mýdla. S kyselým kamenivem anionaktivní emulze nereaguje, čili štěpení probíhá vlivem odpařování vody. Tyto emulze by se neměly používat na kyselém (bazickém) kamenivu, za vlhkého počasí a při práci vyžadující rychlé zrání, [Gruner 2007].

### 8.9. Výroba asfaltové emulze

Asfaltové emulze se vyrábějí chemickou, mechanickou emulzifikací nebo inverzí fází v emulgačním zařízení, do kterého vstupuje horký asfalt a voda s emulgátorem a případně dalšími přísadami pro úpravu vlastností či průběhu emulgace. Chemická emulzifikace se uplatňuje při výrobě anionaktivních emulzí. Horký měkký asfalt se přidává do zásadité vody při současném intenzivním míchání. Emulzifikace fázovou inverzí se používá zřídka, protože je to velmi citlivý proces. Připraví se emulze V/O přidáním roztoku hydroxidu a vody do horkého asfaltu. Dalším přidáváním vody náhle nastane katastrofická fázová inverze a emulze se zvrátí na emulzi typu O/V. Při mechanické emulzifikaci se horký asfalt disperguje pomocí koloidního mlýnu (viz obrázek 18) s velmi úzkými štěrbinami v kyselé nebo zásadité vodě. Mechanická emulzifikace je méně závislá na kvalitě asfaltu. Emulze jsou vyráběny mícháním horkého asfaltu s vodou, která obsahuje emulgátory plus přísady a s použitím dostatečně velké mechanické energie k tomu, aby se rozdělil asfalt na malé kapky a zároveň nedošlo ihned ke koalescenci. Rozdělení, či rozemletí asfaltu na drobné kapky je prováděno v koloidním mlýnu, kde se směs horkého asfaltu a vodní fáze vstřikuje mezi pohybující se rotor a stator. Kolový či konický rotor může mít rýhovaný nebo drážkovaný povrch, aby se docílilo turbulentního proudění, který rozráží vlastní asfaltovou fázi. Proti emulgaci působí vnitřní soudržnost, viskozita a povrchové napětí kapek asfaltu, protože brání vytvoření nového rozhraní. Menší kapky lze vytvořit použitím vysoké mechanické energie při rozrážení v koloidním mlýnu, nízkou viskozitou asfaltu a vhodnou volbou typu a koncentrace emulgátoru. Nejvyšší účinná teplota užívaná pro přípravu emulze k tomu, aby snižovala viskozitu asfaltu, na hodnotu viskozity 500 mPa.s nebo

menší hlavně z důvodu snadného čerpání asfaltu do koloidního mlýnu, je 110 -160 °C. Vodní fáze může být zahřátá na teplotu 30 – 70 °C zejména pro lepší rozpustnost emulgátoru. Výstupní teplota emulze, která hlavně určuje velikost částic je omezená na 95 °C v neutěsněných systémech, z důvodu nebezpečí vykypění emulze. V moderních provozech je možné dosáhnout výstupní teploty až na 120 °C, ale pouze v uzavřených systémech (pod tlakem). Z hlediska výroby asfaltové emulze, je nutné věnovat procesu výroby značnou pozornost, poněvadž ovlivňuje výsledné vlastnosti emulze. Proces výroby ovlivňuje velikost kapek (vzhledem k velikosti asfaltových částic existuje korelace k průměru rotoru, rychlosti otáček rotoru a k mezeře mezi statorem a rotorem) asfaltu, respektive viskozitu a stabilitu výsledné emulze [Gruner 2007, James 1998, Solomon 2006].



Obrázek 18: Koloidní mlýn a schéma uspořádání kontinuálního míchacího zařízení  
 [www.onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec102.pdf]

Postup vlastní výroby asfaltové emulze se skládá ze čtyř fází:

- příprava vodní (voda, kyselina, emulgátor plus přísady) a asfaltové (asfalt, ztekucovač, ředidlo) fáze;
- dávkování asfaltu a vodní fáze do emulgačního zařízení;
- emulgace;
- skladování.





Obrázek 19: Emulgační stanice Eurovia-Kolín - a) zásobník asfaltového pojiva, b) zásobníky s vodou, c) emulgační zařízení, d) koloidní mlýn, e) Laboratoř Eurovia - laboratorní emulgační zařízení<sup>11</sup>

Asfaltová emulze se připravuje buď v šaržovém nebo kontinuálním (viz obrázek 18) výrobním zařízení. V šaržovém zařízení se vodní fáze připravuje v nádrži, do které se dávkuje ohřátá voda, emulgátor, kyselina a jiné přísady, kde se vhodným způsobem míchá. Ohřátá asfaltová fáze a připravená vodní fáze se dávkuje do koloidního mlýna. Šaržová výroba umožňuje manuální kontrolu výroby. Při kontinuální výrobě se ohřívání vody a dávkování ostatních materiálů provádí plynule s použitím samostatných čerpadel pro každý materiál. Pro soustavu vodní fáze je navržen systém tak, aby zajistil dostatečný reakční čas pro rozpuštění emulgátoru ve vodě, předtím než se vodní fáze dostane do styku s asfaltem. Výroba se řídí automaticky s použitím průtokoměrů pro všechny materiály s výjimkou kyseliny, u které se kontroluje hodnota pH ve vodní fázi [Gruner 2007, James 1998, Solomon 2006].

Je nutné ještě zmínit, že při výrobě emulze, která má teplotu vyšší než 100 °C (obvykle při výrobě asfaltové emulze z modifikovaného pojiva) se musí emulze ochladit v chladiči, než je odvedena do skladovací nádrže. Získané teplo se předává do provozní vody, která je pak odváděna do nádrže s ohřátou vodou a je použita při výrobě vodní fáze.

Pro zajímavost je v tabulce 6 uvedena spotřeba paliv pro výrobu asfaltu a asfaltové emulze. Zde je jasně patrné, že energetická náročnost a zároveň i produkce CO<sub>2</sub> u asfaltové emulze je vyšší, nicméně v porovnání k aplikaci v rámci horkých a studených technologií je toto výrazně opačné, poněvadž u horkých technologií je nutný předehřev kameniva, a proto jsou studené směsi ve svém důsledku méně energeticky náročné.

<sup>11</sup> Poděkování patří společnosti Eurovia a.s., zejména panu P. Burešovi a panu J. Honzíkovi za vstřícný přístup, respektive zajištění a umožnění exkurze do emulgační stanice a laboratoře.

Spotřeba média	Typ pojiva		Asfalt vs.
	Asfalt	Asfaltová emulze	Asfaltová emulze
Zemní plyn (kg/t)	22,5	24,3	1,08
Topný olej (kg/t)	50,5	54,4	1,08
Uhlí (kg/t)	10,9	15,21	1,40

Zdroj: LCI Eurobitume

Tabulka 6: Porovnání spotřeby paliva pro výrobu asfaltu a asfaltové emulze

Jen pro zajímavost je vhodné uvést, že v rámci projektu SCORE byla vyrobena asfaltová mikroemulze s průměrnou velikostí částic disperzního podílu  $< 1 \mu\text{m}$ . Tato emulze byla testována v rámci použití ve směsích recyklace za studena [Lesueur 2008].

### 8.10. Stabilita asfaltové emulze

Mírou stability je ovlivněna skladovatelnost, přeprava, životnost a nepřímo vlastní přilnavost ke kamenivu asfaltové emulze. Obecně stabilitu disperzních soustav je možné modelovat teorií stability DLVO. Teorie stability heterogenních disperzních soustav s vodním disperzním prostředím byla vypracovaná v roce 1940 ruskými autory Děrjaginem a Landauem, a nezávisle na nich holandskými koloidními chemiky Verweym a Overbeekem, odtud DLVO. Tato teorie vychází z výpočtu závislosti energie vzájemného působení dvou elektricky nabitých částic na vzdálenosti jejich povrchů. O tom, zda jsou částice chráněny před koalescencí, rozhoduje suma odpuzivých elektrostatických sil s přitažlivými van der Waalsovými silami. Výsledná interakční energie (obrázek 20)  $u$  je pak dána vztahem:

$$u = u_{el} + u_{vdW} \quad (7)$$

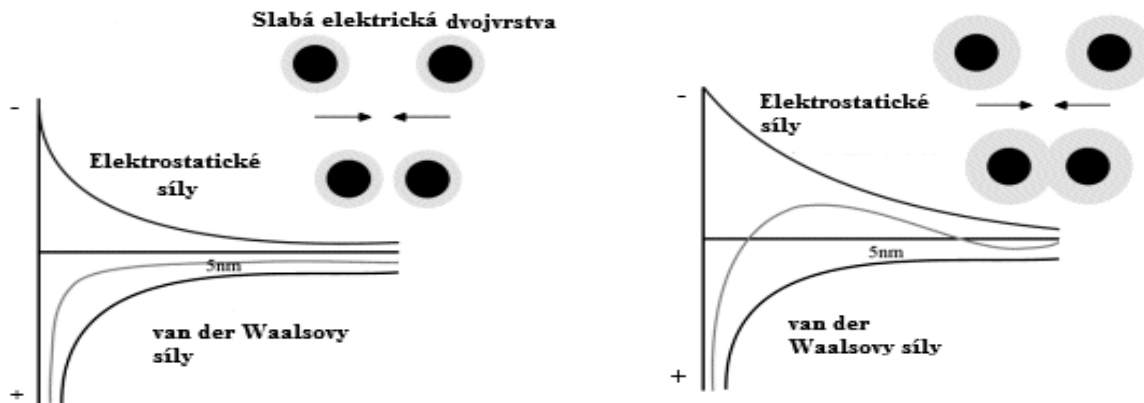
kde

$u_{el}$  příspěvek odpuzivých elektrostatických sil  
 $u_{vdW}$  příspěvek přitažlivých sil za předpokladů

Pro interakce mezi kulovitými částicemi:

$$u = 2 \frac{\varepsilon V_S^2}{l} \cdot \exp\left(-\frac{h}{l}\right) - \frac{A}{12\pi h^2} \quad (8)$$

$h$  vzdálenost povrchů přibližujících se kapek (m)  
 $A$  Hamakerova konstanta jejíž hodnota je dána chemickou povahou disperzního prostředí a disperzních částic  
 $\varepsilon$  permitivita prostředí ( $\text{C}^2\text{m}^{-1}\text{J}^{-1}$ )  
 $V_S$  potenciál Sternovy vrstvy (V)  
 $l$  efektivní tloušťka elektrické dvojvrstvy (m)



Obrázek 20: Výsledná interakční energie mezi kulovitými částicemi  
[[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=stabilization\\_of\\_colloids](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=stabilization_of_colloids)]

V upravené DLVO teorii je dále uvažován vliv hydrofobních mezimolekulárních sil (tyto interakce je nutné uvažovat, protože molekuly surfaktantu neobalí dokonale povrch asfaltových kapek, přičemž asfalt vykazuje hydrofobní charakter) a vliv poměru obsahů asfaltenů a naftových pryskyřic v asfaltu. Dále je nutné zmínit, že ačkoliv asfalt má hydrofobní charakter, tak v koloidní struktuře základní asfaltová hmota tvořená asfalteny a ropnými pryskyřicemi a těžkými ropnými olejovými podíly, kde asfalteny představují jádro micely obklopené malteny, které tvoří nasycené kyseliny, aromatické sloučeniny a pryskyřice (nepolární sloučeniny). Asfalteny a malteny tvoří vodíkové pouto, které při výrobě disperze je přerušeno a tak nejvíce ionizované sloučeniny (asfalteny a naftové pryskyřice), vytvoří přirozený surfaktant, čímž poskytují stabilitu disperze. Tyto amfifilní<sup>12</sup> molekuly se zpočátku chovají jako emulgátory a stabilizátory, přičemž poskytují elektrický náboj novým kapkám asfaltu. Znaménko tohoto náboje se mění dle pH, [Bartovská 2005, Salou 1998, Bartovská 2012].

### 8.11. Důležité vlastnosti asfaltové emulze pro použití v dopravním stavitelství

Důležité vlastnosti asfaltových emulzí pro vlastní použití v dopravním stavitelství lze rozdělit na vnitřní a vnější vlastnosti. Vnitřní vlastnosti asfaltové emulze jsou takové vlastnosti, které nejsou závislé na kamenivu, ke kterému se používají. Těmito vlastnostmi jsou především viskozita a stabilita při skladování. Vnější vlastnosti emulze jsou spojené s jejím použitím. Těmito vlastnostmi jsou rychlost štěpení a přilnavost.

Viskozita je důležitou měřitelnou veličinou, která vyjadřuje míru tekutosti. Viskozita je tedy fyzikální veličina, udávající poměr mezi tangenciálním (tečným) napětím ( $\tau$ ) a změnou rychlosti ( $v$ ) v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami ( $e$ ) při jejich vzájemném posunu.

$$\tau = \eta \frac{dv}{de} \quad (9)$$

kde,

- $\tau$  tangenciální napětí [Pa]
- $\eta$  součinitel viskozity nebo dynamická viskozita [Pa.s]

<sup>12</sup> Amfifilní – látky mající současně vlastnosti hydrofilní i lipofilní



$dv/de$  gradient rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu

Kinematická viskozita je definována:

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (10)$$

Kde,

$v$  kinematická viskozita [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$\rho$  hustota kapaliny v závislosti na teplotě [ $kg/m^3$ ]

Viskozita patří mezi reologické vlastnosti asfaltových emulzí, přičemž ji ovlivňují tyto faktory:

- vlastnosti dispergované fáze (původ asfaltu (obsah soli), gradace asfaltu, obsah ředidla),
- vlastnosti spojité fáze (typ a množství emulgátoru),
- zrnitost, respektive velikost asfaltových kapek,
- poměr fází (asfaltové emulze s obsahem asfaltu nad 70 % jsou velmi viskózní),
- teplota,
- chemické přísady (peptizační činidla),
- interní vodní fáze v disperzním podílu.

Nedávno bylo prokázáno, že asfaltové emulze jsou typu V/O/V. Asfaltové kapky obsahují interní vodní fázi. Surová ropa obsahuje soli a navzdory odsolování v rafinerii, nějaké soli zůstávají v asfaltu. Přítomnost této soli je využívána pro vysvětlení změny viskozity emulze, během uskladnění, vyplývající z osmotického transferu vody do asfaltu. To znamená, že disperzní fáze objemového podílu, který do značné míry určuje viskozitu, je vyšší než objem asfaltu o hodnotu odpovídající uzavřené vodní fáze. Tato interní fáze zvyšuje viskozitu emulze. Pro snížení viskozity se při emulgaci přidává chlorid vápenatý. Při aplikaci asfaltových emulzí je nutné vhodně zvolit viskozitu emulze, ovšem je nutné přihlídnout při použití též k přilnavosti, poněvadž u vysokoviskózních emulzí dochází ke snížení přilnavosti. Emulze s obsahem asfaltu do 60 % jsou dostatečně nízkoviskózní na to, aby se nemusely zahřívat, [Gruner 2007, Janalík 2002, Furlongs 1999, Derkach 2009]. Pro asfaltové emulze platí stejné zákonitosti jako pro ostatní emulze. Jsou to termodynamicky nestálé hrubé disperze. Tato nestabilita vyplývá ze samovolné snahy systému minimalizovat svojí povrchovou energii, přičemž se toto projevuje snižováním plochy fázového rozhraní mezi dispergovanou a spojitou fází. Důsledkem je separace jednotlivých složek na oddělené fáze. Důležitou předností asfaltové emulze je možnost skladování, přepravy a zpracování za studena. Teplota ovšem nesmí klesnout pod bod mrazu. Změny v emulzi nastávají v průběhu doby skladování<sup>13</sup>, přičemž nedosahují technicky rušivý rozsah a nevedou k zhoršení zpracovatelnosti. Dobu skladování (skladovatelnost) ovlivňuje především jemnost rozražení asfaltu v koloidním mlýnu a malý rozptyl rozměrů kapek asfaltu. Po překročení skladovatelnosti asfaltové emulze nastává sedimentace nebo krémování (vlivem rozdílných hustot fází v závislosti na teplotě). Vlivem sedimentace se částičky začnou shlukovat, respektive flokulovat. Tento proces je vratný pouze násilným rozmíšením. Poslední fází destabilizace asfaltové emulze je koalescence,

<sup>13</sup> Skladovatelnost je schopnost disperzního systému udržet se po určenou dobu v mezích kvalitativních změn vratného charakteru.



kdy se částice slévají, přičemž je toto důsledek nesouvislého fázového rozhraní povrchově aktivních látek. Koalescence však neznamená ještě úplné rozdělení obou fází. Ke koalescenci může dojít i v těchto případech, [Gruner 2007, Solomon 2006]:

- smíšení anionaktivní a kationaktivní emulze,
- zamrznutí emulze,
- vícenásobné zahřátí skladované emulze,
- smíšení asfaltových emulzí od různých výrobců,
- silné mechanické namáhání po delší dobu.

Štěpení je komplexní proces, který je závislý na řadě faktorů, a který lze ovlivnit už při výrobě asfaltové emulze, jak je popsáno výše.

Přilnavost (adheze) asfaltového pojiva ke kamenivu je zásadní vlastnost, která umožňuje použití asfaltových emulzí v dopravním stavitelství. Přilnavost mezi kamenivem a asfaltem závisí na protikladných vlastnostech obou povrchů. Neméně důležité je i chemické složení asfaltu, které je dané původem ropy a výrobním procesem. Přilnavost asfaltu ovlivňuje struktura asfaltenů, pryskyřic a také polární složky obsahující prvky O, N, S a kovy. Důležitou roli hrají mezimolekulární přitažlivé van der Waalsovy síly, elektrostatická přitažlivost nabitých částic asfaltu k plošnému náboji povrchu kameniva (nekovalentní vazby). Na rozdíl od systému asfalt/kamenivo vstupují do procesu přilnavosti ještě surfaktanty a voda (kyselá nebo zásaditá), které mohou podporovat adhezivní vlastnosti asfaltových částic. Z hlediska chemických vazeb hydrofilních částí surfaktantu za současného vytlačování vody nebo po odpaření vody zaplňují valenční vrstvu elektronového obalu kameniva, které tvoří sloučeniny udávající tomuto povrchu určitý náboj. Tedy v případě kationaktivních emulzí se v případě elektronegativního povrchu kameniva vytváří ve vodě nerozpustný uhličitán amonný  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  a v případě elektro pozitivního povrchu kameniva se vytváří křemičitan amonný  $(\text{NH}_4)_2\text{SiO}_2$ . Přilnavost ke kamenivu rozlišujeme na aktivní (asfalt vytlačí vodu z povrchu kameniva vlivem rozdílného povrchového napětí) a pasivní (ke smáčení povrchu kameniva asfaltem dochází až po odpaření vody). Dalšími faktory ovlivňující přilnavost je viskozita emulze, teplota prostředí, vlhkost kameniva či přítomnost jemných částic, [Gruner 2007, Hefer 2005].

ČSN 73 6132 stanovuje požadavky na kationaktivní asfaltové emulze, definuje výběr druhů a účel použití jednotlivých typů emulzí při výstavbě a údržbě vozovek a konstrukcí pozemních komunikací, letištních, dopravních a jiných ploch. Tato norma navazuje na harmonizovanou ČSN EN 13808 z roku 2013 výběrem specifikovaných druhů a tříd vlastností pro jejich technické požadavky.

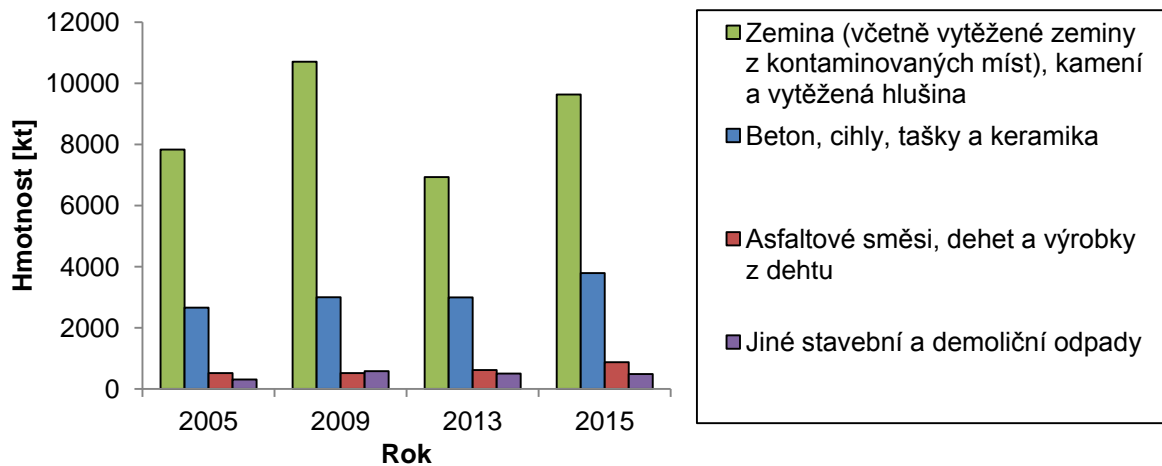


## 9. Technologie recyklace za studena

V České republice je zejména v posledních patnácti letech věnována pozornost technologii recyklace za studena vlivem zaměření silničního stavitelství právě na oblast oprav a rekonstrukcí, než nové výstavby dopravní sítě. K dalšímu podnětu rozvoje recyklačních technologií došlo zejména přijetím legislativních opatření podporující koncepci trvale udržitelného rozvoje [MŽP 2010]. Technologie recyklace za studena na místě umožňuje snižovat spotřebu neobnovitelných zdrojů při maximálním využití materiálů z původní konstrukce vozovky nebo jiných odpadních materiálů, které ve většině případů končí na deponii nebo jsou využity při rekultivacích, [Stehlík 2015, Fiedler a kol. 2005]. Recyklací za studena se rozumí úprava vlastností materiálů vyfrézovaných ze stávajících vozovek. To znamená drcení a třídění R-materiálu, případně doplnění nestmelených materiálů a stmelení pojivem. Tato technologie se dnes stává trendem z důvodů, zejména nízkých nákladů na výrobu (cca nižší o 40 - 50 % než při použití konvenčních metod rekonstrukcí vozovek), rychlosti provádění, šetrnosti k životnímu prostředí, snížení vlastní energetické náročnosti výrobního procesu a v neposlední řadě snížení produkce skleníkových plynů [Souček a kol. 2011]. Dále okolí staveniště není zatížené v souvislosti s odvozem a dovozem stavebního materiálu hlukem a vibracemi. Další potenciální výhodou studené recyklace je využití pasivačního účinku asfaltové emulze či zpěněného asfaltu, který obaluje minerální složku směsi, čímž se zabrání pronikání nebezpečných látek do okolního prostředí. Tohoto lze využít zejména při rekonstrukcích vozovek, kde byla použita dehtová či asfaltodehtová pojiva [Townsend 1999].

Sledování a hodnocení recyklovaných směsí včetně pochopení jejich fyzikálně mechanických vlastností je důležité z hlediska správného návrhu, zpracování a dosažení správné funkce a životnosti ve vozovkovém souvrství. Ovšem je nutné se zabývat také parametry vstupních materiálů.

Stavební a demoliční odpady v zemích EU tvoří cca 25 - 35 % všech produkováných odpadů, což je značná část vzhledem k tomu, že tyto materiály pocházejí z neobnovitelných zdrojů [Eurostat 2012]. Přírodní kamenivo zabudované do konstrukce nepodléhá degradaci, proto je možnost tento materiál efektivně použít při rekonstrukcích, jako plnohodnotný stavební materiál. Jiný pohled na původní konstrukci vozovky je jako na potencionální ložisko přírodních surovin. Pro opětovné a plnohodnotné využití recyklovatelných stavebních materiálů je nezbytné zajištění jejich kvality tak, aby mohly nahradit, pro daný účel použití, přírodní nerostné materiály. Množství recyklovatelného materiálu vyprodukovaného ČR je pro příklad uvedeno na obrázku 21. Dle [Škopán 2010] se v ČR relativní podíl produkce recyklovatelného materiálu na celkovém množství vytěženého přírodního kameniva od roku 2003 trvale mírně snižuje. Přitom jde o materiály, které se při dodržení technologie jejich výroby a zejména technologie při aplikaci vyrovnají přírodnímu kamenivu.



Obrázek 21: Stavební a demoliční odpad v ČR (zdroj ČSÚ, ARSM, MPO)

V současnosti se přístupy jednotlivých zemí výrazně liší, přičemž převládá posuzování kvality recyklovaných směsí za studena na základě pevnostní charakteristiky, které ovšem nepostihuje reálné chování směsi v konkrétní konstrukci. Jen v omezenější míře je věnována pozornost deformačním charakteristikám typu modul tuhosti nebo životnosti zhuťené směsi vyjádřené únavovými charakteristikami. Jinými slovy převládá empirický přístup a zjišťování jediné hodnoty zkoumané vlastnosti (zpravidla pevnosti) materiálu za specifikovaných podmínek, tedy při definované jedné konkrétní teplotě, stáří vzorku apod. Z hlediska trvanlivosti vyjádřené odolností směsi proti účinkům vody nebo proti kombinovanému účinku vody a mrazu sice byly v některých technických předpisech převzaty postupy tradičních zkoušek používaných u asfaltových směsí nebo směsí stmelovaných hydraulickými pojivy. Nicméně podrobnější ověření platnosti a správnosti takto nastavených zkušebních postupů pro směsi recyklace za studena s různými typy pojiv a dalších používaných materiálů existují, přičemž vznikla celá řada významných mezinárodních evropských projektů a aktivit, které se dotýkají jednak celé oblasti recyklace silničních materiálů a samostatně pak i recyklace za studena. Byly realizovány projekty SAMARIS, SCORE, DIRECT-MAT či ReRoad v rámci 5.-7. rámcového programu EU, projekt RECYPMA či CoRePaSol v rámci programů ERANET-Road. Dále aktivity rozvíjené v rámci jedné z technických komisí RILEM, pracovní skupiny při ISAP, manuál pro recyklaci vozovek, pravidelně upravovaný a zpřesňovaný společností Wirtgen Group, nebo např. manuál recyklace vozovek, zpracováváný jihoafrickým týmem prof. K. Jenkinse. Stěžejním cílem veškerých výzkumných aktivit je lepší charakteristika vlastností a chování směsí recyklovaných za studena, která je zcela zásadní pro nalezení optimální metodiky pro navrhování a zkoušení těchto materiálů. Do budoucna se pak očekává jednotné zavedení této metodiky v jednotlivých zemích Evropské Unie.

Recyklace za studena rozlišuje dvě základní technologie, které se liší svou hloubkou provádění, charakterem recyklovaného materiálu a druhem použitého pojiva. První technologie je společná recyklace krytu a podkladu vozovky obvykle do hloubky 120-250 mm. Recyklaci za studena můžeme tedy rozdělit:

a) dle místa zpracování na:

- recyklaci na místě (in-situ) – technologický proces, při kterém se zhotoví recyklovaná vrstva rozpojením a úpravou staré vrstvy recyklačním zařízením přímo na místě za studena.





- recyklaci v centru (in-plant) - technologický proces zhotovení recyklované vrstvy převážně z recyklovaného kameniva, které se před dovezením na stavbu upravuje mícháním v centru.

b) dle použitého pojiva na:

- nestmelené směsi (bez použití pojiva)
- stmelené směsi
  - stmelení asfaltovou emulzí
  - stmelení asfaltovou pěnou
  - stmelení cementem nebo jiným hydraulickým pojivem
  - kombinace výše uvedených možností

c) dle rozsahu recyklace na:

- celkovou recyklaci - Používá se tam, kde je únosnost vozovky vyčerpána a vozovka je natolik poškozena, že je nezbytná rekonstrukce více vrstev. Příznakem je výskyt síťových trhlin, často doprovázených četnými výtluky a plošnými deformacemi zejména ve stopách vozidel nebo při okrajích.
- částečnou recyklaci - vhodná v případě potřeby regenerace asfaltových vrstev. Příznakem je hloubková koroze povrchu, výtluky, mozaikové trhliny, trhliny na pracovních spárách, podélné a příčné trhliny nebo četné vysprávký.

### 9.1. Recyklace za studena na místě

Tento technologický postup je založen na vhodné sestavě strojů, kterou tvoří zásobník pojiv, silniční fréza, třídíč, drtič, míchačka, sběrač, finišer a hutnicí válec. Tuto sestavu strojů můžeme měnit dle závislosti na použitém pojivu a konkrétních použitých strojích.

Při celkové recyklaci se pro rozpojení původních vrstev vozovky do požadované hloubky a promíchání takto vzniklého materiálu s přidávaným pojivem, přísadami, vodou a příp. dalším materiálem (kamenivo) používá obvykle silniční fréza. Některé složky (kamenivo, cement) je možné dávkovat předem rozprostřením na povrch recyklované vrstvy, proto musí být pro jejich dávkování k dispozici vhodný aplikátor. Proces dávkování pojiv (asfaltová emulze, zpěněný asfalt, cementová suspenze) a vody musí být automatický. Dávkování se provádí přes recyklační frézu v závislosti na rychlosti pojezdu a šířce úpravy tak, aby bylo vždy dávkováno předepsané množství. Vyfrézovaný a promíchaný materiál se pak běžnými pracovními postupy urovná a zhutní. Přitom se musí zajistit, aby navazující vrstvy měly z důvodu potřebného přesahu okrajů odstupňované šířky. Cílem použití je zlepšit a snížit variabilitu fyzikálně-mechanických vlastností původních vrstev vozovky, zvýšit únosnost vyhodnocenou z výsledků měření na povrchu původní vrstvy vozovky, zajistit reprofilaci příčného řezu a vyrovnání podélných nerovností malého rozsahu (vln) původní vozovky, pasivovat škodlivé složky silničního dehtu v případě jeho přítomnosti v recyklovaných vrstvách, dosáhnout úspory nových materiálů, snížit energetickou náročnost a omezením stavební dopravy snížit zatížení a poškození okolních komunikací.

Při částečné recyklaci (recyklace asfaltových vrstev s použitím asfaltové emulze jako hlavní složky pojiva) je nutno použít strojní zařízení sestavené a vybavené tak, aby jím bylo možno kromě vyfrézování recyklovaných vrstev zajistit vytřídění přeřadu vyfrézovaného materiálu s jeho případným předrcením a doplnění dalšího dodaného materiálu (kameniva) k dosažení požadované zrnitosti. Dále musí být strojní zařízení vybaveno míchačkou s dávkovačem pojiva a přísad takovým způsobem, aby bylo zajištěno dokonalé mísení a doprava materiálu do násypky finišeru, či do prostoru



rozdělovacích šneků rozprostírací lišty, je-li součástí recyklačního zařízení [Bušina 2014, Suda 2010, Wirtgen 2012, Asphalt Academy 2009].

### 9.2. Recyklace za studena v centru

Použití je stejné jako u technologického provádění recyklace na místě. Vyfrézovaný materiál se odveze do mísicího centra. Směs se míchá v míchacím zařízení, kde musí být zajištěno hmotnostní nebo objemové dávkování jednotlivých složek. Potom je směs zpět přepravena na místo stavby nejpozději do 4–6 hodin od její výroby. Během dopravy nesmí dojít k jejímu znečištění, segregaci a takové změně vlhkosti, při které by směs nebylo možno zhutnit na požadovanou míru zhutnění [Bušina 2014, Suda 2010, Wirtgen 2012, Asphalt Academy 2009].

### 9.3. Recyklace za studena v technických předpisech

Technické podmínky (TP) Ministerstva dopravy ČR stanovují zásady a podmínky pro návrh, provádění, kontrolu a výrobu konstrukčních vrstev PK. Předpis TP 210 - Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací, obsahuje požadavky na recyklované kamenivo a materiál. Doplňuje ČSN EN 13 242+A1, ČSN EN 13 043, ČSN EN 12 620 a ČSN 73 6133 v požadavcích na specifikaci kameniva a popisuje technologie výroby a užití tohoto materiálu do konstrukčních vrstev.

Hlavním předpisem, který v České republice stanovuje požadavky na vlastnosti směsí recyklace za studena, je předpis TP 208 - Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena. Tyto technické podmínky z roku 2009 shrnují a sjednocují požadavky čtyř dříve používaných TP a sice TP 111, TP 126, TP 134 a TP 162. Zavedení jednoho technického předpisu, který definuje požadavky na vlastnosti jakýchkoliv recyklovaných směsí, bylo jistě velmi přínosné, protože mělo za následek značné zpřehlednění situace. Přesto při bližším prozkoumání zkušebních metod předepsaných v TP 208 zůstává otázka, zda se jedná opravdu o dlouhodobě ideální metodiku. Tato metodika je navázána na technický předpis ČSN EN 14227-1 až 5. Provádění a požadavky na zhotovenou vrstvu stanovují TP 208 a ČSN 73 6124-1.

MATERIÁL	SMĚS	VRSTVA
ČSN EN 13242+A1 TP 210	ČSN EN 14227-1 až 5 TP 208	ČSN 73 6124-1 TP 208
recyklované kamenivo	třídy pevnosti	SC, SS, SP, SH, stmelená recyklovaná směs

Tabulka 7: Technické předpisy pro stmelené směsi ve vrstvách vozovky

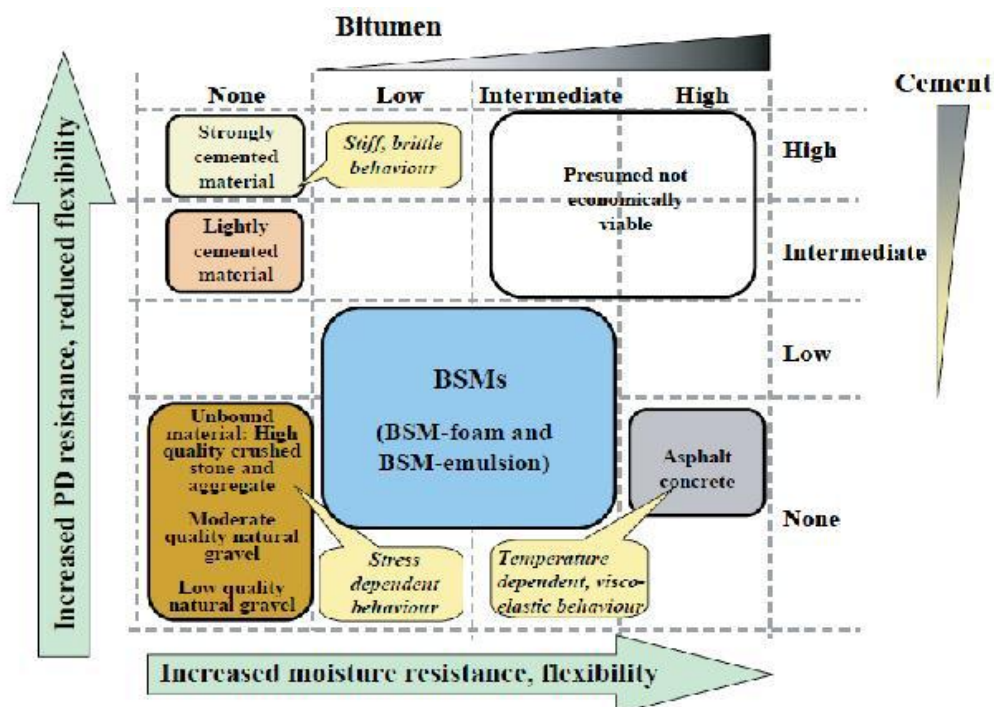
Je nutné zmínit, že TP 208 a ČSN EN 14227-1 obsahují poměrně zásadní rozpor. Přestože oba předpisy definují požadavky pro velmi podobné směsi v podkladní vrstvě, přistupují ke stanovování vlastností těchto směsí poměrně odlišným způsobem (pevnost v příčném tahu (ITS) po 7mi dnech versus pevnost v tlaku ( $R_c$ ) po 28mi dnech). Ačkoliv TP 208 povoluje pro směsi, do kterých je přidáván jako pojivo pouze cement, zkoušku pevnosti v tlaku doplněnou o zkoušku odolnosti proti mrazu a vodě obdobně jako ČSN EN 14227-1, je to zkouška prováděná na jiných tělesech než u této normy, takže výsledky opět nejsou úplně srovnatelné. Odlišný způsob výroby (Proctorův pých x statický lis) zkušebních těles má vliv na výslednou pevnost v tlaku a dosaženou objemovou hmotnost. Dále z hlediska korelace výsledků dosud nebyl definován zcela relevantní vztah mezi ITS a  $R_c$  [Suda 2014]. Celý tento rozpor je navíc podtržen faktem, že v současnosti je ve značné míře v ČR preferována recyklace založená na hydraulickém pojivu.

#### 9.4. Pojiva v recyklaci za studena

Přidáním pojivové složky je umožněno spojit jednotlivé částice (zrna) dohromady. Ve směsích recyklace za studena se dle TP 208 používají dva druhy pojiv - cement a asfalt nebo jejich kombinace, s ohledem na to „co se recykluje“ a jaká je použitá technologie.

Recyklační směs stabilizovaná cementem se vyznačuje relativně vysokým modulem pružnosti, ale nízkou pevností. Již při malé deformaci vznikají velká napětí a dochází k porušení v podobě malých trhlinek a mikrotrhlinek. V každé vrstvě vytvořené ze stmelovaných materiálů se významně uplatňuje pevnost ve smyku, kterou způsobuje vnitřní tření mezi zrny kameniva, jehož velikost závisí na normálovém napětí (od zatížení vrstvy) a soudržnosti ve smyku vlivem působení pojiva (koheze), která je na normálovém napětí (od zatížení vrstvy) nezávislá. Rozdíl v návrhovém modulu pružnosti nestmelovaných materiálů a materiálů stmelovaných či stabilizovaných hydraulickým pojivem je značný (např. dle TP 170 - MZK 600 MPa oproti KSC 2500 MPa). Při porovnání různých konstrukcí vozovek nemá použití vrstvy recyklace za studena s hydraulickým pojivem tak jednoznačný přínos, jak by se mohlo na první pohled zdát, s ohledem na rizika spojená s výstavbou a životností takových vrstev a celé konstrukce vozovky (potenciální riziko vzniku reflexních trhlin).

Materiály stabilizované cementem se také velmi liší od materiálů stabilizovaných asfaltem (viz obrázek 22). Asfalt je používán ve dvou technologiích - emulze (kontinuální obalení) a pěna (bodové obalení). Přidáním asfaltu se zvyšuje pružnost vrstvy (vzhledem k porušené a degradované vrstvě), odolnost vůči vodě, do určité míry i odolnosti vůči únavě vlivem opakovaného zatížení. Současně se zvyšuje pevnost v ohybu vlivem viskoelastických vlastností pojiva. Použitím asfaltového pojiva nedochází k významnému snížení úhlu vnitřního tření kameniva. Na druhou stranu může být vrstva s použitím asfaltu náchylná k tvorbě trvalých deformací. V neposlední řadě je nutné uvažovat i ekonomické hledisko použití výše zmíněných pojiv.



Obrázek 22: Konceptní vlastnosti materiálů používaných v konstrukčních vrstvách vozovek [Asphalt Academy TG 2]



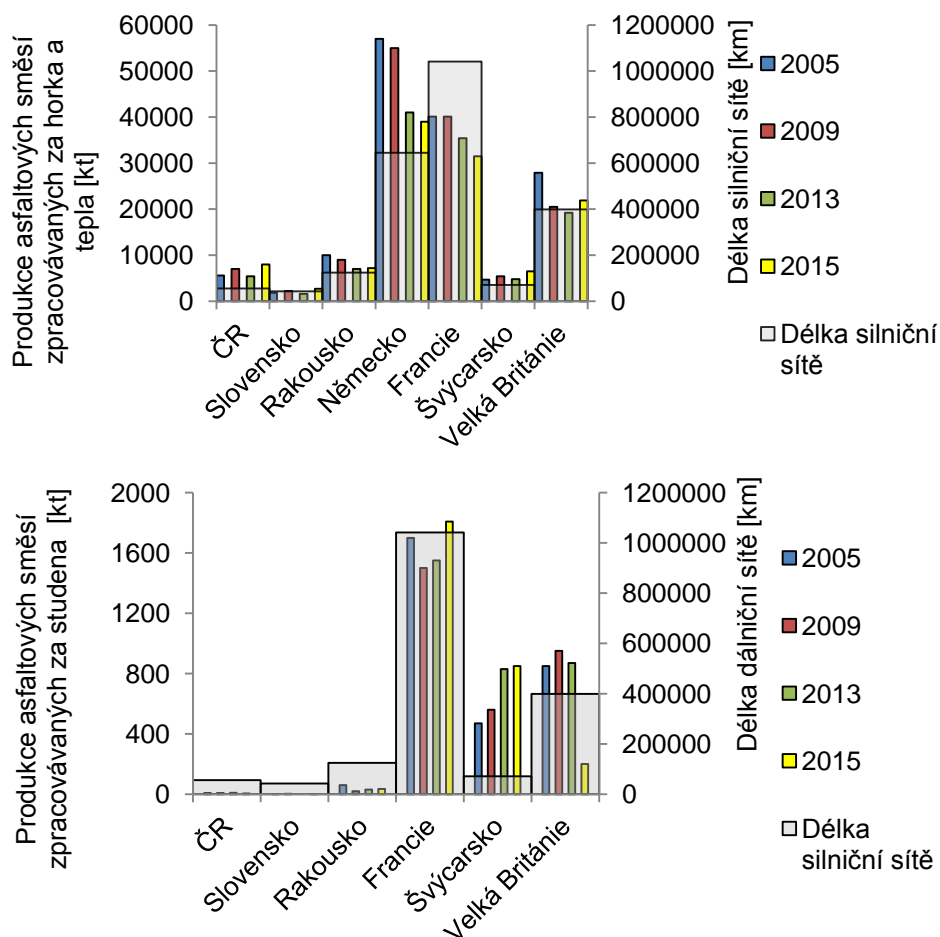
V tabulce 8 jsou uvedeny standardně používané druhy pojiv včetně obvyklého dávkování používaného v České republice [Wirtgen 2012, Batista 2014]. Dále je možné použít i jiná alternativní pojiva nebo minerální přísady. V této práci je to konkrétně FPP a mechanicky aktivovaný FPP v efektivním rozsahu 3,0-15,0 % hm. recyklované studené směsi [Wirtgen 2012, Batista 2014, Asphalt academy 2009].

Asfaltová emulze		Asfaltová pěna		Cement		Hydraulické pojivo	
Typ	Dávkování ve směsi	Asfalt	Dávkování ve směsi	Třída	Dávkování ve směsi	Třída	Dávkování ve směsi
C60B7	Emulze 2,5-5,5 % hm.	50/70	Pěna 0,5- 3,0 %hm.	CEM I 32,5 N	Cement 2,5-6,0 %hm.	HRB 22,5	NDF
C65B7		70/100	Pěna +	CEM I 42,5 N	Emulze/Pěna +	E HRB	
C60BP7	Emulze + cement	100/150	Cement	CEM I 52,5 N	Cement 1,5-4,0	32,5 E	
C65BP7	1,5-3,5 % hm.	160/220	0,5-2,5 %hm.		%hm.		

Tabulka 8: Přehled pojivové složky ve směsích recyklace za studena dle TP 208

## 10. Emulzní asfaltové směsi

Disertační práce zahrnuje téma emulzních asfaltových směsí zpracovávaných za studena. Emulzní technologie jsou v České republice především využívány ve formě postřiků, nátěrů, kalových zákrytů a v neposlední řadě formou recyklační technologie za studena. Nejvýznamnější využití zaznamenává tato technologie v severní Americe a Francii, ale i v některých dalších zemích po celém světě. Na obrázku 23 je uvedeno porovnání produkce asfaltových směsí ve vybraných státech v Evropě z hlediska výroby za studena nebo za horka (za tepla).



Obrázek 23: Produkce horkých a studených asfaltových směsí v evropských státech (zdroj EAPA)

Asfaltové směsi obalované za studena (při teplotách okolního prostředí, nejméně však 5 °C) jsou směsi zvlhčené frakce kameniva a asfaltové emulze, které vykazují změny vlastností v průběhu štěpení asfaltové emulze, respektive z nestmeleného materiálu se stává v průběhu životnosti standardní asfaltová směs, [Choudhary 2014]. Technologie asfaltových směsí zpracovávaných za studena může potenciálně v budoucnu v některých případech nahradit nyní nepoužívanější technologii asfaltových směsí hutněných za horka. Zejména se využije při výstavbě a rekonstrukci vozovek pozemních komunikací s nižším dopravním zatížením.

Studené asfaltové směsi poskytují výhody zejména v eliminaci ohřevu jednotlivých složek směsi v porovnání s asfaltovými směsmi hutněnými za horka, kde teplota při výrobě dosahuje 140 – 160 °C (z technologických důvodů se může asfaltová emulze někdy



ohřívát na teplotu 60 – 65 °C). Neméně důležité je také z environmentálního hlediska, především snížení energetické náročnosti a snížení produkce CO<sub>2</sub> při výrobě směsi. Studená technologie může dosáhnout až 50% úspory energie oproti horkým technologiím. Spolu s možností přípravy směsi na místě a možností pokládky i v malém měřítku, se stává tato technologie vhodná pro rozvoj především extravilánové silniční infrastruktury nižší významnosti, vzhledem k delším převozním vzdálenostem a podmínce nižších investičních nákladů, [Thanaya 2009]. Další výhodou je možné spatřovat v možnosti pokládky i za mírně zhoršených povětrnostních podmínek. Studené asfaltové směsi však mají vůči asfaltovým směsím hutněným za horka několik nevýhod. Například potřeba vyšší hutnicí energie, která je zapotřebí k překonání vyššího tření mezi zrny kameniva. Další nevýhodou můžeme spatřovat v nedokonalém obalení jednotlivých zrn asfaltovým pojivem, které dále ovlivňuje vodní citlivost směsi. V tomto případě se měří procento obalení povrchu kameniva pojivem při manuálním obalování, přičemž lze snadno stanovit optimální vlhkost potřebnou ke zpracování směsi.

Nejzávažnějším problémem u studených asfaltových směsí jsou vlastnosti směsi v počátečních zráních směsi. Při štěpení asfaltové emulze dochází k dekantaci, flokulaci a koalescenci asfaltových částic na povrchu kameniva, přičemž mezi shluky asfaltových částic se uzavře voda (kontinuální fáze emulze), která negativně ovlivňuje fyzikálně-mechanické vlastnosti asfaltového pojiva, především teplotní citlivost pojiva a tím i celé směsi. Při konečné fázi (zráních) destabilizace asfaltové emulze dochází ke slnutí asfaltových částic za současného vytlačování a odpařování vody. Samotné zráních se může pohybovat mezi 2 až 24 měsíci v závislosti na klimatických podmínkách [Thanaya 2009, Wendling 2008, Cyna 2006].

Tento typ směsí lze uplatnit v podkladních, ložních a obrusných vrstvách, při reprofilaci a k lokálním vysprávkám.

### 10.1. Emulzní asfaltové směsi v technických předpisech

V současné době ve světě neexistuje žádná "všeobecně přijímaná" návrhová metoda pro studené asfaltové směsi. Vycházet lze z poznatků amerického přístupu formulovaného v tzv. Cold Mix Design Manual nebo z národních technických předpisů využívaných ve Francii. Kromě toho, vzhledem k nedostatku jednotnosti laboratorních postupů a jejich hodnocení, zejména v rané fázi zráních, je obtížné tvořit spolehlivé korelace mezi výsledky experimentů, které jsou popsány v literatuře od různých odborníků a expertních týmů. V ČR dosud neexistuje technický předpis, který by upravoval návrh, provádění, ověřování a hodnocení těchto směsí. Zpracovány jsou technické podmínky pro tuto oblast silničních technologií a čekají na konečné schválení ze strany MD ČR. Jejich schválení se v rámci Ministerstva dopravy předpokládalo v druhé polovině roku 2014, avšak prozatím je schvalovací proces odložen na neurčito. Tyto předpisy byly zpracovány s využitím zahraničních zkušeností zejména Francie a USA, doložených laboratorními ověřovacími zkouškami. Tyto zkoušky byly prováděny v uplynulých třech letech na katedře silničních staveb fakulty stavební ČVUT v Praze. Výsledky jsou součástí této práce. Další problematikou, která není vhodně ošetřena, je oblast používání asfaltových emulzí. Použití asfaltových emulzí za studena v silničním stavitelství u nás již existuje, avšak zatím se omezuje jen na údržbové technologie emulzních kalových zákrytů a mikrooberců podle ČSN 73 6130 nebo nátěrů a postřiků podle ČSN 73 6129. Naproti tomu použití asfaltových emulzí pro výrobu asfaltových směsí za studena do konstrukčních vrstev vozovek, srovnatelných s klasickým asfaltovým betonem podle ČSN EN 13108-1, zatím není v ČR zavedeno s jedinou výjimkou, kterou představují technologie recyklace za studena podle platných TP 208. Důvodem je obtížnost zvládnutí některých zásadních odlišností této



technologie, které studené směsi pro konstrukční vrstvy vyžadují, např. použití pomaluštěpných emulzí s volbou vhodných emulgátorů a upravený přístup k návrhu směsi.

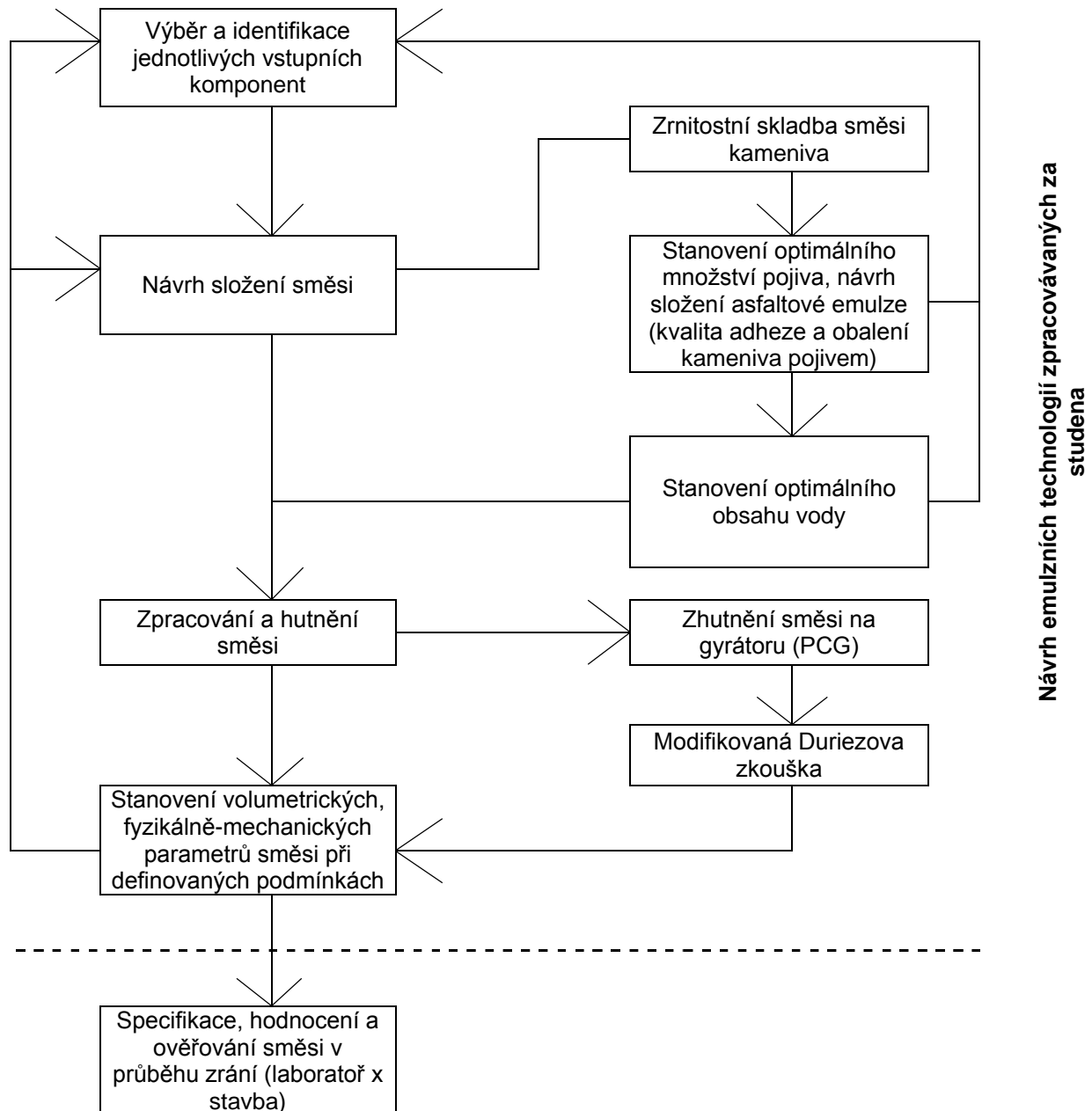
Studené emulzní směsi jsou vhodné jako podkladní vrstvy pro třídu dopravního zatížení II až VI, jako ložní vrstvy pro třídu III až VI a jako obrusné vrstvy pro třídu IV až VI. Největší uplatnění je tedy možné zejména na pozemních komunikacích II. a III. třídy, místních a účelových komunikacích, jejichž celkový stav v ČR není dobrý a jejichž oprava se obvykle neobejde bez rekonstrukce celého krytu.

Obecný přístup při návrhu asfaltového betonu obalovaného za studena BBF je uveden v předpisu NF P98-139 včetně návazných norem a pro asfaltovou emulzí obalené kamenivo pro podkladní vrstvy GE je uveden v XP P98-121 včetně návazných norem. Metodika návrhu a hodnocení je založen částečně na funkčním přístupu. Požadavky na výrobu, dopravu, provádění a kontrolu na místě je uveden v předpisu NF P 150-2. Vlastní technologie obalování kameniva asfaltovou emulzí má počátky v 60. letech ve Francii, která je jedním z největších producentů těchto směsí na světě a právem ji lze v mnoha ohledech považovat za průkopníka. Pro zajímavost bych rád zmínil i existenci dalších typů směsí, které patří svým charakterem mezi studené technologie, ale je proveden ohřev alespoň jedné složky (určitá frakce kameniva či pojivo).

Je nutné zmínit, že výstavba musí probíhat v klimatických obdobích slučitelných s výrobou, realizací a zejména s dozríváním těchto směsí, od počátku jara do počátku podzimu. Proto je nutné upřednostnit realizaci v suchých a teplejších klimatických obdobích a ve všech případech respektovat minimální venkovní teplotu 5 °C.

## **10.2. Metodika návrhu a hodnocení emulzních asfaltových směsí uplatňovaná ve Francii**

Vlastní technologie obalování kameniva asfaltovou emulzí má počátky v 60. letech ve Francii, která je jedním z největších producentů těchto směsí na světě [Gruner 2007] a právem ji lze v mnoha ohledech považovat za průkopníka řady inovativních myšlenek, které se vztahují k technologiím pro asfaltové vozovky. V tomto ohledu se jen v roce 2011 ve Francii vyprodukovalo cca 1 600 000 tun studených směsí [zdroj: EAPA]. Obecný přístup návrhu studených směsí je nastíněn na obrázku 24.



Obrázek 24: Obecný postup pro návrh asfaltových směsí obalovaných za studena

První fáze začíná výběrem složek. Volba samozřejmě začíná kamenivem, jehož zdroj musí být v zájmu nízkých nákladů co nejbližší místu pokládky. Volba kameniva pak určuje výběr vhodné asfaltové emulze (včetně vedlejších složek a způsob zpracování), což zahrnuje hlavně kontrolu afinity kameniva a emulze. Laboratorní práce zahrnují provádění testů přilnavosti, včetně vizuálního vyhodnocení, rychlosti štěpení emulze a zpracovatelnost. Jakmile je navržena emulze lze přistoupit k návrhu optimálního množství pojiva a vody ve směsi. Další fáze návrhu a hodnocení jsou dále popsány dle příslušného typu směsi.

### 10.3. Asfaltový beton obalovaný za studena (BBF - Béton bitumineux á froid)

Jde o asfaltový beton, jehož kvalita a distribuce obalení asfaltovým pojivem není totožná se směsmi vyráběnými za horka. Velká zrna jsou pokryta poměrně tenkým asfaltovým



filmem a udržují mezi sebou přímý kontakt, který vytváří vysoké vnitřní tření. Další součástí je tmel, respektive směs jemné frakce kameniva, která je bohatá na pojivo. Tyto vlastnosti poskytují jak vysokou odolnost proti trvalým deformacím tak i flexibilitu, která jim umožňuje dobře se přizpůsobit pohybům v podloží. Použití měkkých asfaltových pojiv také přispívá k pružnosti těchto směsí.

Metodika návrhu je definována ve francouzském předpisu NF P98-139 (Couches de roulement: Bétons bitumineux á froid). Asfaltový beton obalovaný za studena je směs kameniva frakce 0/10 mm nebo 0/14 mm, vody a asfaltové emulze, míchaný v centru a ztuhlý během 24 hodin. Kamenivo musí být zcela obaleno asfaltovým pojivem. Tato směs se navrhuje pro obrusné vrstvy v tloušťce 5 - 8 cm, kde průměrná denní intenzita v nejméně zatíženém pruhu pozemní komunikace nepřesahuje 300 těžkých nákladních vozidel (5 t), respektive pro třídu dopravního zatížení T2 a nižší. Požadavky na kamenivo je rozděleno na požadavky pro drobné (písek - 0/D, 1 mm < D ≤ 6,3 mm) a hrubé kamenivo (štěrkopísek - d/D, d > 1 mm a D ≤ 125 mm) a filer (0/D, D < 2 mm a propad na síti 0,063 mm alespoň 70 %) dle NF P18-101 (Granulats-Vocabulaire-Définition et classification). Požadované parametry kameniva pro asfaltový beton obalovaný za studena jsou uvedeny v tabulkách 9 a 10 dle EN 13043 a NF P18-545 (Granulats-Eléments de définition, conformité et codification). Klasifikace odpovídá příslušným požadavkům na geometrické, fyzikální a chemické vlastnosti, které musí kamenivo v tomto typu směsi splňovat.

Mechanická odolnost ŠP <sup>1)</sup>	C	B
Klasifikace ŠP	III	III
Klasifikace písku	a	a
CPA <sup>1)</sup>	dle normy P 18 - 101	
<sup>1)</sup> Koeficient zrychlené ohladitelnosti není požadovaný pro frakci kameniva vyšší než 6,3 mm.		

Podíl drcených zrn ŠP a písku	Ic ≥ 60 nebo Ic = 100 nebo Rc ≥ 2		
	Frakce kameniva	Střední síto	Propad
	(mm)	(mm)	(%)
Propad na středním sítu ŠP	4 - 6,3	5	30 - 55
	6,3 - 10	8	37 - 62
	10 - 14	12,5	52 - 77
<sup>1)</sup> Vmíchání 10 % oblých zrn písku je přijatelné pro dosažení požadované mezerovitosti.			

Tabulka 9: Požadavky na fyzikální vlastnosti drobného a hrubého kameniva

Zkouška	Hodnoty
Pórovitost (Rigden) P 18 - 565	IVR ≤ 40 %
Absorpční schopnost (množství jemného kameniva nezbytné pro absorpci 15 g asfaltu 50/70)	PA ≥ 40 g
Stanovení bodu měknutí (hodnota rozdílu teplot zkoušky kroužek a kulička směsi asfaltu (v poměru 60 % kameniva a 40 % asfaltu 50/70) a jemného kameniva dle NF T 66 - 008)	10 °C ≤ rTBA ≤ 20° C
Množství methylenové modři adsorbované na 100 g jemného kameniva	VBta ≤ 1 g

Tabulka 10: Požadavky na filerovou složku kameniva

Návrh vhodné kostry kameniva je deklarován hodnotami propadů na specifických sítích, přičemž drobné odchylky čáry zrnitosti kameniva nejsou chybou. Je nutné zdůraznit, že vhodná volba kameniva, respektive jejich parametrů spolu s vhodným typem asfaltové emulze je při návrhu studených směsí zásadní. Tato skutečnost se týká i výběru



emulgátoru a celkového složení asfaltové emulze, která by se měla vždy optimalizovat v závislosti na použitém kamenivu. Hodnoty propadů na vybraných sítích jsou uvedeny v tabulce 11.

Síto (mm)	Propad na síť (%)
6,3	65
2	35
0,08	7

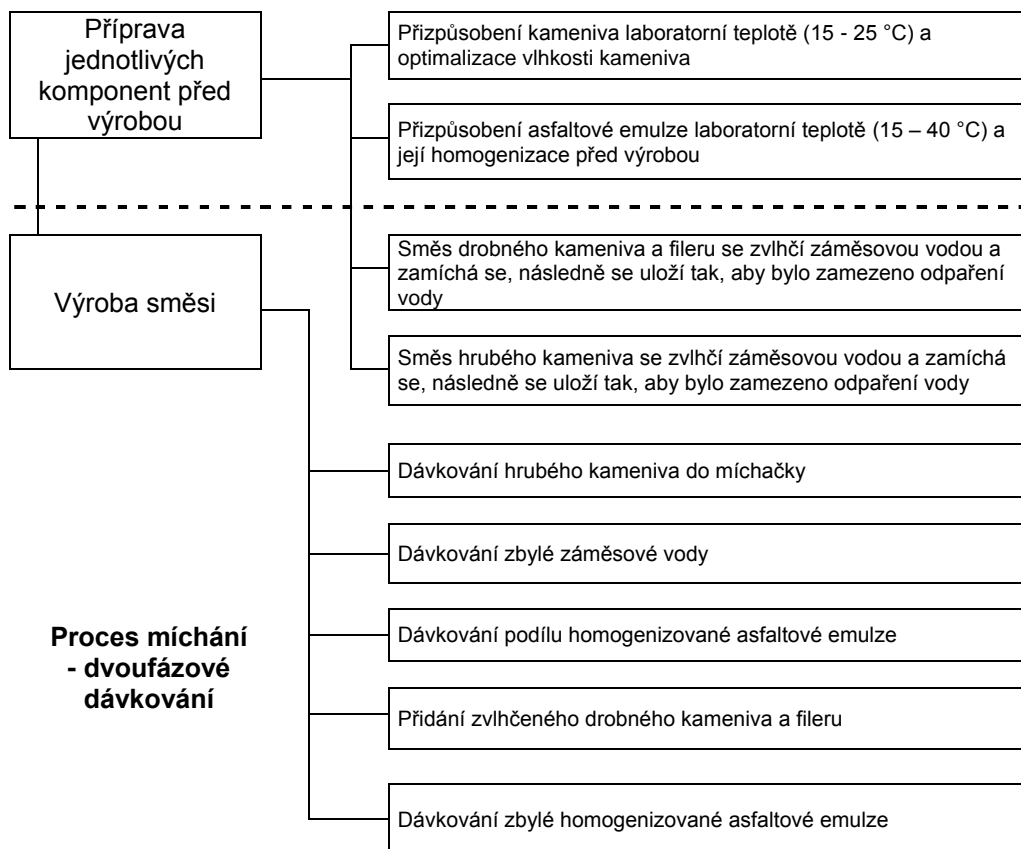
Tabulka 11: Teoretická čára zrnitosti směsi 0/10 mm a 0/14 mm

Pojivo používané pro asfaltový beton obalovaný za studena je kationaktivní pomaluštěpná emulze se silničním asfaltem penetrace 70/100 - 180/220 nebo modifikovaným asfaltem, která splňuje požadavky uvedené v evropské harmonizované normě EN 13808. V případě kyselého kameniva musí být pH emulze  $> 1,8$  a v případě zásaditého kameniva musí být pH emulze  $> 2,2$ . Rovněž důležité je hledisko adsorpce asfaltových kapek na povrch kameniva. Vzhledem k rozmanitosti mineralogického složení kameniva a fyzikálně-chemické rozmanitosti asfaltových emulzí (obsah povrchově aktivních látek atd.), není možné spolehlivě předvídat jejich vzájemné chování [Serfass 2004]. Pro stanovení teoretického optimálního množství asfaltové emulze je ve Francii zásadně použita metodika výpočtu dle součinitele sytosti. Obsah zbytkového pojiva  $p$  je odhadnutý z hodnoty součinitele sytosti  $K$ , specifického povrchu kameniva  $X$  a korekčního koeficientu  $a$  závislého na objemové hmotnosti kameniva  $\rho_r$  vyjádřený v  $\text{g/cm}^3$ . Součinitel sytosti musí mít hodnotu  $> 3,6$ , což odpovídá zpravidla množství emulze 10 % ve směsi, přičemž emulze je alespoň s 60% obsahem asfaltu. Tato skutečnost bude pravděpodobně jedním z omezujících faktorů pro její zavedení v ČR.

Dalším důležitým prvkem při návrhu BBF je stanovení optimální vlhkosti směsi. Technický předpis NF P98 - 139 jednoznačně neurčuje postup stanovení potřebné vlhkosti. Optimální vlhkost lze stanovit dle NF P98-257-1 (Méthode d'essai de détermination de la qualité d'enrobage manuel de matériaux hydrocarbonés á froid). V tomto případě se měří procento obalení povrchu kameniva pojivem při manuálním obalování, přičemž lze snadno stanovit optimální vlhkost potřebnou ke zpracování směsi. Další metodou stanovení optimální vlhkosti směsi je dle modifikované Proctorovy zkoušky. Ve Francii je také používán analogický postup, kdy se směsi s odlišnou vlhkostí zhutní v gyrátoru 10ti otáčkami. Oproti Proctorově zkoušce se objemová hmotnost zamění za mezerovitost a stanoví se optimální vlhkost.

Sekvence dávkování a míchání jednotlivých komponent je stanovena dle typu míchacího zařízení. Jednotlivé typy se odlišují výkonností a způsobem míchání směsi. Veškeré práce v laboratoři jsou prováděny v šaržích. Není možné, aby přesně reprodukovaly provoz zařízení ve výrobnách, které jsou v případě těchto směsí a dle praxe zavedené ve Francii většinou kontinuální. Nicméně, bez ohledu na typ míchacího zařízení, je nezbytné, aby se výroba prováděla v laboratoři tak přesně, jak je možné (pořadí přidávání složek, sekvencí distribuce vody a asfaltové emulze, čas míchání atd.), aby směs byla nejbližší parametrům, při kterých bude realizována v centru a reprezentovala stav při pokládce. Na obrázku 25 je uveden příklad vlastního postupu při míchání studené směsi. Dalším důležitým aspektem je teplota směsi a doba míchání. Obecně se pro studené směsi doporučuje teplota v rozmezí  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při procesu míchání směsi kameniva a emulze je velmi důležité věnovat pozornost délce míchacího času. Obvykle je potřeba kratší míchací čas, protože směsi mají sklon k „přemíchání“, které vede ke ztrátě asfaltové emulze z povrchu hrubého kameniva a nadměrnému nabalení se na kamenivo drobné. Nevhodným míchacím

postupem může docházet i k nežádoucímu předčasnému štěpení asfaltové emulze či k nedokonalému obalení zrn kameniva.



Obrázek 25: Příklad výroby asfaltové směsi obalované za studena

Proces míchání a obalování kameniva pojivem lze provést několika postupy:

- „One step“ (dávkování jednotlivých složek: kamenivo, voda, emulze);
- Předobalené drobné kamenivo (dávkování kameniva ve dvou fázích);
- Předupravené drobné kamenivo (chemické zlepšení reaktivity drobného kameniva, dávkování kameniva ve dvou fázích);
- Sekvenční obalování kameniva (dvojitě dávkování kameniva a emulze) [Silnice a mosty 2013].

Po umíchání musí zůstat směs alespoň 20 minut v klidu, než se naplní do forem a ztuhne. Kvalita obalení zrn má zásadní význam, respektive nedostatečné obalení hrubých zrn může mít za následek jejich vytrhávání. U standardního BBF musí být kvalita povlaku nejméně třída E2 podle normy NF P 98-257-1, tj. nejméně 90 % pokryté minerální plochy. V některých případech, kdy je čerstvě položené BBF vystaveno silnému namáhání (brzdění, ostré ohyby a posuny náprav), je třeba ještě vyšší kvalitu obalení a vyžadovat třídu E1, přinejmenším 97 % povrchu. Postupy pro přípravu zkušebních těles pro asfaltový beton obalovaný za studena jsou dva, přičemž na zkušebních tělesech jsou stanoveny fyzikálně mechanické parametry (mezerovitost, pevnost v tlaku a vodní citlivost za definovaných podmínek) dle tabulky 12 a 13, které směs musí splňovat. Tyto postupy jsou popsány v předpisech NF P98-251-4 (Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés, Partie 4 : Essai DURIEZ aménagé sur mélanges hydrocarbonés à froid à l'émulsion de bitume) a NF P98 - 252 (Détermination du comportement au compactage des mélanges

hydrocarbonés, Essai de compactage á la presse á cisaillement giratoire (PCG)), která již byla nahrazena evropskou technickou normou EN 12697-31 (včetně české verze této normy), které jsou uvedeny níže.

Zkouška	Směs 0/10 nebo 0/14
Zkouška Duriez (NF P98-251-4) <sup>1)</sup>	
Pevnost v tlaku po 14 dnech na vzduchu	
Silniční asfalt 160/220	≥ 3 MPa
Jiný silniční asfalt	≥ 4 MPa
Poměr r/R	≥ 0,7
<sup>1)</sup> Během laboratorní přípravy po zamíchání kameniva a vody ponechat 5 minut tuto směs v klidu a následně dávkovat asfaltovou emulzí.	

Tabulka 12: Mechanické odolnosti asfaltového betonu obalovaného za studena dle NF P98-139

Zkouška	Mezerovitost (%)
Metoda Duriez (NF P98-251-4) <sup>1)</sup>	6 - 11
Zhutňování směsí gyrátorem (NF P98-252) <sup>1)</sup>	
10 otáček	≥ 12
60 otáček	5 - 12
<sup>1)</sup> Během laboratorní přípravy po zamíchání kameniva a vody ponechat 5 minut tuto směs v klidu a následně dávkovat asfaltovou emulzí.	

Tabulka 13: Mezerovitost asfaltového betonu obalovaného za studena dle NF P98-139

Výrobní podmínky jsou upraveny v NF P98-150-2 (Enrobés hydrocarbonés à froid - Exécution des assises de chaussées, couches de liaison et couches de roulement - Partie 2: Enrobés hydrocarbonés à froid - Constituants, formulation, fabrication, transport, mise en oeuvre et contrôle sur chander).

#### 10.4. Asfaltovou emulzí obalené kamenivo (GE - Graves émulsion)

Metodika návrhu směsi kameniva obaleného asfaltovou emulzí je upravena v předpisu XP P 98 - 121 (Assises de chaussées, Graves émulsion). Je to materiál připravený z asfaltové emulze, kameniva a vody, který se dávkuje a míchá za studena v centru nebo na místě. Směs kameniva obalovaného asfaltového se rozděluje na dva typy, dle jeho použití. Rozlišuje se typ R, frakce 0/6 mm, 0/10 mm nebo 0/14 mm, používaný pro reprofílaci  $R_{rp}$  nebo lokální vysprávky vozovek  $R_{rl}$ . Typ S frakce 0/10 mm, 0/14 mm nebo 0/20 mm je používaný pro podkladní vrstvy komunikací s dopravním zatížením T1 a nižší (viz tabulka 14).

Směs	Průměrná denní intenzita TNV
GE <sub>rp</sub>	150 - 300
GE <sub>rl</sub>	≤ 50
GE S	300 - 750

Tabulka 14: Dopravní zatížení

Směs kameniva obaleného asfaltovou emulzí charakterizuje poměrně vyšší obsah zbytkového pojiva (viz tabulka 18). Stojí za povšimnutí, že pro GE je charakteristické preferenční zachycení asfaltového pojiva jemným či drobným kamenivem, což má za následek vytvoření malty bohaté na pojivo, kterou se spojí hrubé kamenivo, jež nemusí být následně kompletně obalené pojivem. Tato nestejná distribuce pojiva ve směsi poskytuje specifické vlastnosti (plastické chování, transport vody ve směsi, zrání, problematika



laboratorního zpracování), [Serfass 2011]. Z hlediska návrhu směsi je postupováno obdobným způsobem jako v případě asfaltového betonu obalovaného za studena. Požadované parametry kameniva obalované asfaltovou emulzí jsou uvedeny v tabulce 15.

Mechanická odolnost ŠP	Dnc
Klasifikace ŠP	III
Klasifikace písku	a
Podíl drcených zrn ŠP a písku	Ang 3

Tabulka 15: Požadavky na fyzikální vlastnosti drobného a hrubého kameniva

Jemnozrnná složka kameniva musí být v souladu s NF P18-545. Požadavky jsou uvedeny v tabulce 16.

Zkouška	Kategorie EN 13043
Hodnota methylenové modři	MBF 10

Tabulka 16: Fyzikální požadavky na jemnozrnnou složku kameniva

Návrh vhodné kostry kameniva je deklarován hodnotami propadů na specifických sítích, přičemž drobné odchylky čáry zrnitosti kameniva nejsou chybou. Hodnoty propadů na vybraných sítích jsou uvedeny v tabulce 17.

Síto (mm)	Typ R			Typ S		
	0/6 (%)	0/10 (%)	0/14 (%)	0/10 (%)	0/14 (%)	0/20 (%)
2	40	40	40	35	33	31
0,063	7	6	6	6	6	6

Tabulka 17: Teoretická čára zrnitosti směsí GE

Pro GE se jako pojivo používá pomaluštěpná kationaktivní asfaltová emulze s asfaltem penetrace 35/50, 50/70, 70/100, 160/220 nebo modifikovaný, či fluxovaný asfalt. Minimální obsah pojiva je uvedený v tabulce 18.

GE	Frakce (mm)	Tloušťka vrstvy (cm)	Minimální obsah zbytkového pojiva (%)
Typ R	0/6	≤ 6	4,5
	0/10	≤ 8	4,2
	0/14	≤ 12	4,2
Typ S	0/10	5 - 10	3,8
	0/14	6 - 12	
	0/20	8 - 10	

Tabulka 18: Obsah zbytkového pojiva v GE

Stanovení obsahu vody ve směsi se zároveň s metodikou míchání směsi v laboratoři a výrobou zkušebních těles řídí stejnými postupy popsány výše (viz asfaltový beton obalovaný za studena), nicméně obsah vody ve směsi bývá cca 7 %. Fyzikálně mechanické parametry jsou stanoveny pouze pro typ směsi GE S (viz tabulka 19)

	GE S
Zkouška Duriez (NF P98-251-4)	
Mezerovitost (%)	≤ 13
Pevnost v tlaku po 14 dnech zrání (MPa)	
- při použití silničního asfaltu 160/220	≥ 2,5
- při použití silničního asfaltu 70/100	≥ 3,5
- při použití silničního asfaltu 50/70	≥ 4
- při použití jiného silničního asfaltu	≥ 4
Poměr r/R	≥ 0,55
Zhutnění směsi gyrátorem (PCG)	
Silniční asfalt 160/220	
Mezerovitost (%)	
10 otáček	≤ 22
200 otáček	≤ 12
Jiný základní asfalt	
Mezerovitost (%)	
10 otáček	≤ 22
200 otáček	≤ 15

Tabulka 19: Volumetrické a mechanické parametry směsi GE S

### 10.5. Modifikovaná Duriezova zkouška

Tato modifikovaná zkušební metoda výroby zkušebních těles dle NF P98-251-4 umožňuje stanovit mezerovitost a zároveň určuje z pevnosti v tlaku, při stanovených podmínkách, odolnost proti účinkům vody studených směsí. Výroba těles je prováděna tak, že směs je hutněna statickým tlakem ze dvou stran. Statický tlak se udržuje po dobu pěti minut v rámci dvou módů zatížení (viz tabulka 20). Rychlost zatěžování je 1 mm/s, přičemž maximální síly musí být dosaženo za 5 - 60 s. Při hutnění musí být zajištěn odvod vytlačené vody.

Velikost max. zrna	F (kN)		Ø válcové formy (mm)	Počet těles (mód 1/mód 2)
	Mód 1	Mód 2		
D < 14 mm	60	20	80	12/2
D > 14 mm	120	40	120	10/2

Tabulka 20: Hodnoty statického zatížení dle módu při výrobě zkušebních těles

Obecně se v rámci módu 1 na dvou tělesech hydrostatickou metodou stanoví objemová hmotnost a vypočte se mezerovitost směsi v J+1. Na ostatních vzorcích jsou v průběhu zrání (J+1, J+8, J+15) stanovena geometrickou metodou objemová hmotnost  $MVA_{(J+k)}$ , dále se vypočte mezerovitost  $v_{géo1}$  a vlhkost směsi  $W_{(J+k)}$ . Zkušební tělesa jsou uložena po dobu 7 dní při teplotě 18 °C a při 40 - 70% relativní vlhkosti vzduchu. Po sedmi dnech zrání (J+8) se polovina těles ponechá ve stejných podmínkách a druhá polovina se ponoří do vody při teplotě 18 °C na dalších 7 dní. Po čtrnácti dnech zrání na vzduchu a kombinovaném zrání (J+15) se tělesa podrobí zkoušce pevnosti v prostém tlaku. Poměrem získaných pevností v tlaku r/R se získá koeficient odolnosti proti vodě.

V módu 2 se na tělesech stanoví pouze objemová hmotnost  $MVA_2$  geometrickou metodou a vypočte se mezerovitost  $v_{géo2}$ .

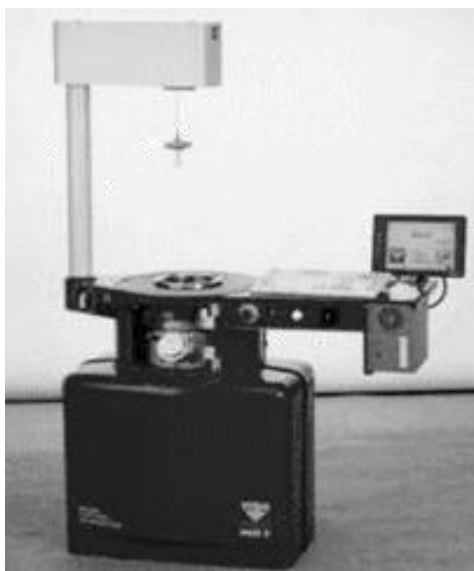
Výše uvedený postup je stanoven pro normalizované zrání zkušebních těles, ovšem existují i postupy urychleného zrání (35 °C, relativní vlhkost vzduchu 20 % a následné zvýšení teploty na 50 °C).

### 10.6. Výroba zkušebních těles gyrátorem (PCG)

Gyrátor obecně slouží k výrobě zkušebních válcových těles určených k testování dalších mechanických vlastností nebo ke stanovení mezerovitosti pro určitý počet otáček. Obecně

u gyrátorů platí, že ke zhutnění dochází současným vyvoláním mírné statické komprese vzorku shora a pohybem formy v ose, která tvoří kónickou rotační plochu. Horní část formy je v přístroji odkloněna o vrcholový úhel, kdežto část spodní by v ideálním případě měla zůstat kolmo k ose vzniklé kuželové plochy.

Využívání gyrátoru při výrobě zkušebních těles sahá až do třicátých let 20. století. První přístroj byl sestaven v Texasu. Po druhé světové válce se rozšířila Marshallova zkouška a od idejí využití tohoto přístroje se upustilo. Výjimkou byla Francie, kde se o gyrátor začali vědci zajímat v 50. letech minulého století. V šedesátých a sedmdesátých letech, po provedení řady výzkumných prací, zde byl přístroj zaveden do praxe. Jeden z prvních francouzských gyrátorů byl vyroben v LCPC. V letech 1974 až 1985 to byly hlavně typy PCG 1 a PCG 2 s průměrem formy 160 mm. Tlak byl nastaven jako konstantní o velikosti 0,6 MPa. Náklon hlavní osy byl v rozmezí 1° až 4°. Od roku 1996 byl v LCPC (centrální francouzská silniční laboratoř) vyráběn typ PCG3 (viz obrázek 26), u kterého se může tlak měnit v rozmezí 0,5 MPa až 0,8 MPa, úhel je nastavitelný v hodnotách 0,5° až 2° a průměr formy je standardizován na 150 mm. V původním francouzském předpisu NF P 98-252 z roku 1993 byl náklon hlavní osy 1° a rychlost 6 ot/min při tlaku 0,6 MPa. Později byla tato rychlost navýšena na 30 ot/min. Je nutné zmínit, že francouzský přístup definuje počet otáček vzhledem k tloušťce pokládáné vrstvy. V tom se liší od přístupu amerického, kde jsou podmínky zkoušky definovány v závislosti na velikosti dopravního zatížení. [Harman 2001, Buráň 2007].



Obrázek 26: Gyrátor PCG 3 - LCPC [zdroj: [www.lcpc.fr](http://www.lcpc.fr)]

Při výrobě zkušebních těles se nejprve stanoví hmotnost navážky, která je získána z maximální objemové hmotnosti směsi, přičemž je nutno v rámci studených směsí uvážit vlhkost směsi. Dále se provede výběr průměru formy dle maximálního zrna  $D$  (pro studené směsi se běžně používá forma s průměrem 150 mm). Počet zkušebních těles by měl být alespoň 3. Hodnota obsahu mezer podle počtu otáček gyrátoru je funkcí měřené výšky vzorku  $h_{(ng)}$  při konkrétních otáčkách a výšky vzorku při nulové mezerovitosti  $h_{min}$ .

Je nutné zmínit, že výsledky zkoušek jsou ovlivněny větším množstvím faktorů, než je tomu u směsí hutněných za horka. Těmito faktory jsou obsah vody, která je v průběhu hutnění odváděna pryč, a proto znemožňuje výpočet složení směsi, dále typ a obsah použité asfaltové emulze. Korelace výsledků zhutnitelnosti studených směsí v laboratoři a in-situ je obtížné hledat, přičemž této problematice se věnuje v současnosti řada



experimentálních výzkumů a vědeckých prací. Polní výsledky však ukazují, že je pravidelně dosahováno 85% míry zhutnění, i když laboratorní výsledky vykazují nižší obsah mezer [Lesueur 2000].

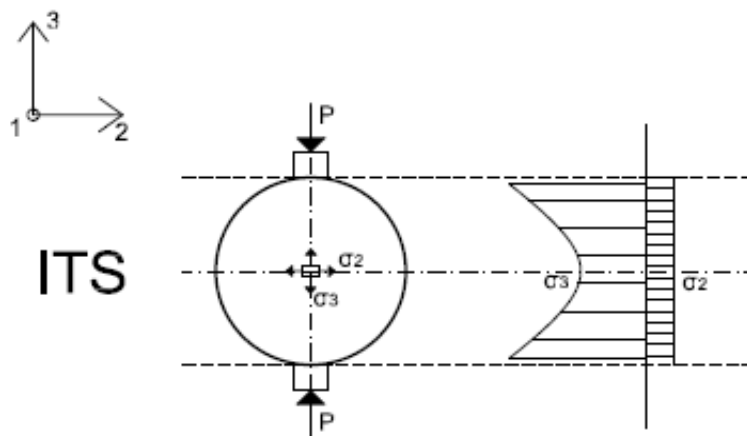
Na konci roku 2016 byly normy NF P98-139 a XP P98-121 významně aktualizovány a rozšířeny. Pro obalované kamenivo (GE) byl vydán technický předpis NF P 98-121. V současnosti zrušené označení BBF nahradil BBE (Bétons bitumineux à l'émulsion) dle předpisu NF P 98-139.

## 11. Zkušební postupy - teorie a měření

V této kapitole jsou uvedeny vybrané metodiky vyhodnocení pro použité zkušební postupy v rámci praktické části této práce.

### 11.1. Stanovení pevnosti v příčném tahu - ITS

Tato zkušební metoda se uplatní pro stanovení základní charakteristiky pro určení pevnostních vlastností směsi studené recyklace dle TP 208 a ČSN EN 13286-42 a pro asfaltové směsi dle ČSN EN 12697-23. Při zkoušce je zkušební těleso namáhané tlakem ve svislé rovině, procházející osou tělesa. Tím se vyvolá tahové napětí kolmo na směr působícího tlaku (viz obrázek 27), až se při dosažení mezní hodnoty těleso poruší v rovině procházející osou tělesa v místě dotyku tlačných ploch zkušební lisu.



Obrázek 27: Teoretické rozdělení napětí při stanovení pevnosti v příčném tahu

Pro každou směs musí být vyrobena alespoň tři zkušební tělesa. Technické podmínky pro recyklované směsi za studena TP 208 a ČSN EN 13286-42 udávají výrobu zkušebních těles pomocí válcových forem o průměru  $150,0 \pm 1,0$  mm a výšce 200-300 mm (štíhlostní poměr 0,8-2,0). Zkušební tělesa se temperují na vzduchu po dobu 4 hodin na teplotu  $(15 \pm 1)$  °C. Dle ČSN EN 12697-23 udávají použití válcových zkušebních vzorků  $100,0 \pm 3,0$  mm nebo  $150,0 \pm 3,0$  mm s výškou v rozmezí 35-70 mm. Zkušební teplota byla zvolena na úrovni  $15,0 \pm 2,0$  °C.

Zatěžování musí působit nepřerušeně a bez nárazů při konstantní rychlosti 50,0 mm/minutu, až do dosažení maximální síly na mezi porušení tělesa, které se zaznamenají. U asfaltových směsí se poté zaznamená typ porušení tělesa. Čas od vyjmutí tělesa z temperovací komory do ukončení zkoušky nesmí přesáhnout 2 minuty. Následně můžeme stanovit pevnost v příčném tahu, případně stanovit poměrnou deformaci a modul pružnosti. Výpočet pevnosti v příčném tahu se vypočte dle následujícího vztahu (11):

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times H} \quad (11)$$

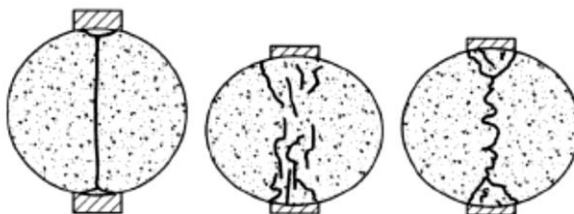
kde,

- $P$  maximální zatížení v (N)
- $D$  průměr tělesa v (mm)
- $H$  výška tělesa v (mm)
- $ITS$  pevnost v příčném tahu v (MPa)



Porušení tělesa se dále stanoví pro asfaltové směsi:

- Rovná podélná prasklina – zkušební těleso je prasklé přes celý průměr od zatěžovacích pásů vyjma ploch kolem nich, kde mohou nastat drobné trojúhelníkové praskliny
- Deformace – těleso bez známek rovné praskliny
- Kombinace – kombinace rovné podélné praskliny a deformace

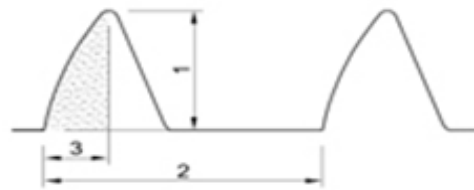
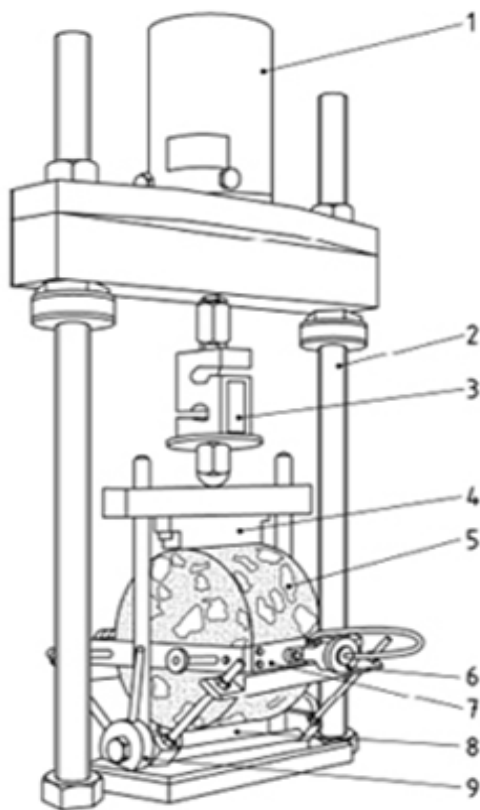


Obrázek 28: Typy porušení

### 11.2. Stanovení modulu tuhosti – zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY)

Modul tuhosti směsi recyklace za studena, zjišťovaný při cyklickém zatěžování v příčném tahu (IT-CY) dle ČSN EN 12697-26, je důležitou deformační charakteristikou, která se spolu s Poissonovým číslem používá při navrhování konstrukčních vrstev vozovek. Podstatou stanovení modulů tuhosti je, že přímé tlakové napětí, přenášené v rovině svislého řezu vzorku, vyvoluje namáhání v příčném tahu kolmo ke směru zatížení, které způsobuje horizontální deformaci. Modul tuhosti je tedy definován jako poměr napětí a poměrného přetvoření při dané teplotě, pro kterou připadá konkrétní hodnota Poissonova čísla, která charakterizuje odolnost proti účinkům zatížení. S rostoucí hodnotou modulu tuhosti, roste i schopnost přenášet větší účinky zatížení. Tato nedestruktivní zkouška se provádí na zkušebních válcových tělesech v přístroji NAT (Nottingham Asphalt Tester), který byl vyvinut v roce 1989 na univerzitě v Nottinghamu (prof. Stephen Brown a Keith Cooper) s cílem usnadnit zkoušení reologických vlastností asfaltových směsí.

Při dynamických zkouškách se používají dva módy – řízené napětí/zatížení a řízené přetvoření. Při vlastním zkoušení bylo použito řízené přetvoření, proto se nastavuje deformace tak, aby byla v pružné oblasti (nízká hodnota deformace) a nedocházelo tak k akumulaci plastického přetvoření.



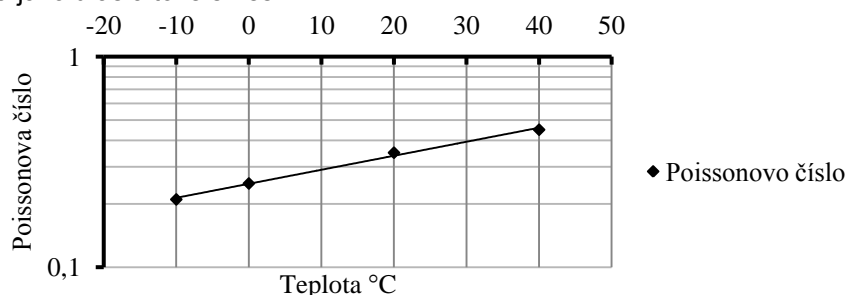
- 1) Špička zatížení
- 2) Perioda opakování zatěžovacího pulzu
- 3) Doba náběhu zatížení

- 1) Pneumatický zdroj zatížení
- 2) Ocelový zatěžovací rám
- 3) Snímač síly
- 4) Horní čelist
- 5) Zkušební těleso
- 6) LVDT nastavovací šroub
- 7) Rámeček s LVDT
- 8) Spodní čelist
- 9) Nastavovací podpěra rámečku

Obrázek 29: Zkušební zařízení / zatěžovací pulz

Válcová zkušební tělesa musí být tloušťky 35-70 mm a jmenovitým průměru 100 nebo 150 mm (nebo jiných) dle rozměrů max. zrna kameniva. Zkušební těleso temperované na zkušební teplotu (rozdíl teplot povrchu a středu tělesa musí být v rozmezí  $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ ) se umístí do polohy zkoušení do předem vytemperovaného prostředí přístroje NAT v toleranci  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  od cílové teploty. Nastaví se snímač a měřící zařízení. K tělesu se stejnoměrně a bezpečně uchytlí rámeček se snímačem deformace LVDT, aniž by došlo k namáhání tělesa. V uživatelském rozhraní počítače se nastaví teplota, průměr, výška, Poissonovo číslo<sup>14</sup>, cílová doba náběhu pulzu (target rise time), cílová příčná deformace (target horizontal deformation) a počet zatěžovacích kontrolních pulzů (number of conditioning

<sup>14</sup> Poissonův součinitel je definován jako poměr poměrné horizontální a vertikální deformace materiálu v závislosti na teplotě. V případě směsi recyklace za studena s využitím asfaltového R-materiálu a asfaltového pojiva v podobě asfaltové pěny nebo asfaltové emulze se předpokládá, že směs je z hlediska materiálových charakteristik blízka asfaltové směsi a je tím pádem možné aplikovat obdobné hodnoty Poissonova čísla jako u asfaltové směsi.



pulses). Použijeme alespoň deset kontrolních zatěžovacích pulzů, aby se nastavilo zařízení na velikost zatížení a dobu pulzu k dosažení stanovené horizontální deformace. Horizontální deformace se nastavuje na hodnoty 5-10  $\mu\text{m}$ , ale u směsi studené recyklace může dojít k destrukci tělesa, a proto byla nastavena menší úroveň deformace 3  $\mu\text{m}$ . Doba náběhu zatěžovacího pulzu musí být  $124 \pm 4$  ms. Poté se zařízení pro měření deformace LVDT uvede přibližně do střední polohy a začne se s vlastním měřením. Provede se pět měření modulu tuhosti a následně se těleso otočí o  $90^\circ \pm 10^\circ$  a opět se opakuje měření. Výsledkem zkoušky je průměrný modul tuhosti vypočtený ve dvou směrech. Při tomto způsobu zkoušení nezjišťujeme deformaci, ale zatížení, které vyvolá deformaci. Při vyhodnocení se předpokládá, že pro podmínky zkoušky lze použít teorii lineární pružnosti. Modul tuhosti se stanoví dle vztahu (12):

$$S_m = \frac{F(v+0,273)}{(z.h)} \quad (12)$$

kde,

$F$	hodnota svislého zatížení v (N)
$v$	Poissonovo číslo <sup>1</sup>
$z$	amplituda horizontální deformace v (mm)
$h$	výška tělesa v (mm)
$S_m$	modul tuhosti v (MPa)

Měření modulu tuhosti probíhá u asfaltových směsí zpravidla při teplotách 5 °C, 15 °C a 40 °C s následným stanovením poměrového ukazatele kvality směsi, kterým je teplotní citlivost asfaltové směsi. Z hlediska funkčního přístupu ke směsím recyklace za studena a emulzním asfaltovým směsím je pro měření modulu tuhosti při teplotě 40 °C neplatný předpoklad lineární pružnosti, přičemž měření vykazuje poměrně značnou variabilitu výsledků. Z tohoto důvodu byla již dříve navržena úprava kritéria teplotní citlivosti, která se stanovuje pro moduly tuhosti zjištěné při teplotách směsi 5 °C a 27 °C [Valentin 2009] Obecně lze tuto teplotní citlivost určit poměrem modulů tuhosti naměřených při nejnižší a nejvyšší teplotě dle vztahu (13):

$$\tau = \frac{S_{min}}{S_{max}} \quad (13)$$

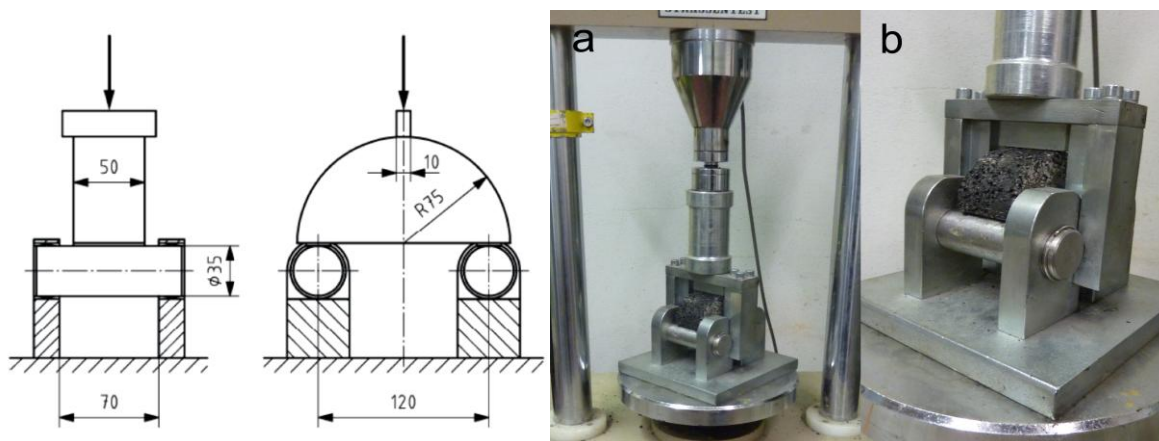
kde,

$S_{min}$	modul tuhosti směsi při minimální teplotě (°C)
$S_{max}$	modul tuhosti směsi při maximální teplotě (°C)
$\tau$	teplotní citlivost (-)

### 11.3. Lomová houževnatost - zkouška půlkruhového ohybu (Semi-Circular Bending test)

Únavové, mrazové a reflexní trhliny patří k rozhodujícím druhům poškození krytů vozovek z asfaltových směsí. Jejich vznik a šíření způsobuje snížení životnosti celé konstrukce vozovky, přičemž náklady spojené s jejich opravou jsou nemalé. Asfaltové směsi obecně jsou vícefázovým systémem mnoha komponent, z nichž některé mají komplikovanou vnitřní strukturu. V základu se jedná o komponenty nepravidelných zrn kameniva, asfaltového pojiva s malým podílem objemu vyplněnými vzduchovými mezerami. I přes složitou strukturu může být chování tohoto materiálu popsáno aplikací teorie viskoelastivity.

Jednoduchá zkouška ohybu půlkruhového tělesa (Semi-Circular Bending test) nabízí velkou flexibilitu, pokud jde o opakovatelnost, konzistenci a jednoduchost odhadu lomové houževnatosti asfaltových směsí (viz obrázek 30), avšak s distinktivními omezeními. Půlválcové zkušební těleso s trhlinou uprostřed je zatěžováno ohybem ve třech bodech tak, že střed spodního líce zkušebního tělesa je vystaven napětí v tahu. V průběhu zkoušky se deformace zvyšuje při konstantní rychlosti 5 mm/min. Odpovídající zatížení se zvyšuje na maximální hodnotu  $F_{max}$ , která se přímo vztahuje k odolnosti zkušebního tělesa vůči lomu. Na obrázku 30 je uveden příklad zkušebního rámu a zkušebního tělesa. Tato zkouška se provádí dle technických předpisů ČSN EN 12697-44<sup>15</sup> zpravidla při teplotě 0°C (-10°C).

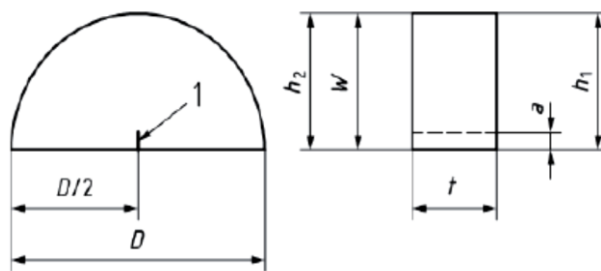


Obrázek 30: Příklad zkušebního rámu a zkušebního tělesa při zkoušce půlkruhového ohybu (mm) a) zatěžovací sestava b) detail zkušebního rámu

Válcová zkušební tělesa z asfaltových směsí se připravují mnoha možnými způsoby. Prvním způsobem je zhutnění v laboratoři v gyrátoru, eventuelně v rázovém hutnicím zařízení. Tloušťka zkušebního tělesa má být  $(50 \pm 3)$  mm a průměr  $(150 \pm 1)$  mm. Je-li nutné, zajistí se, aby horní a spodní povrchy zkušebního tělesa byly rovné a rovnoběžné. Dalším možností je zhutnění směsi do desek o tloušťce nejméně 50 mm zhutňovačem desek (lamelovým či segmentovým). Z desek se vyřezou jádrové vývrty o průměru  $(150 \pm 1)$  mm a tloušťce  $(50 \pm 3)$  mm.

Každé zkušební těleso či jádrový vývrt se rozřízne uprostřed na dvě půlválcová zkušební tělesa (viz obrázek 31). Ve středu zkušebního tělesa se vyřeže drážka (vrub), a to na šířku  $(0,35 \pm 0,10)$  mm a hloubku  $(10,0 \pm 1,0)$  mm. Kovové podpěrné pásy se přilepí ke zkušebním tělesům v místě, kde spočívají na válečkových podporách.

<sup>15</sup> V roce 2016 byla k připomínkovacímu řízení předložena revidovaná norma popisující zkoušku šíření trhliny na půlválcových zkušebních tělesech prEN 12697-44, ve které jsou upraveny některé rovnice pro výpočet odolnosti zkušebního tělesa vůči vzniku trhliny. Celkem byly upraveny dvě rovnice, a to pro výpočet geometrického faktoru zkušebního tělesa a pro výpočet odolnosti vůči lomu. V této práci bylo postupováno dle normy z roku 2010.



Obrázek 31: Rozměry zkušební tělesa pro standardní zkoušku

Pro tuto zkoušku je standardizovaný průměr zkušební tělesa 150 mm, avšak je možné zkoušet i jiná zkušební tělesa s odlišným jmenovitým průměrem (např. poměrně často jsou to Marshallova tělesa s jmenovitým průměrem 101,6 mm), avšak je nutno tomu přizpůsobit zkušební zařízení. Tělesa s odlišným průměrem by se neměla porovnávat.

Pokud jsou zkušební tělesa zkoušena při teplotě  $X$ , pak musí být tělesa uložena do klimatické komory při teplotě  $(X \pm 1) ^\circ\text{C}$  po dobu nejméně 4 hodiny. Tenzometr a zatěžovací pásek se umístí na horní části zkušebního zařízení a válečkové podpory na spodní části zkušebního zařízení. Zkušební těleso se vyjme z klimatické komory a uloží se do univerzálního zkušebního zařízení mezi zatěžovací pásek a válečkové podpory (viz obrázek 30) pokud možno v co nejkratším čase. Je třeba se ujistit, že zkušební těleso je umístěno ve středu zkušebního zařízení. Toto lze provést vyznačením značek na povrch zkušební tělesa do míst, kde se podpory dotýkají tělesa. Jakmile je zkušební těleso na místě, zvedne se spodní část zkušebního zařízení tak, aby se zkušební těleso dotýkalo horního zatěžovacího pásku. Svislá deformace se nastaví na nulu a poté se aplikuje specifické zatížení na zkušební těleso tak, aby bylo dosaženo rychlosti deformace  $(5,0 \pm 0,2) \text{ mm/min}$ . Zaznamená se síla s přesností na 1 N a svislý posun s přesností na 0,01 mm. Doba mezi vyjmutím vzorku z klimatické komory a porušením vzorku musí být menší než 60 s. Vyneše se pracovní diagram, respektive síla  $F$  se vynese v závislosti na svislém posunu  $\Delta W$ . Zkouška se považuje za platnou, pokud se trhlinka vyskytuje v oblasti  $\pm 15 \text{ mm}$  (= 10 % průměru zkušební tělesa) od středu zatěžovacího pásku. Pokud je trhlinka vně této plochy, pak musí být zkoušeno další zkušební těleso.

Definice platné oblasti je nezbytná k vyloučení velkých rozdílů mezi zkušebními výsledky. Rozdíl ve zkušebních výsledcích se zvyšuje se jmenovitou velikostí kameniva. To je způsobeno skutečností, že ve zkušebních tělesech s velkou jmenovitou velikostí kameniva je pravděpodobnost provedení drážky v zrnu kameniva poměrně velká. K omezení rozdílů ve zkušebních výsledcích je zavedeno kritérium platnosti zkoušky. Zkouška musí být provedena nejméně na čtyřech zkušebních tělesech s platnými výsledky.

Ze záznamu tenzometru (snímač síly) a snímače deformace (posunu) se stanoví maximální zatížení  $F_{max,i}$  a svislá deformace  $W_i$ . Vypočítá se přetvoření  $\varepsilon_{max,i}$  při maximální síle podle rovnice (14).

$$\varepsilon_{max,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} 100 \% \quad (14)$$

kde,

$W_i$  je výška zkušební tělesa (i) v (mm);

$\Delta W_i$  svislý posun zkušební tělesa (i) při maximální síle (i) v (mm).

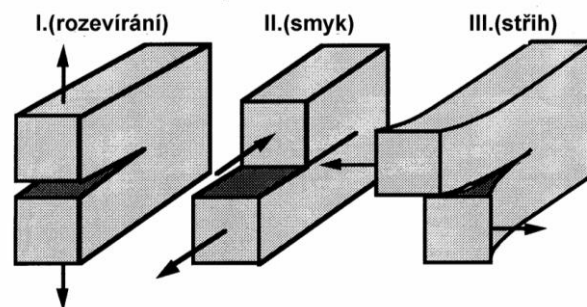
Následně se vypočítá maximální napětí při porušení  $\sigma_{max,i}$  podle rovnice (15):

$$\sigma_{max,i} = \frac{4,263 \cdot F_{max,i}}{D_i \cdot t_i} \quad (15)$$

kde,

- $D_i$  průměr zkušební tělesa (i) v (mm);
- $t_i$  tloušťka zkušební tělesa (i) v (mm);
- $F_{max,i}$  maximální síla zkušební tělesa (i) v (N)

Dále se vypočítá odolnost vůči lomu  $K_{IC,i}$  zkušební tělesa (i) v módu I. Hodnota  $K_{IC}$  charakterizuje odolnost materiálu proti statické iniciaci křehkého porušení při rovinné deformaci v oblasti kořene trhliny a to za platnosti předpokladů lineárně elastické lomové mechaniky (LELM). Oblast LELM, předpokládající platnost Hookova zákona mezi napětím a deformací v oblasti u kořene trhliny. Za určitých zjednodušujících předpokladů je LELM schopna popsat napěťově deformační poměry u kořene trhliny i při existenci malé plastické zóny. Oblast LELM se považuje v současné době do jisté míry za uzavřenou. Lomové kritérium zde může být formulováno na podkladě energetickém (klasické Griffithovy práce, hnací síla trhliny  $G$ , J-integrál, hustota deformační energie) nebo na základě napětí a deformací u kořene trhliny (koncepte Irwinova součinitele intenzity napětí  $K$ ). Nejčastěji dnes používanou je koncepte faktoru intenzity napětí, kde materiálovou veličinou charakterizující odolnost proti iniciaci nestabilního lomu za podmínek rovinné deformace je lomová houževnatost při statickém ( $K_{IC}$ ) nebo dynamickém ( $K_{Id}$ ) zatížení. Lomová houževnatost je závislá na způsobu zatěžování: mód I (rozevírání), mód II (smyk) a mód III (střih) viz obrázek 32.



Obrázek 32: Základní lomové módy [http://docplayer.cz/docs-images/60/45317077/images/21-0.png]

Dále je lomová houževnatost závislá na tloušťce materiálu; pro velmi malé tloušťky dosahuje vyšší hodnoty, poté s větší tloušťkou klesá a od určité hodnoty tloušťky se již dále nemění. V praktických případech se módy I, II a III nevyskytují samostatně, ale velmi často ve svých kombinacích, jako I-II, I-III nebo I-II-III. Posuzování takovýchto případů je potom komplikovanější než případů s jednotlivými samostatnými módy. Byla navržena řada řešení, avšak všeobecně přijatý způsob analýzy ještě neexistuje [Vlk & Florian 2007]. Výše uvedený postup tedy neuvažuje vliv smykového napětí v rovině růstu trhliny. Odolnost vůči lomu  $K_{IC,i}$  zkušební tělesa (i) v módu I se stanoví podle rovnice (16):

$$K_{IC,i} = \sigma_{max,i} \cdot f\left(\frac{a_i}{W_i}\right) \quad (16)$$

kde,

- $W_i$  výška zkušební tělesa (i) v (mm);  
 $a_i$  hloubka vrubu zkušební tělesa (i) v (mm);  
 $\sigma_{max, i}$  napětí při porušení zkušební tělesa (i) v (N/mm<sup>2</sup>);  
 $f\left(\frac{a_i}{W_i}\right)$  geometrický faktor zkušební tělesa (i) podle rovnice (17).

Tento geometrický faktor je bezrozměrná veličina a musí být zaokrouhlena na tři desetinná místa.

$$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right) = -49965 + 155,58\left(\frac{a_i}{W_i}\right) - 799,94\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^2 + 2141,9\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^3 - 2709,1\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^4 + 1398,6\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^5 \quad (17)$$

Dále celková lomová energie  $G_f$  potřebná pro celkové rozlomení vzorku se vypočítá dle následující rovnice (18):

$$G_f = \frac{W_f}{A_{cr}} \quad (18)$$

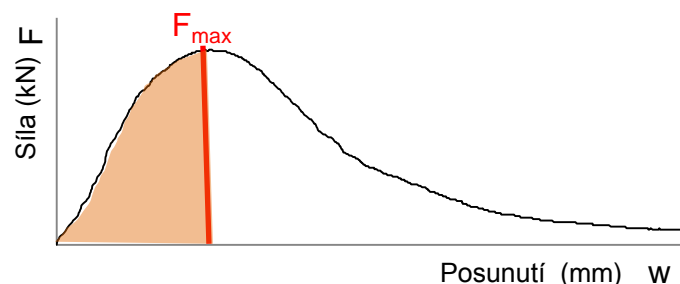
kde,

- $G_f$  lomová energie do roztržení zkušební vzorku [J/m<sup>2</sup>]  
 $W_f$  práce potřebná pro roztržení zkušební vzorku [J]  
 $A_{cr}$  plocha trhliny, respektive  $(W_{i-ai}) \cdot t_i$  [m<sup>2</sup>]

Práce je vypočítána jako plocha pod křivkou zatížení v pracovním diagramu (viz obrázek 33). Naměřené hodnoty jsou diskrétní, proto v této práci je použita proužková metoda:

$$W_f = \int_0^{\infty} F_i dw_i \quad (19)$$

$$W_f = \sum_{i=1}^n (w_{i+1} - w_i) F_i + \frac{1}{2} (w_{i+1} - w_i) (F_{i+1} - F_i) \quad (20)$$



Obrázek 33: Pracovní diagram při zkoušce půlkruhového ohybu

Lomová energie do porušení zkušební tělesa při maximální síle  $F_{max}$  se pak vypočítá jako:

$$G_f = \frac{W_{f, F_{max}}}{A_{cr}} \quad (21)$$

- kde  $G_f$  lomová energie do porušení vzorku při maximální síle  $F_{max}$  [J/m<sup>2</sup>]  
 $W_f$  práce vykonaná do porušení zkušební vzorku při maximální síle  $F_{max}$  [J]  
 $A_{cr}$  plocha trhliny, respektive  $(W_{i-ai}) \cdot t_i$  [m<sup>2</sup>]

Práce je vypočítána jako plocha pod křivkou zatížení v pracovním diagramu (viz obrázek 33) do maximální síly  $F_{max}$  následovně:

$$W_{f,Fmax} = \int_0^{Fmax} F_i dw_i \quad (22)$$

$$W_{f,Fmax} = \sum_{i=1}^n (w_{i+1} - w_i) F_i + \frac{1}{2} (w_{i+1} - w_i) (F_{i+1} - F_i) \quad (23)$$

### 11.3.1. Digitální obrazová korelace (Digital image correlation)

Digitální korelace obrazu (DIC) je inovativní bezdotyková optická technika pro měření deformací a posunutí. Metoda DIC se vyznačuje jednoduchým použitím a nákladově efektivním ve srovnání s jinými technikami, jako je například interferometrie. Párování obrazů je klíčovým komponentem pro mnoho obrazových analýz, které řeší otázku například stereo vnímání hloubky obrazu, analýzy pohybu, detekci změn, rozpoznání a lokalizaci objektů [Pernerová 2014].

Použitá metoda DIC funguje na principu porovnání digitálních obrazů v různých fázích deformace a napěťových stavů. Sledováním pole obrazových bodů lze identifikovat a vytvořit deformační 2D vektorové pole, které umožňuje identifikovat změny napětí a deformací. Aby DIC byla efektivní, pixelové bloky musí být náhodné a jedinečné s úrovní kontrastu a intenzity. Nevyžaduje žádné zvláštní osvětlení, přičemž v mnoha případech má přirozený povrch konstrukce nebo součásti dostatečnou strukturu obrazu pro práci DIC bez nutnosti jakékoliv speciální přípravy povrchu [McCormick 2010, Tung 2008].

V rámci experimentu byla metoda digitální korelace obrazu DIC použita ke sledování testu tříbodového půlkruhového ohybu, přičemž by měla umožnit lépe sledovat a zkoumat lomové chování asfaltových směsí při nízké, ale i běžné laboratorní teplotě v kombinaci rychlosti zatěžování a tuhosti zkušebních vzorků. Metodou DIC byly sledovány posuny, respektive 2D deformace vzorku v čase. Konkrétně v kritické oblasti vytvořeného vrubu a v místech šíření trhliny za definovaných podmínek, co nejjednodušším způsobem, to jest bez použití kontaktních metod, vzhledem k velikosti vzorků a možnostem vybavení laboratoře.

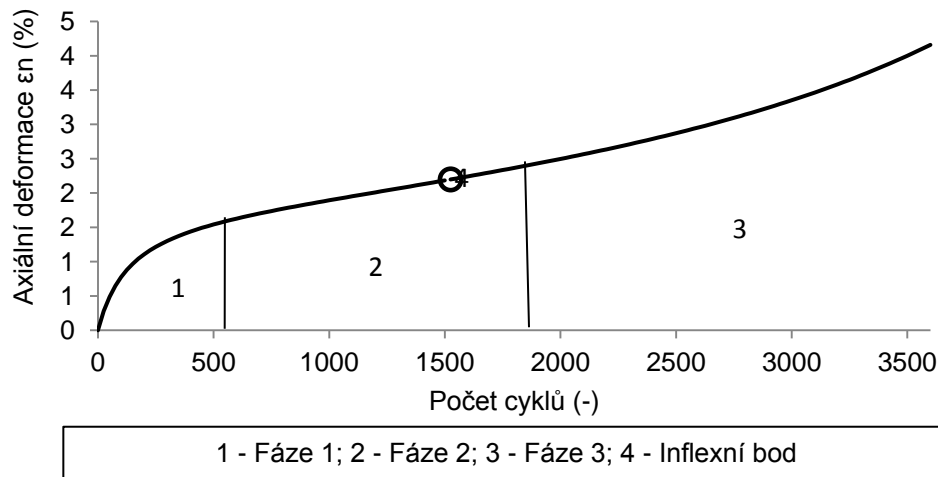
### 11.4. Cyklické dotvarování - cyklická zkouška v tlaku

Zkušební metoda stanovuje odolnost proti trvalé deformaci válcového zkušebního tělesa z asfaltové směsi cyklickým zatěžováním dle ČSN EN 12697-25. Válcové zkušební těleso o průměru 150 mm, temperované na zvýšenou teplotu temperovací komory, se umístí mezi dvě navzájem rovnoběžné zatěžovací desky. Průměr horní zatěžovací desky je 100 mm (podle úhlu sevřeného mezi dosedací plochou zatěžovací desky a plochou zkušebního tělesa je skutečný průměr 96 mm). Zkušební těleso je vystaveno působení cyklického osového tlaku pulzy s časovou prodlevou. Neaplikuje se žádný další boční omezující tlak. Během zkoušky se měří změna polohy horní zatěžovací desky po určitém počtu zatěžovacích cyklů. Narůstající osově přetvoření při dotvarování  $\epsilon_n$  (trvalá deformace) zkušebního tělesa je stanoveno jako funkce počtu zatěžovacích cyklů. Výsledky se vyjádří křivkou dotvarování. Křivka dotvarování udává hodnotu narůstajícího axiálního přetvoření zkušebního tělesa, v procentech, jako funkci počtu zatěžovacích cyklů. Všeobecně se mohou rozlišit následující fáze (viz obrázek 34):

- Fáze 1: (počáteční) část deformační křivky, kde sklon křivky klesá strměji s narůstajícím počtem zatěžovacích cyklů;
- Fáze 2: (prostřední) část deformační křivky, kde je strmost křivky zhruba konstantní a zahrnuje inflexní bod deformační křivky;
- Fáze 3: (konečná) část deformační křivky, kde sklon křivky stoupá strměji s narůstajícím počtem zatěžovacích cyklů.

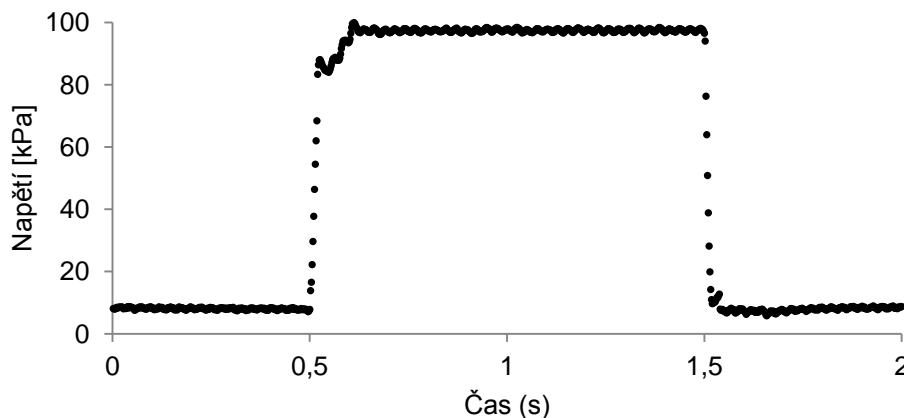


Jedna nebo více fází mohou za různých zkušebních podmínek a podle vlastností směsi chybět.



Obrázek 34: Křivka dotvarování

Pro standardní zkoušku dotvarování se musí použít alespoň 5 zkušebních těles. Běžná zkušební teplota je 40 °C. V rámci zkoušení se nejprve aplikuje přetížení (10 ± 1 kPa) po dobu 10 minut (600 s). Po náběhu přetížení se zaznamená vzniklá deformace. Ihned po skončení doby přetížení se aplikuje cyklické kvadratické zatěžování (100±2 kPa) s dobou trvání stanovenou pro každý puls (1 ± 0,05) sekundy (viz obrázek 35). Každá prodleva mezi jednotlivými pulsy musí také být (1 ± 0,05) sekundy. To znamená, že frekvence je přibližně 0.5 Hz.



Obrázek 35: Parametry zatěžovacího pulzu (zařízení UTM)

Celkově se musí aplikovat 3 600 pulsů. Pokud poměrné přetvoření překročí 4 %, musí se vztah celkové deformace a počtu zatížení zaznamenat graficky a musí být zřejmé, že došlo k porušení zkušebního tělesa (inflexní bod byl překročen). Narůstající axiální přetvoření  $\varepsilon_n$  po  $n$  zatíženích, se vypočítá v procentech (%) podle následující rovnice (24) pro standardní zkoušku dotvarování  $n = 3\,600$  cyklů:

$$\varepsilon_n = 100 \frac{|h_0 - h_n|}{t_i} \quad (24)$$



kde,

- $\varepsilon_n$  narůstající axiální přetvoření zkušebního tělesa po  $n$  zatíženích (%)
- $h_0$  průměrná změna výšky obou snímačů posunu po přitížení (mm);
- $h_n$  průměrná změna výšky obou snímačů posunu po  $n$  zatěžovacích cyklech, (mm)
- $t_i$  počáteční výška zkušebního tělesa (mm).

Dále je možné vypočítat míru dotvarování  $f_c$  v jednotlivých cyklech, a modul dotvarování,  $E_n$ , v MPa, podle následujících rovnic (25) a (26) pro stanovený interval zatížení:

$$f_c = \frac{(\varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2})}{(n_1 - n_2)} 10000 \quad (25)$$

kde,

- $f_c$  míra dotvarování ( $\mu\text{strain}/\text{zatížení}$ )
- $\varepsilon_{ni}$  axiální přetvoření v zatěžovacím cyklu (%)
- $n_i$  číslo zatěžovacího cyklu (-).

$$E_n = \frac{\sigma}{10\varepsilon_n} \quad (26)$$

kde,

- $E_n$  modul dotvarování po  $n$  zatěžovacích cyklech (MPa)
- $\sigma$  napětí od zatížení (kPa)
- $\varepsilon_n$  axiální přetvoření zkušebního tělesa po  $n$  zatíženích (%).

Pokud trvalá deformace překročí 40 000  $\mu\text{strain}$  a grafický záznam zobrazuje, že inflexní bod byl překročen, je mírou dotvarování extrapolovaná inkliniční křivka s nejmenším sklonem.

### 11.5. Měření komplexních modulů tuhosti

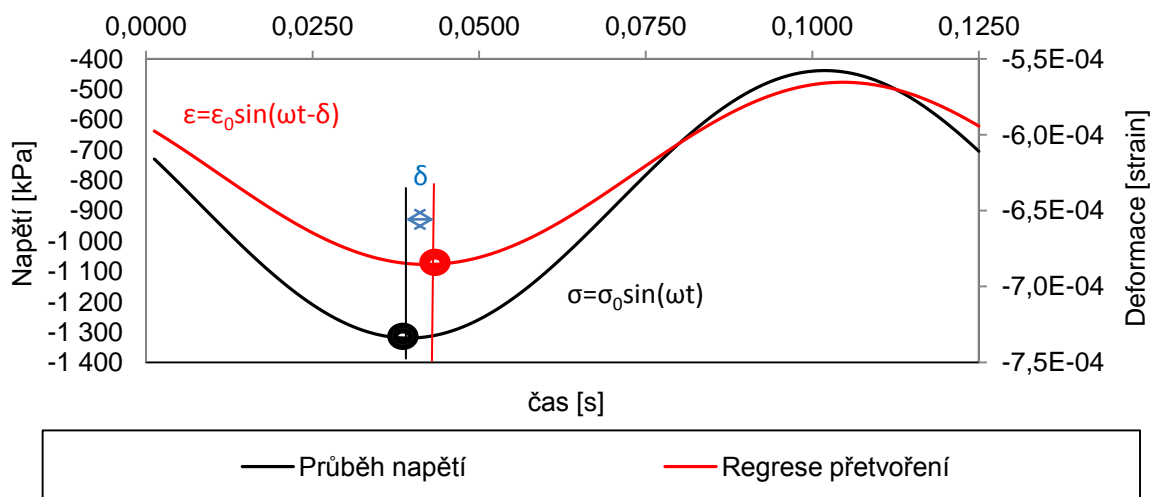
Asfaltové materiály vykazují časově závislé mechanické chování. Pokud se podrobí malým zatížením, pak se u nich projeví kombinace elastického, zpožděného elastického a viskózního chování. Při nízkých teplotách a vysokých frekvencích zatížení se chovají jako pružné hmoty v tuhé fázi s téměř plnou reverzibilní odezvou. Ve vysokých teplotách a malém frekvenčním zatížení, se chovají jako viskózní tekutiny s ireverzibilní odezvou. Ve střední oblasti teplot a frekvenčním rozsahu asfaltové směsi vykazují viskoelastické chování, respektive zpožděnou pružnou odezvu v kombinaci s viskózním tokem. Vypovídací schopnosti mají především ta reologická měření asfaltových směsí, jejichž výsledky ve formě komplexních (směrných) křivek, poskytují informace o závislosti komplexního modulu na době a frekvenci zatížení. Hodnotu komplexního modulu a sklon komplexní (směrné) křivky lze považovat za základní údaje pro předpověď výše uvedených užitečných vlastností asfaltových směsí [Zou 2010].

Testování komplexní modulů asfaltových směsí není nový koncept. Papazian v roce 1962 popsal viskoelastické zkoušky prováděné na asfaltových směsích. Použil sinusové zatížení na válcový vzorek při specifické frekvenci a měřil odezvu. Testy byly prováděny za řízených teplotních podmínek při měnících se amplitudách napětí a frekvencích. Dospěl k závěru, že tento koncept může být aplikován na návrh a testování asfaltových vozovek.

V dalších následujících letech pokračovaly práce, které se týkaly měření komplexních modulů v tlaku, v tahu a v tahu-tlaku. Řada studií prokázala rozdíly v  $|E^*|$  získaném za odlišných podmínek zatížení. Rozdíly jsou zejména v hodnotách fázového úhlu, který

vykazuje tendenci významného růstu při vyšších zkušebních teplotách. Witczak a Root naznačují, že testování v tahu-tlaku může být reprezentativnější pro podmínky, které se vyskytují ve vozovce. Nicméně čtyřicet let po těchto experimentech se stále používají tyto koncepty k vypracování kritérií návrhu a vyhodnocování vlastností asfaltových směsí [Clyne 2003].

Obecně pro lineárně viskoelastické materiály je vztah mezi napětím a deformací vlivem nepřetržitého sinového zatížením definovaný jako komplexní dynamický modul ( $E^*$ ). Komplexní modul je definovaný jak poměr amplitud sinového (haversinového -  $haversin(\omega) = \frac{1-\cos(\omega)}{2}$ ) napětí (v daném čase  $t$ , s úhlovým frekvenčním zatížením  $\omega$ ) a amplituda sinové (haversinové) deformace [Ferry 1980, Clyne 2003] (viz obrázek 36).



Obrázek 36: Napětí a deformace při dynamickém sinovém zatížení

Pro jednorozměrný případ se zatížením reprezentující sinovou funkci je napětí charakterizováno následujícím vztahem (27) a výsledné ustálené přetvoření vztahem (28):

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (27)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta) \quad (28)$$

V rovnici  $\sigma_0$  a  $\varepsilon_0$  značí amplitudu napětí a deformace,  $\omega$  je úhlová rychlost, která se vztahuje k frekvenci  $f$ :

$$\omega = 2\pi f \quad (29)$$

Zpoždění mezi signálem zatížení a deformací, je vyjádřené jako fázový (ztrátový) úhel ( $\delta$ ), někdy označovaný též jako úhel fázového posunu. Pro čistě elastický materiál je ztrátový úhel roven 0 (rad), zatímco u čistě viskózního materiálu je ztrátový úhel roven  $\pi/2$  (rad). Poměr amplitudy napětí a deformace je definována jako absolutní hodnota dynamického modulu. Elastická část komplexního modulu je definována vztahem (30) a ztrátová část komplexního modulu vztahem (31):

$$E' = \frac{\sigma_0 \cos(\delta)}{\varepsilon_0} \quad (30)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0 \sin(\delta)}{\varepsilon_0} \quad (31)$$

Dynamický komplexní modul je tedy absolutní hodnota komplexního modulu:

$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E' + iE'' \quad (32)$$

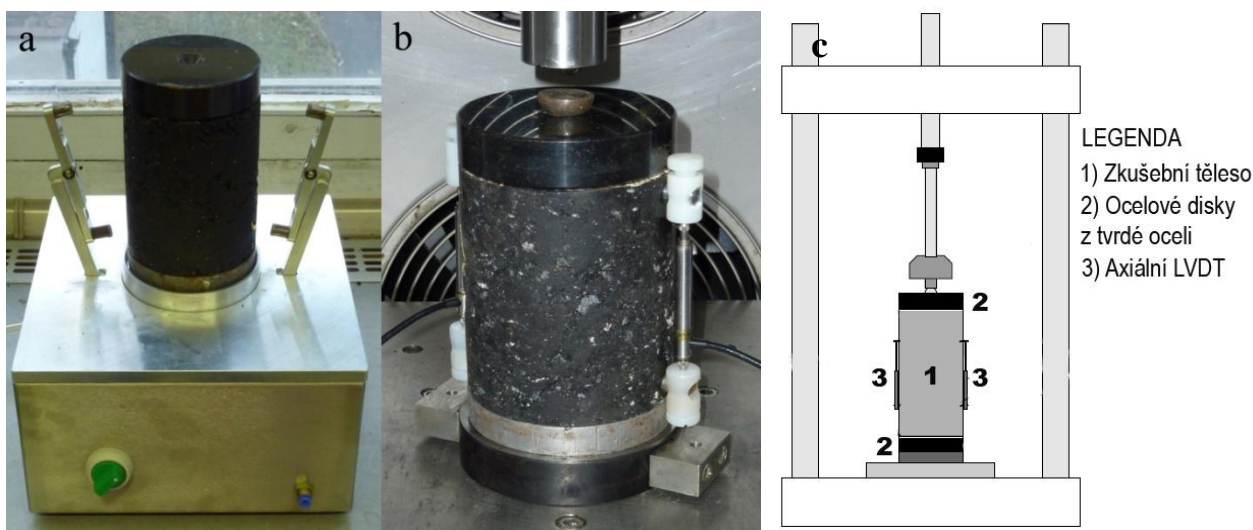
kde,

- $E$  komplexní modul tuhosti (Pa)
- $\sigma$  amplituda sinového (haversinového) napětí (Pa)
- $\varepsilon$  amplituda sinové (haversinové) deformace (m)
- $E'$  elastická složka komplexního modulu (Pa)
- $E''$  ztrátová (viskózní) složka komplexního modulu (Pa).

### 11.5.1. Měření komplexních modulů v tlaku

Jedním ze způsobů měření komplexních modulů je metoda zatěžováním v tlaku na univerzální zkušební přístroji (UTM). Postup měření a výpočet komplexních modulů v axiálním tlaku byl v této práci proveden čistě experimentálně dle metodiky [NCHRP 1-37A Draft Test Method DM-1 - 2002] (viz obrázek 37). Tato metoda je rozdílná od stanovení komplexních modulů dle ASTM D3497-79 (Standard Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures) [Kim 2009].

Na zkušební vzorek se aplikuje sinové (haversinové) axiální tlakové zatížení při dané teplotě. Aplikované napětí a výsledná odezva axiální deformace vzorku je použita pro výpočet dynamického modulu a fázového (ztrátového) úhlu.



Obrázek 37: a) zajištění sousého umístění LVDT držáků b) umístění axiálních LVDT sond c) testovací sestava při měření dynamického komplexního modulu v tlaku

Měření dynamického modulu tuhosti se provádí na zkušebních vzorcích připravených na přístroji Superpave Gyrotory Compactor dle AASHTO T312 (tlak  $600 \pm 18$  kPa, úhel odklonu  $1,16 \pm 0,02^\circ$ ). Průměr každého zkušebního vzorku musí být v intervalu  $102 \pm 2$  mm. Průměrná výška zkušebního vzorku musí být mezi  $150 \pm 2,5$  mm.

Počet požadovaných zkušebních vzorků závisí na počtu měření axiální deformace provedených na jeden vzorek a na přesnosti průměrného dynamického modulu. Tabulka

21 stanovuje počet zkušebních vzorků, které by měly být testovány, aby se dosáhlo požadované přesnosti.

Počet snímačů LVDT	Počet zkušebních těles	Odhadovaný limit přesnosti (%)
2	2	±18,0
2	3	±15,0
2	4	±13,4
3	2	±13,1
3	3	±12,0
3	4	±11,5

Tabulka 21: Doporučený počet zkušebních vzorků

Zkušební těleso musí být osazeno axiálními LVDT sondami tak, aby nedošlo k jakýmkoli posunům nebo dokonce k odtržení, zejména při vyšších teplotách měření.

Doporučená zkušební série se skládá z testování při teplotách v intervalu -10,0 °C až +50,0 °C a při zatěžovacích frekvencích v intervalu 0,1 - 25 Hz při každé teplotě. Každý zkušební vzorek by měly být testován pro každou kombinaci teploty a frekvenci zatížení tak, že se začíná s

nejnižší teplotou a postupuje se k nejvyšší teplotě. V opačném gardu se musí aplikovat frekvence zatížení.

Tabulka 22 naznačuje úrovně napětí pro tento test. Pokud kdykoli během zatěžování překročí trvalá axiální deformace vzorku 1500  $\mu$ strain, musí být vzorek vyřazen. Rozsah úrovně deformace by měl být 50-150  $\mu$ strain, respektive se musí zvolit vhodná úroveň napětí, která vyhovuje omezení deformace vzorku.

Teplota (°C)	Rozsah napětí (kPa)
-10	1400-2800
5	700-1400
20	350-700
40	140-250

Tabulka 22: Úrovně napětí

Kontaktní zatížení ( $P_{min}$ ) se musí rovnat 5 % dynamické zátěže, která bude aplikovaná na zkušební vzorek. V tabulce 23 je uveden doporučený minimální počet zatěžovacích cyklů pro konkrétní frekvence zatížení. Doporučuje se minimálně 2 minutová přestávka mezi jednotlivými zatěžovacími sekvencemi.

Frekvence (Hz)	Počet cyklů
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

Tabulka 23: Minimální počet měření při zatěžovací sekvenci

Výpočet komplexního modulu v tlaku je proveden z průměru posledních 5ti měření. Napětí je vypočítáno dle vztahu (33):

$$\sigma_0 = \frac{\bar{P}}{A} \quad (33)$$



kde,

- $\sigma_0$  průměrné napětí (Pa)
- $\bar{P}$  průměrná maximální tlaková síla při sinovém zatížení (N)
- $A$  plocha vodorovného průřezu vzorku ( $m^2$ ).

Následně dosazením do vzorce (33) se spočítá komplexní modul v tlaku:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (34)$$

kde,

- $E^*$  komplexní modul v tlaku (Pa)
- $\varepsilon_0$  průměrná maximální tlakové přetvoření (strain).

Dále se spočítá ztrátový úhel dle vztahu (35):

$$\delta = \frac{t_i}{t_p} 360 \quad (35)$$

kde,

- $\delta$  ztrátový úhel ( $^\circ$ )
- $t_i$  průměrná doba zpoždění mezi cyklem napětí a cyklem deformace (s)
- $t_p$  průměrná doba trvání cyklu napětí (s).

Měřené veličiny (síla a deformace) jsou diskrétní veličiny, zatížené řadou chyb a nepřesností při měření. Abychom mohli tato data dále zpracovat, je nutné je vyrovnat, respektive aproximovat spojitou funkcí (viz obrázek 38). Samozřejmě nejvhodnější je goniometrická funkce sinus, proto aproximační funkce by měla být v podobě:

$$\check{Y} = A \sin(\omega + B) + C \quad (36)$$

kde,

- $\check{Y}$  odhad goniometrické aproximační funkce
- $A, B, C$  jsou hledané parametry funkce  $\check{Y}$ .

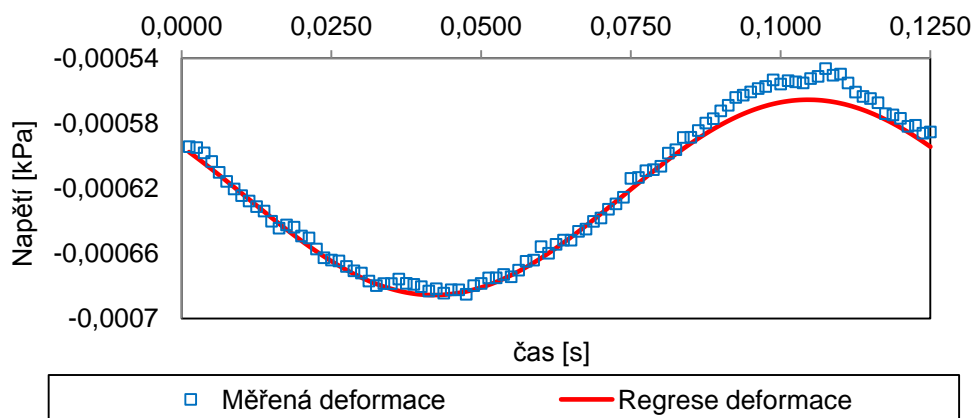
Vyrovnaním experimentálních dat se rozumí proložení regresní funkcí takovou, při kterém je celková chyba nejmenší. Celkovou chybu můžeme popsat jako minimalizaci kritéria nejmenšího součtu čtverců, minimalizaci maximální hodnoty rezidua a minimalizaci součtu absolutních hodnot reziduí.

Nemusí se získat automaticky nejlepší výsledek, který získáme použitím nejznámější a nejpoužívanější metody nejmenších čtverců. Tato metoda vychází z požadavku, aby součet čtverců odchylek  $Sr$  měřených hodnot  $y_i$  od hodnot  $\check{Y}_i$  ležících na regresní křivce byl minimální, čili hledáme minimum funkce [Jarušková 2006]:

$$Sr = \sum_{i=1}^n [y_i - \check{Y}_i]^2 \quad (37)$$

Rezidua  $e_i$  jsou považována za odhady chyby  $e_i$ .

$$e_i = (y_i - \check{Y}_i)_{i=1, \dots, n} \quad (38)$$



Obrázek 38: Typický záznam měřené deformace s následnou sinovou regresí

### 11.5.2. Komplexní modul tuhosti v tahu za ohybu

Další z metod měření komplexního modulu v tahu za ohybu je pomocí zařízení 4PB-PR, kterou získáme hodnoty komplexního modulu při určité teplotě a frekvenci [Zou 2010]. V současnosti je 4PB-PR test normalizován evropskou normou ČSN EN 12697-26. Tato norma předepisuje, že trámeček je upnut svorkami v testovacím zařízení ve čtyřech bodech. Všechny svorky by měly dovolit volné otáčení a posunutí ve směru podélném. Vnější svorky by měly být pevné, aby bránily svislému pohybu. Vnitřní svorky vyvozují svislé zatížení. Vyhodnocení výsledků testu je založeno na Euler - Bernoulliho teorii<sup>16</sup>. V této teorii, je 3D ohyb trámečku reprezentován trámečkem bez výšky a šířky, to jest 1D paprskem. Tuhost 1D trámečků je reprezentována tuhostí „ $EI$ “. Kde  $E$  znamená Youngův modul pružnosti a  $I$  vyjadřuje moment setrvačnosti příčného řezu trámečku [Huurman 2012].

<sup>16</sup> Euler-Bernoulliho teorie je zjednodušená ohybová teorie. V této lineární teorii pružnosti jsou zavedeny tři předpoklady:

- průřez je nekonečně tuhý ve své vlastní rovině,
- příčný řez trámu zůstává rovinný i po deformaci,
- Příčný řez zůstává rovinný po přetvoření osy nosníku.

Základní vztah pro Euler-Bernoulliho teorii pro sinusové namáhání nosníku:

$$M(x, t) = EIw''(x) \sin(\omega t) \quad (39)$$

kde

$EI$	reprezentuje tuhost materiálu
$M$	ohybový moment (Nm)
$t$	čas (s)
$\omega$	frekvenci (Hz)
$w$	je přetvoření ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )



Obrázek 39: Přístroj 4PB-PR

Zkušební těleso ve tvaru trámečku je vystaveno opakovanému ohybu ve čtyřech bodech s volnou rotací a (horizontálním) posunem na všech zatěžovacích a podpěrných bodech. Ohyb se vyvozuje pohybem středního zatěžovacího bodu (nebo bodů) ve svislém směru kolmo k podélné ose zkušebního tělesa. Svislá poloha dvou koncových bodů zůstává neměnná. Vyvozovaná opakovaná výchylka na obě strany je symetrická k základní nulové poloze a sinusová amplituda musí být konstantní v čase [Huurman 2012].

V průběhu zkoušky se síla potřebná k deformaci tělesa měří jako funkce času stejně tak jako fázové zpoždění mezi signálem síly a signálem výchylky. Z tohoto se vypočítá modul tuhosti zkoušeného materiálu. Asfaltová směs je viskoelastická hmota, jejíž tuhost je reprezentovaná komplexními moduly,  $E^*$ . Vlivem viskoelastických vlastností dochází ke zpoždění odezvy definovaným fázovým úhlem  $\delta$ . Tuhost a fázové zpoždění zkoušeného materiálu jsou určeny následujícími rovnicemi [Huurman 2012]

$$E_1 = \gamma \left( \frac{F}{Z} \cos(\delta) + \mu \omega^2 \right) \quad (40)^{17}$$

$$E_2 = \gamma \left( \frac{F}{Z} \sin(\delta) \right) \quad (41)^{18}$$

kde,

$L$	efektivní délka trámečku (m)
$h$	výška trámečku (m)
$b$	šířka trámečku (m)
$x$	umístění sondy pro měření přetvoření trámečku (m)
$E_1$	elastický modul (MPa)
$E_2$	ztrátový modul (MPa)
$\delta$	fázový úhel (rad)
$\gamma$	faktor tvaru (1/m)
$F$	síla působící na trámeček (N)

<sup>17</sup> **Elastický modul** -  $E_1$  je reálná část komplexního dynamického modulu - je mírou elastického odporu materiálu proti deformaci. Určuje hodnotu energie akumulované a uvolněné v jednotce objemu za jednu periodu.

<sup>18</sup> **Ztrátový modul** -  $E_2$  je imaginární část komplexního modulu a je mírou přenosu energie mezi molekulami. Charakterizuje mechanické ztráty a určuje množství energie, která se přemění na teplo za periodu deformace. Ztráty energie lze vysvětlit z molekulárního hlediska tak, že segmenty makromolekul reagují na střídavé napětí a mění uspořádání. Změna uspořádání nastane až za určitý čas  $t$ .





- $Z$  měřená deformace trámečku (m)  
 $\mu$  faktor hmotnosti (kg)  
 $\omega$  frekvence vnější síly (rad/s).

Faktory  $\gamma$  a  $\mu$  jsou stanoveny následovně:

$$R\{x\} = \frac{12L}{A} \left( \frac{1}{3\frac{x}{L} - 3\frac{x^2}{L^2} - \frac{A^2}{L^2}} \right) \quad (42)$$

$$\gamma = \frac{L^2 A}{bh^3} \left( \frac{3}{4} - \frac{A^2}{L^2} \right) \quad (43)$$

$$\mu = R\{x\} \left( \frac{M}{\pi^4} + \frac{m_1}{R(A)} + \frac{m_2 R(A)}{[R(\gamma)]^2} \right) \quad (44)$$

kde,

- $L$  efektivní délka trámečku (m)  
 $A$  vzdálenost mezi vnější svorkou a další vnitřní svorkou (m)  
 $M$  hmotnost trámečku (kg)  
 $m_1$  hmotnost pohyblivé části (kg) v umístění  $A$   
 $m_2$  hmotnost pohyblivé části (kg) v umístění  $y$  (m).

Je nutné ještě poznamenat, že výše uvedené rovnice jsou založené na modifikované aproximaci prvního řádu přesného řešení. Aplikované přiblížení je velmi přesné, rozdíl s přesným řešením je velmi malý. Deformace vzniklé vlivem působení posouvající síly jsou v harmonizované evropské normě zanedbané [Huurman 2012].

$$E^* = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (45)$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (46)$$

### 11.5.3. Faktory ovlivňující měření přístrojem 4PB-PR

4PB-PR je zdánlivě jednoduchý test, který může být charakterizován na základě jednoduché teorie, přičemž získané výsledky jsou významné hodnoty pro účely navrhování vozovek. Ovšem takový závěr nemůže být aplikován, zejména z následujících důvodů. Vlastní měření je ovlivňováno několika faktory, které vnášejí do metodiky měření chyby, které mají vliv na výsledky. Tyto okolnosti nejsou žádným způsobem ošetřeny ve zkušební metodice.

V první řadě trámeček musí být sevřen svorkami. Toto sevření lokálně představuje zavedení napětí a deformace do materiálu trámečku. Tato extra napětí a deformace mohou představovat únavové poškození či lokální nelineární efekty, které nejsou zavedeny do výpočtu komplexních modulů.

Za druhé není možné zkonstruovat 4PB-PR zařízení, které vylučuje tření a zároveň umožňuje volný posun, a které se v čase neopotřebuje. Takové deformace částí zařízení může ovlivnit výsledky testů.

Za třetí smykové síly působí na trámečku v oblasti mezi vnitřními a vnějšími svorkami. Tyto síly způsobují deformaci trámečku, přičemž tyto deformace nejsou uvažované v předepsané zkušební metodice. Trámeček v 4PB-PR zařízení podléhá smykovým silám v

oblasti mezi vnitřními a vnějšími svorkami. Posouvající síly se v této oblasti rovnají  $F/2$ , to je poloviční aplikované celkové zatížení.

Za čtvrté svorky omezují možnost deformace příčného řezu vedoucího k nežádoucím deformacím trámečku blízko svorek, které nejsou v souladu s ohybovou teorií.

Pátým prvkem ovlivňujícím výsledky je faktor tvaru, který je funkcí tvaru a velikosti zkušebního tělesa a faktor hmotnosti, který je funkcí hmotnosti trámečku a zařízení, jež svojí setrvačnou silou ovlivňují působící sílu. Velikost chyby měření je závislá na smykovém modulu  $G$  a Poissonově číslu v zkoumaného materiálu trámečku. Tyto dva faktory jsou zaneseny do výpočtu komplexního modulu [Huurman 2012].

### 11.6. Časově teplotní superpozice

Teplota a čas zatížení má dramatický vliv na viskoelastické odezvy asfaltových pojiv a směsí. To je jedním z důvodů, proč se viskoelastické vlastnosti měří v širokém spektru. Chování asfaltové směsi, nebo asfaltového pojiva závisí na teplotě a času zatížení. Jestliže se tyto proměnné nacházejí v rozsahu, kde se materiál chová lineárně viskoelasticky a současně můžeme materiál charakterizovat jako teplotně-reologicky jednoduchý, pak lze efekt času, nebo frekvence a teploty vyjádřit parametry časově-teplotní superpozice. Vlastnost materiálu jako funkce času, nebo frekvence, jako například výsledky dynamických měření, nebo materiálové spektrum, měřené při několika teplotách, mohou být posunuty podél os k vytvoření komplexní, směrné či hlavní křivky. Aplikací časově teplotní superpozice tedy obdržíme vlastnost materiálu v rozsahu mnohem širším, než může být měřena dostupnou laboratorní technikou při jedné teplotě. Časově-teplotní faktor posunu  $a_T(T)$  může být definovaný jako horizontální posun, který je aplikovaný v logaritmu času na křivce  $E(t)$  v rámci libovolné teploty  $T$ . Posun se provádí pro zvolenou referenční teplotu  $T_{ref}$ . Pro posun na vodorovné ose  $x$  platí [Ferry 1980]:

$$\omega_i = a_T(T) \cdot \omega \quad (47)$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence a  $T$  je proměnná teplota. Přičemž pro referenční teplotu  $T_{ref}$  platí:

$$a_T(T_{ref}) = 1 \quad (48)$$

Rovnice používaná pro výpočet parametrů časově-teplotní superpozice dle WLF (Williams, Landel, Ferry) je následující

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})} \quad (49)$$

kde,

$a_T$  převodní faktor časově-teplotní superpozice

$T$  proměnná teplota

$T_{ref}$  referenční teplota

$C_1$  a  $C_2$  jsou parametry WLF rovnice [Ferry 1980; Dealy and Wissbrun 1999].

Existují však další metody pro výpočet parametrů časově-teplotní superpozice - Vogel – Fulcher, Arrhenius [Žák 2012] nebo polynomiální funkce dle Austroad Test Method AGPT/T274.



### 11.7. Únavové vlastnosti asfaltových směsí

Tuhost se při opakovaném zatížení při únavových zkouškách snižuje. Příklad vývoje tuhosti vzhledem k počtu zatěžovacích cyklů je uveden na obrázku 40. Proces únavy se obecně skládá ze tří fází.

Fáze I - (adaptační fáze), během této fáze tuhost (nebo poměr tuhosti) rychle klesá v důsledku opakovaného zatížení. Pokles je pravděpodobně způsoben kombinovanými účinky únavového poškození, ohříváním vzorku a tixotropie<sup>19</sup>. Dochází k iniciaci mikrotrhlinek.

Fáze II - (kvazi stacionární fáze) - tuhost se v této fázi pomalu snižuje. Vliv únavy na pokles tuhosti je dominantní. Jakékoliv jiné účinky v podobě tepelného ohřevu a tixotropie mohou být považovány za marginální ve srovnání s dominantními účinky únavového poškození. Mikrotrhliny jsou ve stabilní fázi propagace.

Fáze III - (fáze porušení) v této fázi dochází k lokálnímu šíření trhlin jejich dalšímu rozvoji a až na konci této fáze dojde k porušení.

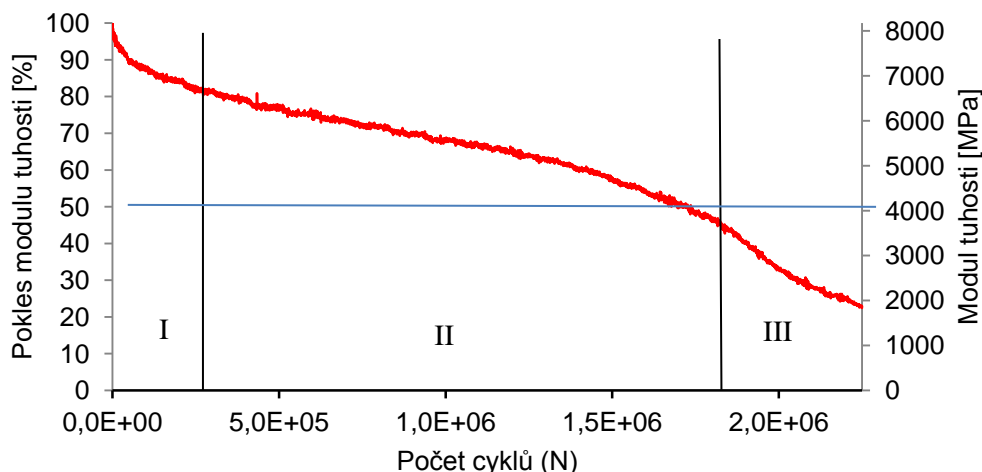
Pro vyhodnocení a porovnání únavových vlastností asfaltových směsí je nutné definovat porušení konzistentním způsobem. Tuhost na počátku testu ( $N = 50$  až  $100$  cyklů) je definována jako počáteční tuhost. V módu řízeného napětí má vzorek poměrně krátkou dobu šíření trhliny, takže okamžik porušení se blíží okamžiku, kdy byl vzorek zcela zlomen. V režimu řízené deformace však okamžik poruchy není snadno definovatelný, díky dlouhé fázi propagace trhlin během testu. Proto je definováno kritérium životnosti  $N1$  vzorku [Žák 2013]. Toto kritérium  $N1$  je v této práci stanoveno čtyřmi způsoby (metodou 50% poklesu modulu tuhosti, metodou disipace energie - Rowe&Bouldin, Hopman&Pronk, RDEC).

#### 11.7.1. 50% pokles modulu tuhosti

Závislost počtu cyklů na napětí nebo přetvoření lze vykreslit jako vztah v logaritmickém měřítku, který lze aproximovat přímkou známou jako Wöhlerova křivka nebo S-N křivka. Konvenčně uváděná hodnota reprezentující odolnost asfaltové směsi vůči únavě je stanovena tak, že je zvolen počet cyklů, ve kterém je hodnota modulu tuhosti poloviční vůči počátečnímu modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-24 (obrázek 40). Takto definovaný vztah odolnosti proti únavě je do velké míry závislý na okrajových podmínkách testu. Parametry Wöhlerovy křivky se liší při volbě rozdílných teplot, jiných frekvencí zatížení a jiných testovacích zařízeních, které předpisy připouštějí.

---

<sup>19</sup> Tixotropie - vlastnost nebo schopnost některých koloidních látek přecházet při konstantní teplotě mechanickým zásahem (smykovým namáháním) z pevného stavu do kapalného a zpět.



Obrázek 40: 50% pokles modulu tuhosti

### 11.7.2. Disipace energie

Ideálně elastický materiál je takový druh materiálu, u kterého veškerá energie akumulovaná v systému při jeho zatížení, je zpětně využita při odlehčení. Nedochozí tedy k žádné disipaci vložené mechanické energie v teplo. Viskoelastické materiály jsou přechodovou oblastí mezi ideálně elastickými a viskózními materiály. Mezi napětím a deformací je určitý fázový posun. Poměrná deformace se opožďuje za napětím, přičemž fázový posun mezi napětím a poměrnou deformací leží v intervalu  $(0, \pi/2)$ . Část vložené mechanické energie při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů se zpětně využije při následném odlehčení. Během deformace viskoelastického tělesa je část celkové práce deformace disipována jako teplo přes viskózní ztráty a část uložena ve formě pružné (vratné) deformace [Rowe 2000, Žák 2013]. Tento proces je nevratný. Množství přeměněné mechanické energie v tepelnou energii je úměrné ploše hysterézní křivky, která udává závislost mezi napětím a poměrnou deformací v průběhu jednoho cyklu při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů. Protože závislost mezi napětím a poměrnou deformací je nelineární, neplatí Hookův zákon u viskoelastických materiálů. Oblast hysterese reprezentuje disipovanou energii v zatěžovacím cyklu a pro výpočet její hodnoty v lineárním viskoelastickém materiálu lze použít následující vztah (50):

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin(\delta_i) \quad (50)$$

kde,

- $W_i$  disipovaná energie v cyklu  $i$  ( $\text{J/m}^3$ )
- $\sigma_i$  amplituda napětí v cyklu  $i$  (Pa)
- $\varepsilon_i$  amplituda deformace v cyklu  $i$  (strain)
- $\delta_i$  ztrátový úhel v cyklu  $i$  (rad)

### 11.7.3. Hopman-Pronk metoda

Pronk a Hopman vytvořili v roce 1990 koncepci poměru disipované energie. Tato metoda je založena na stejné myšlence rozdělení únavové zkoušky prováděné v módu řízeného přetvoření do třech fází. Definice hodnoty  $N1$  na rozhraní fáze II a III jako odolnosti materiálu vůči únavě. Tento bod je označen jako spojení mikrotrhlin do ostrých trhlin a

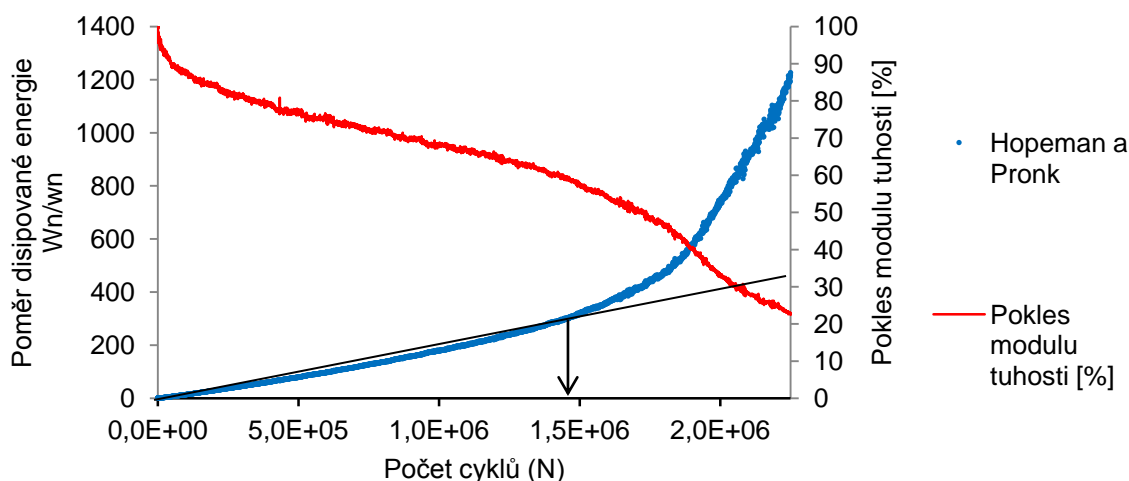
počátek jejich propagace. Metoda podle Hopmana a Pronka je definována jako poměrový ukazatel následovně dle vztahu (51):

$$ER = \frac{nW_0}{W_i} \quad (51)$$

kde,

ER	poměr disipované energie ( $J/m^3$ )
n	zatěžovací cyklus
$W_0$	disipovaná energie v prvním cyklu ( $J/m^3$ )
$W_i$	disipovaná energie v i-tém cyklu ( $J/m^3$ )

V módu řízeného přetvoření se vykreslením poměrů disipované energie pro jednotlivé zatěžovací cykly vzhledem k počtu zatěžovacích cyklů projeví při přechodu mezi mikro a makro trhlinami jako ve formě odchýlení od lineární závislosti. V módu kontrolovaného napětí je únavová životnost definována jako vrchol křivky. V módu řízeného přetvoření bývá hodnota  $N1$  nižší než při hodnocení dle 50 % poklesu tuhosti. Stanovení  $N1$  při řízeném přetvoření není jednoznačné, protože počáteční část křivky není ve skutečnosti lineární (viz obrázek 41). Definice únavového selhání nemají tedy sjednocující charakter pro oba způsoby zatížení [Boudabbous 2013, Žák 2013].



Obrázek 41: Metoda Hopman-Pronk

#### 11.7.4. Rowe-Bouldin metoda

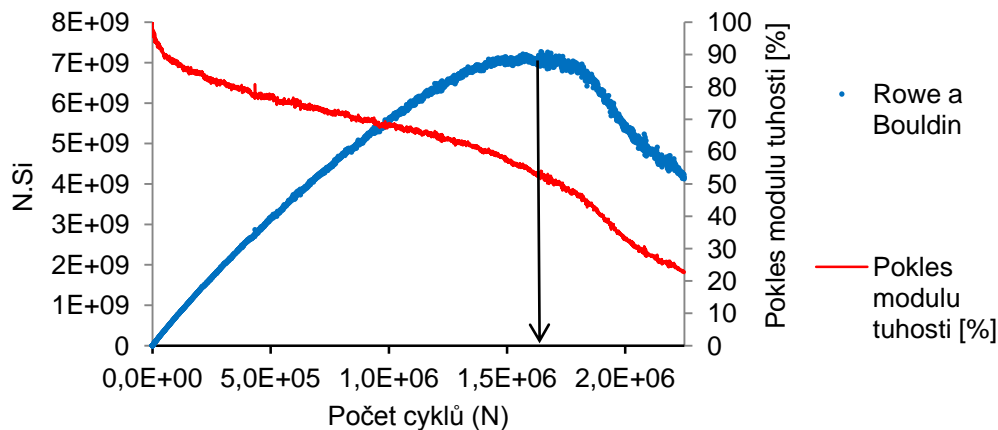
Rowe upravil výše zmíněnou metodu vložení komplexních modulů do rovnice (52), přičemž zjednodušil vztah zanedbáním sinu fázového úhlu, jehož změna je marginální k ostatním vstupním parametrům. Výsledný upravený vztah pro stanovení  $N1$  v režimu řízené deformace nebo napětí je dán vztahem (52):

$$R_\varepsilon = nE_i^* \quad (52)$$

kde

$E^*$	komplexní modul (Pa)
n	hodnota zatěžovacího cyklu

Tento upravený vztah umožňuje snadno identifikovat globální maximum (toto maximum představuje rozvoj trhlin), přičemž velice snadno lze proložit polynomickou funkcí v rámci stanovení  $N_1$ . Odpadá nutnost prokládání přímkou jako je tomu u metody Hopman-Pronk (viz obrázek 42) [Rowe 2000, Boudabbous 2012].



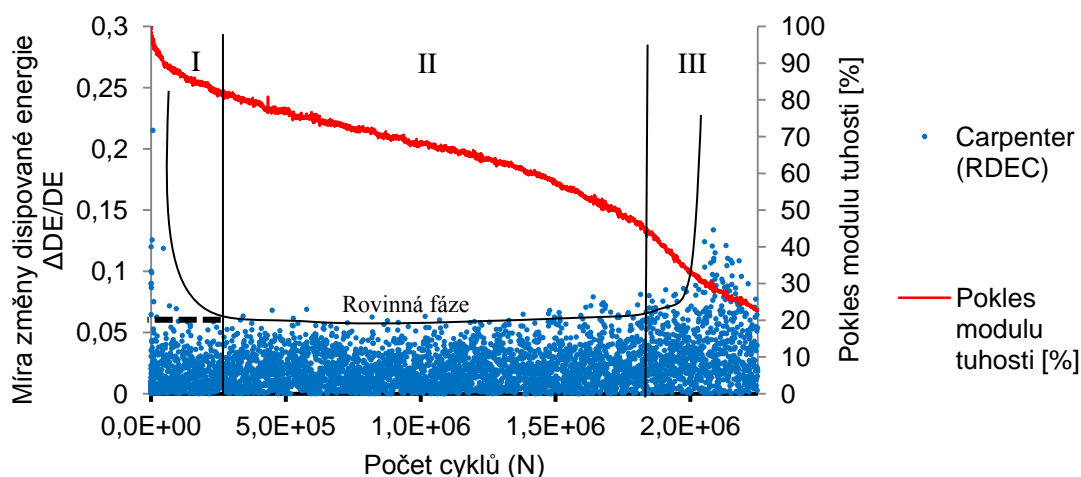
Obrázek 42: Rowe-Bouldin metoda

### 11.7.5. Poměr změny disipované energie (RDEC)

Poměr změny disipované energie ( $RDEC$ ), popisuje únavové chování asfaltových směsí. Tato metoda byla vytvořena Carpenterem a Jansenem v roce 1997. Ve svém výzkumu zjistili, že existuje úzký vztah mezi poměrem změny disipované energie  $RDEC$  (poměr absolutního rozdílu disipované energie mezi  $i$ -tým a  $i+1$ -tým zatížením a disipovanou energií  $i$ -tého cyklu) a únavovou životností materiálu. Poměr změny disipované energie  $RDEC$  se vypočítá dle rovnice (53):

$$RDEC = \frac{(DE_{i-1} - DE_i)}{DE_i} \quad (54)$$

kde  $RDEC$  je poměr změny disipované energie  $DE_{i-1}$  a  $DE_i$  ku disipované energii  $DE_i$  při zatěžovacím cyklu  $i$ . [Ghuzlan 2006; Miao-Miao 2012] se domnívají, že  $RDEC$  je skutečným indikátorem únavového poškození, protože tato metoda je schopna eliminovat jiné formy disipované energie způsobené mechanickou prací nebo vytvářením tepla.



Obrázek 43: Metoda RDEC

Obrázek 43 ukazuje variantu *RDEC* a poměr komplexního modulu  $E^*/E_0$  vyneseny vzhledem k počtu cyklů zatížení. Jsou zde vytvořeny tři hlavní fáze únavového cyklu *RDEC*. Po rychlém poklesu tuhosti (stupeň I) je dosaženo rovinné fáze (tzv. Plateau Value - PV) (stupeň II), ve které je dosaženo téměř konstantní rychlosti změny energie, která se přeměňuje na poškození. Je ověřeno, že PV jednoznačně souvisí s únavovou životností. Poté, se *RDEC* zvětšuje, až do porušení (fáze III). *RDEC* umožňuje stanovit okamžik, kdy zkušební vzorek přestane odolávat dynamickému zatížení [Maggiore 2014, Ghuzlan 2006, Shen 2006].

#### 11.7.6. Měření únavové životnosti metodou 4PB-PR

Odolnost asfaltových směsí vůči únavě je rozhodujícím parametrem materiálu, který ovlivňuje životnost celé konstrukce vozovky. Iniciale únavových trhlin zpravidla vzniká ve spodní asfaltové vrstvě a dochází k její postupné propagaci směrem nahoru napříč dalšími vrstvami z asfaltových hutněných směsí v důsledku dynamického zatížení. Trhliny mohou vznikat i na povrchu obrusné vrstvy a šířit se směrem dolů. Tyto trhliny vznikají kombinací vlivu dopravního zatížení a stárnutí asfaltového pojiva účinky chemické oxidace a působením UV záření [Molenaar 2007]. Obecně může ke vzniku trhlin docházet v jakékoliv asfaltové vrstvě s ohledem na poměr odolnosti proti únavě a napětí v této vrstvě způsobené účinkem dopravy [Žák 2013].

V současnosti v případě emulzních asfaltových směsí neexistují prakticky žádné relevantní výstupy únavových parametrů nebo materiálové knihovny, které by umožnily podrobnější návrh konstrukce vozovky z nových typů směsí, jako jsou právě emulzní asfaltové směsi, recyklace za studena apod., byť návrhové metodiky tento přístup umožňují. Tento přístup by umožnil zvážení výhod těchto materiálů v návrhu. I vozovky s nižším dopravním zatížením, které mohou mít menší tloušťku asfaltových vrstev, musí mít dostatečnou odolnost proti opakovanému zatížení.

Proto je nutné ověřovat únavové parametry i u těchto typů směsí, byť v současnosti se tak neděje. Tento současný přístup zabraňuje zvážení výhod nových technologií a potenciální aplikaci v praxi.

Zkoušky odolnosti proti únavě byly prováděny metodou čtyřbodového ohybu na zařízení 4PB-PR, běžně používanou a uznávanou zkušební metodou. Testy probíhaly v módu (režimu) řízeného přetvoření. Teplota testování byla zvolena vzhledem k typu asfaltové směsi 10 °C a frekvence zatížení 20 Hz. Výroba a příprava zkušebních vzorků (trámečky) včetně zkušebního postupu byly provedeny v souladu s ČSN EN 12697-24. Zkušební vzorky byly zatěžovány ve třech úrovních s konstantním přetvořením v intervalu  $10^4$  až  $2 \cdot 10^6$  cyklu. Pro každou úroveň bylo testováno minimálně 6 zkušebních vzorků.

#### 11.7.7. Vyhodnocení únavových parametrů

Stanovení únavové životnosti a parametrů únavy bylo provedeno dle ČSN EN 12697-24, TP 170 a dle statistického vyhodnocení regresní analýzou (tento způsob byl preferován) [Fiedler 2013, Fiedler 2012, Žák 2015]. Počet cyklů při porušení za definovaných podmínek, stanovený na každém zkušebním tělese, se vynášší do grafu znázorňujícího vztah mezi počtem cyklů a zvoleným napětím či přetvořením při zkoušce (viz obrázek 40). Výsledky únavových zkoušek na zařízení 4PB-PR vykazují poměrně velký rozptyl, a proto je nutné používat při jejich vyhodnocení regresní analýzu. Rovnice (67) lze považovat za základní vztah pro lineární regresi s jednou vysvětlující proměnnou (neboli jednoduchou lineární regresi). Nejčastěji používanou metodou pro odhad parametrů regresní přímky je metoda nejmenších čtverců [Fiedler 2013, Fiedler 2012, Žák 2015, Jarušková 2000].



Předpoklady jednoduché lineární regrese:

- 1) homogenní rozptyl: všechna  $Y$  mají stejnou rozptýlenost;
- 2) linearita: střední hodnota  $y_i$  leží na regresní přímce;
- 3) nezávislost;
- 4) proměnná  $X$  je měřena bez chyby.

Pravděpodobnostní analýza vztahu mezi únavovými parametry, respektive vyjádření závislosti měřených dat, jsou vyjádřeny pomocí jednoduché lineární regrese. Vlastní vyhodnocení je uvedené na obrázku 44.

Jednotlivé hodnoty únavových parametrů jsou uvažovány dle Studentova t-rozdělení. Studentovo t-rozdělení je spojité rozdělení pravděpodobnosti, které umožňuje i na základě souborů dat s malými rozsahy, u kterých nelze mluvit o asymptoticky normálním rozdělení, učinit přijatelné závěry. Pro vyjádření závislosti měřených dat byla použita přímka ve tvaru (55) a analogicky dle (56). V tomto zápisu  $x$  představuje nezávislou proměnnou a  $y$  závislou proměnnou, které má určité pravděpodobnostní rozdělení.

$$y = A_0 + A_1 x \quad (55)$$

Pro odhad koeficientů  $A_0$  a  $A_1$  je použita metoda nejmenších čtverců. Tato metoda hledání koeficientů spočívá v minimalizaci součtu kvadrátů chyb (residuí). Tyto koeficienty jsou tedy stále náhodné veličiny, přičemž jsou to lineární kombinace veličin  $y_1, \dots, y_n$  se stejným rozdělením [Jarušková 2000]. Zde je nutné zmínit nemožnost zpětného přepočtu zkoumaných parametrů vlivem vnášených chyb z odhadů koeficientů a chyb z měření. Na obrázku 44 jsou uvedeny meze predikčních a konfidenčních pásů 95% oboustranných intervalů spolehlivosti pro koeficienty  $A_0$  a  $A_1$  pro závislou proměnnou z rovnice (67). Pro praktické využití nás místo střední hodnoty závislé proměnné  $y$  při dané hodnotě  $x$  zajímá, jak se bude chovat jedna konkrétní hodnota  $y$  při daném  $x$ . Jelikož, ale neznáme přesné hodnoty koeficientů  $A_0$  a  $A_1$ , musíme je nahradit odhady, čímž se dopouštíme jisté chyby, která způsobí, že interval, ve kterém předpokládáme, že bude ležet hodnota  $y$  při daném  $x$ , bude větší.

Norma ČSN EN 12697-24 prezentuje únavovou životnost pro 4PB-PR test jako lineární regresi mezi přirozeným logaritmem počtu cyklů při porušení (vyhodnocení viz výše) a přirozeným logaritmem amplitudy počátečního přetvoření dle vztahu (56):

$$\ln(N) = A_0 + A_1 \ln(\varepsilon_0) \quad (56)$$

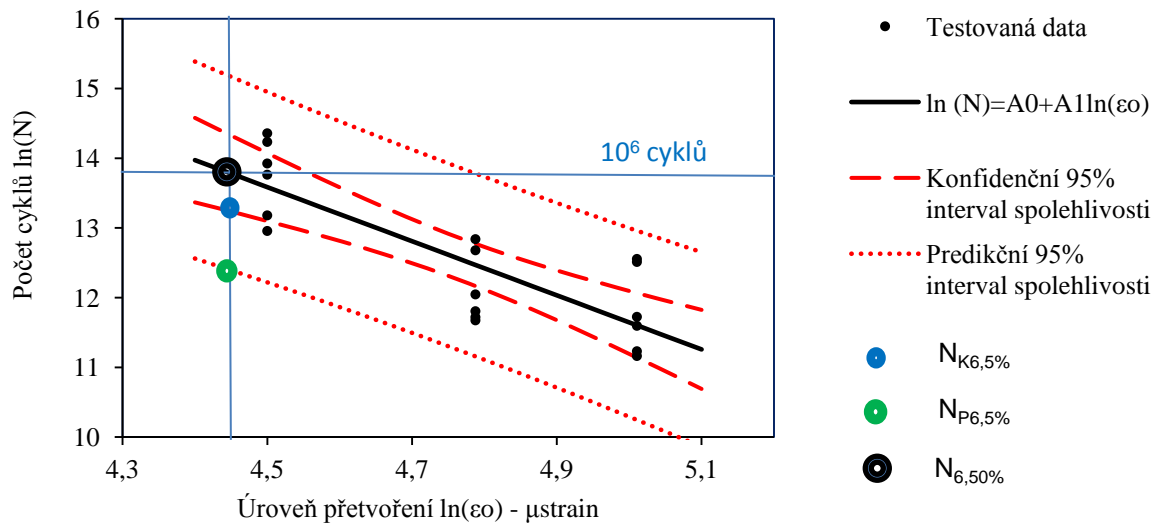
kde,

$N$  počet cyklů při porušení (50% pokles modulu, metoda disipace energie)

$\varepsilon_0$  počáteční amplituda přetvoření při prvních 100 cyklech

$A_0, A_1$  jsou parametry únavové přímky, sklon regresní křivky (odpovídá přibližně parametru  $(-A_1) \sim B$  dle TP 170 je charakteristika únavy v rozmezí 3 až 10)





Obrázek 44: Parametry únavy dle ČSN EN 12697-24 a dle regresní analýzy

Prvním krokem při vyhodnocení únavových parametrů pomocí statistické regresní analýzy je volba, která proměnná je nezávislá, a která závislá. Dle [Žák 2013, Fiedler 2012, Žák 2015, Jarušková 2000] je vyhodnocení dle ČSN EN 12697-24:2012 definována jako nezávislá proměnná přetvoření  $\varepsilon_0$  dle vzorce (66). Oproti staré normě ČSN 736160: 1986 (Zkoušení silničních živičných směsí) je nezávislá proměnná počet cyklů  $N$ . V této práci je vyhodnocení provedeno pouze na základě statistické analýzy jednoduché lineární regrese. Dle ČSN EN 12697-24 je nezávislá proměnná vymezena počátečním přetvořením  $\varepsilon_0$ . Potom se přetvoření  $\varepsilon_6$  při  $10^6$  zatěžovacích cyklech vypočítá dle vztahu (57):

$$\varepsilon_6 = e^{\frac{(\ln(10^6) - A_0)}{A_1}} \quad (57)$$

kde,

$e$  Eulerovo číslo (cca 2,718)

$\varepsilon_6$  je velikost přetvoření odvozená z únavové přímky pro  $10^6$  zatěžovacích cyklů ( $\mu$ strain)

Regresní analýza nám umožňuje odhad podmíněné střední hodnoty (K - konfidenční interval) a odhad individuální hodnoty (P - predikční interval) závislé proměnné. V obou případech můžeme získat jak bodový, tak i intervalový odhad. Intervalový odhad podmíněné střední hodnoty bude „užší“ než intervalový odhad individuální hodnoty (při stejné zvolené hladině významnosti). Minimální odhadovaný počet cyklů odvozený z únavové přímky pro stanovení podmíněné střední hodnoty při přetvoření  $\varepsilon_6$  s pravděpodobností výskytu 5 % se vypočítá dle vzorce (58):

$$N_{K6,5\%} = e^{\left[ \ln(10^6) - t_p s_{\ln\left(\frac{N}{\varepsilon}\right)} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\ln(\varepsilon_6) - \ln(\varepsilon_0))^2}{\sum (\ln(\varepsilon_0) - \ln(\varepsilon_0))^2}} \right]} \quad (58)$$

Z vyjádření predikčního 95% intervalu spolehlivosti, pak můžeme stanovit minimální odhadovaný počet cyklů odvozený z únavové přímky pro predikci individuální hodnoty při přetvoření  $\varepsilon_6$  s pravděpodobností výskytu 5 % dle vzorce (59):



$$N_{P6,5\%} = e^{\left[ \ln(10^6) - t_p s_{\ln\left(\frac{N}{\bar{\epsilon}}\right)} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\ln(\epsilon_6) - \ln(\bar{\epsilon}))^2}{\sum (\ln(\epsilon_0) - \ln(\bar{\epsilon}))^2}} \right]} \quad (59)$$

kde,

- $N_{(K, P)6,5\%}$  minimální odhadovaný počet cyklů odvozený z únavové přímky při přetvoření  $\epsilon_6$  s pravděpodobností výskytu 5 % pro podmíněnou střední hodnotu nebo pro individuální hodnotu
- $t_p$  odpovídající hodnota (studentova) t-rozdělení pravděpodobnosti pro n-2 stupňů volnosti
- $n$  počet měření, respektive počet stupňů volnosti
- $s_{N/\bar{\epsilon}}$  reziduální směrodatná odchylka (neboli rozptýlení hodnot kolem regresní přímky)
- $\bar{\epsilon}_0$  aritmetický průměr souboru počátečního přetvoření.

V příloze A normy ČSN EN 12697-24 je v článku A.5.2 a ve vzorci A.5 užit parametr  $\Delta\epsilon_6$  označený jako „index kvality“. Představuje přibližné stanovení vodorovné vzdálenosti od regresní přímky ke křivkám představujícím dolní a horní meze 95% intervalu spolehlivosti okolo regresní přímky [Fiedler 2013].

Další důležitým parametrem při vyhodnocení zkoušky únavy je také charakteristika rozptylu měření  $\gamma_{úp}$  dle TP 170 (B.7.8). Analogicky pro (58) a (59) můžeme stanovit  $\gamma_{N,K,P,úp}$  tak, aby v základu korespondoval s vyjádřením a funkcí dle TP 170. Součinitel rozptylu únavové zkoušky se tedy vypočte pro názornost dle vztahu (60) a (61) [Žák 2012]:

$$\gamma_{N,K,úp} = \frac{10^6}{N_{K6,5\%}} \quad (60)$$

$$\gamma_{N,P,úp} = \frac{10^6}{N_{P6,5\%}} \quad (61)$$

kde,

- $\gamma_{N(K,P)úp}$  kvalitativní parametr, respektive součinitel rozptylu únavové zkoušky pro podmíněnou střední hodnotu nebo individuální hodnoty vztažené k počtu cyklů.

Výše uvedený postup vyhodnocení únavových parametrů koreluje s přibližným řešením dle ČSN EN 12697-24. Příklad porovnání je uveden v praktické části v rámci vyhodnocení únavových parametrů směsí EAC 11.

## 12. Studie uplatnitelnosti FPP ve směsích recyklace za studena

V oblasti výzkumu byly zpracovávány fluidní ložové popely a filtrové popílků z elektráren ČEZ Počerady, Hodonín, Ledvice a elektrárny Tisová, jejímž vlastníkem je dnes Sokolovská uhelná a.s. (viz obrázek 45). Jako další byla použita směs ložového a úletového popílku z teplárenského provozu v Plzni, na které byla provedena mechanická a chemická<sup>20</sup> aktivace. Získané druhy popílků vznikají při fluidním spalování především hnědého uhlí a práškového vápence. Tyto popílků jsou z pohledu potenciálu dalších aplikací ve stavebnictví poměrně významné.



Obrázek 45: Fluidní popely a popílků a) úletový Ledvice b) ložový Ledvice c) mechanicko chemicky aktivovaný Plzeň d) ložový Počerady e) úletový Tisová f) úletový Hodonín

V první fázi výzkumu byly provedeny chemické analýzy, respektive bylo zjišťováno mineralogické složení a prvkové složení jako podklad pro výluhové testy. Mineralogické složení bylo analyzováno metodou rentgenové difrakční analýzy. Rentgenová difrakční analýza (XRD) je základní metodou k určování struktury pevných látek, respektive k identifikaci krystalických fází látek. Každá krystalická látka má jedinečný difraktogram, podle kterého jsme schopni ji identifikovat. Tato metoda je založená na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bezfotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Studium tohoto difrakčního obrazce pak umožňuje zpětně studovat krystalické složení vzorku a jeho mikrostrukturu [Chempoint 2017, Čapková 2011].

Prvotní XRD analýzy byly provedeny v laboratořích Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy následně pro další vzorky v laboratořích VŠCHT Praha. XRD data byla naměřena při teplotě okolního prostředí v laboratoři na  $\theta$ - $\theta$  práškovém difraktometru Bruker AXS D8 X'Pert PRO v Bragg-Brentanově parafokující geometrii s použitím vlnové délky  $\text{CoK}\alpha$  záření ( $\lambda = 3.0250 \text{ \AA}$ ,  $U = 40 \text{ kV}$ ,  $I = 20$  nebo  $30 \text{ mA}$ ). Data byla naskenována pomocí ultrarychlého detektoru LynxEye v úhlovém rozsahu  $30\text{-}80^\circ$  ( $2\theta$ ) s krokem měření  $0.0500^\circ$  ( $2\theta$ ). Vyhodnocení dat bylo provedeno programem HighScore Plus 1.0d.

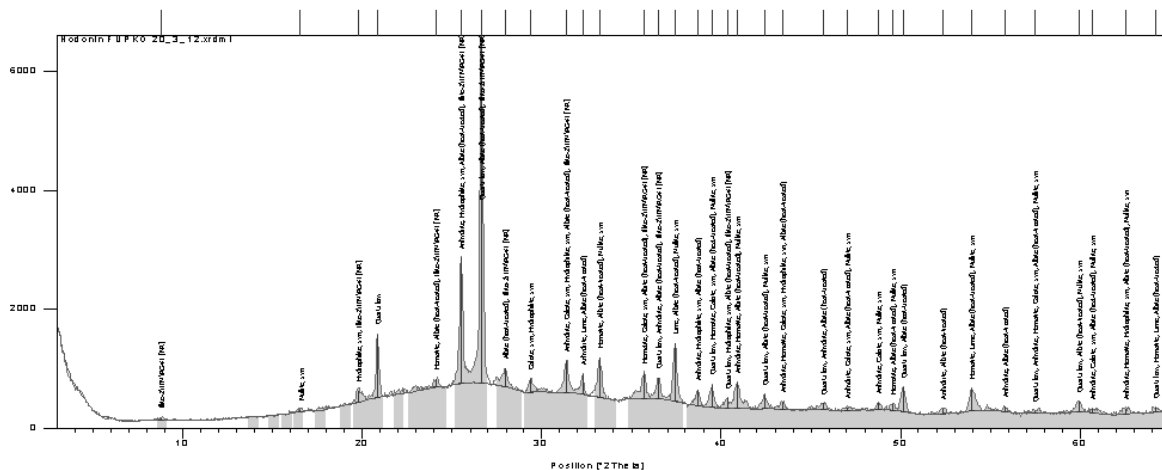
<sup>20</sup> V tomto případě se jedná o směsné pojivo uvedené na trhu pod názvem Dastit®.



## 12.2. FPP Hodonín

Elektrárna Hodonín patří mezi naše nejstarší provozované elektrárny. Výběr lokality pro její výstavbu vycházel z místních podmínek, blízkosti lignitového dolu a řeky Moravy. V letech 1992 – 1997 proběhla výstavba dvou fluidních kotlů, každého o výkonu 170 t/h páry. Problémy odpadních vod a popelovin z nových kotlů byly vyřešeny společným ukládáním na složišti. Po skončení rekonstrukcí došlo k podstatnému snížení vlivu na životní prostředí, například emise škodlivin v kouřových plynech poklesly na desetinu [www.svetenergie.cz].

Složení fluidního popela z Hodonína se oproti minulému desetiletí výrazně změnilo. Původně využívala elektrárna a teplárna Hodonín (ČEZ) pro výrobu energie lignit z místního ložiska. Lignit měl nízkou výhřevnost (většinou ještě nižší, než v současnosti částečně využívaná biomasa, protože měl vlhkost téměř 50%). Ke spalování docházelo za teplot nižších než 800 °C a proto bylo v popelu hodně zbytkových nepřeměněných jílových minerálů a méně metakaolinitu a dalších amorfních fází. Ložisko lignitu bylo ale uzavřeno a elektrárna Hodonín využívá většinou hnědé uhlí dovážené z Polska. To má sice výhřevnost oproti lignitu dvojnásobnou (cca 15 - 17MJ/kg), ale připaluje se biomasa (přitom jsou velké výkyvy podle ročního období) a také v některých kotlích "alternativní paliva". Testovaný popílek pochází z úletu. Z provedené XRD analýzy je patrné, že hodonínský popílek obsahuje velké množství křemene a poměrně menší množství vápna a anhydritu. Dalšími dominantními minerály jsou albit, illit a mulit. XRD záznam a vyhodnocení je uvedeno na obrázku 47 a tabulce 25.



Obrázek 47: Difraktogram - FPP Hodonín

Ref. Code	Compound Name	Score	Total Lines	Scale Factor	SemiQuant [%]
01-087-2096	Quartz low	69	14	0.985	34
01-072-0503	Anhydrite	68	27	0.233	13
01-079-0007	Hematite	58	13	0.097	3
01-078-0649	Lime	52	4	0.151	3
01-086-0174	Calcite, syn	34	17	0.041	1
00-001-0338	Hydrophilite, syn	37	13	0.048	5
01-089-6429	Albite (heat-treated)	25	138	0.071	11
00-026-0911	Illite-2\ITMRG#1 [NR]	36	18	0.341	19
01-073-1253	Mullite, syn	37	38	0.061	10

Tabulka 25: Vyhodnocení fázového složení vzorku FPP Hodonín na základě XRD záznamu





V letech 1996 - 1998 proběhla generální oprava turbíny bloku č. 4 a výstavba fluidního kotle. V roce 1998 byl zahájen zkušební provoz bloku č. 4, jako energetického zdroje v blokovém uspořádání turbíny s fluidním kotlem.

V elektrárně Ledvice je spalováno hnědé uhlí o výhřevnosti 11 - 13 MJ/kg z dolu Bílina. Uhlí je dopravováno přímo pásovými dopravníky ze sousední úpravny uhlí Ledvice buď přímo do zásobníků paliva jednotlivých kotlů, nebo na manipulační skládku. Tato skládka má kapacitu 40 000 t a zajišťuje provoz elektrárny při poruchových stavech v dopravě a těžbě paliva [www.svetenergie.cz]. Materiál byl odebrán z lože a z úletu. Výsledky z provedené XRD analýzy jsou uvedeny v tabulce 27 pro FPP pocházejícího z lože. XRD analýza pro FPP z úletu nebyla provedena. Tento ložový FPP se vyznačuje vyšším zastoupením anhydritu, křemene a nižším obsahem vápna.

Ref. Code	Score	Compound Name	Mineral Name	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-080-6361	66	Calcium Sulfate	Anhydrite	Ca(SO <sub>4</sub> )	48
01-087-2096	64	Silicon Oxide	Quartz low, syn	SiO <sub>2</sub>	28
01-078-4614	47	Calcium Carbonate	Calcite, syn	Ca(CO <sub>3</sub> )	9
01-078-0315	57	Calcium Hydroxide	Portlandite, syn	Ca(OH) <sub>2</sub>	8
04-004-5476	57	Calcium Oxide	Lime, syn	CaO	3
04-014-8515	27	Titanium Oxide	Anatase, syn	TiO <sub>2</sub>	2
04-018-6455	17	Calcium Iron Oxide		CaFeO <sub>3</sub>	2

Tabulka 27: Vyhodnocení fázového složení vzorku FPP Ledvice (ložový popel) na základě XRD záznamu

Je nutno dodat, že všechny testované popílký obsahovaly značný podíl amorfní fáze. Vzhledem k četným překryvům difrakčních linií krystalických fází a přítomností amorfní fáze, je semikvantitativní určení zatíženo značnou chybou.

### 12.5. Mechanická aktivace testovaných fluidních popelovin

Při dlouhodobém kontaktu s vodou vznikají u popílků novotvořené sekundární minerály, především ettringit a Ca karbonáty, které mohou být příčinou objemové nestálosti, která se projeví následnými poruchami. Z hlediska rizika ztráty mechanické pevnosti a posléze i celkové stability je nejnebezpečnější vznik a růst minerálů skupiny ettringitu. V tomto ohledu proto skýtá další potenciál pokračující ověřování vhodného využití vysokorychlostního mletí, kdy by bylo možné strukturními změnami v popílku předcházet vzniku problematických minerálů.

Materiál vybraných popelů a popílků byl podroben slabé mechanické aktivaci, respektive byl vystaven jednomu průchodu mezi rotory na dvourotorovém protiběžném kolíkovém vysokorychlostním mlýně – desintegrátoru při vzájemné obvodové rychlosti rotorů cca 204 m.s<sup>-1</sup> a spotřebě elektrické energie na úrovni cca 20 W/kg mletého popela tak, že výsledná střední velikost zrna mletého materiálu d<sub>50</sub> ~ 25 - 45 μm. Mechanická aktivace byla provedena na popílcích z ČEZ Tisová a Hodonín.

#### 12.5.1. FPP Plzeň

Centrální zdroj Plzeňské teplárenské, a.s. má 6 kotlů (2 horkovodní, 2 parní, 1 parní kotel s fluidním topeništěm a 1 kotel na biomasu). Palivem pro většinu kotlů je hnědé drcené, netříděné uhlí, biomasa a dřevní štěpka. V roce 1998 bylo realizováno zařízení pro odsířování spalin ze všech kotlů [www.energetika.plzen.eu].

Největší pozitivum FPP je poměrně vyšší obsah pucolánově aktivních složek, které potenciálně umožňují využít tento materiál ve stavební praxi. Proto je možné dále využít

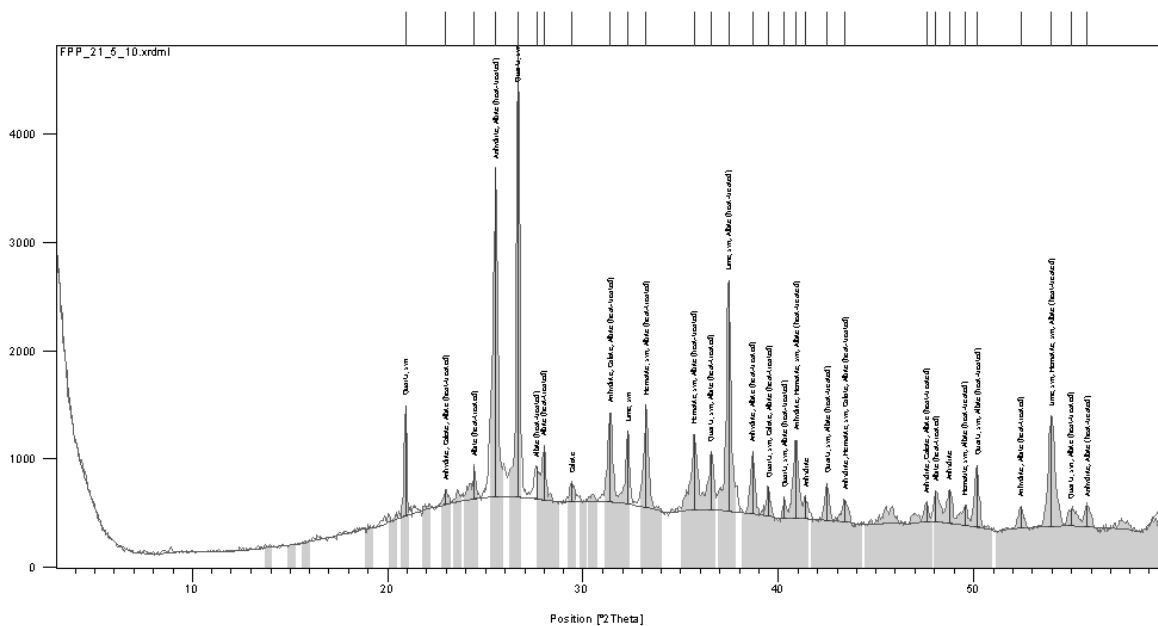


tohoto pozitiva druhotného produktu ve vývoji a produkci stavebních pojiv a zvětšit tak surovinovou základnu pro stavební výrobu. Materiál z teplárny Plzeň použitý v rámci této práce je mechanicko-chemicky aktivovaná směs popela a popílku, která je komerčně vydávána pod názvem Dastit®. Tato směs FPP je aditivována minimálně 5 % portlandského slínku a vápence, zejména z důvodu kolísání obsahu CaO v FPP. U tohoto materiálu bylo použito mletí a intenzivní mechanická aktivace ve vysokorychlostním mlýnu s diskovými repulsními rotory o obvodové rychlosti  $204 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (viz obrázek 49). Velikost maximálního zrna na vstupu přitom smí být max.  $200 \mu\text{m}$ .



Obrázek 49: Diskový vysokorychlostní mlýn

Z provedené XRD analýzy je patrné, že mechanicko - chemicky aktivovaný popílek obsahuje velké množství křemene, anhydritu a vápna. Dalším dominantním minerálem je jílový minerál illit. XRD záznam a vyhodnocení je uvedeno na obrázku 50 a tabulce 28.



Obrázek 50: Difraktogram - mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň





Ref. Code	Mineral Name	Compound Name	Score	Total Lines	Scale Factor	SemiQuant [%]
01-085-0794	Quartz	Silicon Oxide	69	7	0.994	24
01-074-2421	Anhydrite	Calcium Sulfate	63	16	0.722	31
01-079-0007	Hematite	Iron Oxide	46	7	0.136	3
01-078-0649	Lime	Calcium Oxide	49	2	0.800	13
01-083-0578	Calcite	Calcium Carbonate	43	9	0.071	2
01-089-6423	Albite		26	83	0.076	9
00-026-0911	Illite-2\ITM\RG#1 [NR]		36	17	0.427	18

Tabulka 28: Vyhodnocení fázového složení mechanicko chemicky aktivovaného FPP Plzeň na základě XRD záznamu

## 12.6. Chemická analýza stopových prvků vybraných fluidních popelovin

Chemický rozbor byl proveden ve spolupráci s Geologickým ústavem Akademie věd České republiky (AV ČR) v rámci základní analýzy stopových prvků zastoupených v použitých materiálech a částečně jako podklad k difuzním testům. Vybrané vzorky odpadních zrnitých materiálů, jejichž užívání se očekává v konstrukci vozovky, zahrnuje zkoumané fluidní popely a popílky a také tříděný asfaltový R-materiál.

V souvislosti s technickými předpisy pro metody loužení různých druhů minerálních látek se používají různé analytické postupy [Valentin 2009]. Žádný z těchto způsobů, který se řídí příslušným standardem, nebyl použit. Byl upřednostněn a aplikován postup na základě metody analytické spektroskopie.

Zkoumané zkušební vzorky byly analyzovány pomocí IRIS Intrepid II XPS spektrometrem (ICP - EOS). Byly použity standardní provozní podmínky. Kalibrační křivky byly vytvořeny pomocí čtyř bodů (prázdné a víceprvkové standardy v 1% supra-čisté kyseliny dusičné) pokrývající celý rozsah naměřených koncentrací. Koncentrace makroprvků a mikroprvků byly kalibrovány a měřily se při separátních experimentech, přičemž každý vzorek byl analyzován třikrát.

Pro analytické účely a jako základ pro budoucí výluhové testy, byla měřena koncentrace prvků po celkové dekompozici pevných vzorků ve směsi kyseliny dusičné/kyseliny fluorovodíkové/kyseliny chloristé. Tímto způsobem byly pevné vzorky vloženy do kyselých roztoků, ve kterých byly měřeny jednotlivé koncentrace pomocí ICP EOS. Koncentrace základních prvků (makroprvky) a stopových prvků (mikroprvky) byly stanoveny technikou ICP EOS, což je označení pro analytickou metodu, respektive optickou emisní spektroskopii s indukčně vázanou plazmou. Byly stanoveny koncentrace makroprvků Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Si a mikroprvků As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, Sr, Ti, Zn.

Výsledky provedených měření jsou shrnuty v tabulce 29 a 30. Koncentrace jednotlivých prvků jsou normalizovány v jednotkách mg/g na vzorek. Vzhledem k tomuto vyjádření je jednoduché a dobře srozumitelné srovnání jednotlivých makro - a mikroprvků. Toto srovnání je možné zaměnit do relativního vyjádření, dokazujícího, že kromě analyzovaných prvků v materiálu obvykle obsahuje také nějaké další prvky.

V rámci makroanalýzy je zastoupen hliník, vápník a částečně křemík nejvyšší koncentrací. Prvky jsou zastoupeny v chemických sloučeninách v krystalických nebo amorfních fázích. Hliník zastoupený v obou vzorcích popílku je logický, protože zdrojový materiál pochází ze spalování hnědého uhlí a aditiva (vápna). Pouze v případě popílku z elektrárny Hodonín výrobce upravil proces spalování přidáním komunálního odpadu. Obsah vápníku lze snadno vysvětlit procesem fluidního spalování, jak již bylo uvedeno výše. Toto vysvětlení platí i pro výskyt síry. Křemík zastoupený v R-materiálu lze vysvětlit minerální skladbou kameniva.

Z analýzy mikroprvků lze stanovit následující závěry. V rámci analyzovaného materiálu byl nalezen zvýšený obsah nebezpečných/toxických stopových prvků:

- Fluidní popely a popílky - kadmium
- Tříděný asfaltový R-materiál 0 / 11 - barium

V této souvislosti je třeba zdůraznit, v případě baria (Ba) a kadmia (Cd), že tyto prvky, které se zde vyskytují, jsou vysoce toxické a jsou distribuovány především v prachu.

Výrazně odlišný obsah titanu v popílku z teplárenského provozu v Plzni nelze snadno vysvětlit, jediné, že by mohl obsahovat amorfní sloučeninu bohatou na tento prvek. Původ může být pravděpodobně ze zdrojového materiálu, respektive hnědého uhlí.

Z hlediska celkové analýzy R-materiálu, může být tento popsán jako materiál bohatý na arzen. Kromě prvků uvedených v tabulce 30, u obou vzorků popílku bylo zjištěno také zirkonium v množství 0,08 - 0,34 mg/g.

Prvek	Al	As	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si
Vzorek	Celkový obsah (mg) prvku na 1 g vzorku										
Tříděný asfaltový R-materiál 0/11	55.01	0.10	56.06	31.02	17.61	12.6	0.66	21.84	0.35	2.82	72.47
FPP Plzeň (fluidní spalování)	105.95	-	166.36	40.39	1.55	9.88	0.96	8.20	1.58	32.29	0.51
FPP Ledvice (fluidní spalování)	104.35	-	200.87	25.22	0.98	9.24	0.32	4.7	0.54	41.74	1.11
FPP Hodonín (fluidní spalování)	108.33	-	141.67	36.11	1.80	9.44	0.43	5.11	0.54	29.64	0.35

"<" hodnota pod limitem citlivosti, standardně < 0.020 ppm.

Tabulka 29: Celková analýza vzorku – makro

Prvek	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Sr	Ti	Zn
Vzorek	Celkový obsah (mg) prvku na 1 g vzorku												
Tříděný asfaltový R-materiál 0/11	1.89	0.30	0.0004	0.006	<	0.03	0.02	0.03	0.002	0.05	0.11	1.73	0.06
FPP Plzeň (fluidní spalování)	-	0.41	0	0.01	0.07	0.11	0.19	0.24	0.008	0.05	0.54	18.4	0.10
FPP Ledvice (fluidní spalování)	-	0.28	0	0.01	0.03	0.12	0.05	0.11	0.01	0.08	0.30	7.50	0.05
FPP Hodonín (fluidní spalování)	-	0.31	0	0.01	0.02	0.13	0.13	0.12	0.01	0.07	0.29	5.42	0.30

Tabulka 30: Celková analýza vzorku – mikro

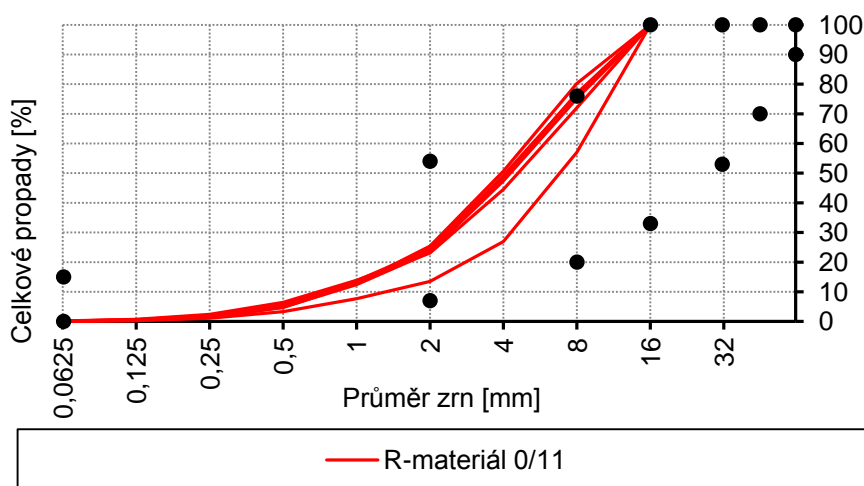
Pro budoucí alternativní testy loužení se jako činidlo pro vyluhování použije destilovaná voda (hodnota pH ~ 6,5) jako aproximaci vlivu vyluhování dešťovou vodou. Podobné postupy testování a prostředí lze nalézt např. v [Townsend 1999].

### 12.7. Recyklace za studena - použité materiály

V rámci experimentální činnosti byla navržena sada laboratorních směsí recyklace za studena s proměnným zastoupením FPP, který zde plní úlohu substituentu hydraulického pojiva. Současně s tím byl vymezen soubor laboratorních zkoušek, které měly stanovit rozsah uplatnitelnosti těchto VEP ve směsi recyklace za studena.

Směsi recyklace za studena byly připraveny dle principů uvedených v předpisu Ministerstva dopravy ČR - TP 208. Pro jejich přípravu byl využit tříděný asfaltový R-materiál frakce 0/11 z obalovny Porr Běchovice, u kterého byl zjištěn průměrný obsah asfaltu ve výši 6,3 %-hm. V rámci ověření homogenity R-materiálu byly v časových

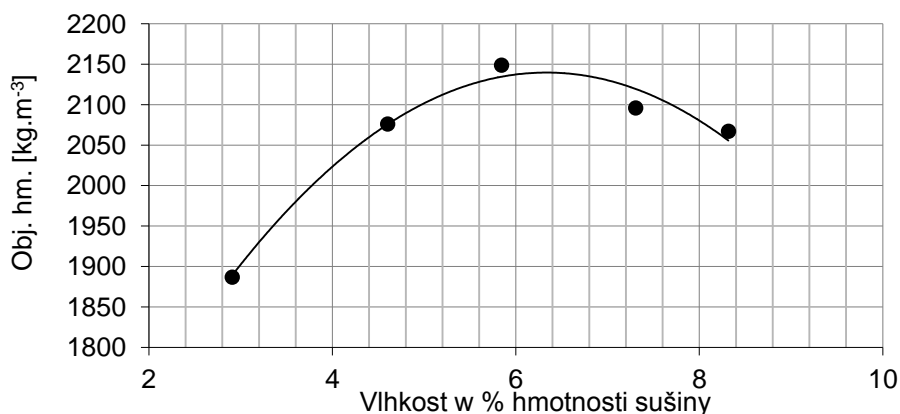
úsecích odebírány reprezentativní vzorky z jednotlivých šarží. Zrnitostní složení R-materiálu v průběhu experimentu je uvedeno na obrázku 51.



Obrázek 51: Zrnitostní složení jednotlivých šarží odebraného R-materiálu 0/11

Jako asfaltové pojivo pro směsi recyklace za studena byla aplikována kationaktivní asfaltová emulze C60B7 (dle dřívějšího značení normy ČSN EN 13808) výrobce Vialit Asphalt GmbH + Co KG. Jedná se o standardní emulzi používanou pro účely studené recyklace. Obdobně byl pro vybrané směsi aplikován běžně používaný portlandský struskový cement CEM II/B - S 32,5R.

V první fázi byla stanovena optimální vlhkost Proctorovou modifikovanou zkouškou dle ČSN EN 13286-2 (viz obrázek 52).



Obrázek 52: Stanovení optimální vlhkosti směsi recyklace za studena - REF

### 12.8. Složení směsi recyklace za studena

Složení jednotlivých směsí je uvedeno v tabulce 31. Zkušební rozsah aditivace FPP odpovídá množství 3,0 - 15,0 %-hm. směsi s cílem plně nebo částečně substituovat hydraulické pojivo či plnit funkci aktivního fileru a mikrofileru.



Cement CEM II/B - S32,5R	Asfaltová emulze C60B7	Fluidní úletový popílek - Ledvice	Fluidní úletový popílek - Ledvice	Fluidní ložový popel - Počerady	Fluidní úletový popílek - Hodonín	Fluidní úletový popílek - Tisová	Mechanicky aktivovaný fluidní úletový popílek - Hodonín	Mechanicky aktivovaný fluidní úletový popílek - Tisová	Mechanicko-chemicky aktivovaný fluidní popel a popílek - Pízeň
3,0%	3,5%	-	-	-	-	-	-	-	-
-	3,5%	3,0%	-	-	-	-	-	-	-
-	3,5%	7,5%	-	-	-	-	-	-	-
1,0%	2,5%	10,0%	-	-	-	-	-	-	-
-	3,5%	-	-	-	-	-	-	3,0%	-
-	3,5%	-	-	-	-	-	-	7,5%	-
-	3,5%	-	-	-	-	-	-	10,0%	-
1,0%	2,5%	-	-	10,0%	-	-	-	-	-
1,0%	2,5%	-	-	15,0%	-	-	-	-	-
-	3,5%	-	-	-	-	5,0%	-	-	-
-	3,5%	-	-	-	-	10,0%	-	-	-
-	3,5%	-	-	-	-	3,5%	-	-	-
1,5%	3,5%	-	-	-	-	5,0%	-	-	-
1,5%	3,5%	-	-	-	-	10,0%	-	-	-
-	3,5%	-	-	-	5,0%	-	-	-	-
-	3,5%	-	-	-	10,0%	-	-	-	-
-	3,5%	-	-	-	3,5%	-	-	-	-
1,5%	3,5%	-	-	-	5,0%	-	-	-	-
1,5%	3,5%	-	-	-	10,0%	-	-	-	-
-	3,5%	-	-	-	-	-	5,0%	-	-
-	3,5%	-	-	-	-	-	10,0%	-	-
1,5%	3,5%	-	-	-	-	-	10,0%	-	-
-	3,5%	-	-	-	-	-	5,0%	-	-
-	3,5%	-	-	-	-	-	10,0%	-	-
-	3,5%	-	-	-	-	-	3,5%	-	-
-	3,5%	-	5,0%	-	-	-	-	-	-
-	3,5%	-	10,0%	-	-	-	-	-	-

Tabulka 31: Složení směsí recyklace za studena

### 12.9. Metodika přípravy, testování a podmínky zrání zkušebních těles

Pro každou směs bylo připraveno minimálně 16 - 20 zkušebních válcových těles dle TP 208. Zkušební tělesa byla připravena modifikovaným postupem. Technické podmínky pro recyklované směsi za studena TP 208 udávají výrobu zkušebních těles pomocí válcových forem o průměru  $150,0 \pm 1,0$  mm a výšce 200-300 mm. Pro potřeby experimentálního posouzení byla jako vhodnější zvolena válcová zkušební tělesa s průměrem  $101,60 \pm 0,1$  mm s výškou  $63,5 \pm 2,5$  mm. Při zpracování byla směs stlačena ve formách tlakem 5,0 MPa. Zkušební těleso bylo ponecháno ve formě při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  po dobu  $(24 \pm 6)$  hodin a další 2 dny při 90% až 100% relativní vlhkosti při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Dále se zkušební tělesa uložila při 40% až 70% vlhkosti při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Zkoumané směsi byly ponechány při uvedených podmínkách zrání 7, 14 a 28 dní. Z hlediska stanovení vodní citlivosti směsí byla sada těles po sedmi dnech zrání při 40% až 70% relativní vlhkosti při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  uložena do vodní lázně na dobu dalších 7 dní.

Na zkušebních vzorcích byly stanoveny parametry pevnostní (pevnost v příčném tahu - ITS dle ČSN EN 13286-42 a TP 208)<sup>21</sup> a deformační (modul tuhosti metodou IT-CY dle ČSN EN 12697-26) dle doby a podmínek zrání, jak je uvedeno v tabulce 32.

Zrání	Zkouška	Zkušební teplota
7 dní vzduch	ITS	15°C
7 dní vzduch +7 dní vzduch	ITS, modul tuhosti IT-CY	15°C
7 dní vzduch +7 dní voda	ITS, modul tuhosti IT-CY	15°C
28 dní vzduch	ITS	15°C
	Modul tuhosti IT-CY	5,15,27°C

Tabulka 32: Zkoušky prováděné na zkušebních tělesech dle doby a prostředí zrání

Výsledky pevnostních charakteristik těles s kombinovaným zráním ve vodě a na vzduchu byly následně porovnány se sedmidenními a čtrnáctidenními pevnostmi pro stanovení odolnosti proti účinkům vody dle TP 208 a pro stanovení modifikovaného ukazatele ITSR<sup>22</sup> běžně zavedeného pro asfaltové směsi. U vybraných směsí byla stanovena odolnost proti vodě a mrazu. V případě modulu tuhosti byl stanoven koeficient odolnosti proti účinkům vody ITMR a u vybraných směsí teplotní citlivost a odolnost vůči vodě a mrazu.



Obrázek 53: Zkušební vzorky - příklady

Tato studie nemá za účel porovnávat jednotlivé směsi, respektive vliv jednotlivých aditiv mezi sebou, ale má postihnout globální trendy v rámci hodnocených parametrů. V rámci reálné uplatnitelnosti FPP ve směsích recyklace za studena nehraje primární roli původ FPP.

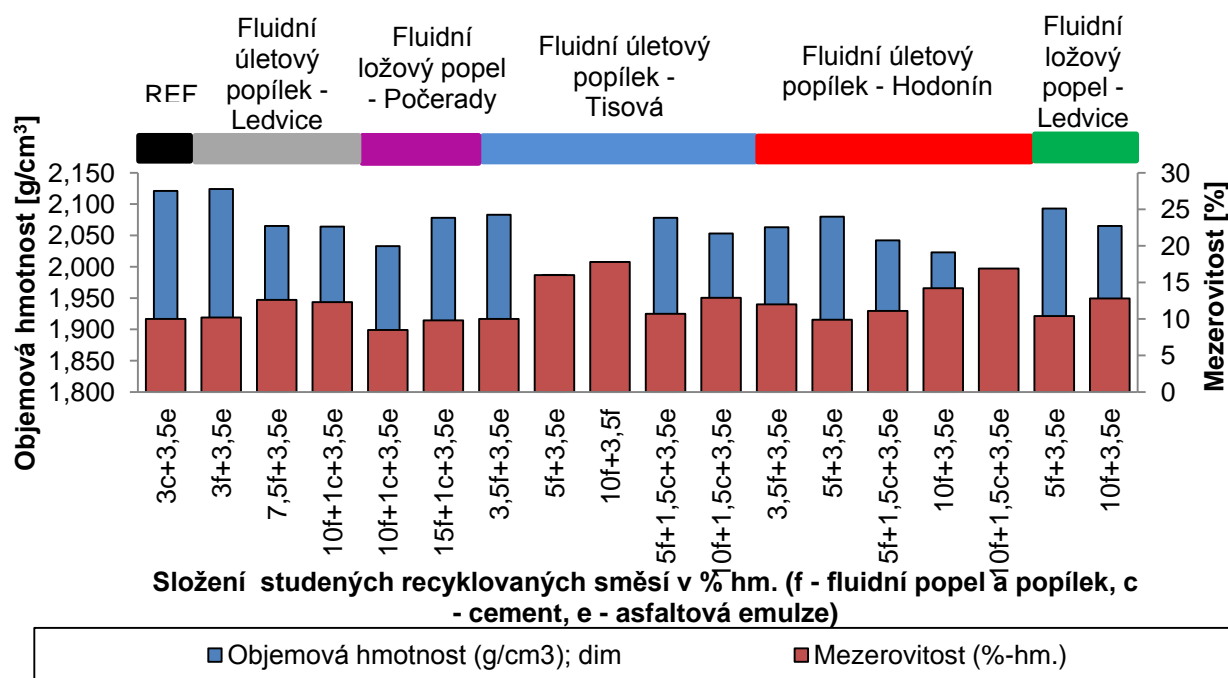
### 12.10. Výsledky experimentu

Objemová hmotnost a mezerovitost testovaných směsí je uvedena na obrázku 54 a 55. Volumetrické vlastnosti recyklovaných směsí nejsou ovlivněny množstvím přidávaného

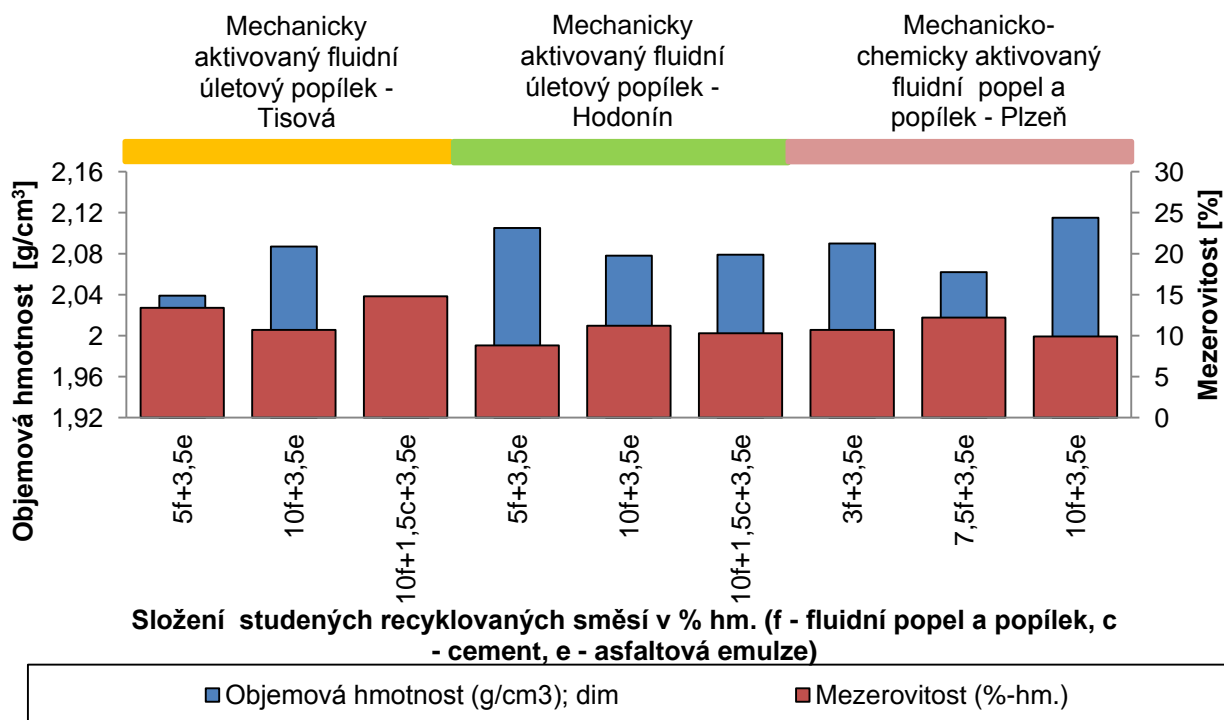
<sup>21</sup> Kvalita směsí recyklovaných za studena se ve většině evropských zemí prokazuje dosažením definované hodnoty pevnosti v příčném tahu (ITS). Dosud ne zcela zodpovězenou otázkou ovšem zůstává, zda je odolnost proti namáhání v příčném tahu opravdu právě jedinou kritickou vlastností, která by měla být zjišťována. Technické předpisy většiny evropských zemí zpravidla obsahují doplňující požadavek na hodnotu odolnosti směsi proti vodě, čímž bývá charakterizována trvanlivost směsi. Další takovou vlastností, jejíž stanovování bývá často vyžadováno, je tuhost (u směsí recyklovaných za studena zpravidla charakterizovaná modulem tuhosti stanoveným na válcových tělesech při zkoušce opakovaným namáháním v příčném tahu IT-CY).

<sup>22</sup> U tohoto ukazatele nebyla prováděna temperance zkušebních těles 72 hodin ve vodní lázni při 40°C.

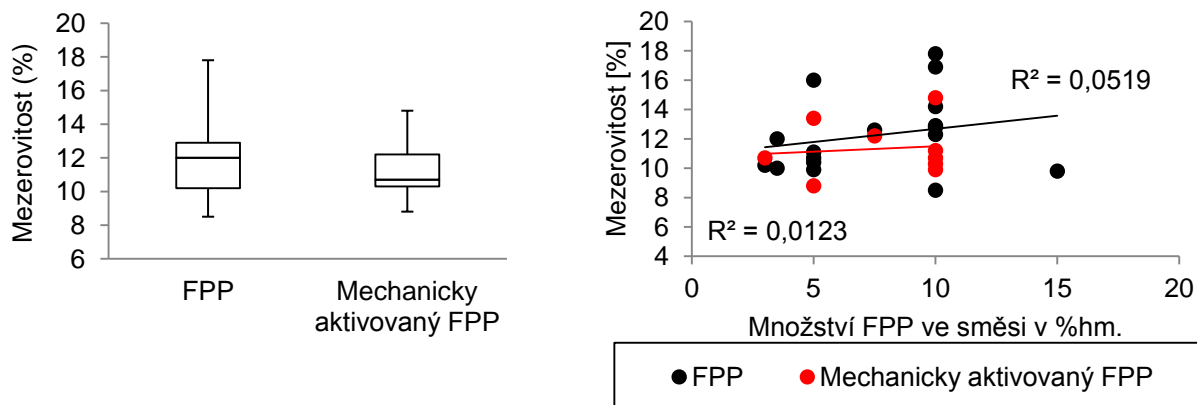
FPP, jak je patrné z obrázku 56, nýbrž zde hraje roli především vliv nehomogenity použitého R-materiálu. Uvedené korelační koeficienty ukazují na nezávislost těchto dvou parametrů. Směsi recyklace za studena aditivované FPP dosahují množství vzduchových mezer v intervalu 7,0 - 17,0 %. Směsi s mechanicky aktivovaným FPP dosahují v průměru mírně nižší mezerovitost nicméně opět v širokém intervalu 7,0 - 15,0 %.



Obrázek 54: Volumetrické parametry směsí recyklace za studena - neupravený FPP

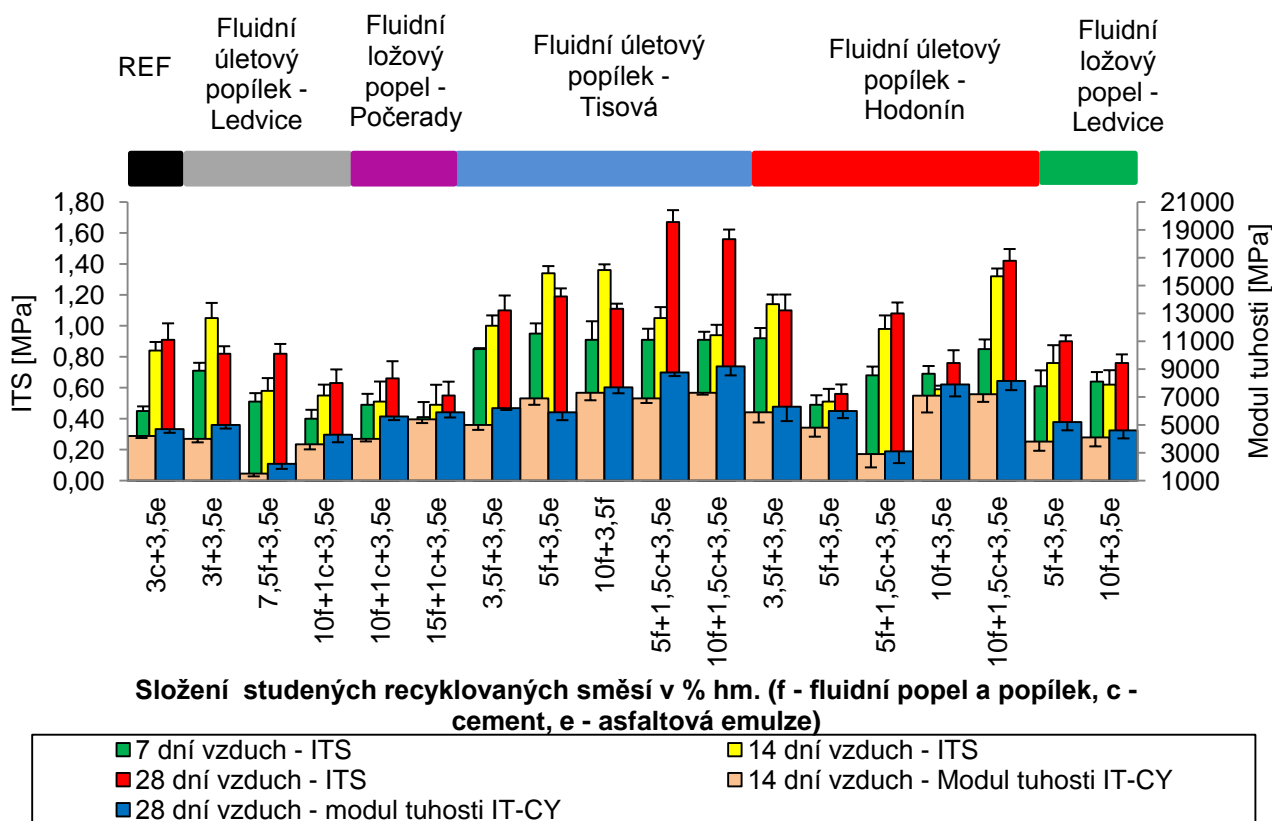


Obrázek 55: Volumetrické parametry směsí recyklace za studena - mechanicky aktivovaný FPP



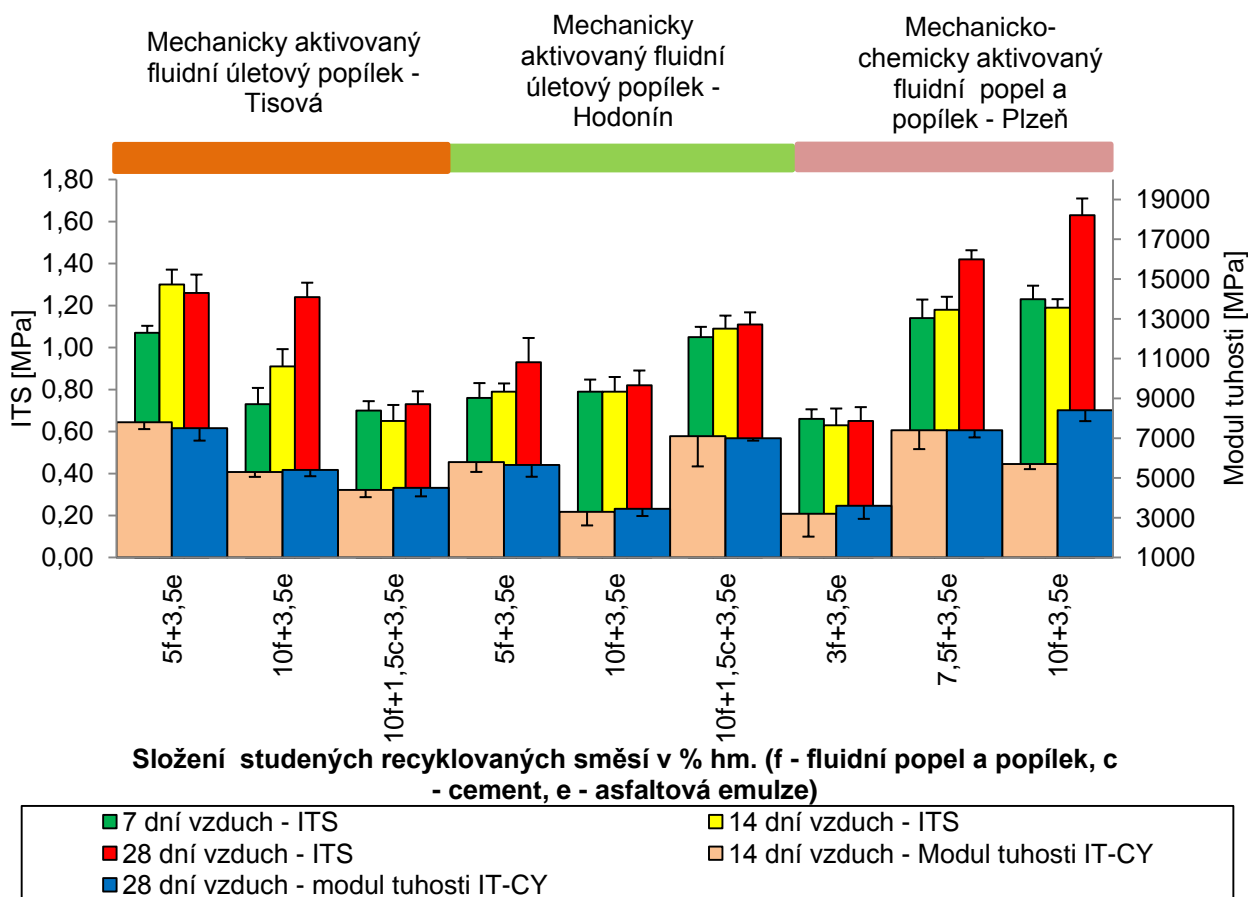
Obrázek 56: Krabicový graf (Box Whisker plot) - mezerovitost

Z výsledků pevnostních charakteristik uvedených na obrázku 57 a 58 lze pozorovat, že k největšímu nárůstu pevnosti ITS dochází v průběhu prvních sedmi dnů zrání. To znamená, že v této době je potenciální riziko velkého vývinu hydratačního tepla a možný vznik smršťovacích trhlin. Deformační parametry v podobě modulu tuhosti kopírují vývoj pevnostních charakteristik. Obecně lze odvodit závěr, že za uplatnitelnosti zkoumaného FPP stojí především obsah reaktivních složek, který je dán původem paliva, množstvím přidávaného vápencového aditiva a spalovacím procesem. Pokud testované směsi porovnáme s referenční směsí je zřejmé, že z hlediska pevnostních a deformačních parametrů je substituce hydraulického pojiva s dosažením finančních úspor potenciálně možná. Dalším zajímavým poznatkem je výrazný vliv na pevnostní a deformační parametry testovaných směsí vlivem spolupůsobení malého množství cementu a FPP.



Složení studených recyklovaných směsí v % hm. (f - fluidní popel a popílek, c - cement, e - asfaltová emulze)

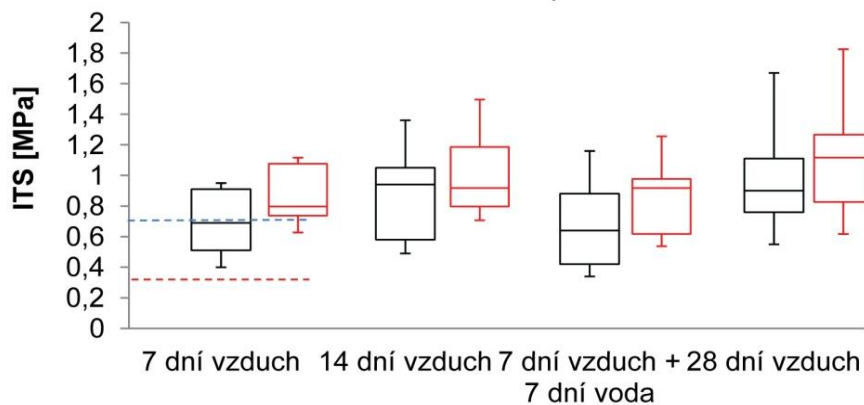
Obrázek 57: Pevnostní a deformační parametry směsí recyklace za studena - FPP



Obrázek 58: Pevnostní a deformační parametry směsí recyklace za studena - mechanicky aktivovaný FPP

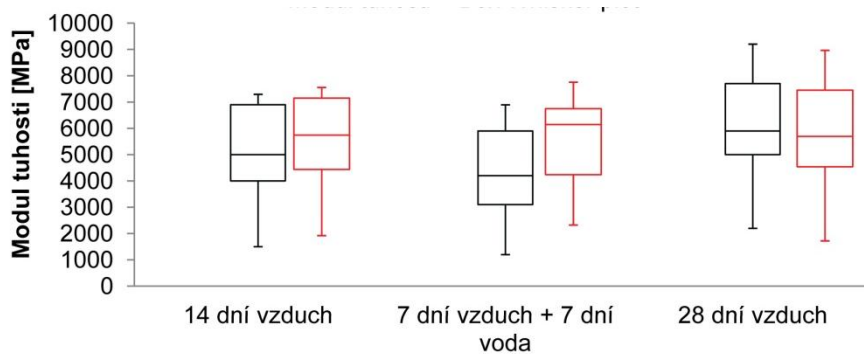
Dalším sledovaným a poměrně zajímavým porovnáním je vlastní vliv mechanické aktivace FPP vysokorychlostním mletím materiálu. Z obrázku 59 a 60 je patrný nárůst testovaných parametrů, což podporuje důkaz pozitivního vlivu mechanické aktivace nebo mletí obecně směrem k mechanickým vlastnostem recyklovaných směsí. Jelikož je, ale upravený a neupravený FPP porovnáván bez rozlišení původu, je na obrázku 61 prověřeno množství dávkovaného FPP a mechanicky aktivovaného FPP ve směsi. Dle obrázku 61 je dávkované množství FPP a mechanicky aktivovaného FPP téměř srovnatelné. Průměrná aditivace směsí recyklace za studena je 7,5 %-hm. FPP a u směsí s mechanicky aktivovaným FPP je to 7,8 %-hm. směsí. Nicméně tento rozdíl je marginální oproti nárůstu mechanických parametrů. Z ekonomického hlediska je pak na zvážení a diskuzi, zda takováto úprava FPP vykazuje dostatečný a akceptovatelný poměr nákladů a výnosů (cost/benefit ratio). Samozřejmě je otázka jakých nákladů a jak chceme charakterizovat výnosy či benefity.





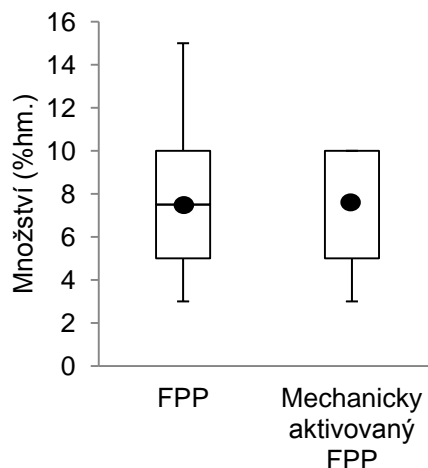
Recyklace za studena - FPP  
Recyklace za studena - Mechanicky aktivovaný FPP

Obrázek 59: Krabicový graf (Box Whisker plot)- ITS



Podmínky zrání  
Recyklace za studena - FPP  
Recyklace za studena - mechanicky aktivovaný FPP

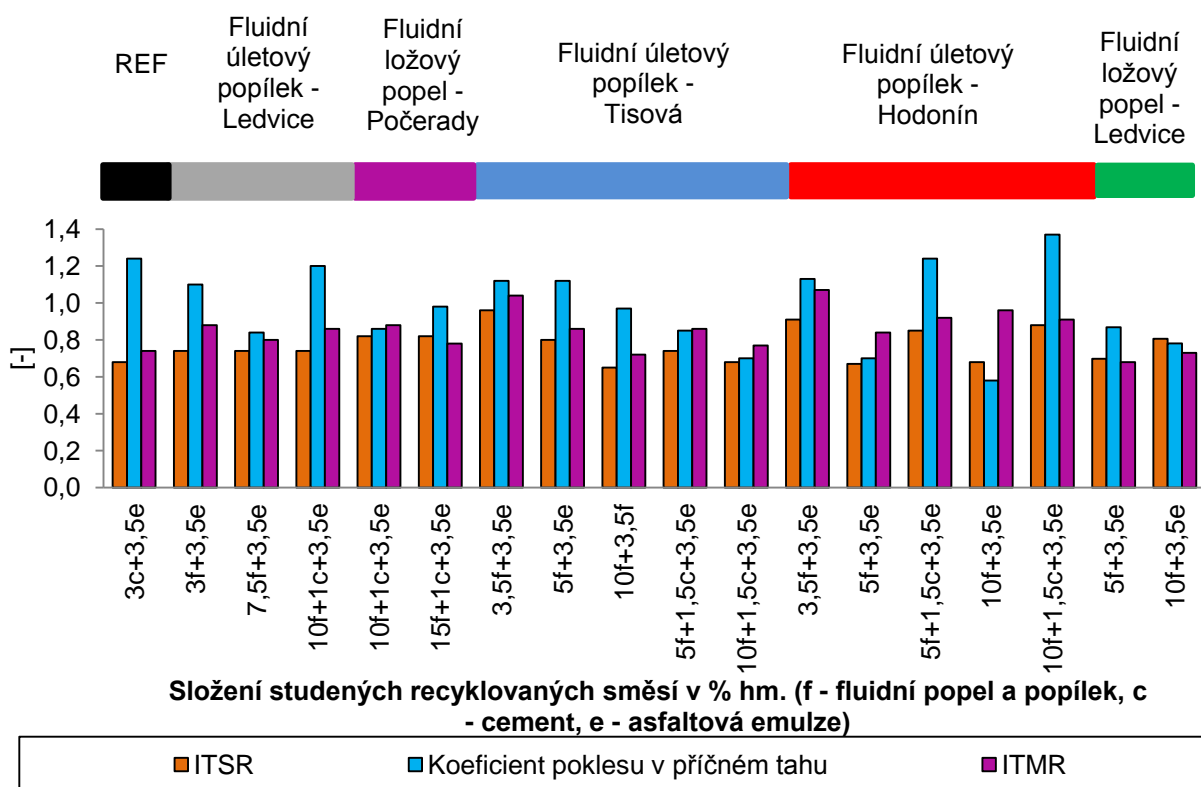
Obrázek 60: Krabicový graf (Box Whisker plot) - modul tuhosti IT-CY



Obrázek 61: Krabicový graf (Box Whisker plot) - obsah FPP ve směsích recyklace za studena

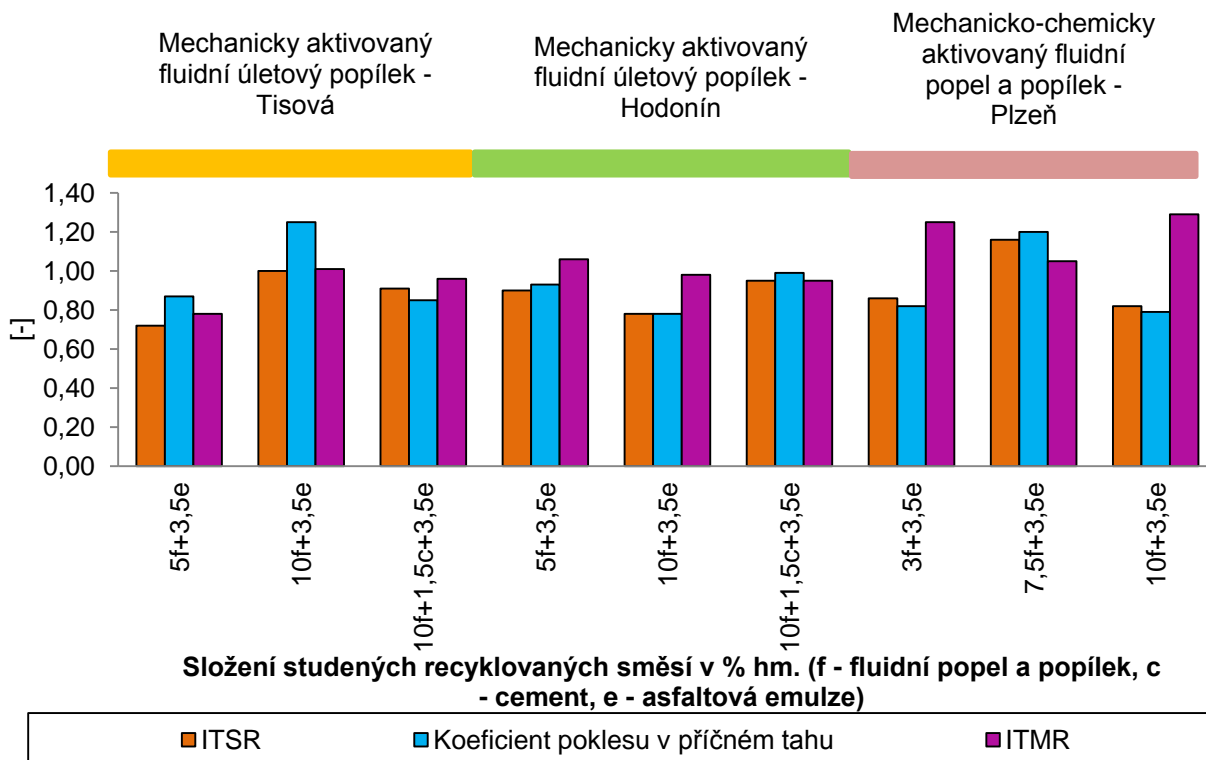
Souběžně byla sledována vodní citlivost, což je v praxi uplatňované kvalitativní kritérium, ale hlavně důležité stabilitní kritérium s ohledem na životnost vrstvy, ale i celé konstrukce vozovky. V této práci byly stanoveny tři parametry vodní citlivosti - koeficient poklesu pevnosti v příčném tahu dle TP 208, modifikovaný ITSR<sup>23</sup> dle ČSN EN 12697-12 a ITMR. Z obrázků 62 a 63 je patrný zřejmě nejdůležitější přínos FPP v podobě jejich aditivace do směsí recyklace za studena, a sice skutečnost, že dle dosavadních poznatků zvyšují odolnost proti vodě.

Vliv mechanické aktivace je v tomto případě jednoznačně pozitivní, respektive mechanicky aktivovaný FPP poměrně výrazně zvyšuje odolnost směsi vůči účinkům vody v rozmezí od cca 5 - 30 % (viz obrázek 59, 60, 62 a 63). Je nutné zmínit, že způsob provedení testování vodní citlivosti dle TP 208 je krátkodobý test a je třeba jistá obezřetnost, zejména ve spojitosti s FPP. Dlouhodobé účinky vody jsou při aplikacích FPP do konstrukce vozovky zásadní z hlediska dlouhodobé stability a životnosti vrstvy.



Obrázek 62: Vodní citlivost - FPP

<sup>23</sup> Hledisko modifikovaného ukazatele ITSR\* a ukazatele poklesu pevnosti v příčném tahu, je takové, že poměr ITSR\* vede k horším hodnotám. Proto by bylo vhodné ke kritériu ukazatele poklesu pevnosti v příčném tahu doplnit do technických podmínek konkrétní minimální hodnotu pevnosti v příčném tahu.



Obrázek 63: Vodní citlivost - mechanicky aktivovaný FPP

Vyrobená zkušební tělesa po dokončení 28 dní zrání se umístila na plstěnou podložku částečně ponořenou ve vodě a nechala se kapilárně nasycit. Následně se zkušební tělesa umístila do mrazicí skříně na dobu 6 hodin při teplotě  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po zmrazení se zkušební tělesa z mrazicí skříně vyjmula a uložila na dobu 18 hodin opět na plstěnou podložku částečně ponořenou ve vodě, aby bylo umožněno jejich další kapilární sycení. Současně s tím probíhalo rozmrazování při teplotě  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zkouška pokračovala novým zmrazením a opakovala se v 13 cyklech dle postupu uvedeném v národní příloze k ČSN EN 14227-5 (viz tabulka 33). Po skončení posledního cyklu se provedla zkouška ITS (v předpisech se uvádí zkouška v prostém tlaku  $R_c$ ) dle ČSN EN 13286-42 a dle TP 208.

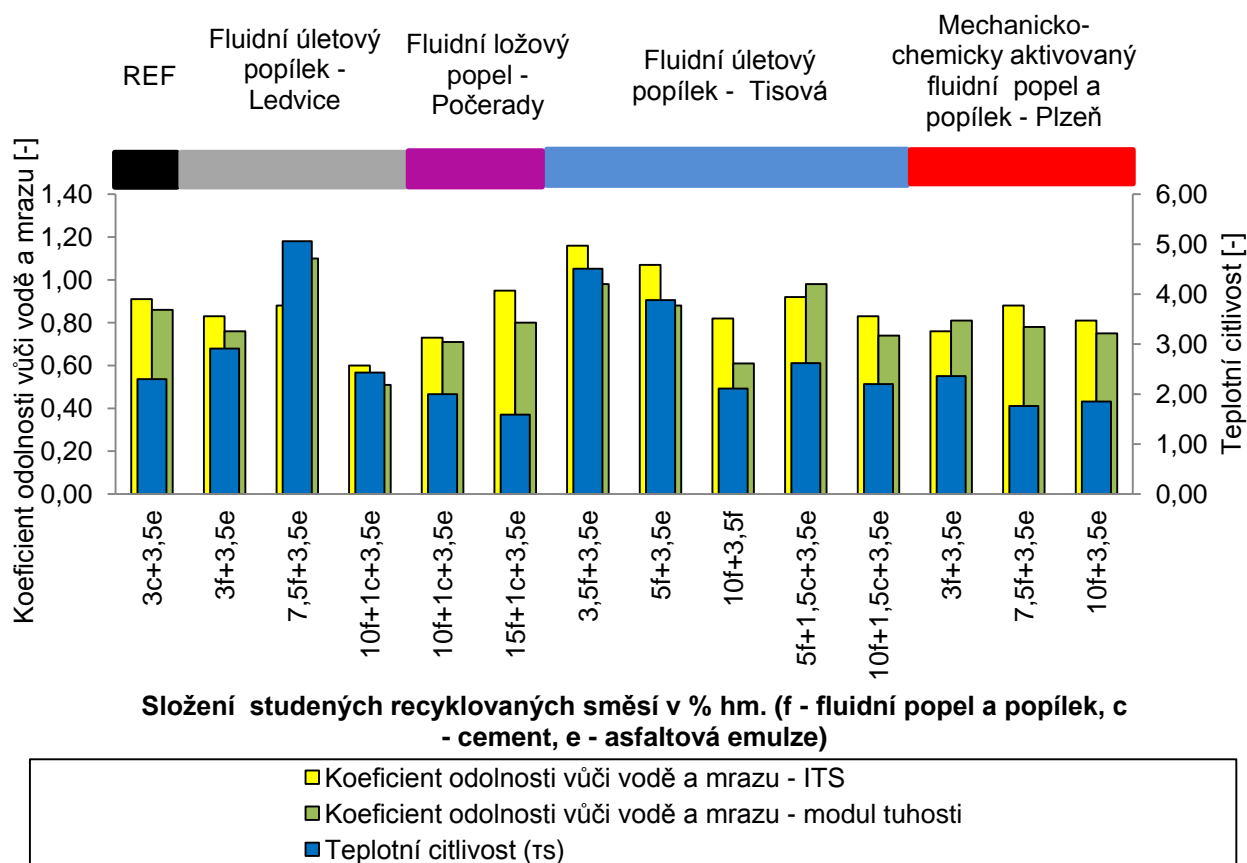
Vrstva vozovky	Teplota zmrazování ( $^{\circ}\text{C}$ )	Počet cyklů podle návrhového indexu mrazu dané oblasti ( $^{\circ}\text{C} \times \text{den}$ )		
		do 350	350 až 600	nad 600
horní podkladní vrstva	-20	10	13	16
spodní podkladní vrstva	-15	7	10	13
ochranná vrstva	-10	5	7	10

Tabulka 33: Teploty zmrazování a počty cyklů zmrazování

Odolnost proti vodě a mrazu směsí recyklace za studena s využitím FPP dle obrázku 64 není ovlivněna, i přes značnou sorpční schopnost fluidních popelovin. Tento závěr koreluje i s výsledky testování permeability (viz níže). Důležitou roli zde pochopitelně zastává i asfaltové pojivo. Vliv cementu nebo mechanické aktivace FPP na stabilitu směsi není prokazatelný.

Teplotní citlivost je stanovena jako poměr modulů tuhosti stanovených metodou IT-CY dle ČSN EN 12697-26 při teplotě  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z obrázku 64 je patrné, že FPP v testovaném

rozmezí dávkování zvyšuje teplotní citlivost. Nicméně je nutno podotknout, že přidáním malého množství cementu lze tuto vlastnost potlačit, přičemž mechanická aktivace má stejný účinek.

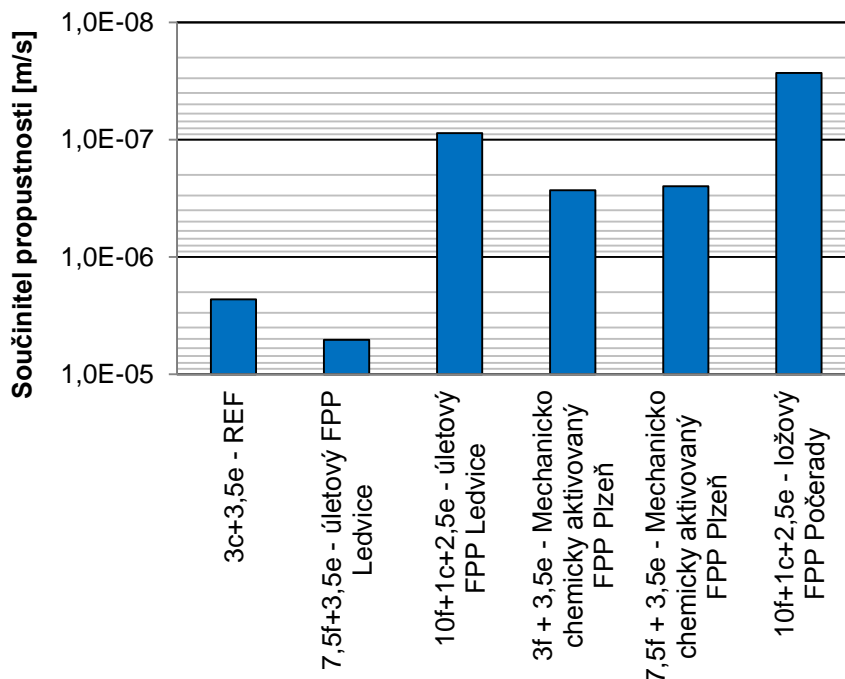


Obrázek 64: Parametry odolnosti vůči vodě a mrazu, teplotní citlivost

### 12.10.1. Permeabilita testovaných směsí

Dále byla u vybraných směsí s obsahem FPP stanovena propustnost dle ČSN CEN ISO/TS 17892-11. Hodnoty koeficientu filtrace klesají s množstvím popílku ve směsi v intervalu  $1,0E-06$  -  $1,0E-07$  m/s při teplotě  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hodnoty součinitele propustnosti jsou uvedeny na obrázku 65.

Testy permeability odhalily, že průměrný koeficient propustnosti recyklovaných směsí aditivovaných FPP je  $6,0E-06$ . Klasifikace propustnosti zemin dle ČSN 73 6850 uvádí interval  $1,0E-05$  -  $1,0E-07$  jako středně až málo propustný materiál. S koeficientem propustnosti nižším než  $1,0E-08$  jako nepropustné.



Obrázek 65: Filtrační součinitel směsí recyklace za studena

### 12.10.2. Výluhové testy

V návaznosti na seznam technických předpisů upravující převážně metodiku výluhových testů, jsou pro vybrané typy málo propustných stavebních výrobků používané analytické postupy dle ČSN P CEN/TS 16637-1. Žádná z těchto metod, které se řídí dotčenými předpisy, nebyla použita, nýbrž byl upřednostněn a aplikován upravený postup založený na základě analytické metody spektroskopie. V rámci možného využití směsi recyklace za studena s VEP v podkladních vrstvách vozovek je nutné také přihlídnout k ekologickým aspektům této aplikace, respektive vyvstává zde nutnost stanovit výluh potenciálně nebezpečných látek do okolního prostředí.

Popílek je heterogenní materiál, přičemž jsou v něm jednotlivé prvky distribuovány nepravidelně. Minerální frakce prodělává během a po skončení samotného procesu spalování rozklad, vytěkávání a odpařování volatlních prvků, tavení, aglomeraci a kondenzaci. Během chladnutí spalin kondenzují volatlní prvky jako As, Cd, Ge, Mo, Pb, Sb, Ti a Zn na povrchu částic popílku, zatímco Ba, Co, Cr, Mn, Ni a P se koncentrují spolu s hlavními prvky v uhlí se vyskytujícími alumosilikátů (Si, Al, Ca, K, Fe, Ti) spíše v hlavní hmotě částic. Prvky v jádře popílkových částic nejsou přímo vystaveny působení okolního prostředí, a proto jejich distribuce a difúze závisí především na stupni rozpustnosti povrchových vrstev [Nejeschlebová 2013].

Laboratorně je výluh simulován difúzním testem. Principem difúzního testu dle EA NEN 7375:2004 je sledování dlouhodobého vlivu působení vody na výrobek z hlediska chemického (obsah analytů ve výluhu) a mechanického (obsah odloučeného pevného podílu). Tento difúzní test je prováděn staticky, aby nebyla ovlivněna přirozená difúze a také aby nebyl narušen povrch vzorku.

Účelem tohoto difúzního testu je simulovat výluh složek z monolitických materiálů za přístupu vzduchu jako funkci času za období 64 dnů. Tento test stanoví povahu a vlastnosti základního materiálu při umístění celého vzorku ve vyluhovací kapalině (demineralizovaná voda s neutrálním pH) a při doplňování vyluhovací kapaliny v určených časech. Koncentrace vyluhovaných složek se měří v jednotlivých po sobě jdoucích

částech výluhu a v časových úsecích po 6 hodinách, po 24 hodinách, po 54 hodinách, po 4 dnech, po 9 dnech, po 16 dnech a po 36 dnech. Hodnota pH, za které se výluh provádí, je ovlivněna samotným materiálem.

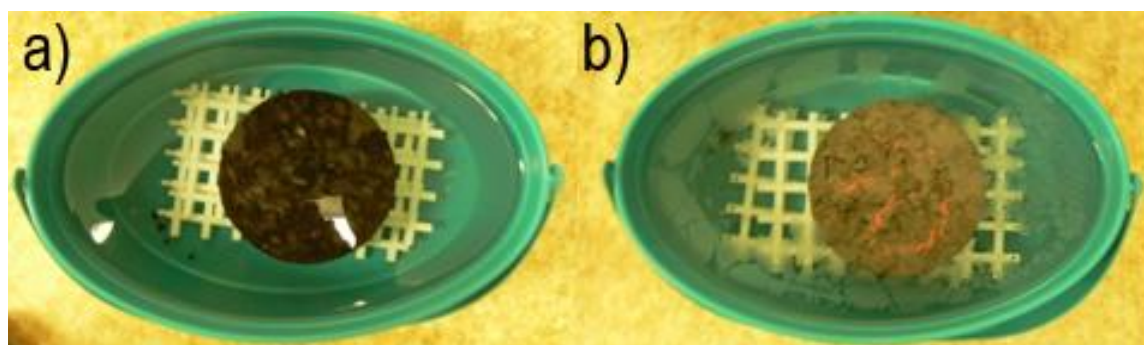
Na základě výsledků difúzního testu se pro každou analyzovanou složku vypočte vyluhované množství na jednotku povrchu. Kvalitativní hodnocení výluhu probíhalo podle limitů, které jsou uvedeny v nařízení o stavebních hmotách nizozemského Ministerstva bydlení, územního plánování a životního prostředí vydané v roce 1999 ve znění pozdějších předpisů. Výluhy byly porovnány s limity pro podklady vozovek (Building Materials Decree – BMD, 64 dní). Výsledky byly dále porovnány s novelou skládkové vyhlášky pro Anglii a Wales („*Landfill Regulation Amendment for England and Wales*“) č. 1640 z roku 2005 pro odpad ukládaný na skládky odpadů – výluh po 64 dnech).

Měřený výluh složky po frakcích	REC REF	10 % mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň	10 % FPP Počeradý	10 % FPP Hodonín	BMD 64 dní; U1a	Odpad ukládaný na skládky odpadů (výluh po 64 dnech)
Chloridy [mg/m <sup>2</sup> ]	2 809,80	2 552,90	2444	2 516,10	-	10 000
Sírany [mg/m <sup>2</sup> ]	2 390	71 397	73264	126 308	27 000	10 000
Arsen [mg/m <sup>2</sup> ]	0,45	8,712	1,468	2,48	41	1,3
Kadmium [mg/m <sup>2</sup> ]	0,09	0,086	0,09	0,085	1,1	0,2
Chrom [mg/m <sup>2</sup> ]	0,6	0,6	1,56	0,6	140	5
Měď [mg/m <sup>2</sup> ]	4,3	4	5,035	3,6	51	45
Rtuť [mg/m <sup>2</sup> ]	0,03	0,03	0,02	0,02	0,4	0,1
Nikl [mg/m <sup>2</sup> ]	0,9	0,9	0,858	0,8	50	6
Olovo [mg/m <sup>2</sup> ]	0,2	0,31	0,277	0,3	120	6
Zinek [mg/m <sup>2</sup> ]	8,3	5,2	5,95	6,1	200	30

Tabulka 34: Hodnoty výluhu testovaných směsí recyklace za studena

Z dosažených výsledků uvedených v tabulce 34 vyplývá, že u směsí, kde byl použit fluidní popílek, byly zjištěny zvýšené hodnoty síranů a arsenu. Nejvyšší množství síranů je patrné u směsi s popílkem z elektrárny Hodonín (zvýšená hodnota je patrně způsobena spalováním hnědého uhlí s komunálním odpadem). Nejvyšší hodnoty obsahu arsenu ve výluhu vykazuje směs s fluidním popílkem z teplárny Plzeň. U všech pozorovaných směsí vykazovala voda z výluhů zásadité pH pohybující se v intervalu od 8,0 - 11,0, přičemž hodnoty pH narůstaly v průběhu 14 dnů trvání testu, následně docházelo k mírnému poklesu.

Zkušební vzorky směsí s FPP vykazovaly na konci každé výluhové periody (nejvíce v posledních periodách) na vodní hladině matný povlak (viz obrázek 66).



Obrázek 66: Zkušební vzorky ponořené v destilované vodě  
 a) REF, b) 10f+3,5e - mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň





Vzhledem k specifickým odlišnostem koncentrací přirozeného pozadí některých ukazatelů v ČR (zejména arsen) má přednost limit pro pitnou vodu. Z tabulky je vidět, že limitní hodnoty pro vodní výluhy dle TP 93 v části ukazatelů překračují některé porovnávané hodnoty. Výluhy z konstrukcí s využitím VEP tak mohou způsobovat kontaminaci podzemní vody, přestože jednotlivé koncentrace ve výluhu vyhovují TP 93. Samostatnou otázkou je šíření kontaminace od zdroje v prostoru a čase. Vzhledem ke značným objemům a liniovému charakteru silničních staveb zůstává jako nedořešená otázka, nakolik se může jednat o významný zdroj kontaminace podzemních, případně i povrchových vod.

Arsen (As) je v uhlí vázán na pyrit, při hoření se pyrit rozkládá, čímž dochází k uvolňování As a jeho navázání na povrchové struktury prachových částic, kde tvoří snadno rozpustné sloučeniny. Schopnost vyluhování As závisí na charakteru popílku a pH, přičemž As je vyluhovatelný ve značně širokém rozsahu hodnot pH. V kyselých popílcích jeho vyluhovatelnost roste se vzrůstajícím pH, u alkalických popílků je opačný trend. Obecně se As ze silně alkalických popílků vyluhuje málo, v případě středně alkalických popílků je vyluhované množství větší. Variabilita vyluhování je přisuzována adsorpčním procesům, vzájemným interakcím s dalšími prvky a sloučeninami, významnou roli zde hraje působení iontů vápníku, srážení ettringitu, oxy-hydroxidy Fe, oxidy Al a Mn, fosfáty a karbonáty [Nejeschlebová 2013, Hartuti 2017].

### 12.10.3. Další analýzy chemických vlastností VEP

Rozsáhlé analýzy chemických vlastností VEP byly například provedeny a shromážděny během přípravy projektu dálničního násypu z VEP ve Velké Británii [Vaníček, 2003, Mráz 2017]. Vzorky VEP byly odebrány ze tří elektráren ve Velké Británii. Analýza výluhů ukázala na zvýšené hodnoty arsenu, kadmia, chromu, rtuti, selenu, síranů, pH a PAU. Potencionální zdroj kontaminace byl VEP navržený do konstrukce násypu, a to za předpokladu, že VEP bude izolován od kolísavé hladiny podzemní vody drenážní vrstvou situovanou nad hladinou 100-leté vody. Pro posouzení analýzy rizik se použil výpočetní program CONSIM, velmi konzervativní nebo „horší“ parametry a bylo vyžadováno velmi malé ředění v potoce. Závěr analýzy zněl, že neexistuje významné riziko kontaminace z výluhů VEP na povrchové vody.

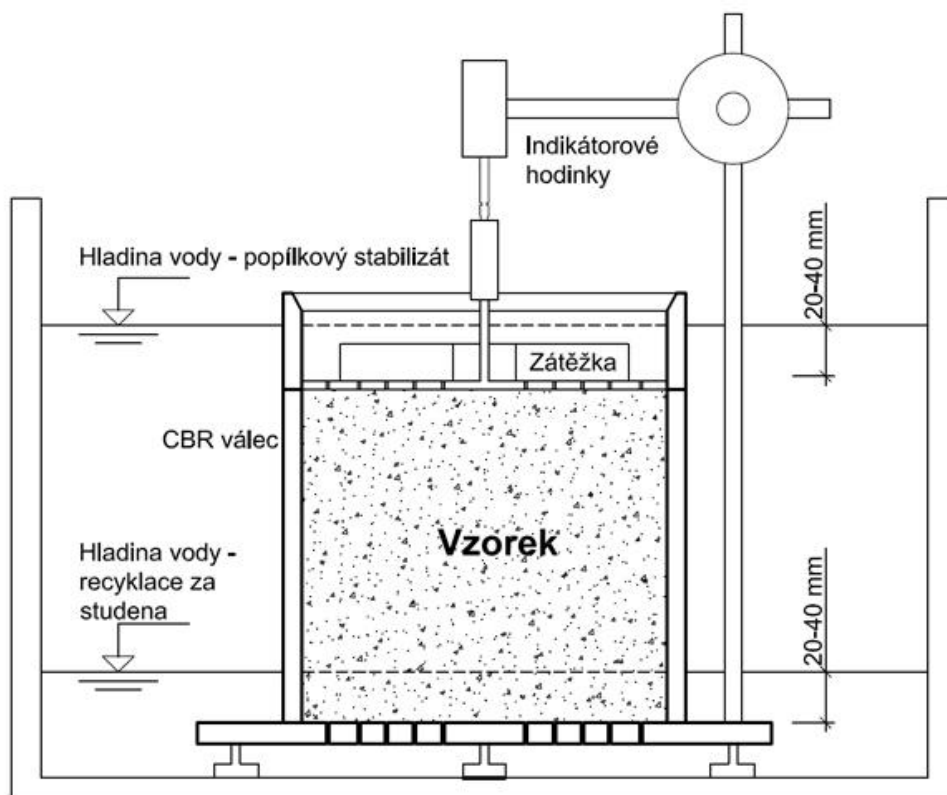
Pro ověření vlastností VEP pro případné použití v lokalitách ochranných pásem pitné vody byly provedeny v rámci projektu Ministerstva dopravy č. CG912-045-520 zkoušky vyluhovatelnosti, ekotoxicity a radioaktivity, kde zjištěné hodnoty byly velmi příznivé. Nejlepší výsledky hodnocení výluhů bylo u směsí fluidního popílku s vápnem, relativně nejhorší výsledek dával hnědouhelný popílek s cementem a to především díky obsahu arsenu ve výluhu [Klímešová 2010, Mráz 2017].

Při odběru náhodných vzorků směsí ze zdrojů v ČR odsířených mokrou vápencovou metodou pro zkoušky výluhů bylo zaznamenáno překročení limitů podle TP 93 (resp. ČSN 73 6133) zpravidla pouze v případě arsenu, baria, selenu a vanadu. Obvykle nevyhoví limitům asi 10 až 20 % vzorků. Pouze v případě vanadu nevyhovělo 40 až 50 % vzorků. Nahodilé výkyvy jsou dány především vrstvením popelových frakcí v silu (střídavé vyklízení hrubších a jemnějších frakcí, přičemž nositeli škodlivin jsou hlavně jemné, úletové frakce), které vždy nesetře ani promísení v míchacím centru. Po zvlhčení na optimální vlhkost z hlediska zpracovatelnosti hutněním dochází zpravidla k chemické stabilizaci (beze změny fyzikální podstaty směsi), která se projevuje postupnou proměnou jednotlivých kontaminantů na méně pohyblivé formy. S rostoucí dobou od zvlhčení směsi se mobilita kontaminantů ve výluhu snižuje. Prvky, které se v neaditivované netuhnoucí

směsi ukazovaly ve výluhu jako nadlimitní, mají po přidání VEP hodnoty zpravidla nižší než limitní. Složení základní popelové směsi se tedy kopíruje i do stabilizátu, ale vyluhovatelnost jednotlivých prvků se výrazně snižuje. Sledováním vlastností výluhů ze stabilizátů získaných ze zdrojů odsířených technologií fluidního spalování bylo ověřeno, že ani v jednom případě nebyly překročeny citované limitní hodnoty (pouze v jednom případě byla u vanadu dosažena limitní hodnota) [Králová 2007, Mráz 2017].

#### 12.10.4. Objemové změny

Předmětem měření objemových změn bylo stanovení součinitele objemové bobtnavosti. Pro tuto zkoušku byl použit CBR mozdík a ostatní vybavení, používané pro přípravu a provedení zkoušky CBR dle ČSN EN 13286-47. Směs, zvlhčená na  $w_{opt}$ , byla zhutněna ve válci CBR energií Proctor modifikovaný. Recyklované směsi zrály 28 dní ve formě při 20°C v neprodyšném obalu a pak se sytily vodou tak, aby byly simulovány podmínky v konstrukci vozovky. V časových intervalech se měřila změna výška povrchu zhutněného, syceného vzorku, zatíženého zátěží (viz obrázek 67). Paralelně probíhal výzkum bobtnavosti popílkových stabilizátů z FPP pocházejících ze stejného zdroje. Tyto popílkové stabilizáty byly hutněny ve válci CBR při  $w_{opt}$  hutnící energií Proctor standard. Tyto vzorky byly ponořeny ve vodě celým objemem. Tyto vzorky slouží jako referenční pro porovnání vývoje objemových změn ve směsích recyklace za studena [Mráz 2015].



Obrázek 67: Sestava pro měření objemových změn - recyklovaná směs (sycení zdola) /popílkový stabilizát (sycení zdola i zhora)

Součinitel objemového bobtnání  $B_t$  byl stanoven dle následujícího vztahu (62) dle TP 93:

$$B_t = \frac{\Delta V_t}{V_1} \quad (62)$$



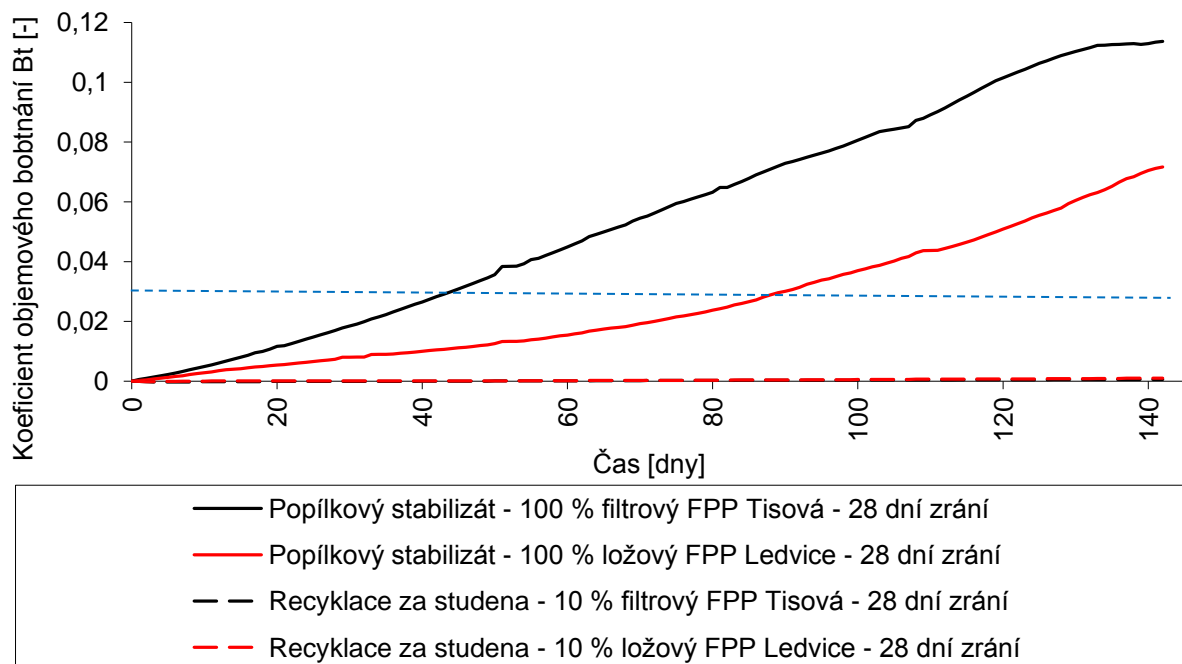
kde,

$V_1$  počáteční objem vzorku ( $m^3$ )  
 $\Delta V_t$  změna objemu vzorku v čase  $t$  ( $m^3$ )

Výsledky objemových změn popílkových stabilizátů a recyklací za studena jsou uvedeny na obrázku 68. Největší nárůst objemu (více než 10 %) vykazují popílkové stabilizáty z ložového FPP Ledvice a z úletového FPP Tisová bez aditiv. Ani po 145 dnech nejeví známky ustálení. Tyto stabilizáty překročily maximální dovolenou míru objemového bobtnání (< 3 % bobtnání v CBR válci dle TP 93).

Důležitým zjištěním z měření bobtnavosti během tuhnutí a tvrdnutí popílkového stabilizátu připraveného z produktů technologie fluidního spalování je skutečnost, že přidáním mechanicko-chemicky aktivovaných aditiv (mechanicky aktivovaný FPP či mechanicky aktivovaný dolomit) do popílkových směsí dochází ke snížení bobtnavosti až o 50 % [Mráz a Suda 2017].

Opačný trend vývoje objemových změn vykazují recyklované směsi, kdy ani po 145 dnech uložení ve vodě nedochází ke zvětšování objemu (viz obrázek 68).



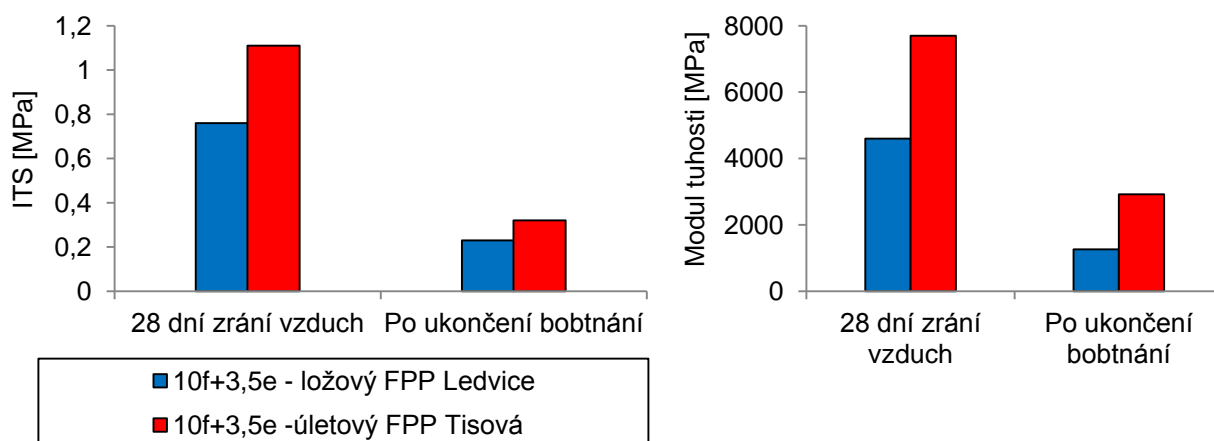
Obrázek 68: Průběh objemových změn v závislosti na čase

Na obrázku 69 jsou zobrazeny jednotlivé vzorky recyklace za studena po ukončení bobtnání (145 dní). Pro porovnání jsou uvedeny i popílkové stabilizáty.



Obrázek 69: Zkušební vzorky po zkoušce bobtnání (145 dní) - a) recyklace za studena 10 %-hm. FPP Ledvice b) recyklace za studena 10 %-hm. FPP Tisová c) popílkový stabilizát FPP Ledvice d) popílkový stabilizát FPP Tisová

Z hlediska změny pevnostních a deformačních parametrů po uložení ve vodě po dobu 145 dní došlo k poklesu ITS a modulu tuhosti ve všech případech o cca 65-75 % (viz obrázek 70). Lze předpokládat, že na strukturní degradaci recyklované směsi má vliv nejen voda samotná, ale i tvorba novotvořených minerálů skupiny ettringit a Ca karbonátů. Nicméně k objemovým změnám v těchto směsích nedochází vlivem relativně malého obsahu FPP a vyššího obsahu vzduchových mezer v těchto směsích. Lze předpokládat, že vlastní expanze minerálů skupiny ettringit je saturována druhofázově právě vzduchovými mezerami, přičemž ve vlhkém prostředí nabývá hlavně gelovitou strukturu.



Obrázek 70: Pevnostní (ITS) a deformační (modul tuhosti) parametry recyklovaných směsí před a po ukončení bobtnání

### 12.10.5. Chemická analýza po zkoušce bobtnání

K popisu příčin vzniku objemové nestálosti byla v laboratořích Vysoké školy chemicko-technologické v Praze provedena analýza stanovení fázového složení metodou rentgenové difrakční analýzy (XRD). Vyhodnocení XRD analýzy vzorků po bobtnání jsou uvedena v tabulkách 35 a 36. Tyto vzorky byly z technických důvodů (odběr, příprava a testování vzorků z recyklovaných směsí nebyl možný) odebrány pouze z popílkových stabilizátů. Chemické změny by měly nicméně korespondovat pro oba typy směsí.

Ref. Code	Score	Compound Name	Mineral Name	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-078-4614	73	Calcium Carbonate	Calcite, syn	Ca(CO <sub>3</sub> )	51
00-046-1045	54	Silicon Oxide	Quartz, syn	SiO <sub>2</sub>	14
03-065-5714	43	Titanium Oxide	Anatase, syn	TiO <sub>2</sub>	3
01-074-3266	48	Calcium Silicon Hydroxide Carbonate Sulfate Hydrate	Thaumasite	Ca <sub>3</sub> (Si(OH) <sub>6</sub> )(CO <sub>3</sub> )(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>12</sub>	20
01-089-1477	21	Calcium Sodium Aluminum Silicate	Anorthite, annealed	(Ca0.98 Na0.02)(Al1.98 Si0.02)Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	12

Tabulka 35: XRD fázové složení fluidního úletového popílku Tisová po zkoušce objemové stálosti

Ref. Code	Score	Compound Name	Mineral Name	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-087-2096	65	Silicon Oxide	Quartz low, syn	SiO <sub>2</sub>	52
01-072-4582	36	Calcium Carbonate	Calcite	Ca(CO <sub>3</sub> )	8
04-013-3691	39	Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate	Ettringite, syn	Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>26</sub>	23
04-014-8515	33	Titanium Oxide	Anatase, syn	TiO <sub>2</sub>	5
01-089-0596	19	Iron Oxide	Hematite, syn	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3
04-009-1810	22	Calcium Sulfate Hydrate	Gypsum	Ca(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	9

Tabulka 36: Fázové složení fluidního ložového popela Ledvice po zkoušce objemové stálosti

Z provedených XRD analýz je patrné, že krystalické fáze jsou ve směsích zastoupeny hlavně anhydritem, křemenem, anortitem, mullitem a kalcitem. Výsledky XRD analýzy ukázaly, že při uložení ve vodě došlo ke změně fázového složení studovaných vzorků. Expanzivní chování jak popílkových stabilizátů, tak pokles pevnostních a deformačních parametrů recyklovaných směsí, lze tudíž přisoudit vzniku ettringitu Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub>·26(H<sub>2</sub>O) a thaumasitu Ca<sub>6</sub>[Si(OH)<sub>6</sub>]<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·24H<sub>2</sub>O [Collepari 1999, Sahu 2002].

### 12.10.6. Ramanova spektroskopie

Analýzy metodou Ramanovské mikrospektroskopie byly prováděny na několika náhodně vybraných místech jednotlivých hrubě práškových vzorků pomocí přístroje InVia Reflex Raman spectrometer od firmy Renishaw propojeného s mikroskopem Leica a s použitím 50× objektivu. Jako excitační záření byl použit argonový laser ( $\lambda = 514$  nm) a diodový laser ( $\lambda = 785$  nm). Energie laseru byla omezena na 10 % z důvodu vyloučení termálních změn ve vzorcích. Spektra byla pořizena v rozsahu 100 – 2000 cm<sup>-1</sup> s následujícím nastavením: 20 sekund čas jedné akumulace a 10-20 těchto akumulací bylo nahráno pro výsledné

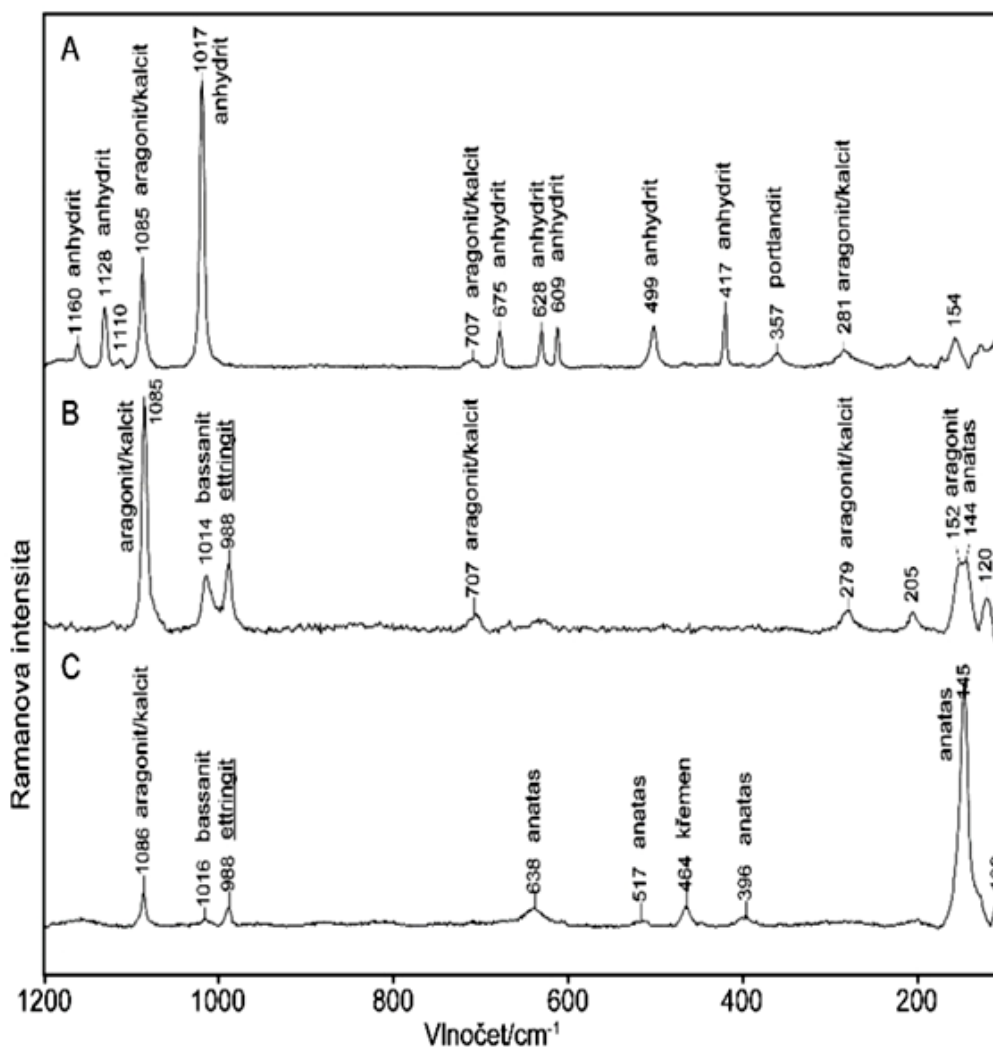


spektrum s optimalizovaným poměrem signál/šum. Přístroj byl kalibrován na Ramanovský pás diamantu  $1332\text{ cm}^{-1}$ . Manipulace se spektry (korekce „baseline“) byla prováděna v programu GRAMS/AI 9.1.

Všechny analyzované vzorky byly ve formě hrubě práškového materiálu tvořeného komplexní směsí minerálů a amorfních fází. Tento fakt se odráží v získaných spektrech, která i při použití mikroskopu a mikrometrické stopy laseru často obsahují Ramanovské pásy několika různých minerálů. Při použití laseru o vlnové délce  $785\text{ nm}$  spektra často obsahovala velké množství luminescence/fluorescence, což odpovídá předchozím zkušenostem při analýzách podobných vzorků obsahujících anhydrit nebo silikátové minerály. Tato luminescence může být způsobena přítomností stopových množství prvků ze skupiny REE<sup>24</sup> a někdy kompletně překryje Ramanovský signál minerálů. Presentovaná spektra (obrázky 71 a 72) jsou tedy případy, kde se negativní fluorescence vyskytovala pouze v omezené míře. Ve spektrech získaných ze vzorku FPP Ledvice před bobtnáním (obrázek 71a), byly následující minerály identifikovány v bílé základní hmotě: anhydrit, aragonit/kalcit, portlandit. Dále byl identifikován křemen. Tmavé minerály byly identifikovány jako anatas a hematit. Ve spektrech získaných ze vzorků FPP Ledvice po bobtnání (obrázek 71b, 71c) byl kromě Ramanovských pásů odpovídajících minerálům aragonitu/kalcitu, basanitu, křemene a anatasu, identifikován pás na poloze  $988\text{ cm}^{-1}$ , který odpovídá minerálu ettringitu. Tento pás je projevem symetrické valenční vibrace v tetraedrech  $\text{SO}_4$  a shoduje se s referenční hodnotou  $988\text{ cm}^{-1}$  [Deb et al., 2003]. Další Ramanovské pásy ettringitu mají mnohem menší intenzitu a nebyly ve vzorcích detekovány.

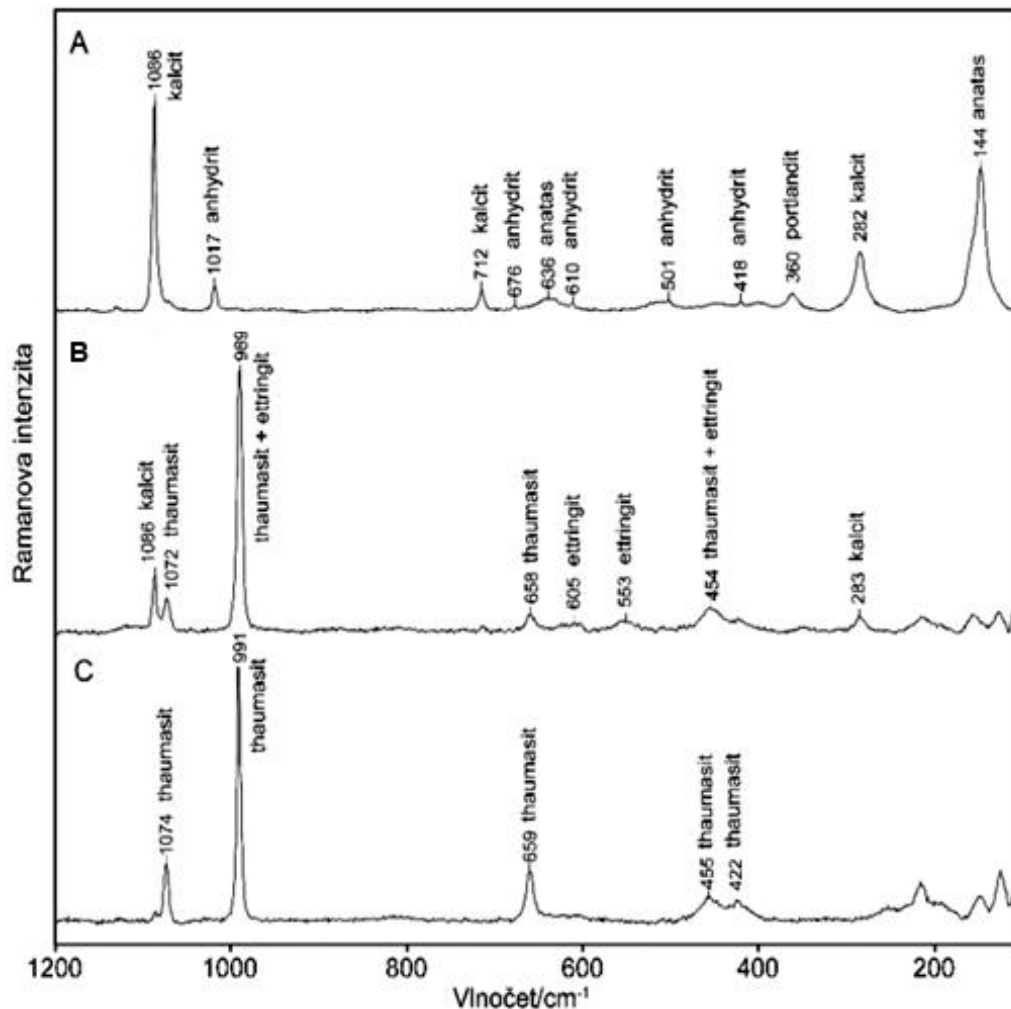
---

<sup>24</sup> REE jsou litofilní prvky (tj. vyskytující se, zejména v zemské kůře), které se vyskytují společně jako trojmocné kationy v karbonátech, oxidech, fosfátech a silikátech. Mezi REE řadíme 15 prvků, které se vyskytují v periodické tabulce od atomového čísla 57 (lanthanu) do atomového čísla 71 (lutecium). Tyto prvky se také běžně označují jako "lanthanoidy".



Obrázek 71: Ramanovo spektrum z ložového FPP Ledvice

Dále byly analyzovány vzorky ze skupiny FPP Tisová. Ve vzorku FPP Tisová před bobtnáním (obrázek 72a) byly jednoznačně identifikovány minerály kalcit, anatas, anhydrit a portlandit. Významné změny však byly zaznamenány ve spektrech získaných ze vzorku FPP Tisová po bobtnání. Jak je patrné z obrázku 72b, 72c spektrum dominuje silný Ramanovský pás na poloze 900 cm<sup>-1</sup>. Tento pás dokládá přítomnost minerálů thaumasitu a ettringitu. Další pásy, odpovídající minerálu thaumasitu, byly identifikovány na 1072, 658 a 454 cm<sup>-1</sup>, a pro minerál ettringit na 605, 553 a 454 cm<sup>-1</sup>. Na obrázku 72c je zobrazeno spektrum téměř výlučně thaumasitu a polohy Ramanovských pásů jsou ve velmi dobré shodě s referenčními hodnotami [Brough and Atkinson, 2001]. Pás na 1074 cm<sup>-1</sup> (1072 ref. hodnota) je přiřazen symetrické valenční vibraci CO<sub>3</sub> skupiny, pás na 991 cm<sup>-1</sup> (990) odpovídá symetrické valenční vibraci SO<sub>4</sub> skupiny, a pás na 659 cm<sup>-1</sup> (658) vibraci Si(OH)<sub>6</sub> skupiny. Pásky na 455 a 422 cm<sup>-1</sup> jsou pravděpodobně projevy deformační vibrace SO<sub>4</sub> skupiny [Mráz 2014].



Obrázek 72: Ramanovo spektrum z úletového FPP Tisová

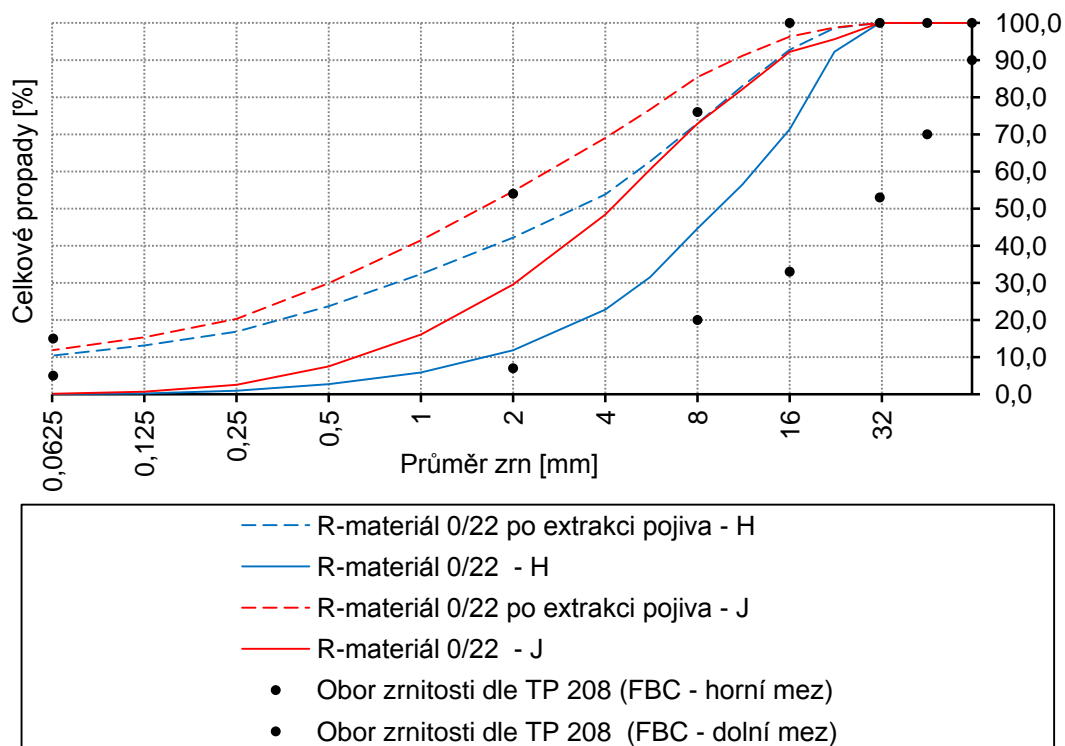
### 12.11. Použití mechanicko-chemicky aktivovaných fluidních popelů a popílků u slabě stabilizovaných směsí recyklace za studena

Tato část dísertační práce se zabývá experimentálním návrhem a hodnocením recyklovaných směsí aditivované mechanicko-chemicky aktivovaným FPP pocházejícího z teplárenského provozu Plzeň. Takto upravený materiál byl použit jako částečný substituent standardního hydraulického pojiva a jako aktivní mikrofiler ve slabě stabilizovaných směších recyklace za studena, přičemž byl sledován jeho vliv na výsledné volumetrické, pevnostní a deformační parametry směsi. V neposlední řadě byla sledována lomová houževnatost těchto směsí při nízkých teplotách. Takto nově vytvořené směsi by měly najít své uplatnění především v podkladních vrstvách vozovek s nízkým dopravním zatížením TDZ V-VI dle TP 170, podpořené nižšími náklady na vlastní kompozitní směs vycházející s ceny pojiva a eventuálně environmentálními hledisky.

#### 12.11.1. Specifikace použitých materiálů

Pro přípravu směsí recyklace za studena byl využit tříděný asfaltový R-materiál (asfaltová směs znovuzískaná odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby) frakce 0/22 z obalovny Středokluky. Zrnitost a obsah pojiva v R-

materiálu jsou uvedeny na obrázku 73 a v tabulce 37, přičemž R-materiál je rozdělen na hrubozrnnou variantu (H) a jemnozrnnou variantu (J).



Obrázek 73: Zrnitost R-materiálu 0/22

R-materiál	0/22 - H	0/22 - J
Množství pojiva (% hm.)	5,5	6,0

Tabulka 37: Obsah zbytkového pojiva v R-materiálu

Jako hydraulické pojivo byl aplikován běžně používaný portlandský struskový cement CEM II/B 32,5 S dle EN 197-1 v množství 1,0 %-hm. směsi. Do recyklované směsi byl dále dávkován zpěněný asfalt v množství 1,0 %-hm.. Pro výrobu zpěněného asfaltu byl použit silniční asfalt 70/100. Pro kvalitní obalení R-materiálu byl zpěněný asfalt optimalizován dle [Wirtgen 2012]. Základní charakteristiky použitého asfaltu a optimální množství vody dávkované do pojiva při výrobě zpěněného asfaltu je uvedeno v tabulce 38.

Asfaltové pojivo	Penetrace při 25 °C 0,1 mm	Bod měknutí (KK) °C	Optimální množství vody ve zpěněném asfaltu % hm. pojiva
70/100	83	46,8	3,8

Tabulka 38: Charakteristika asfaltového pojiva a množství přidávané vody při výrobě zpěněného asfaltu

### 12.11.2. Navržené složení směsí

V rámci návrhu byl kladen důraz na výrobu slabě stmelěných směsí recyklace za studena se specifickým zastoupením standardních pojiv. Takto slabě stmelěné směsi byly aditivovány mechanicko-chemicky aktivovaným FPP. Taková směs by měla mít jak dostatečně vyhovující pevnostní a deformační vlastnosti, ale i dostatečnou trvanlivost, stabilitu a schopnost přenášet účinky zatížení s dosažením ekonomických a energetických



úspor. Mechanicko-chemicky aktivovaný FPP má v těchto směsích funkci pojiva a aktivní filerové složky. Navržené složení jednotlivých směsí je uvedeno v tabulce 39.

Směs	H/J - R-materiál 0/22	H/J - 1F+1C	H/J - 1F+1C+2D
Cement CEM II/B 32,5S	-	1,0	1,0
Zpěněný asfalt 70/100	-	1,0	1,0
Mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň	-	-	2,0

Tabulka 39: Složení směsi recyklace za studena

Pro omezení vlivu nehomogenity R-materiálu byl odběr proveden vždy z jedné šarže.

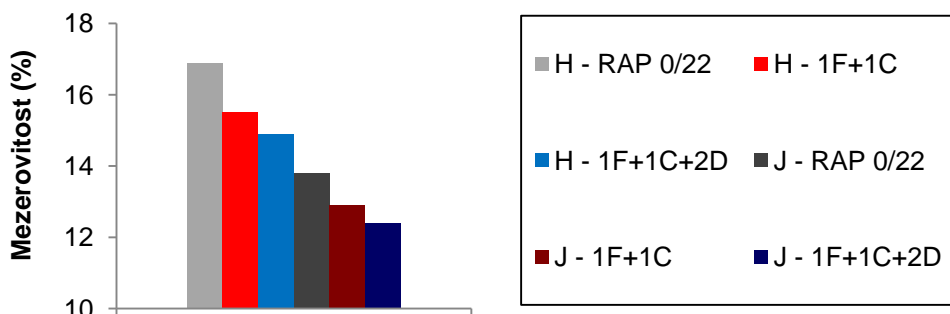
### 12.11.3. Metodika přípravy, testování a podmínky zrání zkušebních těles

Optimální vlhkost směsí byla stanovena dle ČSN EN 13286-2. Technické podmínky pro recyklované směsi za studena TP 208 udávají výrobu zkušebních těles pomocí válcových forem o průměru  $150,0 \pm 1,0$  mm a výšce 200-300 mm. Pro potřeby experimentálního posouzení byla jako vhodnější zvolena válcová zkušební tělesa s průměrem  $150,0 \pm 1,0$  mm s výškou  $63,5 \pm 2,5$  mm. Při zpracování byla směs stlačena ve formách tlakem 5,0 MPa. Zkušební těleso bylo ponecháno ve formě při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  po dobu  $(24 \pm 6)$  hodin a další 2 dny při 90% až 100% relativní vlhkosti při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Dále se zkušební tělesa uložila při 40% až 70% relativní vlhkosti při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Zkoumané směsi byly ponechány při uvedených podmínkách zrání 7, 14 a 28 dní. Z hlediska stanovení vodní citlivosti směsí byla sada těles po sedmi dnech zrání při 40% až 70% relativní vlhkosti při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  uložena do vodní lázně na dobu dalších 7 dní.

Na vyrobených zkušebních tělesech byla stanovena mezerovitost dle TP 208, pevnost v příčném tahu dle TP 208, modul tuhosti opakovaným zatěžováním v příčném tahu IT-CY dle ČSN EN 12697-46 a odolnost vůči šíření trhliny při nízkých teplotách dle ČSN EN 12697-44.

### 12.11.4. Výsledky laboratorního testování

Z hlediska volumetrických vlastností byla v první řadě sledována mezerovitost. Z obrázku 74 je patrné, že přidáním testovaných aditiv dochází ke snížení množství mezer ve směsi recyklace za studena.

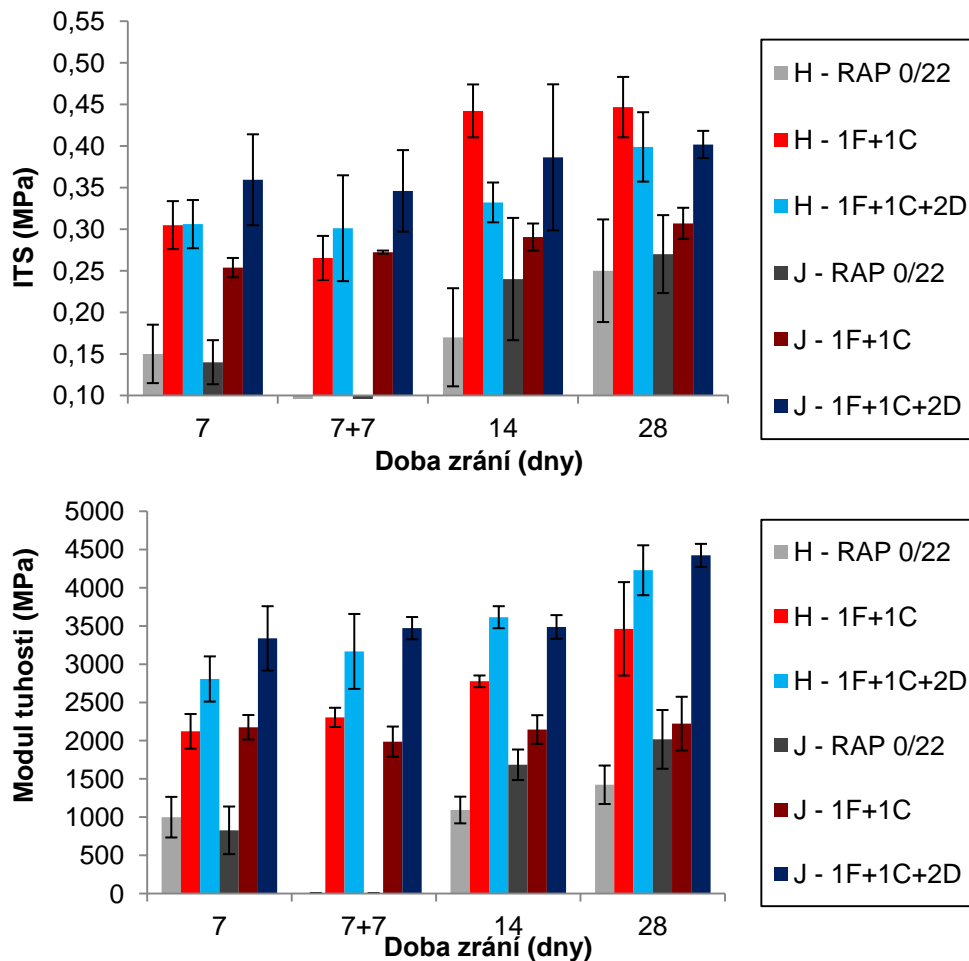


Obrázek 74: Mezerovitost slabě stabilizovaných směsí recyklace za studena

V případě pevnostních a deformačních parametrů recyklovaných směsí dochází u varianty s hrubozrnným R-materiálem pod označením (H) k téměř totožným hodnotám pevnosti v příčném tahu oproti variantě s cementem a zpěněným asfaltem, přičemž aditivované směsi vyhovují požadavkům dle TP 208. U směsi, kde byl použit mechanicko-chemicky

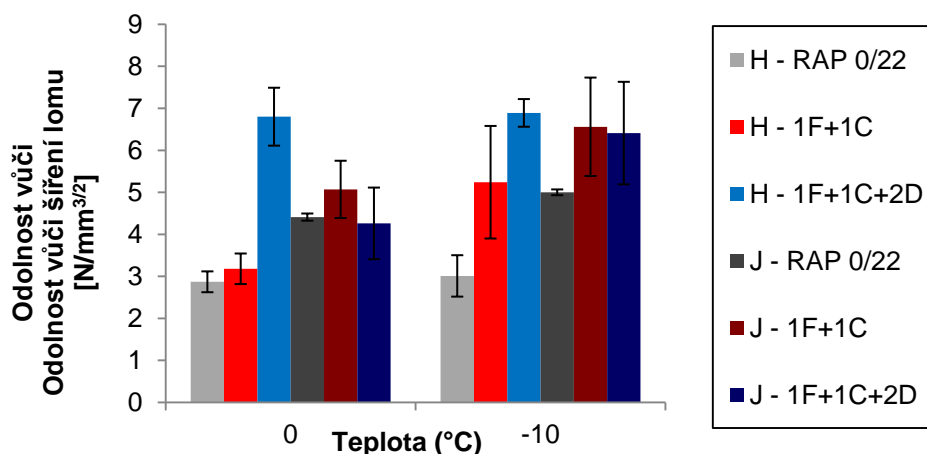


aktivovaný FPP jako u výše uvedených experimentů, je patrná vyšší odolnost vůči účinkům vody. V případě tuhosti směsi u mechanicko-chemicky aktivovaného FPP dochází k nárůstu tuhosti, nicméně tento nárůst je vzhledem k množství přidávaného aditiva poměrně malý, cca 15 - 20 %. Pevnostní a deformační parametry recyklovaných směsí jsou uvedeny na obrázku 75.



Obrázek 75: Pevnostní a deformační parametry slabě stabilizovaných směsí recyklace za studena

Zajímavý trend je však patrný u jemnozrnnější varianty R-materiálu pod označením (J). Zde dochází k nárůstu pevnosti i tuhosti u směsí s mechanicko-chemicky aktivovaným FPP, přičemž významnější nárůst je znatelný především u modulu tuhosti (cca 45 %). Rozdíl je značný zejména v oblasti vodní citlivosti, která je u těchto směsí rozhodující. Dalším zkoumaným parametrem byla odolnost vůči šíření trhliny dle ČSN EN 12697-44, respektive lomová houževnatost při nízkých teplotách. Tento parametr byl zkoumán na půlválcových tělesech opatřených vrubem (SCB test). Z obrázku 76 jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými směsí. Rozdíly jsou v rámci dosažených hodnot minimální, avšak pozitivní trend je jasně patrný u hrubozrnné varianty slabě stabilizovaných recyklovaných směsí mechanicko-chemicky aktivovaným FPP.



Obrázek 76: Lomová houževnatost slabě stabilizovaných směsí recyklace za studena

V případě použitého mechanicky aktivovaného FPP do slabě stabilizovaných směsí recyklace za studena pro vozovky s nižší třídou dopravního zatížení a poznatků vyplývajících z provedeného experimentu je patrné, že využití těchto materiálů je nejednoznačné, respektive je možné dosáhnou zlepšení vlastností jen za určitých podmínek. Nicméně pokud připočteme náklady na úpravu materiálu pomocí vysokorychlostního mletí (jakkoli jsou poměrně malé), jeho využití do podkladních vrstev vozovek ve slabě stabilizovaných směsích recyklace za studena je možné v současnosti doporučit jen v omezené míře a za podmínek dobré znalosti vstupů. Nicméně z hlediska VaV aktivit je nutné dále pro tento materiál hledat další možnosti či varianty jeho úpravy pro jeho budoucí potenciální využití (a to např. i v betonech jako takových nebo jako filerické složky asfaltových směsí).

Neméně důležitý faktor možnosti uplatnění je i hledisko nákladů. Na základě uvedeného by více než samotná cena měla hrát klíčovou roli matice ekonomické veličiny a technických charakteristik. Z ní by následně měl vzejít poměr mezi náklady a přínosy. Teprve ten by měl být porovnáván, pokud je cílem seriózně vyhodnotit, zda jednotlivé varianty mají celkový přínos nebo jsou např. zbytečně drahé.

### 12.12. Aplikace mikromletých materiálů v recyklovaných směsích stmelených hydraulickými pojivy

Poměrně širokou škálu materiálů používanou do podkladních vrstev vozovek zaujímají recyklované směsi stmelené hydraulickými pojivy. Jsou to materiály s řízenou zrnitostí stmelené cementem nebo jiným hydraulickým silničním pojivem. Vrstvy z těchto materiálů mají relativně vysoký modul pružnosti, ale nízkou pevnost. Již při malé deformaci vznikají velká napětí a dochází k porušení v podobě malých trhlin a mikrotrhlin. V každé vrstvě vytvořené ze stmelených materiálů se významně uplatňuje pevnost ve smyku. Tu způsobuje vnitřní tření mezi zrny kameniva, jehož velikost závisí na normálovém napětí (od zatížení vrstvy) a soudržnost ve smyku vlivem působení pojiva (koheze). Ta je na normálovém napětí (od zatížením vrstvy) nezávislá. Nicméně mikromleté odpadní materiály by mohly některé nevhodné vlastnosti za určitých okolností zlepšit. V této části práce bude prověřena možnost substituce hydraulického pojiva mechanicko- chemicky aktivovaným FPP. Respektive bude sledován vliv na pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu dle TP 208 a navazujících předpisů. Toto porovnání vzniklo v souvislosti s probíhajícím výzkumem uplatnitelnosti mechanicky aktivovaného betonového recyklátu v těchto typech směsí.

### 12.12.1. Specifikace použitých materiálů

Ověření materiálů pro stmelené vrstvy konstrukcí vozovek se týká recyklované směsi stmelené hydraulickými pojivy (CSM) dle TP 208.

Ve stmelených recyklovaných směsích CSM byla použita štěrkodrt' 0/63 mm v kombinaci s asfaltovým R-materiálem 0/22 mm v poměru 1:1 odpovídající požadavkům na směsi recyklace za studena dle TP 208.

Jako hydraulické pojivo byl aplikován běžně používaný portlandský struskový cement CEM II/B – M 32,5 R dle EN 197-1.

Jako částečný substituent hydraulického pojiva byl použit mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň v takovém rozmezí, aby výsledné směsi byly z ekonomického hlediska rovnocenné.

### 12.12.2. Složení recyklovaných směsí stmelených hydraulickými pojivy

Referenční směs, respektive recyklovaná stmelená směs CSM byla navržena dle požadavků TP 208. Tyto směsi musejí splňovat minimální pevnost v tlaku po 28 dnech zrání  $C_{3/4}$  a po aplikaci 13ti zmrazovacích cyklů musí být pevnost v tlaku vyšší než  $0,85 R_{c28}$ . Složení směsí CSM je uvedené v tabulce 40.

Označení směsi	Kamenivo	Cement (C) %-hm.	Mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň (D) %-hm.
CSM	ŠD 0/63 : R-materiál	3,0	-
	0/22 (1:1)	1,0	4,0

Tabulka 40: Složení směsí CSM

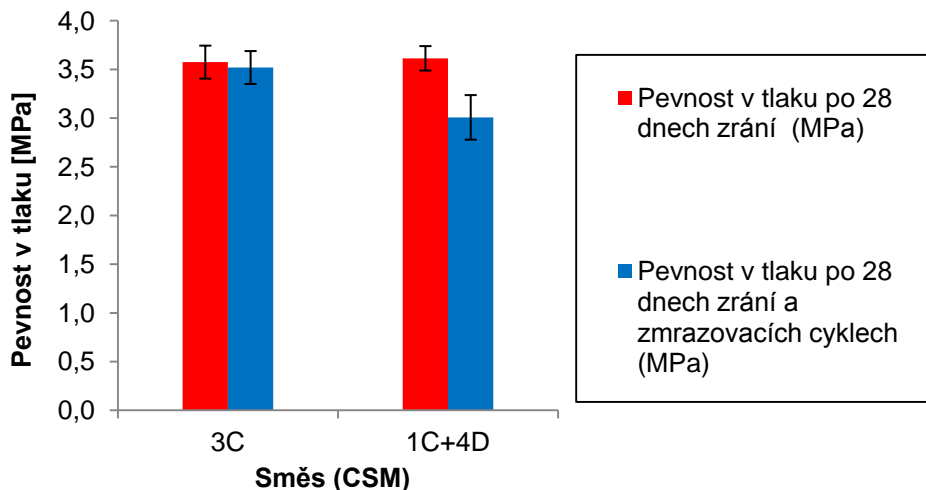
### 12.12.3. Metodika přípravy a hodnocení zkušebních těles

Směsi CSM byly vyrobeny dle TP 208, tedy zkušební tělesa pomocí válcových forem o průměru  $150,0 \pm 1,0$  mm a výšce 200-300 mm. Při zpracování byla směs stlačena ve formách tlakem 5,0 MPa. Zkušební tělesa byla ponechána ve formě při teplotě  $(20 \pm 2)$  °C po dobu  $(24 \pm 6)$  hod, následně se tělesa dalších 27 dní skladovala při 90-100% relativní vlhkosti a teplotě  $(20 \pm 2)$  °C.

Pro recyklované stmelené směsi CSM dle TP 208 byl požadavek na mechanické vlastnosti zadán ze dvou hledisek. A to požadavek na minimální pevnost v tlaku ( $R_{c28}$ ) odpovídající třídě pevnosti  $C_{3/4}$  spolu s odolností proti vodě a mrazu charakterizované koeficientem poklesu ( $0,85 R_{c28}$ ) dle TP 208 a ČSN EN 14227-1.

### 12.12.4. Výsledky experimentu - CSM

Možnost aditivace recyklovaných směsí stmelených hydraulickými pojivy a mechanicky aktivovanými materiály jako částečného substituentu cementového pojiva, lze označit na základě níže uvedených pevnostních parametrů v současné době jako potenciálně možné (viz obrázek 77). Z hlediska pevnosti v tlaku došlo oproti referenční směsi k mírnému nárůstu pevnosti. Z hlediska odolnosti proti mrazu došlo k mírnému poklesu, avšak ve stále vyhovujícím rozsahu. Je zda však nutnost upozornit, že použití produktů po spalování uhlí přináší zásadní problémy spojené s objemovými změnami. Neméně důležité je i problematika dynamiky průběhu hydratačních procesů, vývinu hydratačního tepla a smršťování.



Obrázek 77: Pevnostní parametry recyklovaných stabilizovaných směsí CSM

### 12.13. Poznatky z praktického použití studené recyklace s využitím popelovin ze zahraničí

První zde uvedený projekt US-56 v Haskell County (Kansas) byl postaven v roce 1990. Jednalo se o první projekt recyklace za studena v Kansasu, který používal popílek jako pojivo. Recyklace vozovky byla prováděna do hloubky 250 mm. Projekt zahrnoval stabilizaci kombinací pojiv, respektive 0,9 %-hm. kationaktivní pomaluštěpné asfaltové emulze a 5 %-hm. popílku třídy C z energetického provozu elektrárny Sunflower a přibližně 8 %-hm. vody. Popílek ze Sunflower vykazoval velmi pomalý nárůst pevnosti a působil spíše jako minerální plnivo. Propustnost vrstvy popílek/R-materiál/asfaltová emulze byla podstatně nižší, než vrstvy pouze z R-materiálu stmelého asfaltovou emulzí.

Druhý projekt se nachází na silnici K-27 severně od Syracuse v Hamilton County (Kansas) a byl postaven v roce 1991. Směs recyklace byla tvořena asfaltovým recyklátem. V rámci zkušebního úseku byly vytvořeny tři sekce. První sekce obsahovala 5 %-hm. popílku Sunflower, druhý obsahoval 1 %-hm. asfaltové emulze a 5 %-hm. popílku Sunflower. Třetí úsek byl stmelěn asfaltovou emulzí v množství 1 %-hm. Celý zkušební úsek byl uzavřen obrusnou vrstvou z asfaltového betonu v tloušťce 38 mm. Výstavba se obešla bez výrazných stavebních problémů.

Výsledky průzkumu poruch v rámci obou výše uvedených projektů ukazují na významný vznik trhlin v sekcích, kde byl použit popílek (podélné trhliny v místě jízdnic stop). Nicméně tyto trhliny zůstávaly uzavřené a dále se nerozšiřovaly. Dále nebyl pozorován významný výskyt trvalých deformací v podobě vyjetých kolejí [Cross 1995].

Dalším příkladem recyklace za studena s využitím popelovin je silnice K-27 v Shermanu v okrese Wallace (Kansas). Zde byla provedena hloubková recyklace za studena v tl. 250 mm. V prvním testovacím úseku byl asfaltový recyklát stmelěn 13 % popílku třídy C z tepelné elektrárny Jeffery, v druhém úseku byla přidána pouze asfaltová emulze v množství 1 %-hm. Ve třetím úseku byla použita polymerem modifikovaná kationaktivní asfaltová emulze. Na vrstvu recyklace byl položen asfaltový beton v tloušťce 38 mm. Výsledky ročního sledování naznačují malý nebo žádný vznik trhlin či trvalých deformací. Data z FWD zařízení ukazují značné snižování tuhosti v úseku s popílkem, kdežto v testovaných úsecích, kde byla použita pouze asfaltová emulze se tuhost vrstvy zvyšuje [Cross 1995].

Dalším příkladem je „krajská silnice I. třídy“ (CTH) ve Waukesha, (Wisconsin), kde byl proveden v roce 2001 zkušební úsek v délce 1009 m. Byla zde provedena celková recyklace na místě za účelem vyhodnocení stabilizačního potenciálu popílku třídy C. Jednalo se o dvoupruhovou pozemní komunikaci s ročním průměrným denním intenzitou 5 050 vozidel v roce 2000 s plánovaným nárůstem 8 080 v roce 2021. Podíl TNV činil v roce 2000 5 %. Stávající stavba vozovky se skládala z přibližně 127 mm asfaltových vrstev a 178 mm nestmelených podkladní vrstvy. Nová konstrukce vozovky se skládá z vrstev asfaltového betonu o tloušťce 127 mm a 305 mm recyklované vrstvy za studena. Výsledky zrnitostní analýzy recyklovaného materiálu jsou uvedeny v tabulce 41.

Zrnitost/síto [mm]	Podíl v celkovém materiálu (%)
≥4	68
4 - 0,200	26
≤ 0,200	6

Tabulka 41: Zrnitostní složení recyklovaného materiálu

Směs recyklovaného kameniva byla aditivována v množství 6 %-hm. a 8 %-hm. recyklovaného materiálu. Laboratorní návrh a hodnocení recyklované směsi byl proveden dle ASTM C593. Recyklovaná směs byla hutněna při optimální vlhkosti 5 %-hm. Pevnost v tlaku po 7 denním zrání na vzduchu byla 1,72 MPa (při 6 % popílku) a 2,62 MPa (při 8 % popílku).

Po skončení výstavby bylo provedeno měření deflektometrem FWD, respektive po jednom a druhém roce od okamžiku výstavby. Rázový modul pružnosti recyklované vrstvy vzrostl z 1,24 GPa v roce 2001 na 1,84 GPa (o 49 %) v roce 2002 a na 2,27 GPa (o 83 %) v roce 2003. V průběhu sledování zkušebního úseku nedošlo k žádným problémům, respektive nedošlo k žádnému vývoji trhlin či trvalých deformací (viz obrázek 78). Výsledky této studie naznačují, že stabilizace popílkem třídy C (samotuhnoucí a pucolánově aktivní popílek) by mohl být ekonomickou metodu recyklace vozovek [Ramme 2005].



Obrázek 78: Wisconsin a) CTH v roce 2002 b) CTH v roce 2003

V tabulce 42 jsou uvedeny další příklady staveb s využitím produktů po spalování uhlí, specificky popílku třídy C a F.



Místo	In-situ recyklace za studena (hloubka - mm)	Pojivo (%hm.)	Původ recyklovaného materiálu	Testovaný návrhový parametr	Zdroj
LeSueur - County Road 13	180	PP - 2,5 AE - 3,5	-	-	[Labuz 2012]
Section Line Road in Delaware County, Long Spurling Road in Warren County, Ohio	200	PP - 5,0 - 6,0 (V - 4,0 - 5,0)	Nestmelené podkladní vrstvy, zemina	ITS	[Wolfe 2010]
Kansas Department of Transportation (KDOT) - US 283	-	PP - 8,0 - 10,0 AE - 1,5	Asfaltové vrstvy	ITS, Sm	[Cross 2000]
Jackson County - local road	300	PP - 15,0	Nestmelené podkladní vrstvy a podloží	CBR	[Misra 2005]
Highland Avenue in Mequon, Stabilized lot parking section	800	PP - 18,0	R-materiál, zemina	Triaxální zkouška, CBR	[Rupnow 2015]
Texas, Lubbock district	150 -250	PP - 5,0 - 10,0	-	Rc	[Scullion 2003]
Texas, Childress district, US 287	150 - 300	PP - 4,0 - 8,0 (V - 2,0)	-	Rc	[Scullion 2003]
Pozn. PP - popel a popílek (třídy C nebo F) V - vápno, AE - asfaltová emulze					

Tabulka 42: Příklady provádění směsí recyklace za studena s využitím popelovin

#### 12.14. Závěr

Aplikace hydraulických pojiv do směsí recyklovaných za studena je finančně náročné a je vždy spojené s ekologickou zátěží, kterou výroba cementu přináší (při výrobě 1 tuny Portlandského cementu vzniká celkem 1 tuna CO<sub>2</sub>, z toho 0,55 t se uvolní při kalcinaci vápence a zbylých 0,40 t je způsobeno spalováním paliva). Tato negativa by mohla být odstraněna nebo zmírněna, pokud by se potvrdil předpoklad, že je ve směsích recyklovaných za studena možné částečně nebo úplně nahradit hydraulická pojiva druhotnými nebo odpadními materiály, jejichž likvidaci je v současnosti nutné řešit. Nicméně VEP je stále vnímán jako odpad:

- nejednoznačná legislativa (odpady vs. chemické látky vs. vedlejší produkty vs. produkty)
- omezené využití ve stavebnictví - legislativní příčiny
- nerovnováha produkce VEP
- nízká podpora výzkumu pro aplikace s vyšší přidanou hodnotou

V rámci této kapitoly disertační práce byla řešena uplatnitelnost FPP ve směsích recyklace za studena ze tří hledisek - mechanické, stabilitní a hygienické.

Ze strany pevnostních a deformačních parametrů se jeví uplatnitelnost FPP dle dosažených výsledků jako perspektivní, byť s výhradami, ať už jako částečný nebo plný substituent tradičního hydraulického pojiva. Lze doporučit dávkování do směsí recyklovaných za studena v intervalu 3,0 - 10,0 %-hm. směsi s dobrou znalostí vlastností vstupních materiálů a podmínek vyskytujících se in-situ.

Nicméně z hlediska stability je použití FPP ve směsích recyklace za studena problematické a je nutné zabývat se detailně okrajovými podmínkami. Vodní citlivost eventuálně odolnost vůči vodě a mrazu je z hlediska použití FPP přijatelné, ovšem zde je



nutné si uvědomit jaké podmínky skutečně v konstrukci vozovky vládnu a zda provedené testy jsou dostatečně k nim vypovídající. Opačný trend nastává v případě dlouhodobého vystavení vlhkosti a vodě, přičemž dochází k tvorbě nových minerálů typu ettringit a k rapidnímu poklesu mechanických vlastností, byť k nebezpečným objemovým změnám nedochází.

Aplikací FPP ve směsích recyklace za studena nejsou splněny hygienické požadavky dle uvedených předpisů zejména pro sírany a arsen, který je toxický. Předpoklad uzavření zrn asfaltovým pojivem s potenciálem zabránění výluhu toxických látek do okolního prostředí nelze zatím potvrdit. Nicméně laboratorní postupy nemusí odpovídat podmínkám in-situ. Do budoucna by bylo dále vhodné provést dlouhodobé polní výluhové testy.

Výzkum v oblasti využití mechanicko-chemicky aktivovaných zrnitých materiálů vznikajících zpracováním VEP je motivován jejich ekonomickým a ekologickým potenciálem. Na ČVUT v Praze tento výzkum probíhá již více jak 5 let. Panuje přesvědčení, že mechanicko-chemická aktivace promění odpadní minerální materiál nebo vedlejší produkty v surovinu vhodnou pro přidávání nejen do směsí recyklovaných za studena (resp. do hydraulicky stmelovaných směsí) za současného zlepšení jejich vlastností. Mechanická aktivace FPP dle dosažených výsledků nevykazuje dostatečný potenciál zlepšení problematických vlastností oproti neupravenému FPP. Prozatím lze doporučit volit více konzervativní přístup a hledat celkové přínosy využití těchto aktivních materiálů jinde nebo v další modifikaci v podobě směsných aktivovaných pojiv. Nepříznivou okolností je, že produkce a kvalita VEP je ovlivněna stále se zvyšujícími nároky na kvalitu produkovaných zplodin. Po velmi úspěšné etapě (v ČR a následně i v zemích EU) odsíření velkých zdrojů znečištění (elektrárny, spalovny ad.) je pozornost soustředěna na efektivní snížení emisí oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>). V souvislosti s úpravou legislativy Evropské unie (směrnice 2016/2284/EU) jsou od 1. 1. 2016 platné nižší limity emisí oxidů dusíku a dalších látek kromě zdrojů s výjimkou. Do 30. 6. 2020 je stanoveno přechodné období mj. pro stacionární zdroje s instalovaným výkonem větším než 50 MW, pro zdroje zařazené do Přechodného národního plánu, které plní emisní limity dosud platné a následně emisní stropy pro stanovené jednotlivé roky (dle zákona 201/2012 Sb. v pl. znění). Pro zdroje spalující uhlí jsou cílové limity 300 mg.m<sup>-3</sup> (do 100 MW), resp. 200 mg.m<sup>-3</sup> (dle vyhl. 415/2012 Sb. v platném znění).

Pod pojmem oxidy dusíku (označovaných NO<sub>x</sub>) je myšlena směs zejména oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>) s malým podílem dalších oxidů. Lze je odstraňovat v průběhu spalování (primární metody), nebo z již vzniklých spalin (sekundární metody). Nejčastěji je používán druhý způsob. Z několika známých metod je nejvíce používána selektivní nekatalytická redukce (SNCR), případně selektivní katalytická redukce (SCR). Selektivní nekatalytická redukce spočívá ve vytvoření redukčních podmínek, při kterých je do kotle vstříkovaný čpavek (amoniak) nebo močovina a selektivně (přednostně) snižuje oxidy dusíku za vzniku elementárního dusíku a vodní páry. Účinnost snížení NO<sub>x</sub> dosahuje 40 až 60 %. Charakteristickým znakem této metody je, že probíhá v kotli v oblasti teplot 900 až 1 050°C. Katalytická redukce má obdobný princip, ale probíhá díky katalyzátoru při nižších teplotách 300 až 400°C, s vyšší účinností, ale za mnohem vyšších nákladů.

V případě využití popílků s obsahem amonných solí jako náhrady cementu do betonu, nebo při výrobě směsných pojiv dochází při kontaktu s alkalickými složkami k bouřlivé reakci a k uvolnění plynného čpavku, který je velmi toxický a dráždivý. Tento fakt může odradit potenciální uplatnění v dopravním stavitelství, než bude nalezen vhodný způsob zpracování takového VEP.



### 13. Emulzní asfaltové směsi

Emulzní technologie jsou v České republice využívány především ve formě postřiků, nátěrů, kalových emulzních vrstev a recyklační technologie za studena, přičemž úroveň využití emulzních asfaltových směsí (EAC - Emulsion Asphalt Concrete) je doposud zanedbatelná. V posledních několika letech se ovšem prostor pro uplatnění EAC směsí významně zvětšil, v implikaci potřeby výstavby či rekonstrukcí pozemních komunikací s nižším dopravním zatížením s důrazem na technologie šetrné k životnímu prostředí a požadavku nízké energetické náročnosti výroby. To bylo odrazem pro výzkumnou a laboratorní činnost za účelem charakterizovat vlastnosti těchto materiálů a specifikovat technické parametry a požadavky v podobě technických předpisů. Dalším krokem bylo stanovit postupy a podmínky výroby, pokládky a hutnění těchto směsí a získat představu o chování vozovky v průběhu její životnosti, přičemž tyto informace by měly podpořit a zvýšit důvěru a úroveň využití emulzních asfaltových směsí v budoucnosti nejen v ČR.

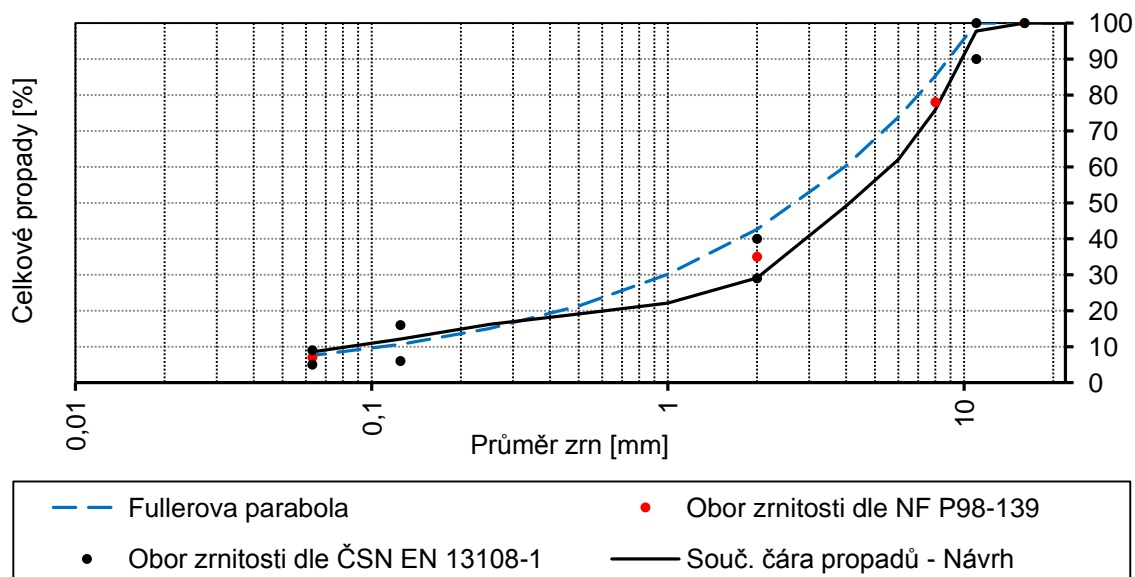
V návaznosti na stávající neexistenci technických podmínek pro návrh, provádění a kontrolu asfaltových směsí prováděných za studena, byl prvotní návrh směsi prováděn na základě francouzských zkušeností a postupů s modifikací, co nejvíce uplatňovat platné národní technické předpisy pro asfaltové směsi hutněné za horka a recyklované směsi za studena, zejména z důvodů porovnatelnosti. Pro specifikaci a ověření návrhové metodiky byla pro účely dísertační práce zvolena a podrobně rozpracována problematika asfaltové emulzní směsi EAC frakce 0/11 mm.

Při výrobě emulzního asfaltového betonu EAC 11 bylo použito kamenivo (amfibolit) z obalovny Libodřice, viz tabulka 43. Toto kamenivo je bazické, vzniklé metamorfózou magmatických hornin především čedičů a andezitů. Hlavními prvky jsou amfiboly a plagioklasy. Nejvhodnější využití je především v silničním stavitelství. Návrh vhodné kostry kameniva je dle technické normy NF P98-139, která koresponduje s metodikou ČSN EN 13108-1. Objemová hmotnost kameniva a nasákavost pro jednotlivé frakce je stanovena taktéž v tabulce 43. Je nutné ovšem podotknout, že ne každé kamenivo je vhodné pro studené emulzní směsi, zejména je nutné sledovat tvarový index kameniva a zrnitost jemnější frakce, které zjevně u tohoto typu směsí představují poměrně kritické parametry. Dále záleží na geometrických, fyzikálních a chemických parametrech kameniva. Navržená křivka zrnitosti je uvedena na obrázku 79.

Amfibolit - lom Libodřice		Objemová hmotnost zrn ( $\text{g/cm}^3$ )	Nasákavost (%)	Tvarový index	Mezerovitost volně sypaná/setřesená (%)
Lom / frakce	%				
Libodřice 0/4	45	3,034	0,86	-	58,3/38,4
Libodřice 4/8	24	3,036	0,47	14,1	51,2/41,1
Libodřice 8/11	26	3,051	0,32	11,5	50,0/40,7
Filer Brant	5	2,430	-	-	-

Tabulka 43: Charakteristiky kameniva





Obrázek 79: Křivka zrnitosti navrženého kameniva

Uvedené obory zrnitosti jsou platné pro BBF (Béton bitumineux á froid) dle NF P 98-139, přičemž odchylka křivky zrnitosti od uvedené referenční zrnitosti je zcela přípustná<sup>25</sup>. Obory zrnitosti vyhovují požadavkům dle ČSN EN 13108-1 pro ACO 11+. Jako pojivo byla použita kationaktivní pomaluštěpná asfaltová emulze Katebit C60B7<sup>26</sup>, která se standardně využívá ve směsích recyklace za studena (viz tabulka 44).

Vlastnost	Zkušební norma	Požadovaný parametr	Stanoveno
Obsah pojiva v %	ČSN EN 1428	58-62	60,1
Mísitelnost s cementem	ČSN EN 12848	≤2	0,7
Zbytek na sítu (0,5mm) po 7 dnech skladování	ČSN EN 1429	≤0,5	0,02
Doba výtoku C2/40°C	ČSN EN 12846	15-45	28,3
Vlastnosti pojiva po zpětném získání z emulze			
Penetrace při 25°C	ČSN EN 1426	<100	75
Bod měknutí	ČSN EN 1427	≥43	46,4

Tabulka 44: Parametry asfaltové emulze Katebit C60B7

Důvodem volby tohoto typu emulze byla skutečnost, že v současné době nelze pro laboratorní účel v ČR flexibilně připravit vhodný typ asfaltové emulze, která by byla uzpůsobena pro tento typ směsí. Navržená EAC směs s touto asfaltovou emulzí je označena dále v textu jako E<sub>CZ</sub>.

Ve spolupráci s evropským centrem společnosti MeadWestVaco Europe s.p.r.l. byl připraven vhodný typ asfaltové emulze, který byl přizpůsoben tomuto typu směsi vzhledem k použitému kamenivu. Byla navržena pomaluštěpná kationaktivní asfaltová emulze C60B7<sup>1</sup>. Asfaltová emulze byla připravena ze standardního asfaltu 70/100 odpovídajícího vlastnostmi požadavkům dle ČSN 657204, kontinuální fáze (voda s HCl) s pH 2,0 a 0,8 % emulgátoru Indulin GE7, bez fluxovadel. Navržená EAC směs s touto asfaltovou emulzí je

<sup>25</sup> Dle novelizované normy NF P 98-139:2016 BBE (Bétons bitumineux à l'émulsion) jsou uvedeny horní a dolní meze oboru zrnitosti.

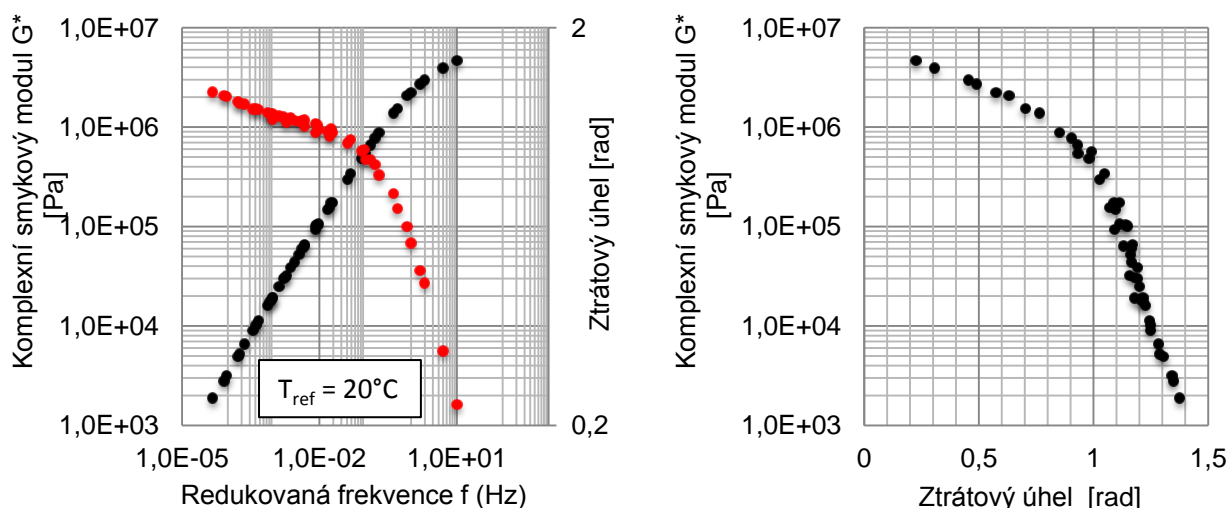
<sup>26</sup> Odpovídá starému značení. Dle normy ČSN EN 13808:2013 odpovídá označení emulze C60B10

označena v textu  $E_{FR}$ . Pro použité asfaltové pojivo byly stanoveny vybrané empirické parametry (penetrace dle ČSN EN 1426, bod měknutí dle ČSN EN 1427 a vratná duktilita. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 45.

Dále byla provedena zkouška posuzující potenciální vznik plastických deformací, respektive zkouška MSCR – Multiple Stress Creep Recovery test dle AASHTO TP70. U testu MSCR se předpokládá, že postihne vlastnosti pojiva i v nelineární oblasti zátěžové odezvy a umožní tak identifikovat pojiva, která jsou nadměrně citlivá na zatížení právě v nelineární oblasti. MSCR umožňuje lépe rozlišit disipovanou energii při cyklickém zatěžování. Výsledky testů MSCR se vyznačují mnohem lepší vypovídající schopnost o chování v reálných asfaltových vrstvách, pokud uvažujeme v intencích trvalé plastické deformace. Dále byl stanoven komplexní smykový modul a fázový úhel na dynamickém smykovém reometru dle ČSN EN 14770. Vyhodnocení v podobě komplexní (směrné) křivky a Blackova diagramu je uvedeno na obrázku 80.

Pojivo		70/100
Bod měknutí (°C)		49,7
Penetrace (0,1 mm)		78,8
Vratná duktilita (%)		8,8
Přetvoření (-)		6,3
0,1 kPa	El. zotavení (%)	4,0
	$J_{nr}$ (1/kPa)	4,6
MSCR	Přetvoření (-)	200,7
	3,2 kPa El. zotavení (%)	0,1
	$J_{nr}$ (1/kPa)	5,7

Tabulka 45: Parametry použitého asfaltového pojiva 70/100



Obrázek 80: Komplexní (směrná) křivka a Blackův diagram asfaltového pojiva 70/100

Pro stanovení teoretického optimálního množství asfaltové emulze byla použita metodika výpočtu dle součinitele sytosti dle ČSN 73 6160, která se používá ve francouzských předpisech dle NF P 98-139 (výpočet upravený dle velikostí sít):

$$p = \frac{100}{a} K \alpha^5 \sqrt{\varepsilon} \quad (63)$$

$$\alpha = \frac{2,65}{\rho_r} \quad (64)$$



$$\varepsilon = 0,01(0,174G + 0,4g + 2,3S + 15,33s + 140f) \quad (65)$$

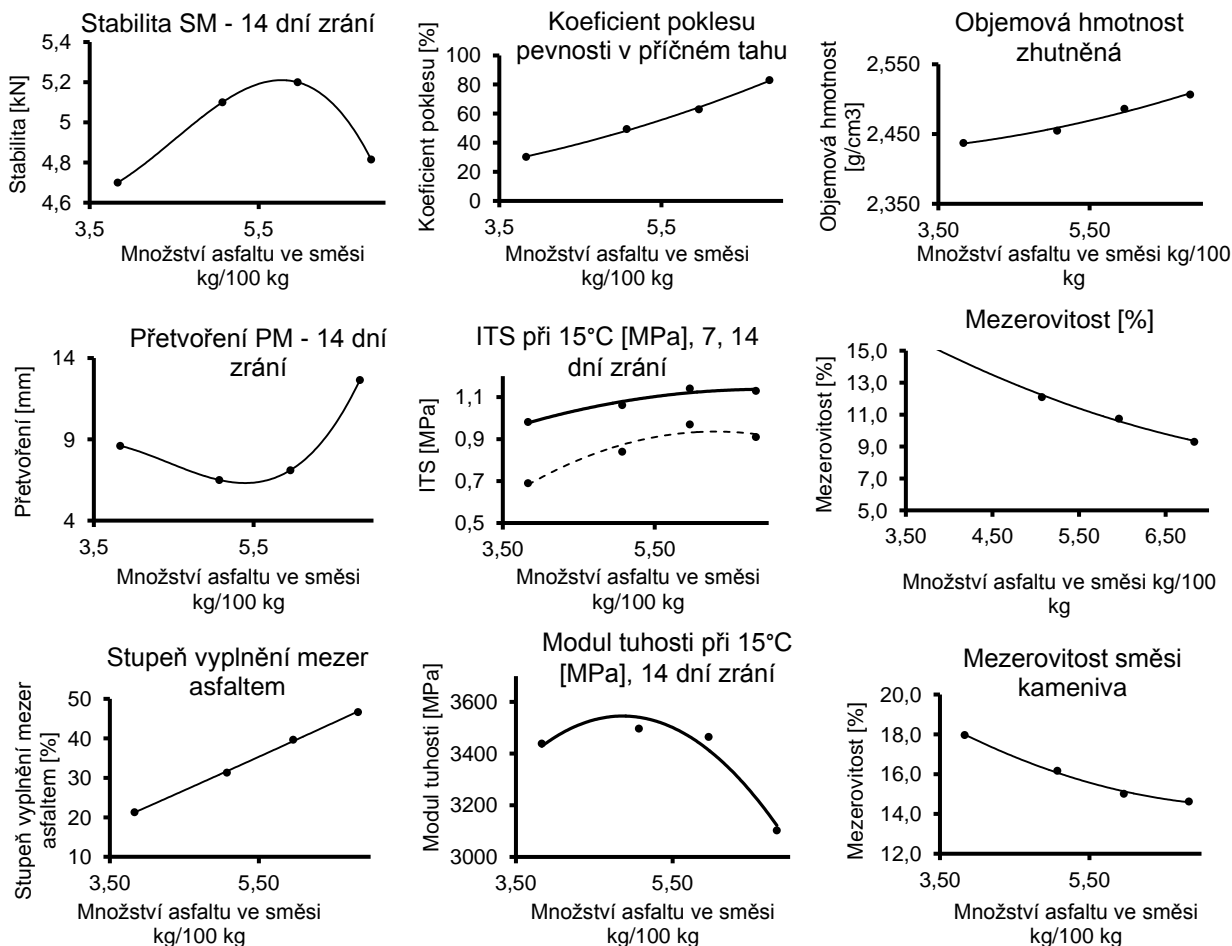
Kde,

G	podíl kameniva v % hmotnosti, které zadrží síto 8;
g	podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 8 a zadrží síto 4;
S	podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 4 a zadrží síto 0,25;
s	podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 0,25 a zadrží síto 0,063;
f	podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 0,063;
$\rho_r$	objemová hmotnost kameniva v $\text{g/cm}^3$ ;
K	součinitel sytosti;
a	obsah asfaltu v asfaltové emulzi v %;
$\varepsilon$	měrný povrch $\text{kg/m}^2$

Pro asfaltové směsi hutněné za horka se pro obrusné vrstvy aplikuje součinitel sytosti o hodnotě 3,4 nebo 3,1. V případě studených asfaltových směsí se součinitel sytosti při výpočtu teoretického množství asfaltové emulze dle francouzské metodiky zvyšuje na hodnotu  $>3,6$  (pro všechny typy vrstev). Obecně se do BBF směsí může dávkovat maximálně 12,5 %-hm. asfaltové emulze. Nad touto hodnotou dochází k problémům se štěpením emulze a se zpracovatelností.

Dle uvedeného výpočtu bylo stanoveno optimální množství asfaltové emulze na hodnotu 9,5 %-hm. směsi. Což odpovídá množství zbytkového asfaltu ve směsi cca 5,56 kg/100 kg kameniva a součiniteli sytosti 3,67.

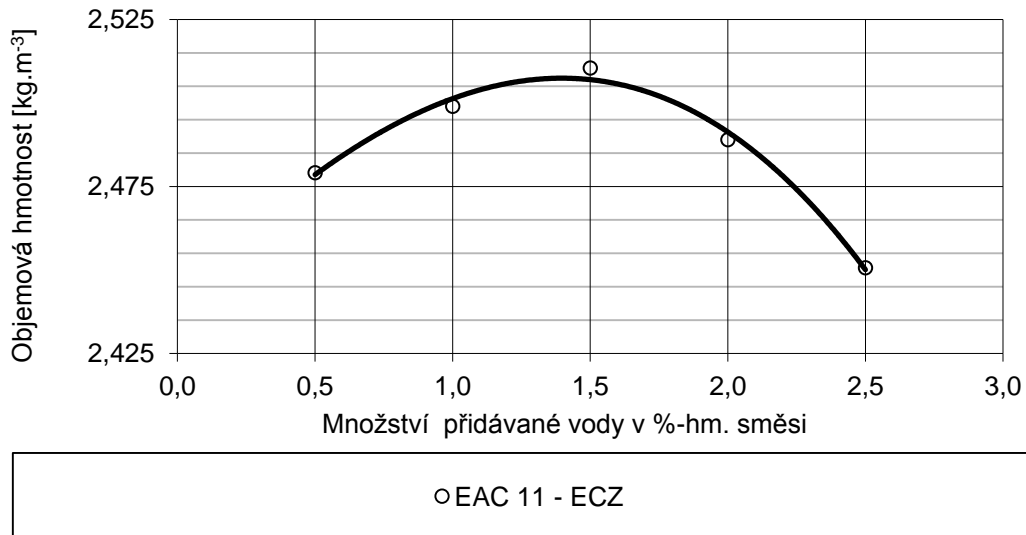
V rámci odvození optimálního množství pojiva ve směsi a stanovení korelace vztahu pro výpočet množství pojiva byly experimentálně stanoveny fyzikálně-mechanické parametry (objemová hmotnost zhutněná, mezerovitost směsi, pevnost v příčném tahu, modul tuhosti IT-CY, koeficient poklesu pevnosti v příčném tahu - vodní citlivost, Marshallova stabilita a přetvoření) směsi v závislosti na množství zbytkového pojiva. Hutnění nebylo prováděno dle francouzských postupů, nýbrž dle modifikovaného postupu vycházejícího z TP 208. Technické podmínky pro recyklované směsi za studena TP 208 udávají výrobu zkušebních těles pomocí válcových forem o průměru  $150,0 \pm 1,0$  mm a výšce 200-300 mm. Pro potřeby experimentálního posouzení byla jako vhodnější zvolena válcová zkušební tělesa s průměrem  $101,60 \pm 0,1$  mm s výškou  $63,5 \pm 2,5$  mm. Při zpracování byla směs stlačena ve formách tlakem 5,0 MPa. Zkušební tělesa byla ponechána zrát při teplotě  $(18 \pm 2)$  °C při 40-70% relativní vlhkosti po dobu 7 a 14 dní. V případě stanovení vodní citlivosti byla zkušební tělesa ponechána zrát při teplotě  $(18 \pm 2)$  °C při 40-70% relativní vlhkosti po dobu 7mi dní a poté uložena ve vodě pod dobu 7mi dní. Následně byly stanoveny následující fyzikálně mechanické parametry (objemová hmotnost zhutněná dle ČSN EN 12697-6, mezerovitost směsi dle ČSN EN 12697-8, mezerovitost kameniva a stupeň vyplnění mezer asfaltem dle ČSN EN 12697-8, pevnost v příčném tahu dle TP 208, modul tuhosti IT-CY ČSN EN 12697-26, Marshallova stabilita a hodnota přetvoření dle ČSN EN 12697-34). Závislost stability a hodnoty přetvoření na množství asfaltového pojiva ve směsi byla provedena při teplotě 40 °C z důvodu vysoké teplotní citlivosti směsi. Testované parametry směsi jsou uvedeny na obrázku 81. Vlastní směs byla míchána za pomoci dvouhřídelové laboratorní míchačky s nuceným mícháním Wirtgen WLM 30 po dobu 30ti vteřin. Prodleva mezi koncem míchání a začátkem hutnění byla 5 minut.



Obrázek 81: Základní volumetrické, mechanické a deformační vlastnosti emulzní asfaltové směsi dle obsahu zbytkového pojiva

Z obrázku 81 je patrné, že množství pojiva ve směsi při dosažení optimálních fyzikálně-mechanických parametrů se nachází v intervalu 5,4-5,6 kg/100 kg kameniva, což koresponduje s výše uvedeným výpočtem dle součinitele sytosti.

Schopnost asfaltové emulze obalovat kamenivo je obvykle závislá na vlhkosti kameniva při míchání, množství jemnozrnné frakce a vhodně nastavené asfaltové emulzi (emulgátor). Nevhodná (nízká) vlhkost způsobuje, že asfaltová emulze a jemné částice kameniva začnou tvořit hrudky a hrubé frakce kameniva nejsou dostatečně obaleny. Z hlediska vhodné vlhkosti studené asfaltové směsi je možné uplatnit více postupů. Stanovení optimální vlhkosti bylo provedeno modifikovanou Proctorovou zkouškou dle ČSN EN 13286-2. Tento způsob je vhodné zvolit v případě, pokud asfaltová emulze a kamenivo nejsou významně ovlivňovány změnami vlhkosti. Na obrázku 82 je uvedeno vyhodnocení modifikované Proctorovy zkoušky vzhledem k množství přidávané vody ke kamenivu. Pokud je obalení kameniva asfaltovou emulzí ovlivněno vlhkostí, uplatní se postup stanovení přilnavosti pojiva ke kamenivu, tzv. "coating test", byť s výhradou. Vlhkost směsi kameniva byla 0,8 %-hm. kameniva. Celkové optimální množství vody ve směsi je 6,0 %-hm. směsi. Lze konstatovat, že tento postup není zcela vhodný a tato fáze stanovení optimálního množství vody by měla být stanovena již ve fázi návrhu asfaltové emulze. Vyšší množství vody ve směsi může být vhodné pro lepší obalení kameniva. Přebytečná voda pak může být vytlačena při hutnění.



Obrázek 82: Modifikovaná Proctorova zkouška - EAC 11

Zhutnitelnost EAC směsi je obtížnější oproti asfaltové směsi hutněné za horka, neboť dochází k vyššímu tření mezi zrny kameniva. Parametry ovlivňující zhutnění jsou především vlhkost směsi, zrnitostní skladba kameniva, podíl oblých zrn, tvarový index, množství pojiva ve směsi a zhutňovací zařízení. Dosud neexistuje spolehlivý porovnatelný vztah zhutňování směsi v laboratoři a in-situ. Jedním ze specifických problémů v rámci EAC je stanovení korelace mezi zhutněním směsi v laboratoři [Suda 2014] a in-situ [COLAS 2002]. Některé prameny uvádějí zhutňování studených emulzních směsí v laboratoři pomocí rázového zhutňovače [Thanaya 2009], hydraulického lisu [Ormsby 2011] či gyrátorem [Serfass 2011]. Z postupů uplatňovaných ve Francii zhutnění dosažené při pokládce odpovídá zhutnění na gyrátoru při 60ti otáčkách tlakem 600 kPa. Dále dle [Serfass 2000, Harman 2001, Lesueur 2000, Serfass 2011] je počet otáček gyrátoru předepsán dle tloušťky vrstvy a typu směsi bez ohledu na velikost dopravního zatížení. Hodnota 60 otáček aplikovaných na gyrátoru odpovídá tloušťce vrstvy 5-10 cm.

Vzhledem k nejednotnosti návrhových a zkušebních postupů je přistoupeno k metodice zhutňování pomocí gyrátoru (SUPERPAVE Gyratory Compactor Troxler 4140), která dle francouzských postupů dle NF P 98-139 lépe simuluje zhutnění dosažené při pokládce. Na obrázku 83 jsou představeny různé druhy zhutňovacích zařízení. Ovšem prozatím nelze spekulovat, který způsob a aplikovaná hutnicí energie reprezentuje zhutnění in situ. Ve Francii pro BBF či GE se stanovuje jak v laboratoři, tak in-situ tzv. stupeň zhutnění  $C_x$  (Compaction degee):

$$C_x = \frac{G_{md}}{G_{mm}} 100 \quad (66)$$

Kde,

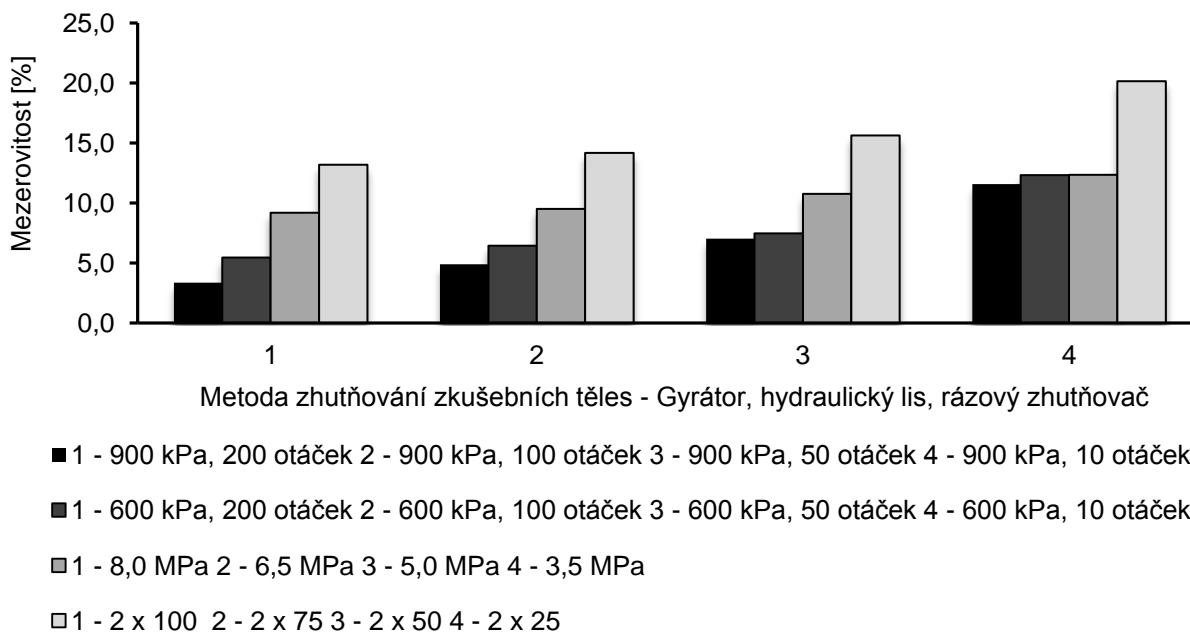
$G_{md}$  zhutněná objemová hmotnost (kg/m<sup>3</sup>)

$G_{mm}$  maximální objemová hmotnost (kg/m<sup>3</sup>)

$x$  počet otáček (10, 50, 100 a 200) gyrátoru při definovaných podmínkách při hutnění v laboratoři

Tento parametr nelze srovnávat s mírou zhutnění běžně uváděnou pro horké technologie. Nicméně v této práci je stanovena dosažená mezerovitost při hutnění, což je obrácená

hodnota stupně zhutnění C. Na obrázku 83 jsou porovnány metody hutnění při odlišných okrajových podmínkách a zkušebních zařízeních (Marshallův pěch, gyrátor, hydraulický lis).



Obrázek 83: Zhutnitelnost EAC směsi

Pro možnost porovnání s francouzskými poznatky je v této práci hutnění EAC směsi prováděno gyrátorem, navzdory skutečnosti, že v ČR v současnosti existuje pouze jedno zařízení tohoto typu. V rámci laboratorního návrhu EAC směsi se mezerovitost směsi při 60ti otáčkách gyrátoru musí pohybovat v intervalu 5-12 %-obj. a zároveň při 10ti otáčkách gyrátoru musí být mezerovitost >12 %, přičemž tato hodnota reprezentuje kvalitativní parametr zhutnitelnosti při pokládce. Zhutnění gyrátorem s použitím 200 otáček a osovým tlakem 600 kPa odpovídá hodnotě maximální míry zhutnění emulzní asfaltové vrstvy po pojíždění dopravou. Obecně se uvažuje, že emulzní asfaltová směs dosáhne úplné konsolidace a vytvrzení po 2-24 měsících od pokládky [Thanaya 2009]. V níže uvedené tabulce 46 jsou dosažené volumetrické parametry jednotlivých směsí.

Počet otáček gyrátoru / 600kPa	Požadavky na mezerovitost směsi (%)	$E_{CZ}$	$E_{FR}$
60	5 -12	8,9	9,1
$C_{60}$		91,1	90,9
10	≥ 12	13,6	14,2
200	-	5,7	5,6
Objemová hmotnost ( $g/cm^3$ ) při 60-ti otáčkách gyrátoru		2,494	2,483

Tabulka 46: Volumetrické vlastnosti EAC směsí

Stanovení základních pevnostních parametrů směsi zahrnuje zkoušku pevnosti v příčném tahu v závislosti na době zrání 7, 14, 28 dní (tabulka 47) a kombinaci zrání vzduch - voda. Zkoumaná tělesa zrála při teplotě  $18 \pm 2$  °C a 40-70% relativní vlhkosti. V této práci jsou studené asfaltové směsi sledovány především v počátcích zrání. Oproti hodnocení směsí ve Francii (pevnost v tlaku a odolnost proti vodě dle NF P98-139) bylo hodnocení

pevnostních parametrů založeno na stanovení ITS, zejména z důvodů alespoň přibližného porovnání s platnými předpisy pro recyklační technologii za studena.

Směs	Pevnost v příčném tahu @ 15 °C - zrání při 18 °C				ITSR	Pokles pevnosti v příčném tahu
	7 vzduch	14 vzduch	7 vzduch + 7 voda	28 vzduch		
			(MPa)		[-]	[-]
E <sub>CZ</sub>	0,72	1,09	0,67	1,43	61,5	93,1
E <sub>FR</sub>	0,75	1,07	0,62	1,23	57,9	82,7

Tabulka 47: Pevnostní parametry a vodní citlivost EAC směsi

Je nutno doplnit rozsah výsledků s tím, že v centrální laboratoři společnosti MeadWestVaco Europe s.p.r.l. v Lille byl navržen emulzní asfaltový beton (BBF) paralelně s návrhem na ČVUT v Praze. Kompletní report výsledků z tohoto návrhu je uveden v příloze A této práce.

Základní deformační parametry (tabulka 48) jsou charakterizované modulem tuhosti, který byl stanoven v závislosti na rozdílných podmínkách a době zrání. Dále je stanoven ukazatel poklesu modulu tuhosti po uložení ve vodě a teplotní citlivost. Moduly tuhosti byly stanoveny na válcových tělesech cyklickým zatěžováním v příčném tahu (IT-CY) dle ČSN EN 12697-26 metodou řízené deformace o velikosti 3 µm a délce zatěžovacího pulsu 125 ms při teplotách 5, 15, 27 °C.

Směs	Modul tuhosti @ 15 °C (MPa) - zrání při 18 °C				Ukazatele poklesu modulu tuhosti (ITMR)	Teplotní citlivost
	7 vzduch	14 vzduch	7 vzduch + 7 voda	28 vzduch		
			(MPa)		(-)	(-)
E <sub>CZ</sub>	1900	3200	2500	4300	78,1	7,5
E <sub>FR</sub>	2000	3200	2700	4100	84,3	8,1

Tabulka 48: Základní deformační parametry EAC směsi

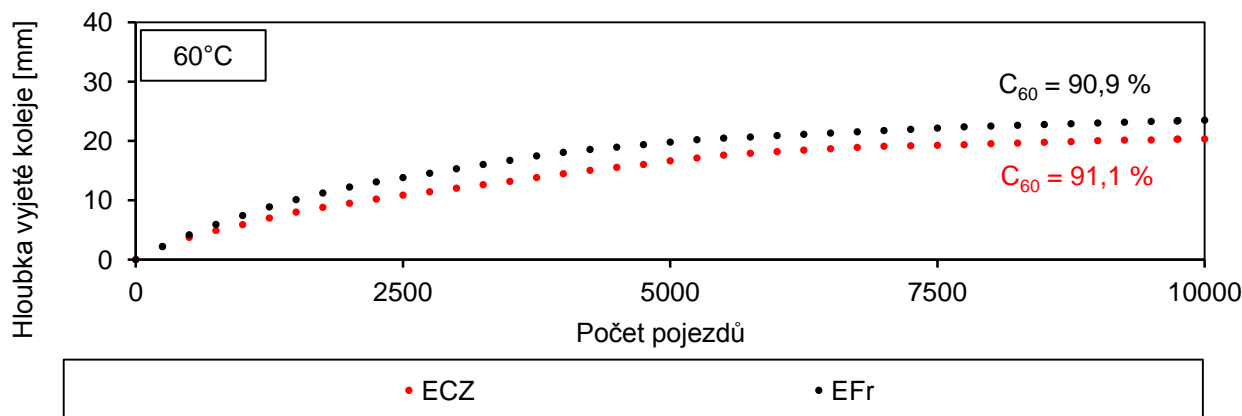
Z výše uvedených výsledků lze usoudit, že rozdíl mezi směsmi s odlišnými asfaltovými emulzemi je nepatrný. Vyšší množství zbytkového asfaltového pojiva ve směsi zlepšuje zkoumané pevnostní a deformační parametry směsí. Další neopomenutelná vlastnost s ohledem na využitelnost EAC směsí v obrusné vrstvě vozovky je odolnost proti vodě, která je zde stanovena třemi postupy, respektive koeficientem poklesu ITS dle TP 208, modifikovanou metodou dle ČSN EN 12697-12 a koeficientem poklesu modulu tuhosti ITMR. Dalším poměrně zásadním kvalitativním parametrem u EAC směsí je teplotní citlivost.

Z hlediska tvorby trvalých deformací byla provedena zkouška opakovaným pojižděním kolem na malém zkušebním zařízení při teplotě 60 °C dle ČSN EN 12697-22 + A1. Zkušební těleso bylo zatíženo 10.000 cykly pojezdů kola při frekvenci pojezdu 0,44 Hz. Z dosažených výsledků je patrné (tabulka 49, obrázek 84), že došlo k výrazným trvalým deformacím a navíc k vytlačení směsi horizontálním směrem a k tvorbě trhlin. Nicméně je na diskuzi zda podmínky zkoušky odpovídají skutečným podmínkám použití v rámci životnosti konstrukce vozovky za použití studených asfaltových směsí či zde hrají roli jiné faktory. Uplatnění těchto směsí se předpokládá na silnicích s nižším dopravním zatížením s velkou fluktuací jízdních stop vozidel. Dle poznatků z Francie se EAC směsí v reálných podmínkách většinou chovaly výrazně lépe, než při laboratorních zkouškách. Například zkoušky stanovení odolnosti směsi proti trvalým deformacím, které vedly zpravidla k obdobně nevyhovujícím laboratorním výsledkům, nekorespondovaly se skutečností

v reálných podmínkách. [Serfass 2011, Lessueur 2000]. Proto námi dosažené výsledky nesnižují možnost použití těchto směsí v dopravním stavitelství.

Směs	ECZ	EFr
WTS <sub>AIR</sub> (mm)	0,732	0,726
PRD <sub>AIR</sub> (%)	41,6	49,5

Tabulka 49: Parametry zkoušky poježděním kolem

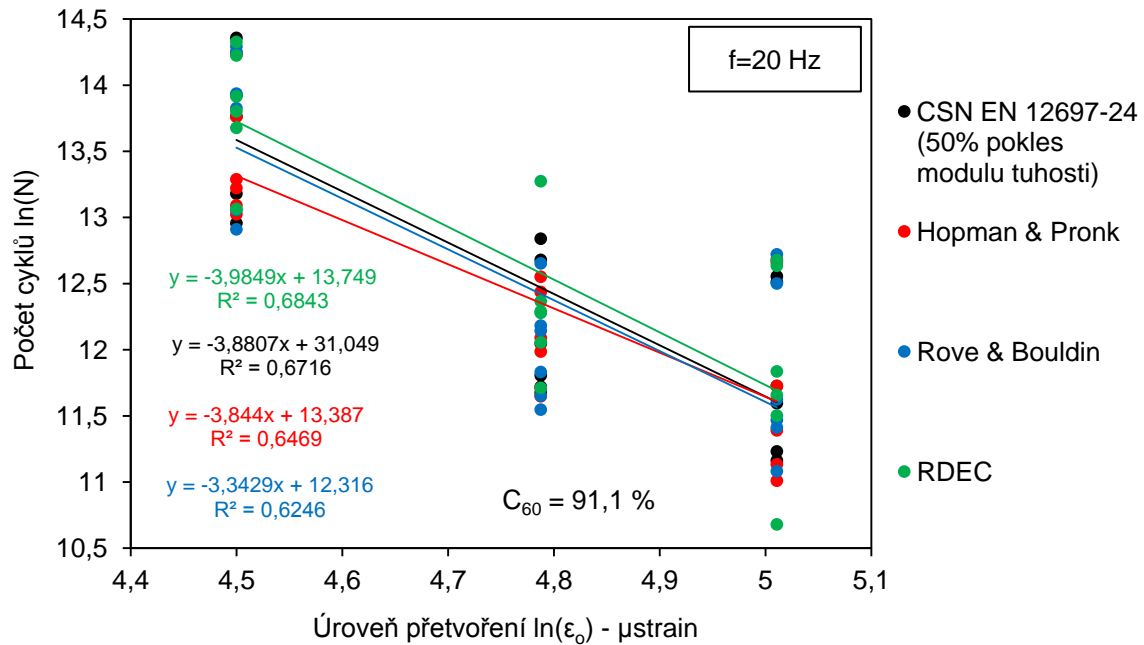


Obrázek 84: Hloubka vyjeté koleje na malém zkušebním zařízení

Viskoelastické parametry v podobě komplexních modulů byly měřeny v tahu za ohybu na přístroji 4PB-PR dle ČSN EN 12697-26 a v axiálním tlaku dle [NCHRP 1-37A Draft Test Method DM-1 - 2002]. Výsledky jsou uvedeny v následující kapitole z důvodů lepšího porovnání více směsí EAC 11 zároveň.

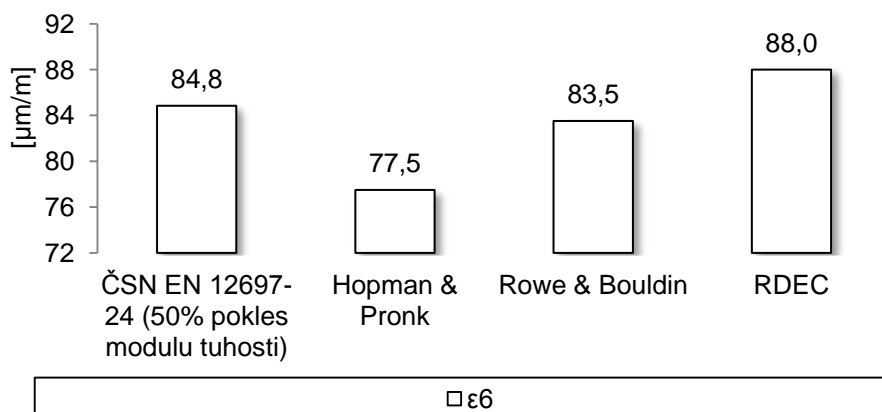
Zkouška odolnosti proti únavě byla prováděna zkouškou čtyřbodového ohybu na tělesech tvaru trámečku (4PB-PR) dle ČSN EN 12697-24. Frekvence zatěžování byla 20 Hz oproti obvykle používaných 25 Hz dle TP 170 nebo 30 Hz dle ČSN EN 13108-20. Teplota při zkoušce byla stanovena na 10 °C z důvodů vysoké teplotní citlivosti směsi. Zkušební teplota odpovídá návrhové teplotě při navrhování vozovek dle TP 170. Byla zkoušena EAC směs po 6ti měsících zrání a tuhnutí. Tato směs obsahuje asfaltové pojivo v množství 5,2 %-hm. směsi a má mezerovitost 8,9 %. Ve směsi bylo použito amfibolitické kamenivo z kamenolomu Libodřice. Naměřené výsledky jsou zobrazeny na obrázku 85. Vyhodnocení únavové zkoušky bylo provedeno dle ČSN EN 12697-24 (50% pokles modulu tuhosti) a metodou disipace energie (Hopman&Pronk, Rowe&Bouldin, RDEC).





Obrázek 85: Vyhodnocení únavové zkoušky

V tabulce 50 a na obrázku 86 je uvedeno porovnání parametru  $\epsilon_6$  stanovených dle výše uvedených postupů. Dále byly stanoveny na základě statistické analýzy únavové parametry, tj. parametr sklonu únavové přímky  $A_1$ , kde je ( $-A_1=B$ ) dle TP 170, a který se používá ve vzorcích pro počet přejezdů návrhových náprav. Dále pak byl stanoven tzv. „koeficient kvality“  $\gamma_{N,K,Púp}$  (nezaměňovat s indexem kvality  $\gamma_{úp}$  dle TP 170), který je přesným vyjádřením svislé vzdálenosti od regresní přímky k dolní a horní mezi konfidenčního/predikčního 95% intervalu spolehlivosti  $N_{6,5\%}$ . V tabulce 51 je pro porovnání uveden postup stanovení únavových parametrů dle TP 170 a ČSN EN 12697-24 přibližným vyjádřením poměru  $\epsilon_6$  a minimální velikosti přetvoření  $\epsilon_{6,5\%}$  odvozené z únavové přímky při  $10^6$  zatěžovacích cyklech pro pravděpodobnost výskytu 5 %. Rozdíl mezi zjednodušeným výpočtem podle ČSN EN 12697-24 a výpočtem ze statistické analýzy jednoduchou lineární regresí je uvedený v tabulkách 50 a 51 je patrný, nicméně zanedbatelný.



Obrázek 86: Vyhodnocení  $\epsilon_6$  pro  $10^6$  zatěžovacích cyklů na základě regresní analýzy

Získané výsledky naznačují, že rozptyl u únavových zkoušek EAC směsí na zařízení 4PB-PR je větší než předpokládají TP 170. Větší rozptyl zkoušek se projevil kromě menší



hodnoty korelačního koeficientu  $r^2$ , také tím, že interval spolehlivosti regresní přímky je širší. Vychází pak větší hodnota charakteristiky „koeficient kvality“  $Y_{N,K,P,úp}$ .

	B	$N_{6,5\%}$ predikční interval	$N_{6,5\%}$ konfidenční interval	$Y_{N, K, úp}$	$Y_{N, P, úp}$
ČSN EN 12697-24 (50% pokles modulu tuhosti)	3,9	248643	573498	1,74	4,02
Hopman & Pronk	3,3	252597	527704	1,90	3,95
Rowe & Bouldin	3,8	231201	547809	1,83	4,32
RDEC	4,0	253750	599719	1,67	3,94

Tabulka 50: Vyhodnocení únavových parametrů na základě regresní analýzy

ČSN EN 12697-24 (50% pokles modulu tuhosti)	B	$\epsilon_{6, 5\%}$	$Y_{up}$
	3,9	61,1	1,39

Tabulka 51: Vyhodnocení únavových parametrů dle ČSN EN 12697-24

Stanovené parametry dle ČSN EN 12697-24 (viz tabulka 51) vstupují do metodiky návrhu vozovky, například vliv parametru charakterizujícího odolnost vůči únavě je patrný ze zavedené a platné návrhové metodiky konstrukce vozovek, kde se objevuje v exponentu výpočtového vztahu a ovlivňuje tak exponenciálně výslednou hodnotu mezního počtu opakovaných zatížení. Velikost hodnoty únavových parametrů je tedy podstatná jak pro návrh, tak pro životnost konstrukce vozovky [Žák 2013]. Nicméně je nutné zmínit vlivy a faktory na laboratorně zjišťovanou odolnost proti únavě, které je obtížné zavést v rámci zkušební metodiky, ale přesto je nutné o nich vědět. Velmi významný vliv na laboratorně zjištěnou odolnost proti únavě mají přestávky mezi zatěžovacími cykly, dopravní zatížení v podobě amplitudy a frekvence, v menší míře zkušební teplota, a další vlivy [Fiedler 2014].

### 13.1. Uplatnitelnost reaktivních aditiv

Dalším pojivem testovaným v emulzních asfaltových směsích je portlandský struskový cement CEM II/B – S 32.5R a mechanicko-chemicky aktivovaný FPP z teplárny Plzeň. FPP se vyznačuje pucolánovými a hydraulickými vlastnostmi, který je dále upraven vysokorychlostním mletím v desintegrátoru, přičemž rozemletím dochází ke zvětšení specifického povrchu a k výraznému zvýšení reaktivity tohoto materiálu. Tento materiál by mohl být efektivně využit ke zlepšení vlastností EAC směsí, zejména ke zlepšení chování v počáteční fázi zrání.

Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulce 52. U testované EAC směsi  $E_{CZ}$  tato uvedená pojiva nahrazují plně nebo částečně filerovou složku.

Směs	Součinitel sytosti K	Množství asfaltové emulze	Množství zbytkového asfaltu ve směsi	CEM II/B – S 32.5R	mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň
	(-)	(%)	(kg/100 kg)	(%)	(%)
$E_{CZ}$ mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň	3,67	9,5	5,47	-	5,0
$E_{CZ}$ CEM	3,67	9,5	5,47	2,0	-

Tabulka 52: Složení EAC směsí

EAC směsi s reaktivními aditivami byly připraveny výše uvedeným postupem. V tabulce 53 je patrné, že zhutnitelnost směsi s mechanicko-chemicky aktivovaným FPP, z hlediska výsledných požadavků je dána především charakteristickými vlastnostmi FPP (specifická hmotnost, značná sorpční schopnost). Naproti tomu použití cementu zlepšuje zhutnitelnost směsi.

Počet otáček gyrátoru / 600 kPa	Požadavky na mezerovitost směsi	$E_{CZ}$ mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň (%)	$E_{CZ}$ CEM
60	5-12	12,3	8,5
$C_{60}$		87,7	91,5
10	$\geq 12$	14,7	13,3
200	-	6,2	5,5
Objemová hmotnost ( $g/cm^3$ ) při 60-ti otáčkách gyrátoru		2,406	2,508
Vlhkost směsi (%)		6,4	6,2

Tabulka 53: Základní deformační parametry EAC směsi

Pevnostní a deformační parametry směsi včetně stabilitních kritérií v podobě vodní a teplotní citlivosti jsou uvedeny v tabulce 54 a 55.

Směs	Pevnost v příčném tahu @ 15°C - zrání při 18°C				ITSR	Pokles pevnosti v příčném tahu
	7 vzduch	14 vzduch	7 vzduch + 7 voda	28 vzduch		
$E_{CZ}$ mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň	0,92	1,11	0,78	1,32	70,3	84,8
$E_{CZ}$ CEM	0,87	0,96	0,54	1,40	56,3	62,1

Tabulka 54: Pevnostní parametry a vodní citlivost EAC směsi

Směs	Modul tuhosti @ 15°C (MPa) - zrání při 18°C				Ukazatele poklesu modulu tuhosti (ITMR) (-)	Teplotní citlivost (5°C/27°C) (-)
	7 vzduch	14 vzduch	7 vzduch + 7 voda	28 vzduch		
$E_{CZ}$ mechanicko-chemicky aktivovaný FPP Plzeň	5500	7100	6700	8700	94,4	2,1
$E_{CZ}$ CEM	4100	4400	3400	4200	77,4	5,1

Tabulka 55: Základní deformační parametry EAC směsi

Z dosažených výsledků je patrné, že vliv na pevnostní a deformační parametry směsi  $E_{CZ}$  je poměrně výrazný. Zlepšení je patrné i v případě vodní a teplotní citlivosti. V případě cementu je mírné zlepšení patrné především v počátcích zrání. Markantnější nárůst sledovaných parametrů vykazuje  $E_{CZ}$  směs aditivovaná mechanicko-chemicky aktivovaným FPP. Nicméně je nutné uvážit potřebné vlastnosti těchto typů směsí a jejich funkci ve vozovce. Tyto vlastnosti musejí poskytovat jak vysokou odolnost proti trvalým deformacím a opakovanému zatížení, tak i flexibilitu, která jim umožňuje dobře se přizpůsobit pohybům v podloží. Proto lze spíše doporučit dávkování reaktivních aditiv s ohledem k výše zmíněným poznatkům v množství 1,0-2,0 %-hm. směsi. Ovšem je nutné ověřit a zajistit, zda nebyl ovlivněn proces štěpení asfaltové emulze při použití těchto reaktivních aditiv.



### 13.2. Zkušební úsek

Záměrem bylo na vhodném úseku vybrané pozemní komunikace v ČR ověřit technologie studených emulzních asfaltových směsí v konstrukci existující vozovky, pro kterou jsou známé původní dimenze, její celkový technický stav i dopravní zatížení. Návrh, výroba a pokládka směsi se prováděla dle návrhu nově připravovaných technických podmínek MD ČR (TP Asfaltové směsi za studena).

Pokusný úsek byl realizován na pozemní komunikaci III/44441 v úseku Hraničné Petrovice – Moravský Beroun v červenci 2014. Záměrem projektu bylo ověřit in-situ technologii emulzních asfaltových směsí obalovaných a pokládaných za studena a to ve variantě pro obrusnou i ložní vrstvu s využitím 30 % R-materiálu a bez R-materiálu. Součástí projektu byla také realizace technologie recyklace za studena na místě podkladní vrstvy - RS 0/32 CA (in-situ); 150 mm; š. = 4,5 m dle TP 280. Tato technologická etapa avšak nebyla předmětem sledování a periodické kontroly. Konstrukce původní vozovky pochází z 60. let minulého století, kdy tato komunikace byla vybudována na základě technologie penetračního makadamu a následně opravována překrytím buď četnými nátěry, nebo asfaltovými vrstvami různého složení. Kryty těchto vozovek proto nelze recyklovat způsobem, který by zajistil obnovení jeho původní funkce, ale jen technologií hloubkové recyklace za studena podle českých technických podmínek TP 208 s cílem získat kvalitní homogenní podkladní vrstvu. Na tuto podkladní vrstvu bylo pak potřeba provést nový asfaltový kryt, kde se nabízí využití EAC směsí. Zkušební úsek byl tedy zvolen přímo na míru pro ověření jednoho z možných způsobů oprav komunikací II. a III. tříd způsobem jak šetrným k životnímu prostředí, tak efektivním z hlediska vynaložení finančních nákladů.

Pro zkušební úsek byla vybrána pozemní komunikace o délce 1 815 m. Jedná se o silnici III. třídy s ročními průměrnými denními intenzitami celkem 184 všech vozidel a orientační skladbou dopravy – 80 % osobních vozidel a 20 % v souhrnu všech nákladních vozidel a traktorů. Zkušební úsek byl pro vlastní realizaci rozdělen na 6 částí, každá o délce cca 300 m, kde se provádělo ověření 5 různých variant, přičemž poslední část je referenční. Vlastní skladba jednotlivých úseků je uvedena v tabulce 56.

Úsek č. 1	Úsek č. 2
RS 0/32 CA (na místě); 150 mm; TP 208    š. = 4,5 m PS-E; ČSN 73 6129 EAC 16; 50 mm    š = 4,3 m PS-E; ČSN 73 6129 EAC 11; 40 mm    š = 4,2 m	RS 0/32 CA (na místě); 150 mm; TP 208    š. = 4,5 m PS-E; ČSN 73 6129 EAC 16; 80 mm;    š = 4,2 m Nátěr JV; ČSN 73 6129    š = 4,2 m
Úsek č. 3	Úsek č. 4
RS 0/32 CA (na místě); 150 mm; TP 208    š. = 4,5 m PS-E; ČSN 73 6129 EAC 16; 80 mm;    š = 4,2 m Nátěr emulzní JV    š = 4,2 m	RS 0/32 CA (na místě); 150 mm; TP 208    š. = 4,5 m PS-E; ČSN 73 6129 EAC 16 + 30 % R-materiálu; 50 mm    š = 4,3 m PS-E; ČSN 73 6129 EAC 11 + 30 % R-materiálu; 40 mm    š = 4,2 m
Úsek č. 5	Úsek č. 6 (referenční)
RS 0/32 CA (na místě); 150 mm; TP 208    š. = 4,5 m PS-E; ČSN 73 6129 EAC 16 + 30 % R-materiálu; 80 mm;    š = 4,2 m Nátěr JV; ČSN 73 6129    š = 4,2 m	RS 0/32 CA (na místě); 150 mm; TP 208    š. = 4,5 m PS-E; ČSN 73 6129 AC 16; 50 mm;    š = 4,3 m PS-E; ČSN 73 6129 AC 11; 40 mm;    š = 4,2 m

Tabulka 56: Skladba konstrukce vozovky zkušebního úseku

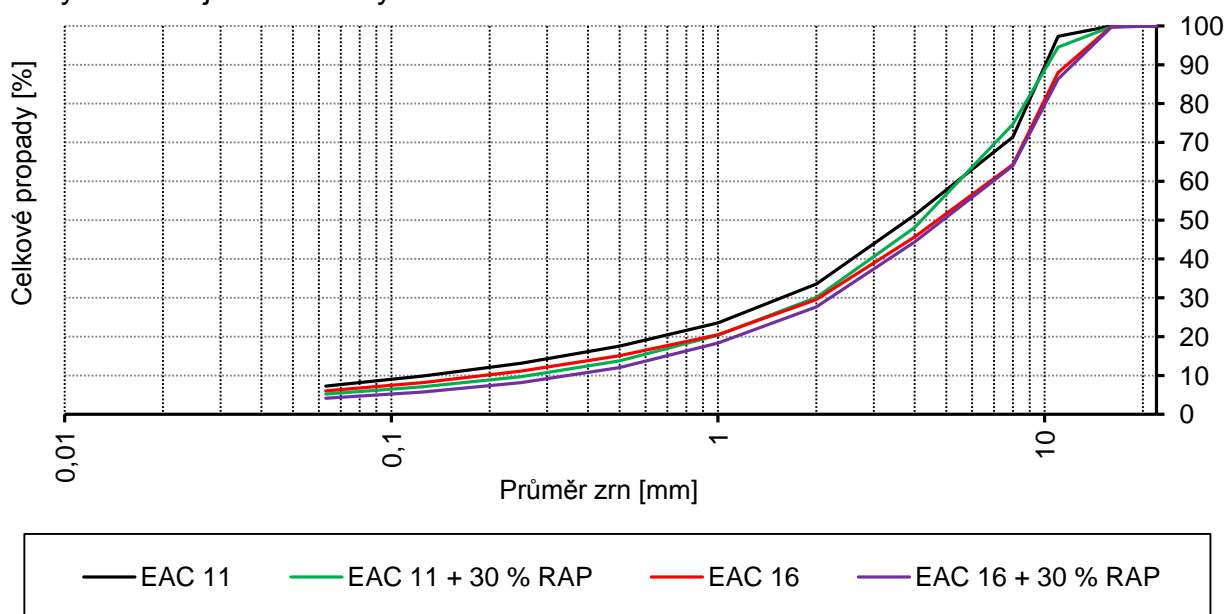
### 13.2.1. Materiály

Vlastní návrh emulzních směsí byl proveden na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Kamenivo pro emulzní asfaltové směsi bylo odebráno z místních zdrojů, respektive z blízkých lomů Bílčice (čedič) a Valšov (moravská droba). Nejvhodnější využití tohoto kameniva je především v silničním stavitelství, přičemž se jedná o tradiční kamenolomy, s produkcí kvalitního drceného kameniva. Vlastnosti kameniva jsou uvedeny v tabulce 57. Dále do vybraných směsí byl přidáván v množství 30 %-hm. směsi asfaltový tříděný R-materiál frakce 0/11 mm s obsahem zbytkového pojiva 6,2 %-hm.

Vlastnosti kameniva	Objemová hmotnost kameniva	Tvarový index	Zrnitost SK/DK $G_A/G_F$	Zrnitost HK $G_C$
Značka	-	SI	-	-
Jednotka	$Mg.m^{-3}$	% hm.	-	-
HDK Bílčice 8/16	3 074	13	-	90/15
HDK Bílčice 8/11	3 067	21	-	90/15
HDK Bílčice 4/8	3 061	16	-	90/15
SDK Valšov 0/4	2 828	-	85	-

Tabulka 57: Parametry kameniva

Kostra směsi je tvořena jednotlivými frakcemi složenými dle připravovaných TP. Navržené křivky zrnitosti jsou uvedeny na obrázku 87.



Obrázek 87: Zrnitostní křivky navržených EAC směsí

V součinnosti s evropským výzkumným centrem společnosti MeadWestVaco Europe s.p.r.l. a výrobcem asfaltových emulzí, společností Vialit Asphalt GmbH & Co. KG, byl flexibilně připraven vhodný typ asfaltové emulze, uzpůsobený pro tento typ směsí vzhledem k použitému kamenivu. Jedná se o pomaluštěpnou kationaktivní asfaltovou emulzi s označením C60B10. Parametry asfaltové emulze jsou uvedeny v tabulce 58. Asfaltová emulze byla vyrobena z asfaltu penetrace 70/100, kontinuální fáze (voda) s HCl a obsahem 1,2 %-hm. emulgátoru Indulin GE7, bez použití fluxovadel.



Vlastnost	Zkušební norma	Požadovaný parametr	Stanoveno (produkce 30.06.2014)
Zjevné vlastnosti	DIN EN 1425	deklaruje se	hnědá, s hrubšími částicemi
Polarita částic	DIN EN 1430	kladná	kladná
pH hodnota	ÖN EN 12850	<7	2,2
Hodnota štěpitelnosti	EN 13075-1		
Obsah pojiva	DIN EN 1428	58-62 %-hm.	62,0 %-hm.
Dynamická viskozita při 25°C, smykový spád 1	ÖN EN 13302, bod 7.3	deklaruje se	45 mPa.s
Zbytek na sítu (0,5mm) po 7 dnech skladování	DIN EN 1429	< 0,5 %-hm.	1,0 %-hm.
Interní zkoušky výrobce (nepožadované výrobními normami)			
Minerální složky se nechají s emulzí mísit, během několika minut dochází k ztuhnutí.			
Štěpitelnost/Přilnavost	Po odpaření vody (v závislosti na klimatických podmínkách) byla minerální složka z přibližně 70 % obalená pojivem.		

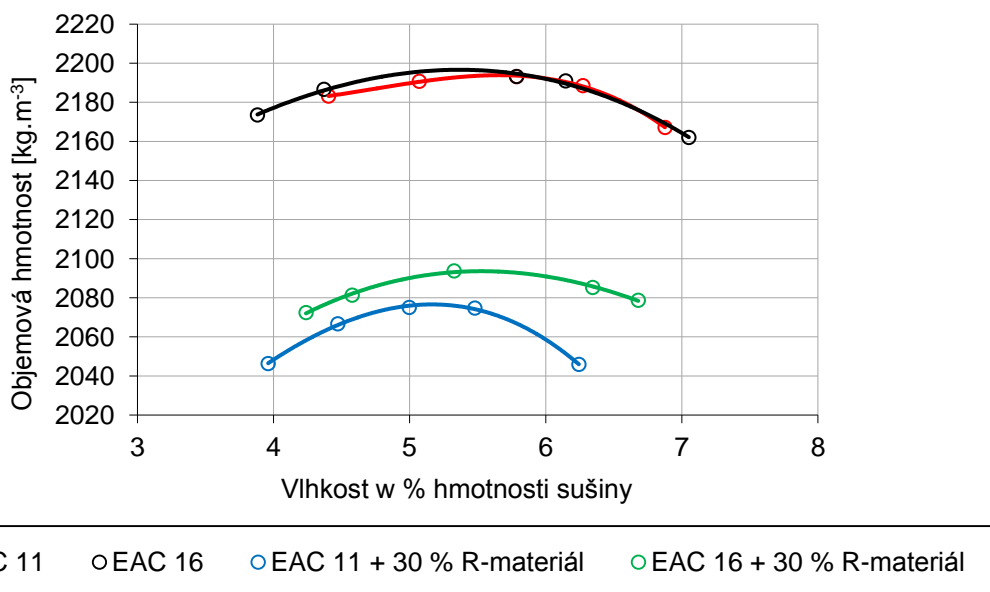
Tabulka 58: Vlastnosti asfaltové emulze

### 13.2.2. Laboratorní návrh EAC směsí

Vlastní zpracování směsi v laboratoři probíhalo tak, aby co nejvíce reprodukovalo míchání v centru. Směs v laboratoři byla vyráběna v šaržích ve dvouhřídelovém míchacím zařízení Wirtgen WLM 30. Jednotlivé směsi byly míchány, z níže uvedených důvodů, způsobem „One Step“ při teplotě 18–25 °C. Míchání bylo prováděno tak, aby došlo k co nejlepšímu obalení zrn kameniva pojivem a zároveň nedošlo k přemíchání směsi a tím k porušení asfaltového filmu. Technické podmínky pro emulzní směsi prováděné za studena udávají výrobu zkušebních těles pomocí válcových forem o průměru 150,0±1,0 mm a výšce 200-300 mm. Pro potřeby návrhu a experimentálního zkoumání byla jako vhodnější zvolena válcová zkušební tělesa s průměrem 101,60 ± 0,1 mm s výškou 63,5±2,5 mm. Zkušební tělesa byla hutněna statickým tlakem 5,0 MPa stlačováním pístů z obou stran a umožněním odtoku přebytečné vody. Zkušební tělesa byla ponechána ve formě při teplotě (20±2) °C po dobu (24±6) hod.. Podmínky zrání zahrnují zrání na vzduchu při teplotě (20±2) °C a při relativní vlhkosti 40-70 % po dobu 7 dní a dále kombinované zrání ve vodě po sedmi dnech na vzduchu a sedmi dnech ve vodě.

Prvním krokem bylo stanovit optimální množství asfaltové emulze a optimální vlhkost. Výpočet optimálního množství pojiva byl proveden dle předběžných TP pro emulzní směsi, avšak vzorec pro výpočet množství asfaltové emulze udával nereálné nízké množství emulze vzhledem ke skladbě směsi kameniva. (Zde je nutné uvést, že uvedený vzorec slouží k výpočtu spíše obsahu asfaltu ve směsi). Proto bylo přikročeno k výpočtu součinitelem sytosti. Následně byly vyrobeny směsi s různým množstvím obsažené emulze, respektive 9,0-10,0-10,5 %-hm. směsi. Po optimalizaci byly navrženy směsi uvedené v tabulce 56, které splňují požadované parametry dle předběžných TP „Asfaltové směsi za studena“.

Optimální vlhkost směsi pak byla stanovena dle ČSN EN 13286-2. Výsledky Proctorovy zkoušky jsou uvedeny na obrázku 88.



Obrázek 88: Proctorova modifikovaná zkouška - stanovení optimální vlhkosti emulzních asfaltových směsí

Požadavky na mechanické vlastnosti emulzní asfaltové směsi definují stanovení optimální vlhkosti směsi (Proctorova modifikovaná zkouška), srovnávací objemové hmotnosti zhutněné směsi, mezerovitosti, minimální obsah rozpustného pojiva, pevnost v příčném tahu po sedmi dnech na vzduchu a parametr odolnosti proti vodě. Jednotlivé volumetrické, fyzikálně-mechanické a deformační parametry navržených emulzních směsí po optimalizaci jsou uvedeny tabulce 59. U navržených směsí byly dále určeny pevnosti v tahu za ohybu a odolnost vůči lomu v oboru nízkých teplot na půlválcových zkušebních tělesech stanovené po 28 dnech zrání.



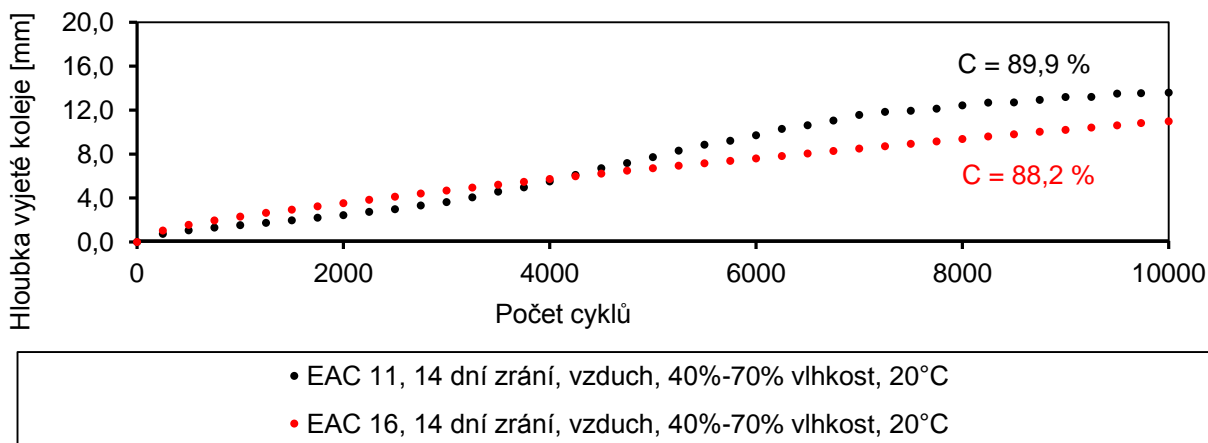
Vlastnosti asfaltové směsi	Značka	Jednotka	Požadavky dle předběžných TP XXX	EAC 11	EAC 11 + 30 % R-materiál	EAC 16	EAC 16 + 30 % R-materiál
Součinitel sytosti	K	-		4,1	3,8	4,2	3,9
Asfaltová emulze C60B6 Vialit Asphalt GmbH + Co KG		%-hm. směsi		10,0	10,0	9,0	9,0
Zbytkový obsah rozpustného pojiva	B <sub>min</sub>	%-hm.	Obrusná v. Ložní v. -*/4,2**	6,1	6,2	5,4	6,6
Vlhkost (Proctor modifikovaný)	w <sub>opt</sub>	%		5,7	5,2	5,2	5,4
Maximální objemová hmotnost	ρ <sub>mv</sub>	kg/m <sup>3</sup>		2460	2478	2529	2533
Objemová hmotnost zhutněná	ρ <sub>b,dim</sub>	kg/m <sup>3</sup>		2211	2250	2230	2231
Mezerovitost	V <sub>m</sub>	%-obj.	5,0 - 12,0	10,1	9,2	11,8	11,9
Stupeň zhutnění	C	%		89,9	90,8	88,2	88,1
Poměr pevnosti v příčném tahu	ITSR	%	min.70 %	105,3	99,1	98,9	107,9
Pevnost v příčném tahu při 15 °C	ITS <sub>d</sub>	MPa	min. 0,3	0,74	0,76	0,77	0,72
Pevnost v příčném tahu při 15 °C	ITS <sub>w</sub>	MPa		0,78	0,75	0,76	0,78
Modul tuhosti při 15 °C po 7 dnech na vzduchu	IT-CY	MPa		2 029	1 815	1 939	1 970
Modul tuhosti při 15 °C po 7 dnech na vzduchu a 7 dnech ve vodě	IT-CY	MPa	Deklarované hodnoty	2 137	1 945	2 029	1 792
Poměr modulů tuhosti při 15 °C	ITMR	%		98,9	107,1	104,6	91
Objemová hmotnost PM	ρ <sub>b,dry</sub>	kg/m <sup>3</sup>		2 195	2 077	2 196	2 080
Pevnost v tahu za ohybu při -5 °C		MPa		0,51	1,39	0,5	0,77
Odolnost vůči lomu (lomová houževnatost) při 0 °C	K <sub>ic,i</sub>	N/mm <sup>3/2</sup>		26,4	25,5	18,3	25,2
Odolnost vůči lomu (lomová houževnatost) při -10 °C	K <sub>ic,i</sub>	N/mm <sup>3/2</sup>		28,3	26,5	22,2	27,6

\* Max. zrno 11 mm \*\*Max. zrno 16 mm

Tabulka 59: Charakteristiky navržených emulzních směsí

Z hlediska tvorby trvalých deformací byla provedena zkouška opakovaným pojižděním kolem na malém zkušebním zařízení při teplotě 60 °C dle ČSN EN 12697-22 + A1. Zkušební těleso bylo zatíženo 10.000 cykly pojezdů kola při frekvenci pojezdu 0,44 Hz. Výsledky uvedené na obrázku 89 a v tabulce 60 nijak nevybočují z dosud získaných zkušeností ohledně tvorby trvalých deformací zejména v počátcích zrání EAC směsí.





Obrázek 89: Hloubka vyjeté koleje na malém zkušebním zařízení

Směs	EAC 11	EAC 16
	14 dní zrání, vzduch, 40-70% relativní vlhkost, 20 °C	
WTS <sub>AIR</sub> (mm)	1,17	0,85
PRD <sub>AIR</sub> (%)	34,1	18,3

Tabulka 60: Parametry zkoušky poježděním kolem

### 13.2.3. Výroba in-plant

Výroba EAC směsi byla provedena ve výrobním areálu dodavatele. Původní doporučené sekvenční míchání (příprava směsi kameniva a R-materiálu > 4 mm, včetně promíchání s polovinou vody a asfaltové emulze, následně přidání drobného kameniva a opětovné promíchání se zbytkem asfaltové emulze) směsi bylo opuštěno ve prospěch „one step“ postupu. Pro výrobu bylo zajištěno mobilní míchací centrum – Wirtgen KMA 200. Zařízení, včetně jeho obsluhy bylo zajištěno subdodavately. Asfaltová emulze byla dávkována pomocí čerpadla z přistavené cisterny (viz obrázek 90). Kamenivo pro jednotlivé směsi bylo oproti původnímu záměru připraveno v obalovacím centru. Důvodem byla skutečnost, že při výrobě studených emulzních asfaltových směsí se standardně používají zařízení, která umožňují dávkovat odděleně alespoň tři úzké frakce. V případě mobilního zařízení KMA je však možné odděleně do násypky dávkovat pouze R-materiál a současně suchou směs kameniva. Tím nebylo možné oddělit např. hrubší kamenivo od jemnějšího a provést sekvenční míchání asfaltové emulze a kameniva se záměsovou vodou. Z uvedeného důvodu byla suchá směs kameniva připravena na obalovně dodavatele. Tento postup se bohužel neobešel bez nežádoucího vlivu předehřevu. Zvolená předvýroba na obalovně neumožnila dávkování a předmíchání kameniva bez ohřevu v sušícím bubnu (zanášení filtrů jemnými částicemi). Takto připravené horké kamenivo bylo následně dávkováno do dvouhřídelového míchacího zařízení, aniž by došlo k dostatečnému ochlazení kameniva. U některých emulzních technologiích se pracuje s mírným ohřevem složek, nicméně v daném případě to nebylo vhodné. Dávkování příliš ohřátého kameniva do míchačky má výrazný vliv na vlhkostní poměry a zejména dopad na změnu parametrů štěpení asfaltové emulze. Postup s příliš horkým kamenivem (cca 100-120 °C) se ukazuje jako zcela nevhodný, neboť dochází ke zvýšenému odparu vody a především k výraznému zrychlení štěpení asfaltové emulze. To způsobí nedokonalé obalení především hrubých zrn kameniva. Ve vozovce to pak vede k pravděpodobně vyšší vodní citlivosti, ztrátě makrotextury vylamováním zrn z povrchu. Takto vyrobená směs navíc bude v rozporu s parametry směsi dle protokolů ke zkoušce typu.

Zahájení ověřovací výroby pro nastavení potřebného množství záměsové vody proběhlo bez komplikací. Směs byla dobře zhutnitelná a vizuálně vykazovala charakteristiky souvisle obaleného materiálu. V průběhu realizace první části prvního úseku se nicméně v průběhu štěpení a konsolidace asfaltové emulze ukázalo, že vlastní zhutněná směs je málo soudržná. Na základě tohoto zjištění bylo provedeno ověření dávkování jednotlivých složek, přičemž se ukázalo, že míchací centrum dávkuje pouze část požadovaného množství asfaltové emulze (cca 3 %-hm. směsi). Na základě této skutečnosti byla další pokládka pozastavena, aby se stanovila příčina tohoto stavu. Původní domněnku, že na vině je nízká teplota emulze (cca 30 °C), se podařilo vyvrátit. Zde je třeba zdůraznit, že emulze tohoto typu obdobně jako v případě technologií recyklace za studena lze přehřívat maximálně na teplotu 40 °C. Běžně se s těmito emulgemi pracuje s teplotou 20-35°C. Jako skutečná příčina problému se ukázalo být technicky nepřipravené výrobní zařízení. Subdodavatel totiž neprovedl řádnou údržbu a v systému pro čerpání a dávkování emulze zůstala větší množství usazenin z předešlých výrob. Tato skutečnost vedla k zanesení dávkovacích trysek a pravděpodobně měla za následek i nedostatečnou funkci vlastního čerpadla. Problém se podařilo vyřešit po cca 2 dnech s nezbytnými technickými zásahy.



Obrázek 90: a) výrobní zařízení Wirtgen KMA-200 / nežádoucí přehřátí kameniva - odpařování vody ze směsi b) emulzní asfaltová směs - výroba v laboratoři c) emulzní asfaltová směs - in plant d) emulzní asfaltová směs - pokládka in situ

Dále není zřejmé, zda se skutečně provedla změna receptur při míchání suché směsi kameniva pro studené emulzní směsi EAC16 i EAC11 (tato informace nám nebyla poskytnuta). Čáry zrnitosti kameniva pro všechny čtyři směsi dle platných protokolů o zkoušce typu se lišily. Při prvním dni asistence při výrobě a pokládce toto nemohlo být ověřeno a nebyly předány ani následně laboratoři zhotovitele provedené rozborů. Dojem, který byl získán při druhé návštěvě lokality, byl takový, že předmíchané kamenivo se skládá na stejných hromádách bez rozlišení, zda se jedná o EAC11 či EAC16, ačkoli během dne se vyráběla jak směs EAC16, tak směs EAC11. K vlastnímu průběhu denní výroby a skutečně použitým materiálům by měly existovat informace, jaká byla skutečnost. Dávkování emulze i vody bylo opět pro každou směs odlišné (viz obrázek 90), což má dopad na výsledné parametry. Ideální by bylo, kdyby existovaly ze všech 4 směsí odběry a provedené extrakce, což zhotovitel nezajistil. FSv ČVUT měla možnost v rámci problémů vzniklých při míchání směsi dovézt jen několik těles a vzorků směsí z ložní vrstvy, které byly následně podrobeny rozborům (viz tabulka 61).

Směs	Množství zbytkového pojiva (%)	Objemová hmotnost nezhuťněná (g/cm <sup>3</sup> )	Objemová hmotnost zhuťněná (g/cm <sup>3</sup> )	Mezerovitost (%)	Stupeň zhuťnění C (%)	Pevnost v příčném tahu - [MPa] 7 dní	Pevnost v příčném tahu - [MPa] 14 dní	Koeficient poklesu v příčném tahu (%)	Modul tuhosti - [MPa] 7 dní	Modul tuhosti - [MPa] 14 dní	ITMR (%)
Úsek č. 5 / EAC 16 + 30 % R-materiálu	6,0	2,520	2,257	10,2	89,8	0,41	0,54	61,1	1550	2190	48,6
Úsek č. 3 / EAC 16	5,8	2,653	2,242	14,4	85,6	0,33	0,37	56,1	990	1480	48,7

Tabulka 61: Výsledky kontrolních rozborů v rámci výroby

Tabulka 61 shrnuje rozborů odebraných směsí v rámci realizace zkušební úseku. Z výsledků je patrné:

- obsah zbytkového pojiva je srovnatelný;
- oproti protokolům zkoušky typu dosahují kontroly provedené na směsi odebrané z míchacího centra zhoršení z hlediska pevnosti v příčném tahu a koeficientu poklesu v příčném tahu (vodní citlivost);
- z hlediska hodnot modulů tuhosti je patrný obdobný závěr jako v případě pevnosti v příčném tahu. Směs EAC16 vykazuje snížení této charakteristiky, přičemž je oproti tomu zajímavý mnohem menší pokles parametru ITMR (vodní citlivost vyjádřená charakteristikou modulu tuhosti).

#### 13.2.4. Pokládka a hutnění

Směs byla z míchacího centra převážena nákladními vozidly na místo pokládky ve vzdálenosti cca 30 km. Směs byla pokládána a hutněna kolovým finišerem VÖGELE SUPER 1803-2 v celé šířce komunikace (viz obrázek 91). Hutnicí sestava se skládala ze dvou válců s ocelovými běhouny. První válec BW 154 AD (11 t) a druhý BW 120 AD (2,5 t). Z hlediska vlastního hutnění měl být aplikován následující postup hutnění.

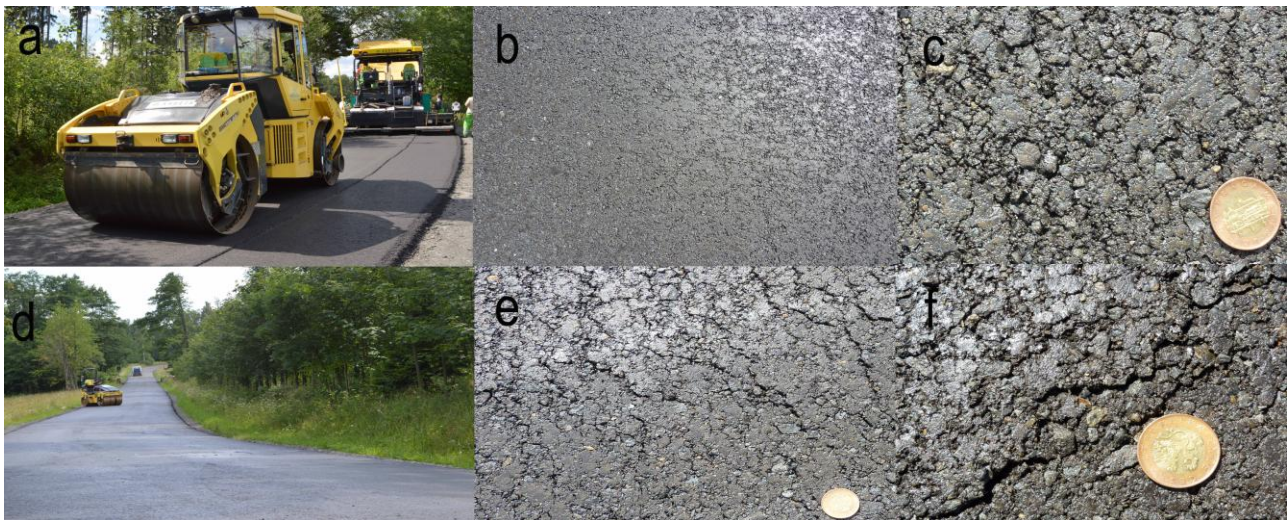
- Provést minimálně 4-6 pojezdů válcem s ocelovými běhouny bez vibrace (vibrace se však může použít v podobě vysoké frekvence a malé amplitudy, přičemž se musí vypnout, jakmile se objeví příčné trhliny). Obecně se doporučuje i vyšší počet pojezdů (12-15 pojezdů), aby došlo k co nejlepšímu zaklínování zrn kameniva.
- S odstupem cca jedné hodiny několik pojezdů válce s pogumovanými běhouny pro zažehlení s tím, že nejpozději tady je žádoucí vizuální kontrola kvality zhuťnění (kompaktní povrch bez výskytu trhání směsi či vzniku drobných příčných trhlin).
- Na závěr se mohou udělat 1-2 zažehlovací pojezdy lehčím ocelovým válcem.

Při vlastní pokládce se z hlediska vlastní práce finišeru neidentifikoval žádný zásadní problém. V rámci dočasného zprovoznění míchacího centra dne 24.6.2014 se v druhé části prvního podúseku projevilo větší dávkování záměsové vody a přesně neznámé vyšší množství emulze. Při večerní prohlídce realizovaných prací byla patrná převodnělá místa a současně některé problematiky způsobené hutněním.

V rámci hutnění nebyl aplikován doporučený postup – první den nebyl přítomen ani lehký válec s ocelovými běhouny. První (klíčová) fáze hutnění proběhla dle doporučení a upřesnění přímo na stavbě s maximálním počtem pojezdů středně těžkých nebo těžších válců s ocelovými běhouny (bez vibrace). Pro následné zažehlení po cca 60 minutové přestávce však byly použity stejné válce, čímž nedošlo k potřebnému zahřazení povrchu a především nedošlo k eliminaci drobných příčných trhlin či k zamezení vzniku lokálního „potrhaní“ realizované vrstvy (viz obrázek 91). Je nutné ještě zmínit, že po problémech



s dávkováním pojiva bylo na úsek č. 4 místo směsi EAC 11 + 30 % R-materiálu položena směs ACO 11+ kvůli nesoudržnosti ložné vrstvy a zajištění dostatečné funkčnosti a životnosti vozovky.



Obrázek 91: a, d) pokládka a hutnění EAC směsi - úsek č. 5  
b, c) příklady stavu zhutněné vrstvy EAC bez potrhání při hutnění  
d, e) příčné potrhání povrchu zhutněné EAC vrstvy, které je nezbytné „zažehlit“ vhodným hutním prostředkem

### 13.2.5. Provedení kontrol hotového úseku včetně celkového vyhodnocení

Provedení první kontroly hotového úseku bylo realizováno cca po dvou měsících od vlastní pokládky. Kontrola se skládala z vizuální prohlídky jednotlivých úseků a souboru kontrolních zkoušek provedených na jádrových vývrtech.

V rámci provedených jádrových vývrťů byly odebrány vždy 4 vzorky pro úseky 1, 3, 4 a 5. Nejprve je nutné upozornit a označit kvalitu účinnosti spojení EAC vrstev za nedobrou, respektive na získaných vývrtech tento parametr nemohl být určen. Dále je patrné, že pro jednotlivé úseky nebyly vždy dodrženy požadované tloušťky pokládané vrstvy. V některých místech byly zjištěny velmi malé tloušťky i u ložní vrstvy (viz obrázek 92).



Obrázek 92: Ukázky jádrových vývrťů a) úsek č. 1 b) úsek č. 5

Z principu vlastní EAC směsi to nepředstavuje zásadní problém, jelikož jednou z výhod tohoto typu směsí je její využitelnost pro vyrovnání různé výšky v příčném profilu vozovky (reprofilace). Z hlediska celkové konstrukce vozovky lze toto zjištění považovat za

nedostatek vlastního provedení, v jehož důsledku může být ovlivněna celková funkčnost a životnost vozovky.

Směs	Tloušťka položené vrstvy (mm)	Množství zbytkového pojiva (%)	f - obsah jemných částic celkem (%)	Objemová hmotnost zhutněná (SSD) (g/cm <sup>3</sup> )	Objemová hmotnost zhutněná (z rozměrů) (g/cm <sup>3</sup> )	Objemová hmotnost nezhutněná (g/cm <sup>3</sup> )	Mezerovitost (%)	Stupeň zhutnění C (%)
Úsek č. 1 / EAC 11	55	6,2	13,1	2,224	2,164	2,537	14,7	85,3
Úsek č. 1 / EAC 16	30	3,4	15,9	2,214	-	2,608	-	-
Úsek č. 3 / EAC 16	65	4,9	9,9	2,388	2,327	2,668	12,8	87,2
Úsek č. 4 / EAC 16 + 30 % R-materiálu	45	-	-	-	-	-	-	-
Úsek č. 5 / EAC 16 + 30 % R-materiál	77	6,0	13,8	2,262	2,258	2,535	10,2	89,8

Tabulka 62: Výsledky kontrolních rozborů směsí jádrových vývrtů (odběr 04.09.2014)

V tabulce 62 jsou uvedeny výsledky kontrolních rozborů směsí z jednotlivých úseků a jádrových vývrtů. Zjištěný obsah jemných částic je plně dostačující pro zajištění a vytvoření dostatečného tmele pro spojení vlastní směsi. Na druhou stranu takovéto zvýšení oproti návrhu (viz obrázek 87 a 93) zvýší specifický povrch a tím i potřebné množství asfaltové emulze. Stanovený obsah zbytkového asfaltového pojiva je v případě vzorku směsi EAC 16 z úseku č. 1 zcela nedostačující. V případě úseku č. 3 je hraniční. Na extrahovaném pojivu (původní 70/100) z vývrtů byla stanovena penetrace a bod měknutí pro úsek č. 1. Tvrdnutí pojiva je pravděpodobně způsobeno oxidačními procesy vlivem vyššího obsahu mezer ve zkoumaných směsích [Serfass 2004, ] (viz tabulka 63).

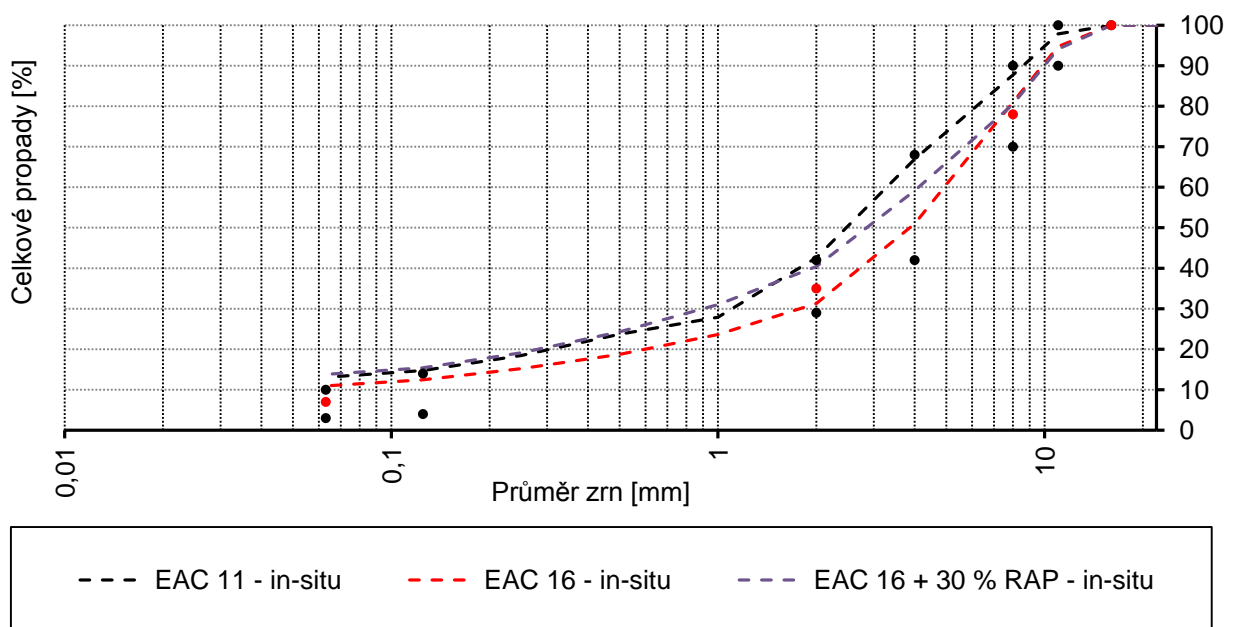
Mix	Penetrace (mm <sup>-1</sup> )	Bod měknutí (°C)
EAC 11	56,9	49,8
EAC 16	57,4	49,5

Tabulka 63: Parametry asfaltového pojiva po 2 měsících zrání (úsek č. 1)

Výsledky stupně zhutnění pro jádrové vývrty (viz tabulce 62) dokládají dosažené nižší hodnoty oproti zhutnění v laboratoři. Analogicky lze uvést, že mezerovitost je v porovnání s protokoly ke zkouškám typu o cca 20 % vyšší. V případě uvedených EAC směsí v úseku č. 1 a 4 nebylo možné stanovení mezerovitosti doložit s ohledem k problematickému stanovení rozměrů (nesoudržnost při vrtání) odebraných jádrových vývrtů pro směs EAC 16 a EAC 11 + 30 % R-materiálu. Tato skutečnost platí i pro pevnostní a deformační parametry prezentované v následující tabulce 24. Uvedené hodnoty pevnostních charakteristik mají pro směsi EAC16 v porovnání s výsledky uvedenými v tabulce 62 rostoucí tendenci, čímž je doložena postupná konsolidace vlastní konstrukční vrstvy. Tato skutečnost plně odpovídá očekávání, které lze pro tento typ směsí stanovit. Opačný trend je patrný u hodnot modulu tuhosti, kde patrně vyšší vlhkost ve vozovce způsobuje pomalejší nárůst, viz tabulka 64.

Směs	Pevnost v příčném tahu (MPa)	Modul tuhosti @ 15°C (MPa)	Teplotní citlivost (-)	Odolnost vůči lomu (0°C) (N/mm <sup>3/2</sup> )	Odolnost vůči lomu (- 10°C) (N/mm <sup>3/2</sup> )
Úsek č. 1 / EAC 11	0,37	960	4,9	7,5	12,3
Úsek č. 1 / EAC 16			-		
Úsek č. 3 / EAC 16	0,44	1080	9,1	9,1	18,5
Úsek č. 4 / EAC 16 + 30 % R-materiálu			-		
Úsek č. 5 / EAC 16 + 30 % R-materiál	0,57	1340	6,4	13,5	18,4









Tabulka 64: Výsledky kontrolních rozborů směsí jádrových vývrtů (odběr 04.09.2014) - 2 měsíce zrání



Obrázek 93: Zrnitostní složení EAC směsí

Vizuální prohlídky byly zajištěny v čase 2 a 12 měsíců od pokládky. V rámci těchto prohlídek byly zjištěny následující poruchy uvedené v tabulce 65.



Úsek č.	Vizuální kontrola		Fotodokumentace (12 měsíců)
	2 měsíce	12 měsíců	
1	Projevuje se otevřená struktura povrchu vrstvy, respektive je zde patrná ztráta hrubých zrn z obrusné vrstvy v celé délce úseku. Ztráta hmoty z krytu byla způsobena již při hutnění vrstvy nalepováním hrubých zrn směsí na ocelový běhoun válece. Tato porucha je doprovázena tvorbou příčných krátkých trhlin, které jsou opět způsobeny vlastním hutněním.	Výrazný vývoj plošného vylamování hrubých zrn z povrchu obrusné vrstvy. Místy je patrná hlubková koroze a tvorba kaveren.	 
2	Tyto zkušební úseky jsou opatřeny jednovrstvým nátěrem dle národních technických předpisů ČSN 736129. Zde jsou již patrná poškození povrchu nátěru. Jedná se o lokální místa se ztrátou kameniva v důsledku buď nevhodné volby drti, nedostatečného očištění povrchu či použití nepraného kameniva a pravděpodobně nevhodné volby pojiva, resp. nedostatečné kvality asfaltové emulze. Dalším nedostatkem je překrývání okrajů JV nátěru mezi jednotlivými jízdními pruhy, konkrétně na úseku č. 3. Tato skutečnost je v hrubém rozporu s platnými technickými předpisy, kde se zdůrazňuje způsob, jakým má být provedenou napojování nátěrů.	Vyskytují se ve větší míře plochy s vystoupeným pojivem na povrch. V ose jízdních stop dochází ke ztrátě kameniva z nátěru. Místy dochází k vylamování hrubých zrn.	  
3		-	
5		Vyskytují se plochy s vystoupeným pojivem na povrch. V ose jízdních stop dochází ke ztrátě kameniva z nátěru.	
4	Nebyly vizuálně zjištěny žádné poruchy.	-	
5			

Tabulka 65: Vizuální kontrola zkušebního úseku

Z hlediska tvorby trvalých deformací vozovky vlivem dopravního zatížení nejsou patrné na žádném z realizovaných úseků problémy. Bohužel výše popsané poruchy způsobené chybami při vlastním provedení mohou mít negativní dopad na vlastní vnímání technologie emulzních asfaltových směsí.

### 13.3. Experimentální testování EAC 11

Tato část práce se věnuje experimentálnímu ověření vlastností směsi EAC 11, která byla použita v obrusné vrstvě zkušebního úseku na pozemní komunikaci III/44441 v úseku Hraničné Petrovice – Moravský Beroun.

Použití asfaltových emulzí pro výrobu asfaltových směsí za studena do konstrukčních vrstev vozovek zatím není v ČR zavedeno s jedinou výjimkou, kterou představují technologie recyklace za studena podle platných TP 208. Důvodem je obtížnost zvládnutí některých zásadních odlišností této technologie, které obecně studené směsi pro konstrukční vrstvy vyžadují. V rámci ověření kvalitativních parametrů výsledné směsi bylo provedeno i posouzení vlivu asfaltové emulze, která nebyla optimalizována ke konkrétnímu kamenivu, na výslednou směs. Z předchozí kapitoly (porovnání  $E_{CZ}$  a  $E_{FR}$ ) by se mohl vytvořit chybný závěr, že nastavení emulze není nutné. V rámci tohoto posouzení byly použity tyto asfaltové emulze:

- Asfaltová emulze Paramo Katebit PS - C60B10
- Asfaltová emulze Silnice CZ - C60B10

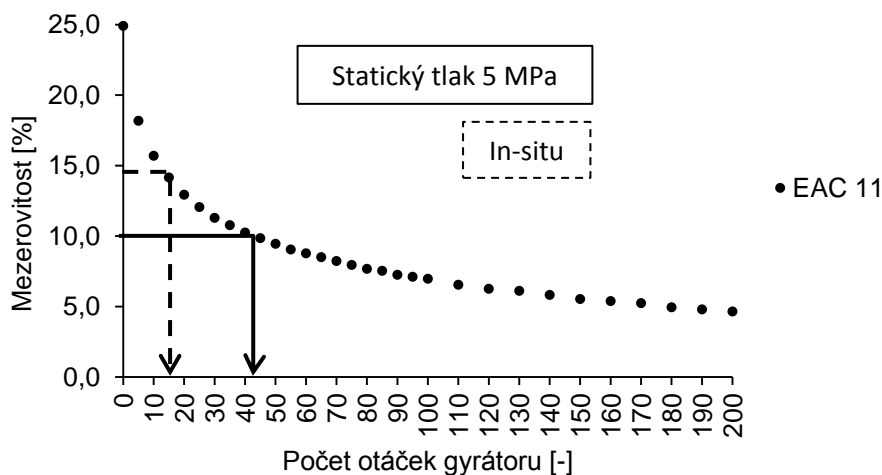
Z dosažených výsledků uvedených v tabulce 66 je patrné, že vhodný typ emulze je naprosto zásadní pro kvalitu výsledné směsi při porovnání s navrženou referenční směsí, kde byla použita „na míru“ připravená emulze Vialit C60B10. Tento fakt by měl být řádně ošetřen v příslušných předpisech pro návrh emulzních asfaltových směsí.

Směs	Emulze Paramo - Katebit PS C60B10	Emulze Silnice CZ - C60B10
Mezerovitost (%)	9,8	9,9
Stupeň zhutnění C (%)	90,2	90,1
Pevnost v příčném tahu - 7 dní vzduch (MPa)	0,53	0,38
ITSR (%)	73	46
Modul tuhosti - 7 dní vzduch (MPa)	1880	810
ITMR (%)	43	40

Tabulka 66: Parametry směsi EAC 11 v závislosti na použité asfaltové emulzi

Dalším sledovaným parametrem byla zhutnitelnost, respektive porovnání mezi jednotlivými hutnicími prostředky v laboratoři či in-situ. Pro porovnání s francouzským přístupem, tedy hutnění pomocí gyrátoru dle NF P 98 139, byla vyjádřena závislost počtu otáček gyrátoru k dosažené mezerovitosti. Podmínky hutnění byly 30 otáček/min., tlak 600 kPa, a úhel náklonu formy 1,25°. Výsledky porovnání jednotlivých způsobů hutnění jsou uvedeny na obrázku 94. Hutnění směsi statickým tlakem 5,0 MPa odpovídá 43 otáčkám gyrátoru. Zhutnění in-situ odpovídá 16 otáčkám gyrátoru. Zde je ale nutné dosaženou mezerovitost uvažovat s jistou rezervou, vzhledem ke kvalitě získaných vzorků z jádrových vývrtů a použité metodě stanovené zhutnění objemové hmotnosti a maximální objemové hmotnosti a vzhledem k použitým metodám jejich stanovení.





Obrázek 94: Porovnání zhutnění - hydraulický lis x gyrátor x in-situ

V tabulce 67 jsou uvedeny výsledky porovnání volumetrických, pevnostních a deformačních parametrů směsi EAC 11 dosažených vzhledem k testovaným podmínkám hutnění v laboratoři. Z výsledků je patrné, že lepších parametrů dosahuje směs při hutnění statickým tlakem.

	Gyrátor	Hydraulický lis	Změna hodnoceného parametru v %
EAC 11	60 otáček / 600 kPa	5 MPa	
Zhutněná objemová hmotnost v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 231	2 211	99,1
Mezerovitost v %	8,8	10,1	114,8
Stupeň zhutnění C v %	91,2	89,9	98,5
Pevnost v příčném tahu po 7 dnech zrání v MPa	0,61	0,74	121,3
Pevnost v příčném tahu po 14 dnech zrání (7vzduch+7voda) v MPa	0,53	0,78	147,2
Modul tuhosti po 7 dnech zrání v MPa	1 727	2 029	117,4
Modul tuhosti po 14 dnech zrání (7vzduch+7voda) v MPa	1 599	2 137	133,6

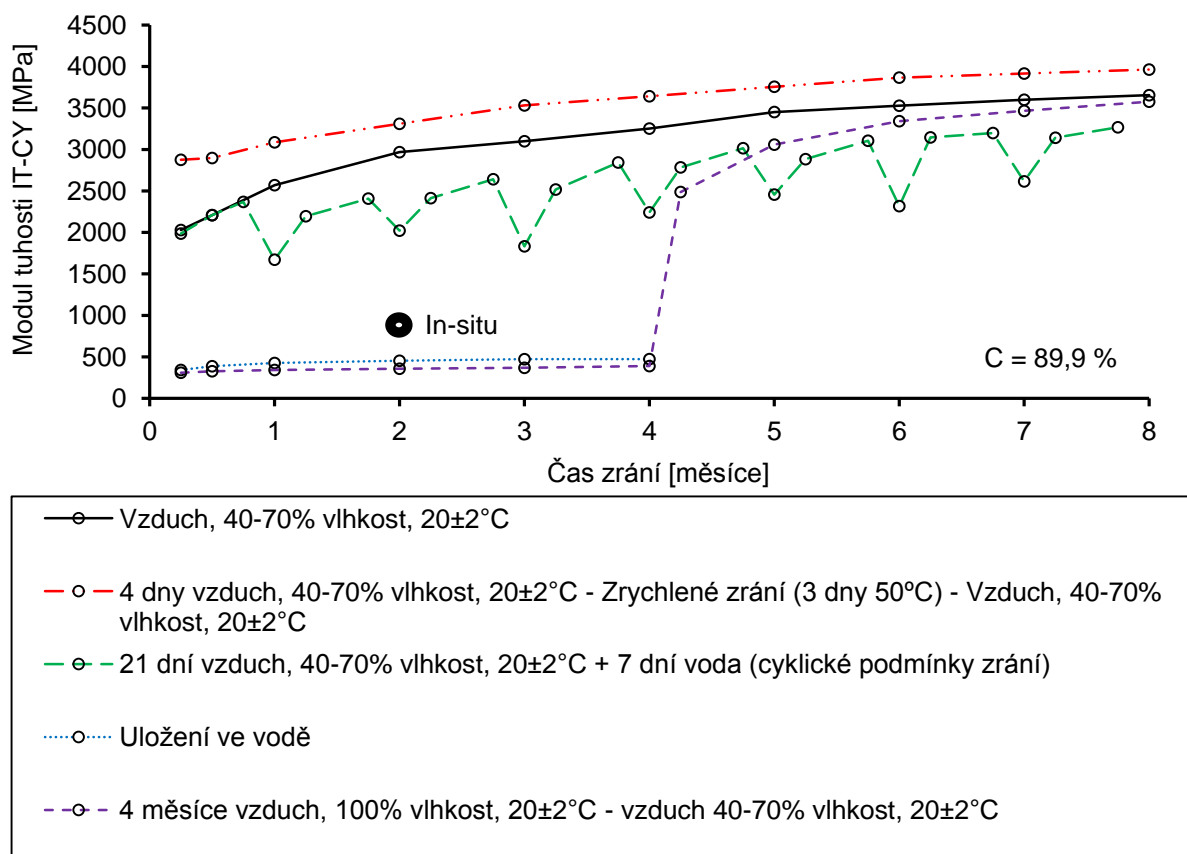
Tabulka 67: Porovnání parametrů směsi EAC 11 s odlišným způsobem zhutnění

Další důležitá problematika, která ovlivňuje výsledné vlastnosti EAC směsí je vliv okrajových podmínek v počátcích zrání. V rámci laboratorního testování byl zkoumán vliv podmínek zrání na vývoj modulu tuhosti stanoveného metodou IT-CY dle ČSN EN 12697-26 při 15 °C v čase vždy z průměru tří zkušebních těles. Cílem bylo postihnout vliv vody, respektive vlhkosti při zrání a tuhnutí EAC směsi. Tato problematika je důležitá z hlediska ošetřování a ochrany povrchu položené a zhutněné konstrukční vrstvy vozovky. Způsoby zrání byly zvoleny tak, aby umožnily si vytvořit představu o vlivu vlhkosti na vývoj pevnosti či tuhosti takové vrstvy:

- první způsob byl proveden dle standardizovaných podmínek dle předběžných technických podmínek, tedy zrání na vzduchu při teplotě  $(20\pm 2)$  °C a při 40-70% relativní vlhkosti;
- druhý způsob zrání probíhal při 100% relativní vlhkosti okamžitě po výrobě při teplotě  $(20\pm 2)$  °C po dobu 4 měsíců (simulováno tak, že zkušební vorky byly vloženy ihned po výrobě do neprodyšného sáčku) a poté se skladovaly dle standardizovaných podmínek;

- u třetího způsobu byl zkoumán vliv zrychleného zrání, kdy tělesa 4 dny po výrobě zrál při standardních podmínkách, následně byly vloženy na 3 dny do sušárny na  $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Následně zrání probíhalo na vzduchu při relativní vlhkosti 40-70 % a při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;
- čtvrtá varianta zahrnovala zrání zkušebních těles ihned po výrobě uložených ve vodě;
- pátá kombinace odpovídá zrání po dobu 21 dnů na vzduchu při teplotě  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  a při relativní vlhkosti 40-70% s následným uložením ve vodě po dobu 7 dnů s cyklickým opakováním.

Emulzní asfaltové směsi jsou vývojové materiály. Vedle teploty či stárnutí asfaltového pojiva má na vývoj deformačních či pevnostních parametrů EAC směsí v čase zásadní vliv obsah vlhkosti ve směsi, jak je ukázáno na obrázku 95 a dle [Serfass 2004, Gaudefroy 2008]. Dobře patrný je i vztah mezi laboratorními a in-situ podmínkami, přičemž je možné tento značný nesoulad přisuzovat rozdílnosti výrobě a hutnění v laboratoři a in-situ uvedeném výše a rozdílným vlhkostrním podmínkám zrání (viz obrázek 95).



Obrázek 95: Vliv podmínek zrání směsi EAC 11

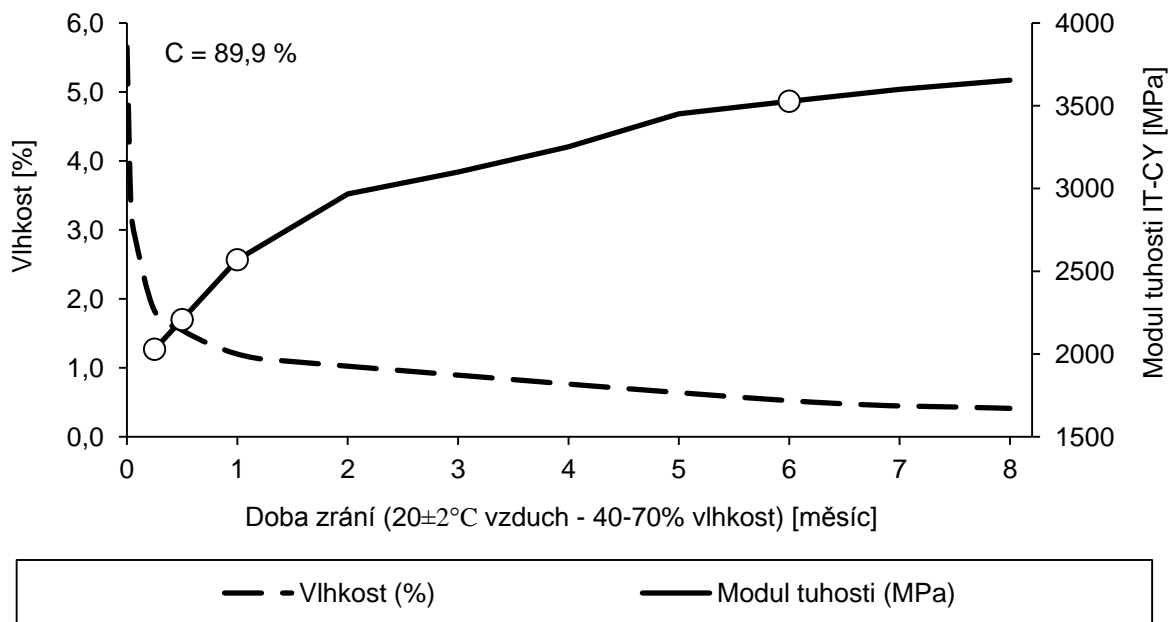
Z hlediska chemických reakcí při štěpení kationaktivní asfaltové emulze probíhá adsorpce polárních částí molekuly emulgátoru na povrchu zrna kameniva za tvorby soli nerozpustné ve vodě, která způsobí okamžitou adhezi na kamenivu za současného vytlačování a odparu vody. Dle obrázku 98 a dle [Serfass 2011, Ormsby 2011] se během prvního dne odpaří cca 50 % vlhkosti. Pokud se podíváme na dosaženou tuhost EAC 11 odebranou z pokládky v rámci zkušebního úseku a porovnáme ji s laboratorními výsledky (byť toto porovnání z výše uvedených důvodů není korektní) nedošlo k nárůstu tuhosti směsi.

Nicméně úsek 1 byl položen v lesním úseku, kde lze předpokládat zvýšené vlhkostní poměry.

Z dosažených výsledků lze doporučit, že po čerstvě položené vrstvě z EAC směsi by se nemělo zbytečně pojíždět, doporučené požadavky pro ošetřování a ochranu povrchu jsou následující:

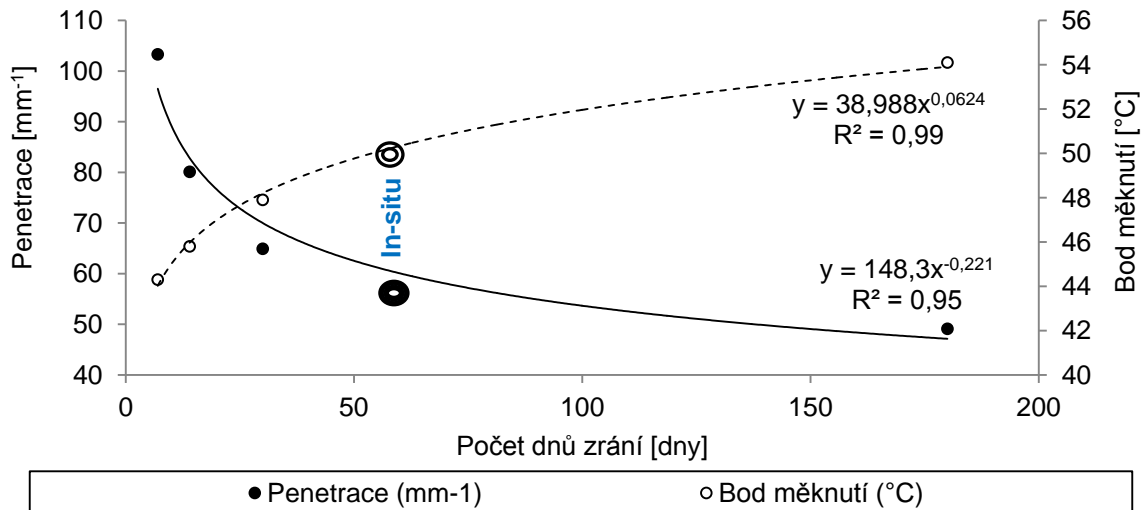
- zatížení vrstvy běžným provozem po 48 hodinách za předpokladu vhodných klimatických podmínek (jinak vyloučit pojezd těžkou dopravou min. na 3 dny),
- pokládka další vrstvy nejdříve po 3 dnech.

Následující vrstvu je vhodné provádět až po odpaření určitého množství vody z důvodů štěpení asfaltové emulze a zajištění dostatečné stability vrstvy.



Obrázek 96: Vývoj vlhkosti směsi EAC 11

Současně po měření modulu tuhosti bylo z vyrobených vzorků extrahováno asfaltové pojivo dle EN 12697-3. Extrakce byly prováděny pomocí rotačního destilačního vakuového zařízení. Na extrahovaných pojivech byla stanovena penetrace dle ČSN EN 1426 a bod měknutí dle ČSN EN 1427 v průběhu zrání EAC směsi. Vlastnosti extrahovaných pojiv v čase jsou zobrazeny na obrázku 97. Výsledky jsou poněkud překvapující. V prvním týdnu je znovuzískané pojivo měkčí než původní pojivo, ze kterého byla asfaltová emulze vyrobená. Následně dochází k rapidnímu tvrdnutí pojiva. Tento jev je jistě způsoben preferenční vazbou pojiva na drobné kamenivo, přičemž je vytvořena malta bohatá na pojivo, což vysvětluje flexibilní chování směsi. Velmi tenká vrstva pojiva na hrubém kamenivu umožňuje právě rychlou oxidaci [Serfass 2011]. Zkoumaný vývoj empirických vlastností pojiva plně koreluje s výsledky provedenými v laboratoři a in-situ.



Obrázek 97: Empirické vlastnosti pojiva v průběhu zrání

Emulzní asfaltové betony jsou vícefázovým systémem mnoha komponent, z nichž některé mají komplikovanou vnitřní strukturu s vysokou teplotní citlivostí. V základu se jedná o komponenty nepravidelných zrn kameniva s mírně vyšším obsahem pojiva a malým podílem objemu vyplněnými vzduchovými mezerami. I přes složitou strukturu může být chování materiálu popsáno aplikací teorie viskoelastivity [Collop 1995; Ferry 1980; Tschoegl 1989; Underwood 2011; Zou 2010].

Jedním z lineárně viskoelastických parametrů, které byly měřeny, jsou komplexní moduly v tahu za ohybu. Dynamické komplexní moduly byly naměřeny metodou 4PB-PR dle ČSN EN 12697-26 v rozsahu teplot  $-20$  až  $+27$  °C a frekvencí od 0,1 do 40 Hz. Komplexní křivky byly vytvořeny metodou časově teplotní superpozice posunem v horizontální rovině k zjištění teplotní závislosti reologického chování materiálu a rozšíření časového frekvenčního rozsahu při dané teplotě. Pro popis posunu v horizontální rovině byla použita Williams-Landel-Ferry rovnice o parametrech uvedených v tabulce 68 a 69 pomocí programu IRIS Rheo Hub [Žák 2014] pro směsi EAC 11 navržené pro zkušební úsek, tak i pro směs  $E_{CZ}$  a  $E_{FR}$  z předchozí kapitoly (taktéž EAC 11). Jako referenční teplota byla zvolena  $T_{ref} = 15$  °C.

WLF- $E_{CZ}$ 1 měsíc zrání			WLF- $E_{CZ}$ 6 měsíců zrání			WLF - $E_{FR}$ 1 měsíc zrání		
C1	100,00	(K)	C1	100,00	(K)	C1	100,00	(K)
C2	1393,97	(K)	C2	1384,53	(K)	C2	1315,20	(K)

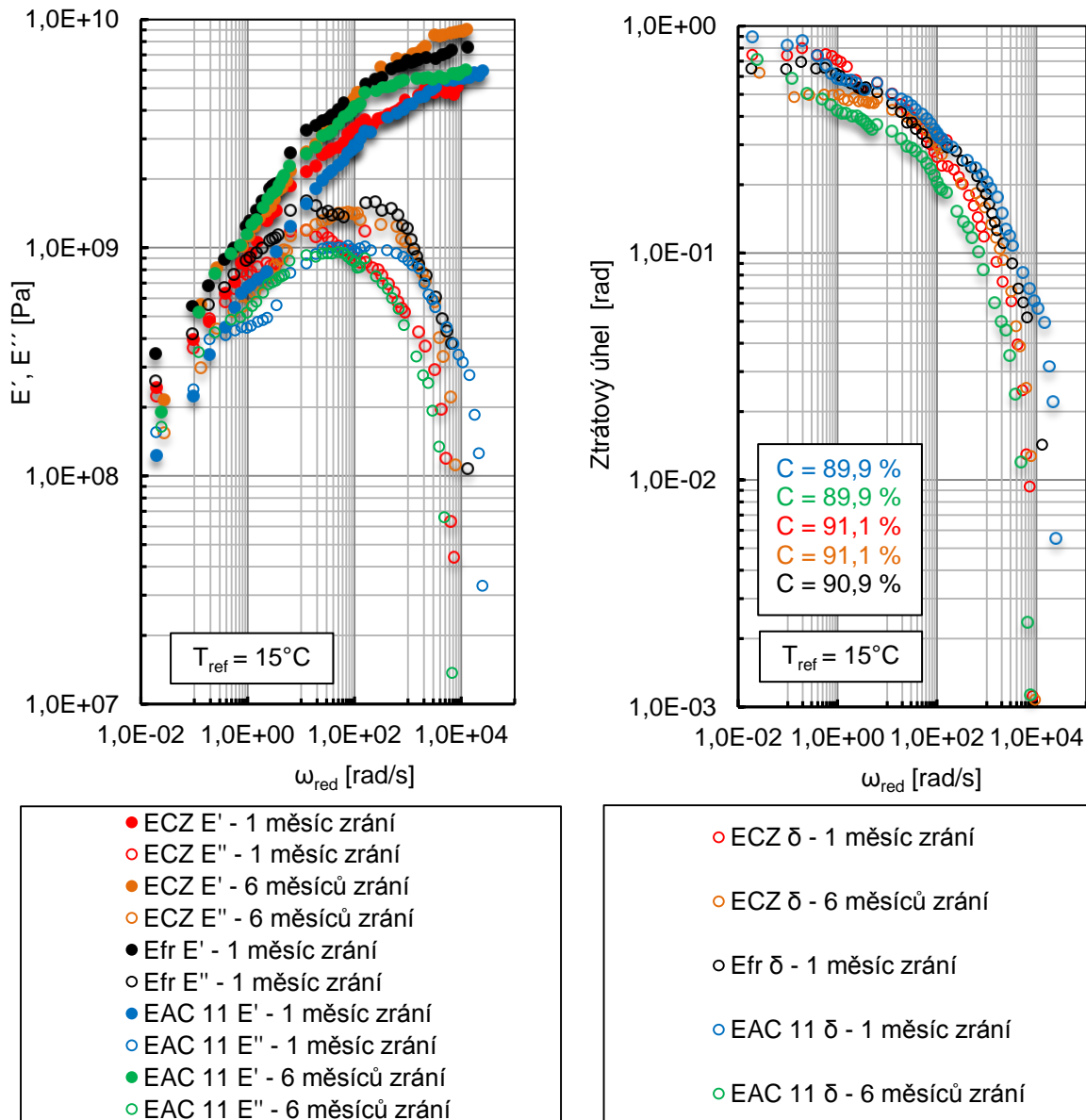
Tabulka 68: Parametry posunu v horizontální rovině dle WLF

WLF-EAC 11 1 měsíc zrání			WLF-EAC 11 6 měsíců zrání		
C1	100	(K)	C1	100	(K)
C2	1218,46	(K)	C2	1489,93	(K)

Tabulka 69: Parametry posunu v horizontální rovině dle WLF

Podíváme-li se na komplexní křivky (obrázek 98) zprava doleva, je patrné, že v oboru nejnižších zkoušených teplot a nejvyšších frekvencí má materiál tendenci se chovat téměř elasticky. Přechod od viskoelastického chování k elastickému je zjevně patrný z posledních naměřených hodnot klesající imaginární části komplexní křivky. Se vzrůstající frekvencí reálná část komplexní křivky postupně roste, s tím, že její derivace postupně

klesá, kdy v posledních hodnotách dosahuje téměř 0. Tento jev koreluje s přechodem vlastností materiálu do elastické oblasti a dosažení modulu rovnováhy  $E_e$  [Ferry 1980; Kim 2008]. Při poklesu redukované frekvence od maximální hodnoty na pravém konci grafu fázový úhel velmi rychle roste. Během třech měřených teplot stoupne z hodnoty blízké nule až na cca  $50^\circ$ . Ze změny fázového úhlu je tedy patrné, že asfaltová směs hutněná za studena je vysoce termo-mechanicky citlivý materiál [Tschögl 1989].



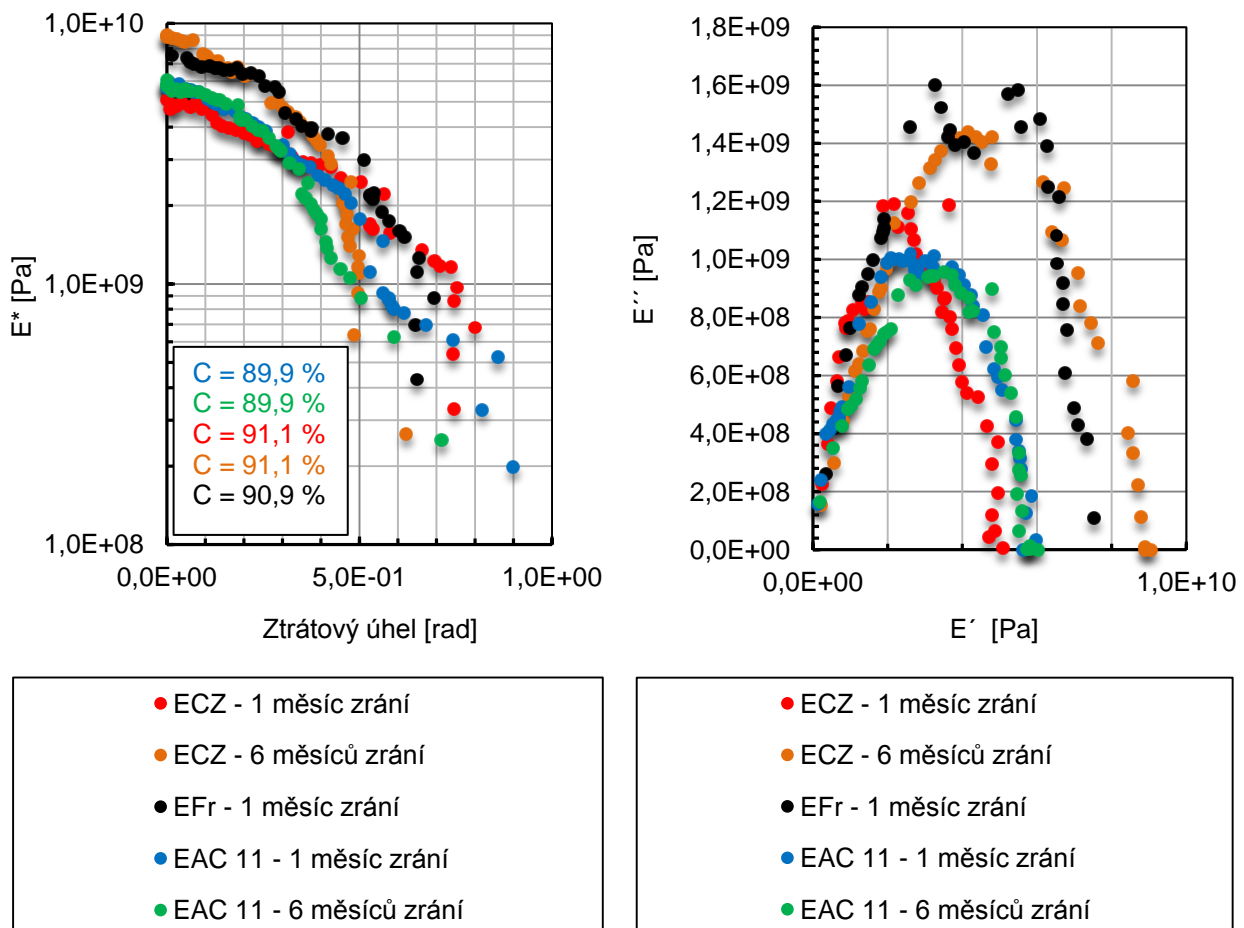
Obrázek 98: Komplexní (směrná) křivka - elastický a ztrátový modul, ztrátový úhel,  $T_{ref}=15^\circ\text{C}$

Z obrázku 99 je patrný vliv zrání EAC směsi v podobě přechodu k více elastickému chování, respektive výrazný pokles fázového úhlu při nízkých frekvencích a vyšších teplotách. Tento posun je méně patrný u směsi EAC 11 navržené pro zkušební úsek. Lze se domnívat, že je to buď způsobeno vlivem zhutnění, respektive pokud se vrátíme k obrázku 83 a 94 s tím, že směs byla zhutněna na segmentovém hutnicím zařízení dle ČSN EN 12697-33 na požadovaný stupeň zhutnění při návrhu  $C = 89,9 \%$  (statický tlak)

oproti  $C = 91,2 \%$  (gyrátor). Stupeň ztuhnutí je zejména pro možnost mezilaboratorního porovnávání EAC směsí mezi výzkumnými týmy, které používají odlišné postupy při návrhu, ale hlavně pro možnost porovnání a sledování vlastností směsí in-situ a v laboratoři, zásadní parametr.

Nebo je tento pokles fázového úhlu zapříčiněn pravděpodobně intenzivnějšími změnami v asfaltovém pojivu v průběhu zrání u směsi  $E_{CZ}$ . Dle [Shiea 1992] při testování jednotlivých vzorků emulzních asfaltových směsí docházelo k velice rozdílným změnám v chemickém složení emisí těkavých látek (VOC) při destilačním testu. Tyto změny pravděpodobně zapříčinil vliv oxidace a termální degradace pojiva během stárnutí (porovnání - čerstvá směs, odběry z vozovky 2, 4, 6 a 10 let) ve vozovce. Nicméně tento výše popsáný jev je obtížné z dosažených výsledků interpretovat.

Dále na tomto obrázku je jasně patrný rozdíl mezi  $E_{CZ}$  a  $E_{FR}$ , kde směs  $E_{FR}$  s upravenou emulzí vykazuje více elastické chování v rozsahu měřených teplot a frekvencí zatížení než směs  $E_{CZ}$  s asfaltovou emulzí používanou převážně pro recyklace za studena, což je v rozporu s pevnostními parametry uvedenými v tabulce 47.



Obrázek 99: Blackův a Cole-Cole diagram

Další z lineárně viskoelastických parametrů, které byly měřeny, jsou komplexní moduly naměřené v axiálním tlaku dle [NCHRP 1-37A Draft Test Method DM-1-2002] v rozsahu teplot  $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$  až  $+40 \text{ } ^\circ\text{C}$  a frekvencí od 0,5 Hz do 40 Hz. Měření bylo prováděno na přístroji UTM. Zkušební vzorky pro tuto zkoušku byly vyrobeny na gyrátoru. Průměr zkušebních vzorků byl 100 mm a výška z technických důvodů pouze 140 mm oproti požadovaným 150

$\pm 2,5$  mm. Při testování byly použity tři zkušební vzorky se dvěma LVDT sondami na každý vzorek.

Komplexní křivky byly vytvořeny metodou časově teplotní superpozice posunem v horizontální rovině k zjištění teplotní závislosti reologického chování materiálu a rozšíření časového frekvenčního rozsahu při dané teplotě. Pro popis posun v horizontální rovině byla použita Williams-Landel-Ferry rovnice o parametrech uvedených v tabulce 70 a 71 pomocí programu IRIS Rheo Hub [Žák 2014] pro směsi EAC 11 navržené pro zkušební úsek tak i pro směs  $E_{CZ}$  a  $E_{FR}$  z předchozí kapitoly (taktéž EAC 11). Jako referenční teplota byla zvolena  $T_{ref} = 10$  °C.

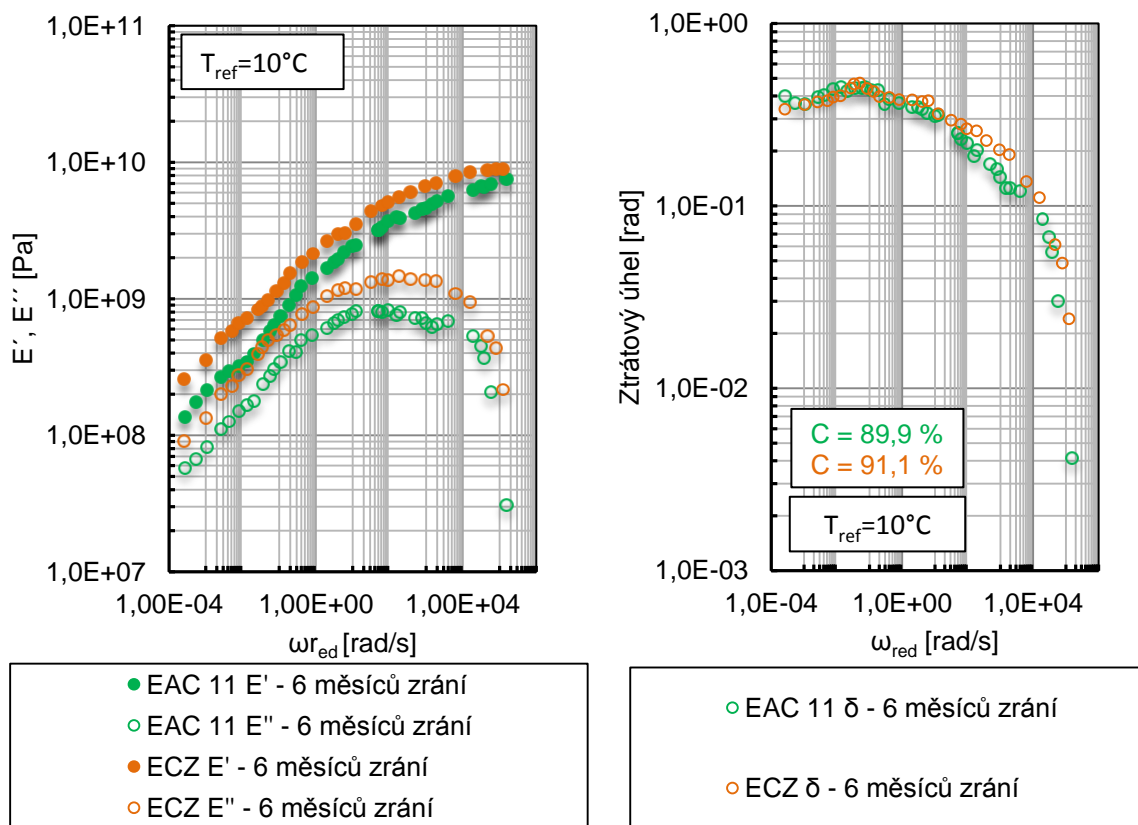
WLF-ECZ		
6 měsíců zrání		
C1	100	(K)
C2	720,51	(K)

Tabulka 70: Parametry posunu v horizontální rovině dle WLF směsi  $E_{CZ}$

WLF-EAC 11		
6 měsíců zrání		
C1	100,00	(K)
C2	720,51	(K)

Tabulka 71: Parametry posunu v horizontální rovině dle WLF směsi EAC 11

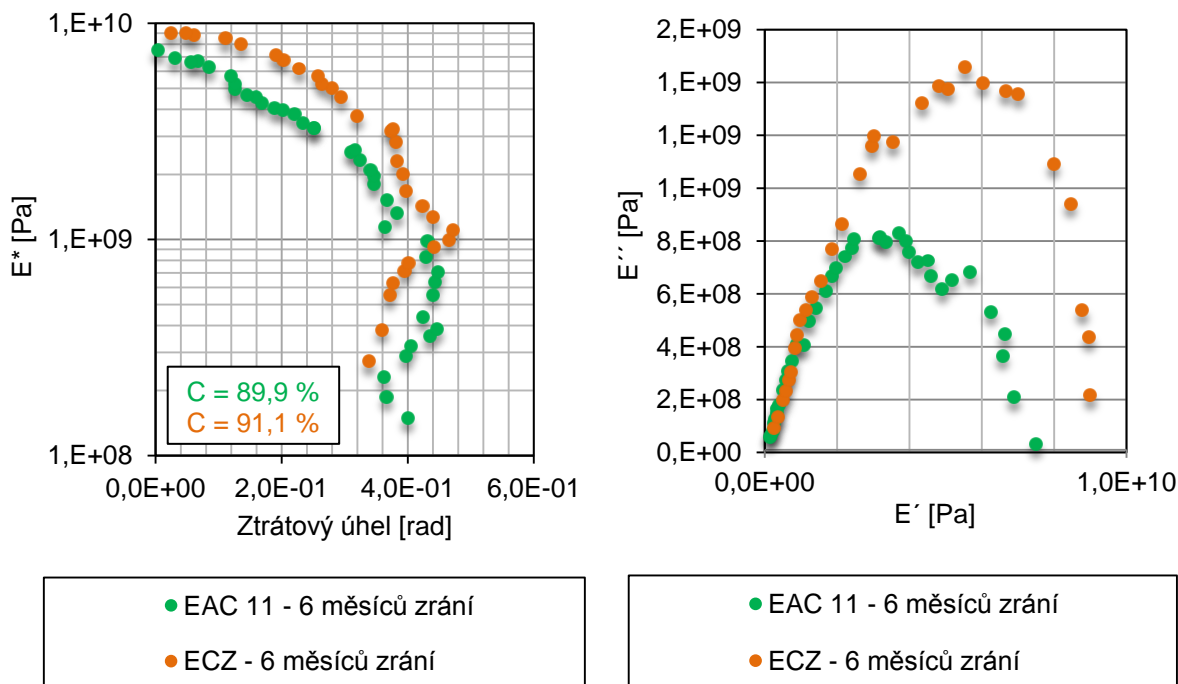
Podíváme-li se na komplexní křivky (obrázek 100) zprava doleva, je patrné, že v oboru nejnižších zkoušených teplot a nejvyšších frekvencí má materiál tendenci se chovat téměř elasticky. Přechod od viskoelastického chování k elastickému je zjevně patrný z posledních šesti naměřených hodnot klesající imaginární části komplexní křivky. Se vzrůstající frekvencí reálná část komplexní křivky postupně roste, s tím že její derivace postupně klesá, kdy v posledních hodnotách dosahuje téměř 0, tento jev koreluje s přechodem vlastností materiálu do elastické oblasti a dosažení modulu rovnováhy [Ferry 1980; Kim 2008]. Fázový úhel pak velmi rychle roste a dosahuje během třech měřených teplot hodnot od 0° do cca 30°. Komplexní modul tuhosti směsi  $E_{CZ}$  při 10 °C a frekvenci 10 Hz je 5017 MPa po 6ti měsících zrání na vzduchu při laboratorních podmínkách. Komplexní modul tuhosti směsi EAC 11 navržené pro zkušební úsek při 10 °C a frekvenci 10 Hz je 2270 MPa po šesti měsících zrání na vzduchu při laboratorních podmínkách.



Obrázek 100: Komplexní (směrná) křivka - elastický a ztrátový modul, ztrátový úhel,  $T_{ref}=10^{\circ}\text{C}$

Z dále uvedeného Blackova diagramu (viz obrázek 101) je patrné, že nízký fázový úhel při vysokých frekvencích a nízkých teplotách dokazuje elastické vlastnosti EAC směsi, nicméně pro vysoké teploty blíží se k bodu měknutí pojiva ( $54,1^{\circ}\text{C}$  po 180 dnech zrání) a nízké frekvence, přičemž v tomto okamžiku začíná dominovat pružná struktura kameniva a fázový úhel klesá. Toto potvrzuje termomechanickou citlivost EAC směsi. Pokud se podíváme na Cole-Cole diagram a budeme předpokládat, že směsi jsou velmi podobné svojí formulací. Potom lze diskutovat opět vliv zhuštění směsi nebo vliv stárnutí pojiva.





Obrázek 101: Blackův a Cole-Cole diagram

### Lomová houževnatost

Jednoduchá zkouška tříbodového ohybu půlkruhového tělesa (Semi-Circular Bending test) byla vybrána, protože nabízí velkou flexibilitu, pokud jde o opakovatelnost, konzistenci a jednoduchost odhadu lomové houževnatosti asfaltových směsí, avšak s distinktivními omezeními [Pérez-Jiménez 2013].

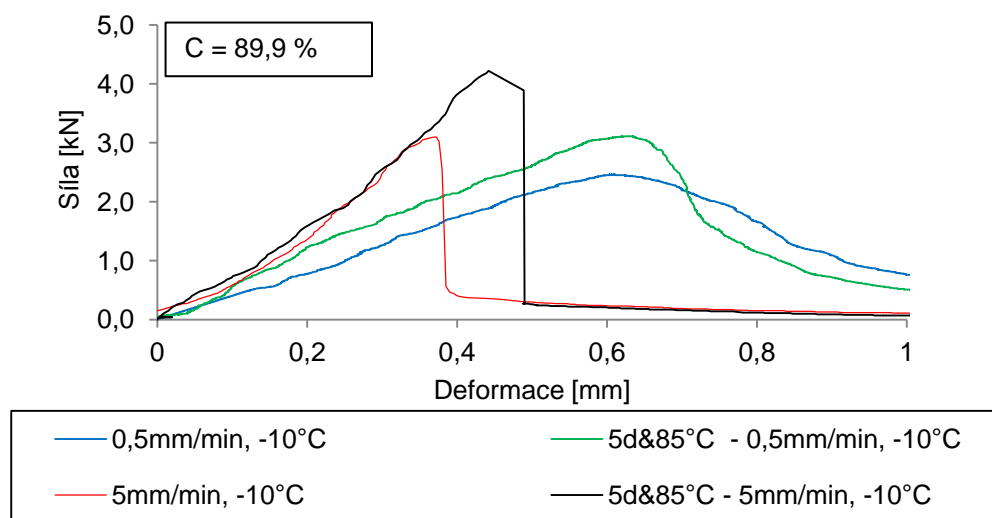
Půlválcové zkušební těleso, s vrubem uprostřed, bylo monotonicky zatěžováno ohybem ve třech bodech tak, že střed spodního líce zkušebních těles byl vystaven napětí v tahu. Průběh vlastního testu byl prováděn dle ČSN EN 12697-44. Rychlost zatěžování zkušebních těles probíhal ve dvou módech, respektive při konstantní rychlosti 5,0 a 0,5 mm/min, přičemž byla zaznamenávána (ALMEMO 2890-9) síla a svislý posun. Testování bylo prováděno při teplotách  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  v rámci koncepce LELM [Marasteanu 2004]. Rozměry zkušebních těles byly oproti požadavkům normy modifikovány:

- Výška  $50,0 \pm 3,0$  mm;
- Průměr  $101,6 \pm 0,5$  mm;
- Tloušťka  $50 \pm 1,0$  mm;
- Vrub
  - Délka  $10,0 \pm 0,5$  mm;
  - Šířka  $0,65 \pm 0,35$  mm.

K testování byla zvolena emulzní asfaltová směs EAC 11 s odlišnými způsoby zrání. Zkušební tělesa byla rozdělena dle způsobu zrání s důrazem na výslednou tuhost vlivem stárnutí:

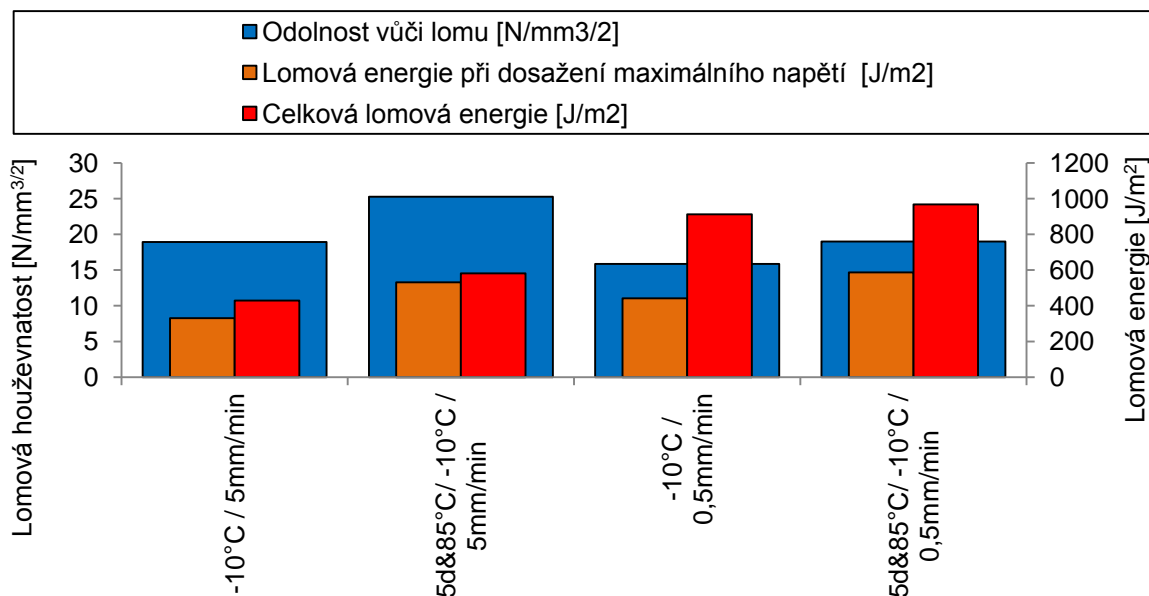
- 28 dní zrání na vzduchu při teplotě  $(20 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- 23 dní zrání na vzduchu při teplotě  $(20 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$  + 5 dní termo-oxidativní stárnutí při teplotě  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $5\text{d}@85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dle AASHTO R30-02 [Bell et al 1994].

Analýza a charakterizace procesu vzniku trhlin a parametry odolnosti proti šíření trhlin v asfaltových směsích jsou důležité pro správné postupy návrhu a predikce životnosti konstrukce netuhých vozovek. Avšak tyto vlastnosti v návrhových přístupech nejsou dosud přímo zohledněny. Cílem tohoto experimentu je určit a porovnat lomové vlastnosti směsi EAC 11 v zatěžovacím módu I. Srovnání je založeno na dvou lomových parametrech, respektive lomové houževnatosti a lomové energii. Na obrázku 102 jsou zobrazeny pracovní diagramy směsi EAC 11 dle okrajových podmínek zrání a zatěžování.



Obrázek 102: Pracovní diagram - Odolnost vůči šíření trhliny EAC 11

Z průběhu síly a deformace byla stanovena lomová houževnatost, celková lomová energie a lomová energie při maximálním napětí. Z výsledků uvedených na obrázku 103 je patrné, že EAC směsi nelze z hlediska šíření trhliny při teplotě  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  charakterizovat jako křehký materiál, protože z cela nepozbyl viskózní vlastnosti. Poměrně zajímavé je, že u EAC směsí není hlavním faktorem ovlivňující odolnost vůči šíření trhliny rychlost náběhu zatížení. K obdobnému závěru při testování směsí CAEM došel také [Ormsby 2011]. Z hlediska lomové houževnatosti nemá vliv ani zestárlé pojivo ve směsi, ale poměrně výrazný vliv má na potřebnou energii pro úplné zlomení zkušebního vzorku.

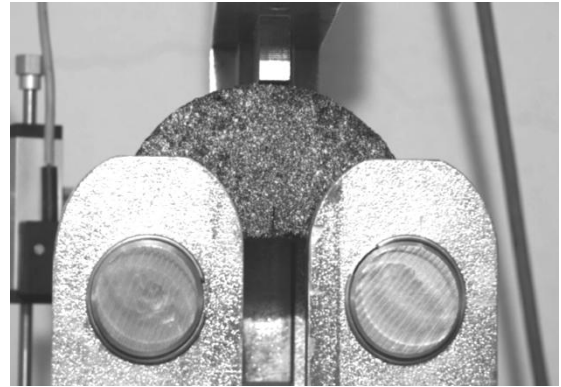
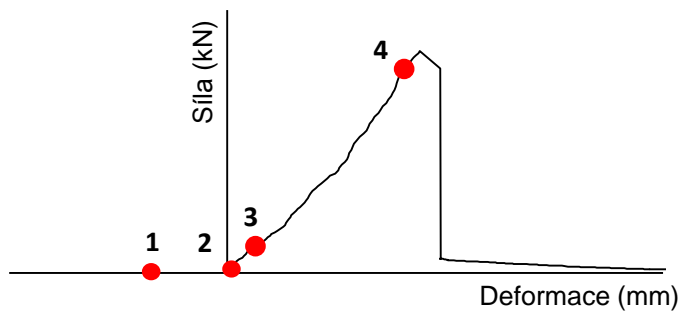


Obrázek 103: Parametry lomové houževnatosti směsi EAC 11

Paralelně při testování odolnosti vůči šíření trhliny byl sledován průběh deformace a růst trhliny při zatěžování metodou DIC. Hlavním cílem DIC bylo nalézt shodné body referenčního obrazu a obrazu po deformaci. Toho bylo dosaženo tím, že byly sledovány malé podmnožiny referenčního obrazu, čímž bylo možno určit jejich polohu a deformaci v obrazu. Výstupem je rastr s informacemi o posunutích a deformacích s ohledem na referenční konfiguraci obrazu. Deformace a posunutí byly redukovány nebo interpolovány tak, aby vytvářely kontinuální pole deformace a posunutí.

Digitální záznam obrazu v průběhu zkoušky se provedl s vysokým rozlišením kamerou Canon 70D nastavenou na záznam v 0,5 sekundových intervalech. ISO citlivost na světlo byl nastaven na 100, protože bylo k dispozici silné umělé osvětlení. Dokonalé osvětlení umožnilo krátkou dobu expozice (1/125 s) a nízké clonové číslo nastavené na f/8, které bylo udržováno konstantní pro všechny snímky v sérii. Aby se minimalizoval vliv zkreslení čočky, vzdálenost mezi kamerou a pozorovaným povrchem byl přibližně 1 m a ohnisková vzdálenost (zoom) byla nastavena na 55 mm. Zkušební tělesa byla opatřena černobílým rastrem, jak je uvedeno na obrázku 104. Vzdálenost mezi jednotlivými pixely je 0,062893 mm.

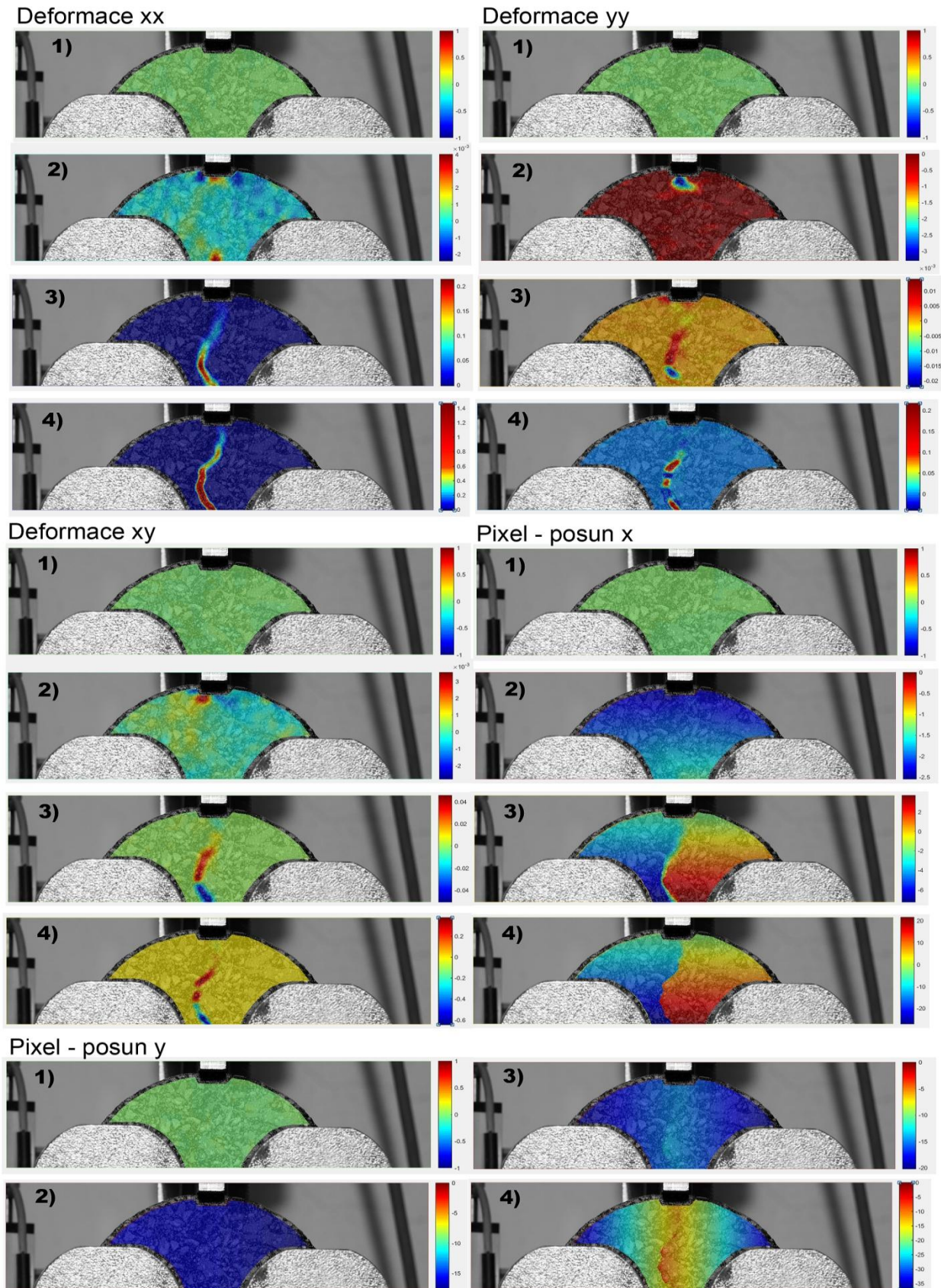
Vyhodnocení DIC provedl Ing. Václav Nežerka Ph.D. v softwaru Ncorr\_post. Ncorr\_post je nástavbová aplikace pro MATLAB<sup>®</sup> přizpůsobená pro následné zpracování, vizualizaci a export dat softwaru Ncorr Digital Image Correlation (DIC), který vyvinuli Justin Blaber a Antonia Antoniou na technologickém institutu v Georgii.



Obrázek 104: Ilustrace sledovaného rastru deformací a posunutí v rámci zatěžování při zkoušce odolnosti proti šíření trhliny / úprava zkušebního tělesa

Byl sledován zkušební zestárý vzorek (5d@85°C) zatěžovaný rychlostí 5 mm/min. při teplotě -10 °C. Výsledný rastr deformací a posunutí v souřadnicovém systému je uveden na obrázku 105. Jednotlivé obrazy s rastem deformací a posunutí je vztažen k obrázku 104, kde jsou vyznačeny body, které odpovídají okamžiku záznamu obrazu.





Obrázek 105: Výsledný rastr deformací a posunutí - EAC 11 (-10°C, 5 mm/min., 5d@85°C)

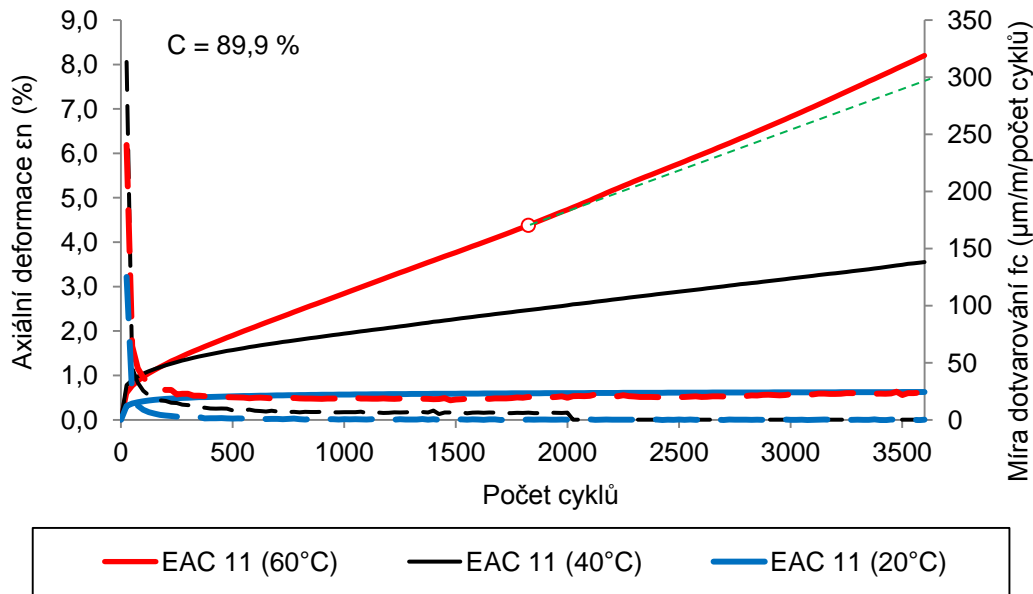
Na obrázku 105 je zobrazen rastr posunů v souřadnicovém systému (xx, yy, xy) ve vybraných napjatostních stavech. Výsledky ukázaly, že šíření trhlin lze snadno zaznamenat pomocí systému digitální korelace obrazu. Digitální obrazová korelace se zdá být jedním z vhodných nástrojů při analýze plného dvourozměrného pole posunutí/deformace při analýze vzniku a šíření trhlin v asfaltových směsích, ale může sloužit také jako porovnávací metoda pro prediktivní modelování propagace trhlin a mikrotrhlin v asfaltových směsích dle [Birgisson 2008].

Další metodou, která byla použita pro hodnocení odolnosti směsi EAC 11 proti vzniku trvalých deformací, je cyklická zkouška v tlaku dle ČSN EN 12697-25. Testování bylo prováděno při teplotách 20, 40 a 60 °C. Výroba zkušebních vzorků byla provedena na gyrátoru (SUPERPAVE Gyratory Compactor Troxler 4140) v módu řízené výšky tak, aby byla dosažena zhutněná objemová hmotnost dle návrhu. Rozměry zkušebních těles byly modifikovány dle [Thanaya 2009], respektive průměr 100 mm a výška v intervalu 62-65 mm. Zkušební sestava je zobrazena na obrázku 106.



Obrázek 106: Zkušební sestava - cyklická zkouška v tlaku

Bylo použito 5 zkušebních těles pro každou testovanou teplotu. Zkušební tělesa byla testována po šesti měsících zrání při teplotě  $(20 \pm 2)$  °C při laboratorních podmínkách. Parametry zatěžování jsou popsány v kapitole Cyklické dotvarování - cyklická zkouška v tlaku. Vyhodnocení zkoušky je uvedeno na obrázku 107 v podobě narůstající axiální deformace a míry dotvarování.



Obrázek 107: Cyklické dotvarování EAC 11 - axiální deformace a míra dotvarování

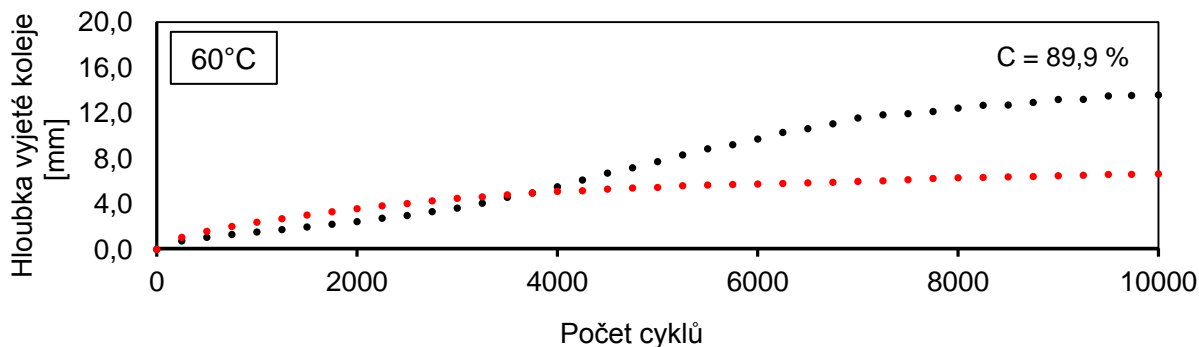
Z obrázku 107 je patrný výrazný nárůst trvalé deformace zejména při vyšší teplotě, obdobně jako je tomu u zkoušky poježdění kolem. Dalším parametrem vyjadřujícím odolnost proti trvalým deformacím je modul dotvarování (viz tabulka 72).

Směs	Teplota (°C)	Modul dotvarování (MPa)
EAC 11 / 6 měsíců zrání	60	134
	40	310
	20	1760

Tabulka 72: Modul dotvarování směsi EAC 11

Dále byla provedena zkouška opakovaným poježděním kolem na malém zkušebním zařízení při teplotě 60 °C dle ČSN EN 12697-22 + A1. Zkušební tělesa byla zatížena 10.000 cykly pojezdů kola při frekvenci pojezdu 0,44 Hz. Z dosažených výsledků je patrné (tabulka 73, obrázek 108), že došlo k výrazným trvalým deformacím u směsi testované po 14ti dnech zrání. Nicméně dle výše uvedených zjištění je vliv zrání na vývoj trvalých deformací významný. Vliv je patrný především v nižším přírůstku trvalé deformace, ale i v celkové velikosti vyjeté koleje (viz tabulka 73). Jelikož jsou tyto směsi vhodné pro pozemní komunikace s nižším dopravním zatížením a lze předpokládat výraznou fluktuaci jízdnicích stop a pokud vezmeme v úvahu okrajové podmínky zkoušky, lze předpokládat, což je potvrzeno i z pozorování chování vrstev EAC ve Francii dle [Lesueur 2000], výrazně lepší chování in-situ.





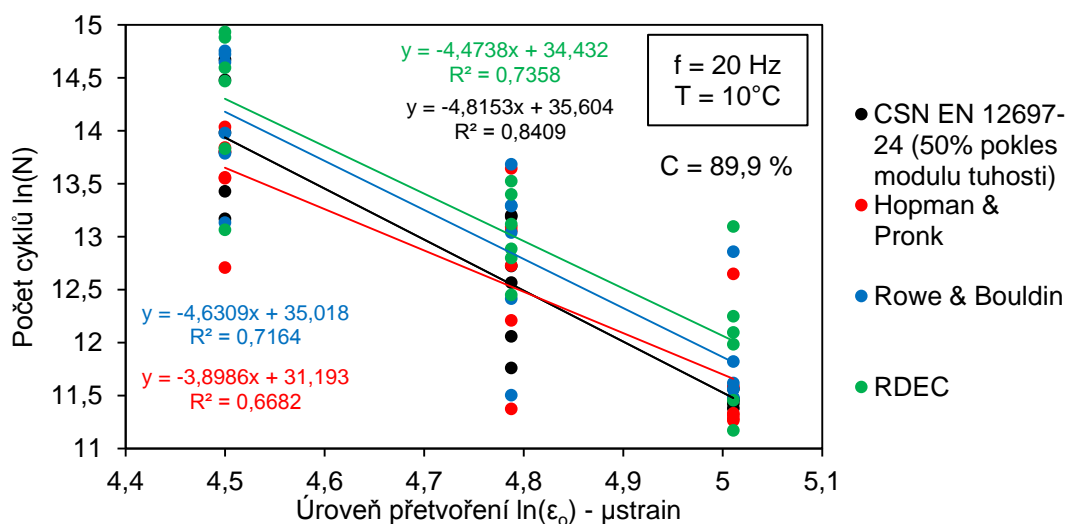
- EAC 11, 14 dní zrání, vzduch, 40%-70% vlhkost, 20°C
- EAC 11, 180 dní zrání, vzduch, 40%-70% vlhkost, 20°C

Obrázek 108: Hloubka vyjeté koleje na malém zkušebním zařízení

Směs	EAC 11
	14 dní zrání, vzduch, 40-70% relativní vlhkost, 20 °C
	180 dní zrání, vzduch, 40-70% relativní vlhkost, 20 °C
WTS <sub>AIR</sub> [mm]	1,17
PRD <sub>AIR</sub> [%]	34,1

Tabulka 73: Parametry zkoušky pojižděním kolem

V tabulce 74 a obrázku 109 a 110 jsou uvedeny základní únavové charakteristiky zkoušené směsi EAC 11, vyhodnocené dle výše uvedených postupů, tj. průměrná velikost přetvoření odvozená z únavové přímky pro  $10^6$  cyklů  $\epsilon_6$ , parametr sklonu únavové přímky  $A_1$  a „koeficient kvality“  $\gamma_{N,K,P,\text{úp}}$ , který je přesným vyjádřením svislé vzdálenosti od regresní přímky k dolní a horní mezi konfidenčního/predikčního 95 % intervalu spolehlivosti. Rozdíl mezi výpočtem podle ČSN EN 12697-24 a výpočtem pomocí statistické analýzy jednoduchou lineární regrese je uveden v tabulce 74 a 75.

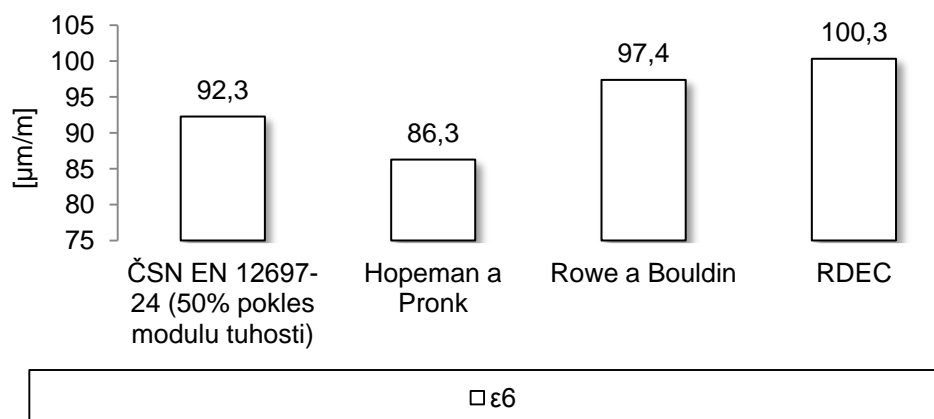


Obrázek 109: Vyhodnocení únavové zkoušky

Získané výsledky naznačují (viz obrázek 110 a tabulky 74 a 75) předchozí závěry v předcházející kapitole, kde byly stanoveny parametry únavy pro směs E<sub>CZ</sub>. Porovnání postupů uvedených v této práci, respektive postup dle ČSN EN 12697-24 a dle TP 208



oproti čistě statistickému vyhodnocení na základě jednoduché lineární regrese, je proveden pouze z důvodů, aby byl patrný rozdíl při volbě závislé a nezávislé proměnné.



Obrázek 110: Vyhodnocení  $\epsilon_6$  pro  $10^6$  zatěžovacích cyklů na základě regresní analýzy

	B	$N_{6,5\%}$ predikční interval	$N_{6,5\%}$ konfidenční interval	$Y_{N,Kup}$	$Y_{N,Pup}$
ČSN EN 12697-24 (50% pokles modulu tuhosti)	4,8	351070	701583	1,43	2,84
Hopman & Pronk	3,9	246369	581181	1,72	4,09
Rowe & Bouldin	4,6	237668	648113	1,54	4,21
RDEC	4,5	268701	689351	1,45	3,72

Tabulka 74: Vyhodnocení únavových parametrů na základě regresní analýzy

ČSN EN 12697-24 (50% pokles modulu tuhosti)	B	$\epsilon_{6,5\%}$	$Y_{up}$
	4,8	75,2	1,23

Tabulka 75: Vyhodnocení únavových parametrů dle ČSN EN 12697-24

### 13.4. Porovnání energetické náročnosti vybrané studené technologie

Tato část disertační práce se zabývá analýzou energetické náročnosti výstavby silnic, což je jedna z hlavních otázek udržitelného rozvoje dopravní infrastruktury. Hlavní prioritou je porovnat jednotlivé zmíněné technologie při výstavbě zkušebního úseku silnice III/44441 na základě energetické náročnosti. V prvním případě byla porovnána energetická náročnost asfaltové směsi ACO 11 vs. EAC 11 pokládané do obrusné vrstvy. V druhém případě byla porovnávána technologie recyklace za studena s použitím cementu oproti technologii recyklace za studena s použitím mechanicky aktivovaným FPP. Do úvahy byl vzat pouze proces od získávání surovin přes výrobní proces včetně fáze výstavby. Energetická náročnost fáze údržby a konce životnosti zde není zahrnuta z důvodu specifického porovnání pouze konkrétních technologií a specifických konstrukčních vrstev ve vozovce.

Data pro analýzu energetické náročnosti byly získány ze strany příslušných organizací či specializovaných agentur Eurobitume, Athena, Canadian Portland Cement Association, Swedish Environmental Institute, IVL [Ahlmán 2015, Grabowski 2010, Goyer 2012, Chehovits 2010, Chappat & Bilal 2003, Stripple 2001, Eurobitume 2012, Dorchies 2008].

Při určování spotřeby energie, respektive energetické náročnosti výstavby pozemních komunikací, je potřeba určit všechny jednotlivé součásti tohoto procesu. V první fázi je řešeno získání základních surovin, jako je kamenivo a jednotlivá pojiva. Energetická

náročnost výroby kameniva zahrnuje těžbu, dopravu, drcení a třídění. Spotřeba energie pro výrobu asfaltového pojiva zahrnuje těžbu ropy, dopravu a rafinaci. U asfaltových emulzí je nutné zahrnout další procesy a suroviny pro výrobu, dopravu, ohřev, provoz čerpadel a koloidního mlýnu. Výroba cementu zahrnuje těžbu vápence, korekčních a pomocných surovin, jejich drcení mletí a homogenizaci. Následující fáze je pak výpal slínku a po vychladnutí jeho mletí. V případě mechanicky aktivovaného fluidního popílku je energetická náročnost dána především dopravou a mletím, výrobu nelze brát v potaz, protože vzniká jako druhotný produkt při výrobě elektrické energie a tepla.

Výroba výše uvedených směsí zahrnuje všechny kroky týkající se manipulace, skladování, sušení, míchání a přípravy materiálů pro vlastní pokládku. Energetická náročnost se liší v závislosti na konkrétním materiálu nebo typu výrobku, ale také v závislosti na typu výrobního zařízení. Na obrázku 111 jsou specifikovány místa výrobních zařízení, lomů a pozice zkušebního úseku silnice III/44441.



## LEGENDA

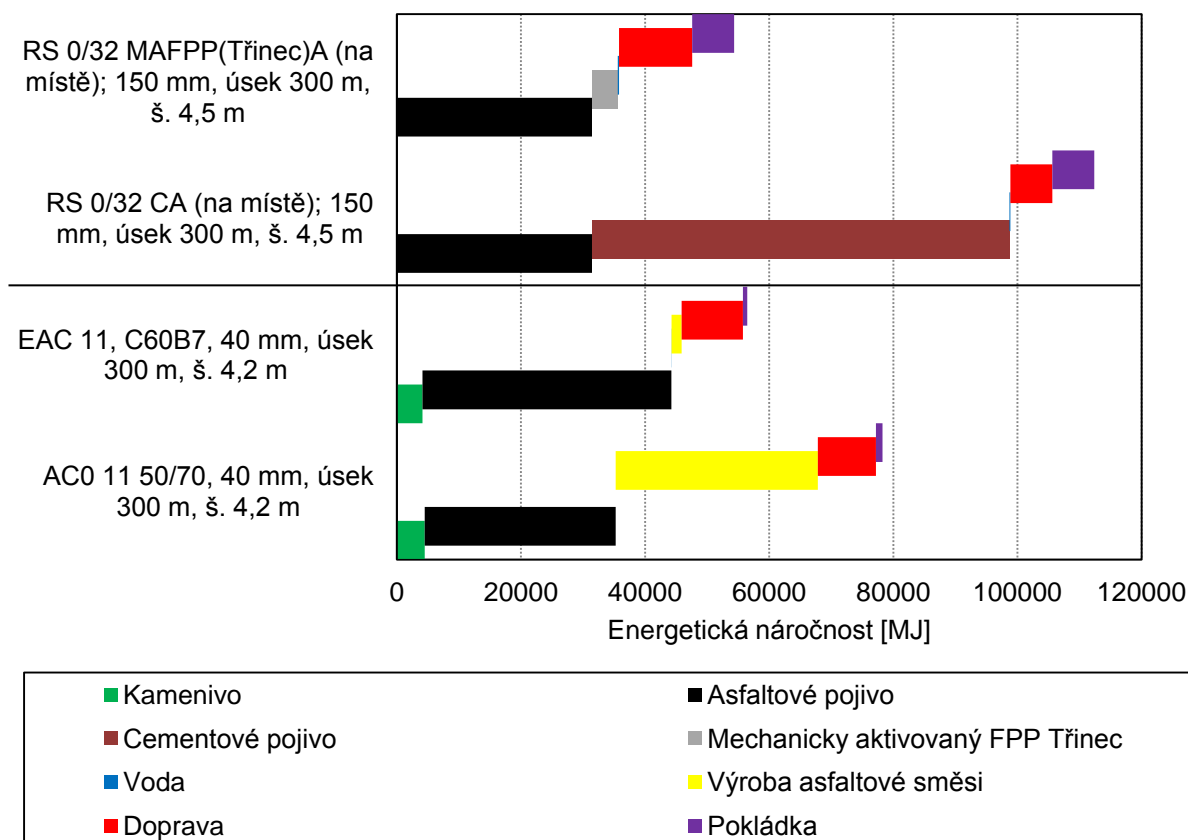
- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| 1 - výrobní zařízení KMA 200  | 5 - teplárenský provoz (Třinec)          |
| 2 - zkušební úsek (III/44441) | 6 - obalovna Bruntál                     |
| 3 - kamenolom Valšov          | 7 - provozovna (mechanická aktivace VEP) |
| 4 - kamenolom Bílčice         |  |

Obrázek 111: Situační plán - výstavby zkušebního úseku silnice III/44441

Pokládka a hutnění se skládají ze všech činností nezbytných pro instalaci materiálů nebo výrobků do konstrukce vozovky. To zahrnuje kontrolu provozu, příprava místa a stavebních strojů, pokládka, zhutňování, dokončení, čištění, likvidace odpadu atd. Technologie recyklace za studena s cementem a asfaltovou emulzí zahrnuje procesy jako rozpojení stávajících vrstev, dávkování pojiv, homogenizaci, zarovnání a hutnění. Samozřejmě nesmí být opomenuta veškerá přeprava, ať už materiálu nebo strojního zařízení.

Na obrázku 112 je stanovena orientační energetická náročnost technologie recyklace za studena s použitým odlišným minerálním pojivem a technologie emulzních asfaltových směsí oproti technologii obalování kameniva asfaltovým pojivem za horka. Stanovení energetické náročnosti je založeno na reálných podmínkách výstavby zkušebního úseku pozemní komunikace III/44441. V případě mechanicky aktivovaného FPP (MAFPP) byla

vybrána nejbližší provozovna Oldřichovice, kde se vyrábí pojivo Dastit<sup>®</sup>. Tato provozovna odebírá VEP z Třinecké elektrárny, která je vybavena fluidním kotlem.



Obrázek 112: Energetická náročnost vybraných technologií

### 13.5. Uplatnitelnost reaktivních aditiv

Potenciál uplatnitelnosti mechanicko-chemicky aktivovaného FPP Plzeň byla prověřena analýzou směsi EAC 11. Složení testované směsi odpovídá referenční směsi EAC 11 s tím, že filerová složka byla nahrazena mechanicko-chemicky aktivovaným FPP Plzeň (2,0 %-hm. směsí). Vliv tohoto reaktivního aditiva byl prověřován a testován z hlediska pevnostní a deformačních parametrů směsi vzhledem k referenční směsi. Sledována byla taktéž i vodní citlivost směsi. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 76 a 77.

Směs	Pevnost v příčném tahu @ 15°C - zrání při 18°C					ITSR	Pokles pevnosti v příčném tahu
	7 vzduch	14 vzduch	7 vzduch + 7 voda	28 vzduch	180 vzduch		
EAC 11 - REF	0,74	0,86	0,78	1,02	1,13	90,7	105,3
EAC 11 + mechanicko chemicky aktivovaný FPP Plzeň	0,41	0,54	0,39	0,69	0,71	72,2	95,5

Tabulka 76: Pevnostní parametry a vodní citlivost EAC směsi



Směs	Modul tuhosti @ 15°C (MPa) - zrání při 18°C					Ukazatele poklesu modulu tuhosti (ITMR) (-)
	7 vzduch	14 vzduch	7 vzduch + 7 voda (MPa)	28 vzduch	180 vzduch	
EAC 11 - REF	2029	2208	2137	2570	3527	98,9
EAC 11 + mechanicko chemicky aktivovaný FPP Plzeň	1306	2103	1293	2782	3230	61,3

Tabulka 77: Základní deformační parametry EAC směsi

Z dosažených výsledků je patrné, že aditivace mechanicko-chemicky aktivovaným FPP negativně ovlivňuje testované parametry, nýbrž i vlastní zpracovatelnost směsi. Při výrobě byly patrné problémy s průběhem štěpení asfaltové emulze. Zhutnění muselo být zpožděno o 45 minut od výroby, aby nedocházelo k vytlačování vody a asfaltové emulze. Pokud poznatky porovnáme s výrobou směsi  $E_{CZ}$ , lze předpokládat, že uplatnitelnost reaktivních aditiv musí být prověřena již při návrhu asfaltové emulze.

### 13.6. Závěr

Jedním z hlavních cílů této práce bylo popsat jednotlivé cykly projektu zkušebního úseku, který měl ověřit uplatnitelnost technologie emulzních asfaltových směsí, který probíhal v ČR. Tento projekt měl za úkol, pro potřeby vydání technických podmínek „Asfaltové směsi za studena“, prověřit návrhovou metodiku a získat první zkušenosti s výrobou směsi a následné realizaci in-situ. Z výše popsaného lze uvést, že projekt se podařilo úspěšně realizovat, přičemž získané poznatky se uplatní nejen v předpisové základně, ale i v argumentaci z hlediska doporučení pro zhotovitele. Tento projekt měl řadu problémů, zejména technického charakteru a dalo by se hovořit o celkové nepřipravenosti zhotovitele, ale i takovéto poznatky jsou cenné pro budoucí aplikace této technologie.

Z hlediska postupu při návrhu lze jednoznačně doporučit postup dle obrázku 24 s tím, že zhutnění bude prováděno statickým tlakem 5,0 MPa. Takto zhutněná směs by měla dosahovat mezerovitosti v rozmezí 5-12 %. Z hlediska minimálních pevnostních parametrů by měla být při návrhu stanovena pevnost v příčném tahu po 7mi dnech zrání na vzduchu při teplotě  $20 \pm 2$  °C a vlhkosti 40-70 %. Vodní citlivost by měla být stanovena dle parametru poklesu pevnosti v příčném tahu, který musí být větší než 70 % dle TP 208. Nicméně koeficient citlivosti vůči vodě by bylo potenciálně vhodnější stanovit dle metodiky ČSN EN 12697-12, který lépe charakterizuje směs z hlediska odolnosti vůči vodě než pouhé uložení vzorků na stanovenou dobu do vody, zejména pokud by byla směs použita do obrusných vrstev.

Stanovení optimální vlhkosti směsi musí vycházet již z návrhu asfaltové emulze, respektive musí být do směsi dávkováno takové množství vody, aby bylo dosaženo co nejlepšího obalení kameniva pojivem a bylo dosaženo dostatečně kvalitní adheze. Je na dalším zkoumání a diskuzi, jak nastavit tyto požadavky, protože v současnosti jsou tyto parametry velmi obtížně stanovitelné, byť některé postupy již existují, nicméně tyto postupy jsou velice diskutabilní. Z hlediska optimálního množství vody lze použít modifikovanou Proctorovu zkoušku dle ČSN EN 13286-2.

Dalším problematickým bodem, který je patrný z dosažených výsledků, je evidentně stanovení míry zhutnění při kontrolních zkouškách na hotové vrstvě. Vzhledem k technologické náročnosti této technologie, je nutné kontrolovat míru zhutnění již při pokládce, protože dosažené zhutnění je silně závislé na specifické únosnosti podkladu. Proto je vhodné, než budou získány dostatečné zkušenosti a data, postupovat obdobně jako v případě [Colas 2002], respektive sledovat parametry (volumetrické a fyzikálně-



mechanické) zkušebních vzorků s odlišnou úrovní zhutnění a porovnávat je s daty získanými in-situ. Samozřejmě základem je dodržování technologické kázně.

Z dosažených výsledků v rámci experimentálního testování směsi EAC 11 je patrné, že emulzní asfaltové směsi jsou vývojový materiál. Je nutné poukázat především na problematiku vodní citlivosti, vzhledem ke klimatickým podmínkám v ČR. Studené emulzní směsi jsou vhodné jako podkladní vrstvy pro třídu dopravního zatížení TDZ II až VI, jako ložní vrstvy pro třídu III až VI a jako obrusné vrstvy pro třídu IV až VI. Největší uplatnění EAC směsí je tedy možné zejména na pozemních komunikacích II. a III. třídy, místních a účelových komunikacích.

Konstrukční vrstvy v rámci návrhové metodiky dle TP 170 jsou charakterizovány přetvárnými vlastnostmi (modulem pružnosti a Poissonovým číslem) a odolností proti opakovanému zatěžování (odolností proti únavě). Na základě provedených zkoušek a rešerše literatury byly odvozeny návrhové moduly pružnosti pro EAC. Modul pružnosti při 15 °C lze stanovit hodnotou 2500 MPa pro mezerovitost směsi 5 - 12 % a použité asfaltové pojivo 70/100. Hodnoty  $\epsilon_6, B$  a dílčího součinitele rozptylu únavové zkoušky  $\gamma_{up}$  by bylo velice odvážné definovat na základě dvou provedených únavových zkoušek. Nicméně bychom museli nejprve rozhodnout, zdali ponecháme pro tento typ směsi stejný dílčí součinitel aplikace únavové zkoušky  $\gamma_u = 1,6$  jako pro asfaltové vrstvy hutněné za horka.



#### 14. Závěrečné resumé

V této disertační práci byla představena technologie recyklace za studena, ve které byly ověřovány možnosti uplatnitelnosti specifického druhu vedlejších energetických produktů, konkrétně fluidních popelů a popílků. Prezentované experimentální výsledky posuzují uplatnitelnost FPP ve směsích recyklace za studena z hlediska mechanické odolnosti, stability a environmentálních kritérií. Z mechanického hlediska tento materiál vykazuje potenciál, ať už částečné nebo plné substituce tradičních hydraulických pojiv a to v rozsahu 3 - 15 % hm. směsí. Na druhou stranu stabilitní posouzení vykazuje nevhodné vlastnosti, zejména při dlouhodobém vystavení účinkům vody. Z environmentálního hlediska je uplatnění tohoto pojiva ve směsi recyklace za studena částečně problematické, přičemž v tomto směru je nutná další identifikace rizik spojená s kontaminací okolního prostředí, především podzemních a povrchových vod. Z těchto důvodů využití surového FPP ve směsích recyklace za studena lze doporučit jen za určitých okrajových podmínek. V návaznosti k těmto environmentálním rizikům by se měla vhodně upravit dlouhodobá politika využití druhotných surovin v ČR, zejména pak v podmínkách pro použití do konstrukce a podloží vozovky. V literatuře je popsána celá řada úspěšných staveb s využitím VEP, ale i stavby, ve kterých se vyskytly poruchy či jiné problémy [Mráz 2017]. Opomíjeným souvisejícím tématem je také vícenásobná recyklovatelnost, kterou bude potřeba řešit. Po skončení životnosti již jednou recyklované vrstvy s využitím FPP v konstrukci vozovky bude potřeba se rozhodnout, jak se s tímto recyklovaným materiálem naloží dále a jestli se bude moci znovu využít v plném rozsahu, protože postupné navyšování jemnozrnného materiálu může vést k negativním vlivům na vlastnosti celé vozovky.

K zajištění vyššího rozvoje vedlejších energetických produktů na trhu by mohlo posloužit zavedení určitých opatření, zejména v oblasti administrativního a ekonomického směru, které by zvýšily zájem zpracovatelů o jejich využívání. Nicméně, hlavní směr by měl být ve zvýšení informovanosti v oblasti VEP, jejich možných aplikací, ale také rizik. Dále je nutné mít na paměti energetickou koncepci státu či Evropské unie, respektive v budoucnu očekávaný útlum tradiční výroby elektrické energie, respektive omezení výroby elektrické energie z uhelných elektráren se všemi ekonomickými důsledky ve spojitosti s VEP.

Výzkum v oblasti využití mechanicko-chemicky aktivovaných či jen mechanicky aktivovaných materiálů je motivován jejich ekonomickým a ekologickým potenciálem. Panuje přesvědčení, že mechanicko-chemická aktivace promění odpadní příp. druhotné materiály v surovinu vhodnou pro přidávání do směsí recyklovaných za studena (resp. do hydraulicky stmelovaných směsí) za současného zlepšení jejich vlastností. Odvážnější úvahy hovoří dokonce o možnosti úplné substituce cementu v těchto směsích. Tyto představy jsou jistě velice lákavé, ovšem v případě mechanicky aktivovaného FPP poznatky vyplývající z výsledků uvedených v této práci spíše ukazují, že jeho využití do směsí studené recyklace může způsobit zhoršení z hlediska environmentálního. V jakém rozsahu lze těžko na základě opravdu velmi omezeného rozsahu zkoušek výluhů jen s obtížemi kvantifikovat. Nicméně v současnosti v rámci probíhajícího výzkumu je vyvíjena snaha tyto environmentální rizika minimalizovat či eliminovat. V tomto ohledu je také nutné získat výsledky in-situ, respektive zda jsou simulované laboratorní závěry reálné a odpovídají skutečným podmínkám v konstrukci vozovky.

Na druhou stranu vysokoenergetické mletí jasně prokázalo pozitivní vliv na mechanické vlastnosti a dlouhodobou stabilitu recyklované směsi. Pokud připočteme náklady na úpravu FPP pomocí vysokorychlostního mletí (jakkoli jsou poměrně malé), jeho využití do podkladních vrstev vozovek lze doporučit, jen v případě dobré znalosti vstupů a místních podmínek. Tento závěr není ovšem kýženým výsledkem ve smyslu „uplatnitelnost bez



rizika“. Proto třetím stupněm experimentálního vývoje, v rámci současného výzkumu uplatnitelnosti VEP obecně, jsou směsná pojiva na bázi VEP, včetně jejich mechanické aktivity.

Tato práce tedy popisuje dva stupně vývoje při řešení uplatnitelnosti FPP ve směsích recyklace za studena. První stupeň je použití surového FPP. Druhý stupeň je mechanická či chemická aktivace. Třetí stupeň vývoje v rámci uplatnitelnosti FPP jsou nyní předmětem výzkumu, respektive aktivovaná směsná pojiva na bázi FPP.

Druhá část práce byla zaměřena na technologii emulzních asfaltových směsí. Zde možnosti uplatnění mechanicko-chemicky aktivovaných FPP, ve formě minerální filerové složky za účelem zlepšení vlastností v počátečních zráních, lze kvantifikovat jako méně vhodné řešení. Z dosažených výsledků je patrné, že chemické složení a vlastnosti FPP mohou negativně ovlivňovat proces destabilizace asfaltové emulze, respektive proces štěpení. To má za následek zhoršení výsledných vlastností směsi, ale i její zpracovatelnost. Aktivace mechanicko-chemicky aktivovaným FPP je proto nutné uvažovat již při návrhu asfaltové emulze. Dalším aspektem jsou environmentální hlediska, především riziko kontaminace povrchových vod. V rámci aplikace do kameniva obaleného asfaltovou emulzí rovněž nelze doporučit, zejména z důvodu ztráty flexibility vrstvy, která je primární výhodou tohoto typu asfaltové směsi.

Je nutné na závěr podotknout, že připravovaná metodika návrhu a testování emulzních asfaltových směsí hutněných za studena vychází především z technických podmínek TP 208 a Asphalt Cold Mix Manual (MS-14, Third Edition, Asphalt Institute, KY, USA) a technických předpisů pro asfaltové směsi hutněné za horka. Metodika experimentálního hodnocení EAC směsi v této dísertační práci byla provedena dle francouzských technických předpisů a českých technických předpisů pro komplexnější hodnocení.

Tyto připravované technické podmínky nelze na základě dosažených výsledků a poznatků doporučit, zejména z těchto důvodů:

- nerozlišují emulzní asfaltový beton určený především pro obrusné a ložné vrstvy a kamenivo obalené asfaltovou emulzí, které se používá pro podkladní vrstvy či reprofilace;
- nedefinuje nutnost specifického návrhu asfaltové emulze pro danou frakci a typ kameniva (pouze uvádí použití pomaluštěpné kationaktivní (anionaktivní) asfaltové emulze, což je naprosto nepřijatelné pro tento typ směsi. Dále zde není uveden požadavek na kvalitu obalení kameniva pojivem (pro obrusné vrstvy zásadní parametr);
- uvádí nereálné požadavky na volumetrické a fyzikálně-mechanické parametry směsi;
- nejsou zde dostatečně specifikovány parametry výroby a pokládky směsi.

Z hlediska laboratorního návrhu EAC směsí je zde nevhodně stanoven postup návrhu EAC směsi, respektive řešení návrhu by mělo být provedeno dle modifikovaného (TP 208 - metodika hutnění zkušebních těles, odolnost vůči vodě) postupu uvedeného na obrázku 24. Tyto TP obsahují několik dalších drobných nedostatků, nicméně výše uvedené jsou nejzásadnější.

V této práci jsou testovány a hodnoceny emulzní asfaltové směsi tak, aby se uceleně vytvořil obrázek o chování těchto směsí v konstrukci vozovky. Tyto údaje o vlastnostech je nutné dále rozšiřovat a zpřesňovat. Nicméně jako další by měla být zpracována metodika technického návrhu (složení) a vlastní výroby asfaltové emulze, která zejména dle zkušeností a zavedené praxe ve Francii vždy bere ohled na specifickým charakteristikám kameniva. Pro další rozvoj a uplatnění této technologie v ČR je nezbytná.



## Reference

Abel, F.: Foamed Asphalt Base Stabilization. Proc.,6th Annual Asphalt Paving Seminar, Colorado State Univ, Dec.7-8,1978.

Asociace pro využití energetických produktů [online]. Dostupné z: <http://www.aswep.cz>.

AUSTROADS: Technical Report – Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods, Austroads Publication No. AP–T178/11, ISBN 978-1-921709-77-7, 2011.

Asphalt Academy, 2009: Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials: A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials. Second edition. South Africa, Pretoria. ISBN 978-0-7988-5582-2.

Ahlman A. P., Edil T. B, Natarjan B. M., Del Ponte K., Systém wide life cycle benefits of fly ash, World of coal ash, Conference im Nashville, TN - May 5-7.2015

Aidara M., & Carter A., Makhaly B., (2015). Measurement of Dynamic Modulus and Master Curve Modeling of Hot Mix Asphalt from Senegal (West Africa). Studies in Engineering and Technology Vol. 2, No. 1; August 2015 ISSN 2330-2038 E-ISSN 2330-2046

Arizona State University, 2002. "Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Concrete Mixtures," NCHRP 1-37A Provisional Test Method DM-1.

Baláž, P. Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering. Chapter 2, High - Energy Milling, Springer, Hardcover, Netherland, 2008, ISBN: 978-3-540-74854-0.

Brennen, M., Tia, M., Altschaeffl, A.G., Wood, L.E.: Laboratory Investigation of The Use of Foamed Asphalt for Recycled Bituminous Pavements. In: Asphalt materials, mixtures, construction, moisture effects and sulfur. Washington, DC: Transportation Research Board. (Transportation Research Record; 911), pp 80-87, 1983.

Blanco F., Garcia M.P., Ayala J., Mayoral G., Garcia M.A., The effect of mechanically and chemically activated fly ashes on mortar properties, Fuel, Volume 85, Issues 14–15, October 2006, Pages 2018-2026, ISSN 0016-2361.

Bissada, A.F.: Structural Response of Foamed-Asphalt-Sand Mixtures in Hot Environments. In: Asphalt materials and mixtures. Washington, DC: Transportation Research Board. (Transportation Research Record, 1115), pp 134-149, 1987.

Bartovská L., Šišková M., VŠCHT. Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav. 1. vyd. Praha, 2005. ISBN 80-7080-579-X.

Bartovská L., Šišková M., VŠCHT. Co je co v povrchové a koloidní chemii [online]. Praha [cit. 2012-06-14]. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/).

Bušina F., Neuvirt M., Rekonstrukce vozovek - recyklace za studena, ABS portal, 2014, [online] Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/doprava/rekonstrukce-vozovek-recyklace-za-studena>.

Baumgaertel M., Winter H. H., 1989. "Determination of Discrete Relaxation and Retardation Time Spectra from Dynamic Mechanical Data." Rheologica Acta 28 (6): 511–19. doi:10.1007/BF01332922.

Batista F., Valentin J., Čížkova Z., Valentova T., Simnofske D., Mollenhauer K., Tabakovic A., McNally C., Engels M., Report on available test and mix design procedures for cold-recycled bitumen stabilised materials CEDR Transnational Road Research Programme Call 2012: Recycling: Road construction in a post-fossil fuel society, 2014.





- Birgisson B., Montepara A., Romeo E., Roncella R., Napier J. A. L., Tebaldi G., Determination and prediction of crack patterns in hot mix asphalt (HMA) mixtures, In *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 75, Issues 3–4, 2008, Pages 664-673, ISSN 0013-7944.
- Bell, C. A., Wieder, Alan J., Fellin, Marco J., SHRP-A-390: Laboratory aging of asphalt aggregate mixtures: Field Validation. Oregon state University Corvallis, April 1994.
- Buráň, F.: Využití gyrátoru při návrhu směsí recyklace za studena, diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, 2007.
- Boudabbous M., Millien A., Petit C., Neji J., Energy approach for the fatigue of thermoviscoelastic materials: Application to asphalt materials in pavement surface layers, In *International Journal of Fatigue*, Volume 47, 2013, Pages 308-318, ISSN 0142-1123
- Cross, D., Stephens, J. and Vollmer, J., "Field Trials of 100% Fly Ash Concrete," *Concrete International*, September, 2005, pages 47 to 51.
- Cross S. A., Evaluation of cold in-place recycled mixtures on US -283, University of Kansas, Lawrence, Kansas, Report No. KS-99-4, 2000, pp. 84
- Castedo-Franco, L.H., Wood, L.E.: Stabilisation with Foamed Asphalt of Aggregate Commonly Used in Low Volume Road. In: *Low volume road: 3rd International Conference*, 1983.
- Čmiel P., Sledování vlastností druhotných materiálů v podloží vozovek pozemních komunikací, Brno 2010.
- Chiu, C.T., Huang, M.Y.: A Study on Properties of Foamed Asphalt Treated Mixes. Chung Hua University, Department of Civil Engineering, No.30 Tung Shiang, Hsin Chu,300, Taiwan, 2002.
- Collings, D.C.; Jenkins, K.J. (2008). Characteristics of materials stabilised with foamed bitumen. Proceedings of the "4th Euroasphalt & Eurobitume Congress", Copenhagen, Denmark, Paper 402-113, 12p.
- Clyne T.R., Li X., Marasteanu M.O., Skok E. L., Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures, Report No. MN/RC – 2003-09, University of Minnesota, 2003
- Cross S. A., Fager G. A., Fly ash in cold recycled bituminous pavements, Issue Number: 1486, Publisher: Transportation Research Board, ISSN: 0361-1981, 1995, pp. 49-56
- Collepari M., Thaumassite formation and deterioration in historic buildings, In *Cement and Concrete Composites*, Volume 21, Issue 2, 1999, Pages 147-154, ISSN 0958-9465
- COLAS S.A., Emulsion cold mixes specific features and new design method, *Extrait de la Revue générale des routes et des aérodromes (RGRA) Ranvier á juillet-aout 2002*, pages 62, <http://www.colas.com/FRONT/COLAS/upload/com/pdf/2002-EN.pdf>.
- Collop, A. C., Cebon D., and Hardy M. S. A., 1995. "Viscoelastic Approach to Rutting in Flexible Pavements." *Journal of Transportation Engineering* 121 (1) (January): 82–93. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1995)121:1(82).
- Cyna M., Gresset P., Ossola M.F., Fouchard C., Les émulsions de bitume, Paris: *Revue générale des routes et des aérodromes (RGRA)*, Union des syndicats de l'Industrie routière française (USIRF), pp. 339, ISBN: 2-913414-48-6
- Český statistický úřad, [online]. Dostupné z: [www.csu.cz](http://www.csu.cz).



ČEZ energetické produkty, [online]. Dostupné z: [www.cezep.cz](http://www.cezep.cz).

Čižmář Z., PARAMO A.S. Ohlédnutí v čase. Pardubice, 2009, Pages 50, [online] Dostupné z: [www.petroleum.cz/upload/publikace/paramo.pdf](http://www.petroleum.cz/upload/publikace/paramo.pdf).

Čapková P., RTG difrakce v materiálovém výzkumu, Přírodovědecká fakulta Univerzity J.E. Purkyně, Ústí nad Labem, 2011, pp. 33

Deb S.K., Manghnani M.H., Ross K., Livingston R.A., Monteiro P.J.M.: Raman scattering and x-ray diffraction study of the thermal decomposition of an ettringite-group crystal. *Phys Chem Minerals* 30, 2003, 31-38;

Dorchies P.T., The environmental road of the future: Analysis of energy consumption and greenhouse gas emissions, 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, Ontario

Dhir, R. K., Dyer, T. D., Halliday, J. E.: Sustainable concrete construction: Utilization of CCPs in Europe. 1. vyd. UK, London: Thomas Telford Ltd., 2002. ISBN 0 7277 3177 7.

Dermatas, D. Ettringite-Induced Swelling in Soils: State-of-the-art. *Applied Mechanics Review*, Vol.48, No. 10, 1995, pp. 659-673.

Derkach S. R., Rheology of emulsions, *Advances in Colloid and Interface Science*, Volume 151, Issues 1–2, 30 October 2009, Pages 1-23, ISSN 0001-8686, 10.1016/j.cis.2009.07.001.

Dybaiski J. N., The Chemistry of Asphalt Emulsions, Fifty-Fifth Annual Meeting Transportation Research Board, 1976, p. 10.

Dealy, J. M., and K. F. Wissbrun. 1999. *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing: Theory and Applications*. Springer.

Erbitu T.J., Příprava a hodnocení silničních asfaltů, Disertační práce, VŠCHT, Praha, 2002.

Everret, D. H. Basic principles of colloid science, Royal Society of Chemistry Paperbacks, 1992, ISBN: 0-85186-443-0, [on-line] Dostupné z: [https://archive.org/stream/EverettD.H.1988BasicPrinciplesOfColloidScience/Everett,%20D.H.%20-%201988%20-%20Basic%20Principles%20of%20Colloid%20Science\\_djvu.txt](https://archive.org/stream/EverettD.H.1988BasicPrinciplesOfColloidScience/Everett,%20D.H.%20-%201988%20-%20Basic%20Principles%20of%20Colloid%20Science_djvu.txt).

Elektrárny ČEZ, [on-line] Dostupné z: [www.svetenergie.cz](http://www.svetenergie.cz)

European asphalt pavement association, EAPA 2013, Asphalt in Figures, [http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/AIF\\_2013\\_Final.pdf](http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/AIF_2013_Final.pdf).

Fiedler J., Bureš P., Sýkora M., Poznatky ze zkoušení a aplikace únavových vlastností asfaltových směsí při návrhu vozovek, Seminář I.Poliačka, Bratislava 2012

Fiedler J., Žák J., Mondschein P., Jarušková D., Statistické hodnocení únavových zkoušek asfaltových směsí a jejich aplikace při navrhování vozovek – část 1, Silnice mosty 3/2013

Ferry J. D., 1980. *Viscoelastic Properties of Polymers*. 3rd ed. Wiley.

Fiedler J., Žák J., Mondschein P., Jarušková D., Statistické hodnocení únavových zkoušek asfaltových směsí a jejich aplikace při navrhování vozovek – část 1, Silnice mosty 3/2013

Fiedler J., Komínek Z., Racek I., Rychlík V., Využití asfaltových a betonových recyklátů do vozovek, *Recycling* 2005, Brno, ARSM, pp. 5-10, ISBN: 80-214-2875- 9.

Furlong S., James A., Kalinowski E., Thompson M., Water enclosed within the droplets of



bitumen emulsions and its relation to viscosity changes during storage, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 152, Issues 1–2, 15 July 1999, Pages 147-153, ISSN 0927-7757, 10.1016/S0927-7757(98)00628-1.

Faltus M., Valentin J., Principy vysokorychlostního mletí recyklátů a vedlejších energetických produktů a potenciál mechano-chemické aktivace zrnitých materiálů, *Znovupoužitie materiálů na stavebné účely*, 2013, pp. 60-73, Nový Smokovec, ISBN: 978-80-232-0320-2.

Faltus M., Nové typy hydraulických pojiv na bázi odpadních materiálů, *Ecology and new building materials and products*, Juni 2009, ISBN 978-80-254-4447-4.

Fryzová R., Fázové složení elektrárenských popílků: kvantitativní stanovení vybraných minerálů, *Diplomová práce Brno 2012*.

Fečko P., Kušnierová M., Lyčková B., Čablík V., Farkašová A. (2003): *Popílký*, VŠB-TU, Ostrava, 187 s.

Gruner K., C.S.BITUNOVA. Asfaltové emulze při výstavbě a údržbě cest. 1. vyd. 2007, Pages 152, ISBN 978-80-969771-5-4.

Ghuzlan K.A., Carpenter S.H., Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures using the dissipated energy approach, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33 (7) (2006), pp. 890-901

Gaufrey V., Wendling L., Odie L., Fabre J. C.2008. In: *La-boratory characterization of cold mix treated with bitumen emulsion*, In: *Proceedings of the 4th Eurasphalt and Eurobitume congress*, s. 1-11.

Goyer S., Dauvergne M., Wendling L., Gaufrey V., Ropert C., Environmental data of cold mix using emulsified bitumen for a better selection of road materials, *ISAP 2012: Environmental data of cold mix using emulsified bitumen for a better selection of road materials*, Jul 2012, France. 12p., tabl., graphiques, 2012

Grabowski W., Janowski Ł., Issues of energy consumption during hot mix asphalt (HMA) production, *Modern building materials, structures and techniques*, May 19-21. 2010, The 10th International conference, Vilnius, Lithuania

Harman, T., Bukowski, J., Moutier, F., Huber, G.: *The History and Future Challenges of Gyratory Compaction 1939 - 2001*, 2001.

Hartuti S., Kambara S., Takeyama A., Hanum F. F., Leaching Characteristic of Arsenic in Coal Fly Ash, *Journal of Materials Science and Engineering B* 7 (1-2) (2017) 19-26, doi: 10.17265/2161-6221/2017.1-2.003

Huurman M., Pronk A. C., A detailed FEM simulation of a 4-point bending test device. roč. 2012, s. 1-12. ISBN 978-0-415-64331-3.

Hefer A., Little D., Texas Transportation institute, Adhesion in bitumen-aggregate system and quantification of the effects of water on the adhesive bond. Texas, 2005, Pages 220.

He, G., Wong, W.: *Laboratory Study on Permanent Deformation of Foamed Asphalt Mix Incorporating Reclaimed Asphalt Pavement Materials.* Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 8, pp. 1809-1819, Elsevier, 2007.

Hela R., Orsáková D., The Mechanical Activation of Fly Ash, *Procedia Engineering*, Volume 65, 2013, Pages 87-93, ISSN 1877-7058.



- Honskus P., a kol., SPALOVÁNÍ PALIV, Ministerstvo životního prostředí, 2015, [online] Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky\\_u\\_s\\_tacionarnich\\_zdroju\\_vystup\\_projektu/\\$FILE/000-spalovani\\_paliv-20160222.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_s_tacionarnich_zdroju_vystup_projektu/$FILE/000-spalovani_paliv-20160222.pdf).
- Hemalatha T., Ramaswamy A., A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete, In Journal of Cleaner Production, Volume 147, 2017, Pages 546-559, ISSN 0959-6526.
- Choudhary, R.: Use of Cold Mixes for Rural Road Construction, In: International Conference on Emerging Frontiers in Technology for Rural Area, 2012, s 20-24.
- Chempoint, Rentgenová difrakční analýza na práškových vzorcích, [on-line] Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/rentgenova-difrakcni-analyza-na-praskovych-vzorcich>
- Chehovits J., Galehouse L., Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Process, Asphalt Concrete Pavements, Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation, 2010
- Chandra R., Veeraragavan A., Murali Krishnan J., Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 104, 2 December 2013, Pages 2-11, ISSN 1877-0428.
- Chappat, M. & Bilal, J. (2003). The Environmental Road of the Future: Life Cycle Analysis, Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions. Colas Group. 2003. <http://www.colas.co.uk/about-colas-detail.asp?pagelid=14>
- Iwański, M., Chomicz-Kowalska, A.: Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology, Procedia Engineering, Volume 57, p. 433-442, 2013, ISSN 1877-7058.
- Juhász A. Z., Aspects of mechanochemical activation in terms of comminution theory, In Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Volume 141, Issue 3, 1998, Pages 449-462, ISSN 0927-7757.
- Jenkins, K.J., de Ven, M.F.C., de Groot, J.L.A.: Characterisation of Foamed Bitumen. 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA), 1999.
- Jenkins K.J.: Mix Design Considerations for Cold and Half-warm Bituminous Mixes with emphasis on Foamed Bitumen, PhD Dissertation, University of Stellenbosch, South Africa, 2000.
- Janalík J., Štáva P., VŠB TU OSTRAVA, Fakulta strojní. Mechanika tekutin. Ostrava. Dostupné z: [www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-Mechanikatekutin.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-Mechanikatekutin.pdf).
- James A., Asphalt Emulsions - Chemistry and Concepts”, Asphalt Technology Conference of the Americas, 1998, Austin, Texas. Also presented at AEMA Annual Meeting 1999, Santa Fe, New Mexico..
- James A.D., Stewart D., Vening P., Cationic bitumen emulsion - theory and applications, Akzo Chemie Ltd., Presented at the 6th Strassenkonferenz, Budapest 1988.
- Jarušková, D., Pravděpodobnost a matematická statistika, Česká technika - ČVUT, ISBN 978-80-01-04829-0, 2000
- Kim, Y. 2008. Modeling of asphalt concrete, 1st ed. McGraw Hill Professional.
- Klimešová Š. (2010) Trvanlivost a hygienická a ekologická bezpečnost stabilizátů vyráběných z druhotných energetických surovin určených pro podpůrné dopravní využití v



- lokalitách ochranných pásem pitné vody. Projekt MD ČR č. CG912-045-520. Praha;
- Králová M., (2007) Ověření vlastností vedlejších energetických produktů podle zdrojů a možnosti aplikace v silničním stavitelství. Praha: AGE s.r.o., 36 s.;
- Koloničný J., Horák J., Petránková Ševčíková S. (2011): Kotle malých výkonů na pevná paliva. — VŠB–TU, Ostrava, 106 s.
- Kim Y. R., Modeling of asphalt concrete, American Society of Civil Engineers, 2009, ISBN 978-0-07-146462-8
- Kvítek, L., UNIVERZITA PALACKÉHO, Přírodovědecká fakulta. Metody studia koloidních soustav. 1. vyd. Olomouc, 2006. Pages 32.
- Kvítek L., Panáček A., UNIVERZITA PALACKÉHO. Základy koloidní chemie. Olomouc, 2007, p. 52.
- Ložiska ČR, [online]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/loziska\\_cr.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/loziska_cr.html).
- Lesueur, D., Clech, H., Brosseaud, A., Such, C., Cazacliu, B., Koenders, B., Cerino, P., Bonvallet, J., Foamability and Foam Stability. Road materials and pavement design, ISSN 1468-0629, vol.5, no. 3, pp. 277-302, Paris, 2004.
- Lesueur, D.: Predicting the in-place compacity of cold mixes, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, 2000.
- Ledererová J., Leber P., Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot. Časopis stavebnictví: časopis stavebních inženýrů, techniků a podnikatelů. Brno: EXPO DATA, 2008, č. 4. ISSN 1802-2030.
- Lesueur, D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification., Elsevier, s. 42-82., Madrid, 2009.
- Lesueur D., Herrero L., Uguet N., Hurtado J., Peña J.L., Potti J.J., Walter J., Lancaster I., (2008). Bitumen nanoemulsions and their interest for cold recycling of bituminous mix. 4. 48-53.
- Lee D.Y. 1981. Treating marginal aggregates and soil with foamed asphalt. In: Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 50, pp 211-150.
- Labuz J. F., Structural Evaluation of Asphalt Pavements with Full-Depth Reclaimed Base, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Final Report 2012-36, pp. 53, 2012
- Life Cycle Inventory: BITUMEN, Eurobitume, 2nd Edition July 2012, ISBN 2-930160-26-8
- Mráz, V., Valentin, J., Suda, J., and Kopecký, L. "Experimental Assessment of Fly-Ash Stabilized and Recycled Mixes," Journal of Testing and Evaluation, Vol. 43, No. 2, 2015, pp. 1-15, <https://doi.org/10.1520/JTE20140097>. ISSN 0090-3973
- Mráz V., Havlice M., Suda J., Příklady využití vedlejších energetických produktů v zemních konstrukcích a vliv kvality vodných výluhů na jejich uplatnění, ODPADOVÉ FÓRUM 2017 - MATERIÁLOVÉ VYUŽITÍ ODPADŮ, pp 10, 2017
- Misra A., Upadhyaya S., Gustin R., Roohanirad A., Stokes J., Full-Depth Cold In-Place Recycling of Asphalt Pavements Using Self-Cementing Fly Ash: Field and Laboratory Study, World of Coal Ash (WOCA), April 11-15, 2005, Lexington, Kentucky, USA
- Molenaar, A. 2007. "Prediction of Fatigue Cracking in Asphalt Pavements: Do We Follow



- the Right Approach?" *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, January, 155–162. doi:10.3141/2001-17.
- Miao-Miao Y., Xiao-Ning Z., Wei-Qiang C., and Shun-Xian Z., Ratio of Dissipated Energy Change-based Failure Criteria of Asphalt Mixtures, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 6(14): 2514-2519, 2013, ISSN: 2040-7459; e-ISSN: 2040-7467
- McCormick N., Lord J., Digital Image Correlation, In *Materials Today*, Volume 13, Issue 12, 2010, Pages 52-54, ISSN 1369-7021
- Maggiore C., Airey G., Marsac P., A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Volume 1, Issue 1, 2014, Pages 49-54, ISSN 2095-7564,
- Mondschein P., Valentin J., Využití asfaltového R-materiálu v asfaltových kobercích (SMA), CIDEAS, ČVUT, 2009.
- Ministerstvo životního prostředí, Strategický rámec udržitelného rozvoje České republiky, 2010, p. 97, ISBN: 978-80-7212-536-4.
- Marasteanu M. Li X. and Labuz J. F. "Low temperature asphalt test for fracture test for asphalt mixtures. Effects of HMA composition on pavement cracking", 5th Int. RILEM Conference on Cracking in Pavements, Limoges, May 2004, p. 249-256.
- Merrill, D., Nunn, M., Carswell, I.: A Guide to The Use and Specification of Cold Recycled Materials for The Maintenance of Road Pavements. Prepared for County Surveyors' Society, Highways Agency, Hanson Environmental Fund (Viridis), Scottish Executive, Tarmac, UKQAA, WS Atkins, Colas, RBA. TRL Report TRL 611. First published 2004, ISSN 0968- 4107, Copyright TRL Limited, 2004.
- Muthen, K. M., CSIR Transportek, 1998. Foamed Asphalt Mixes, Mix Design Procedure. Website <http://foamasph.csir.co.za:81/chap4.htm>.
- Maccarone, S., Holleran, G., Leonard, D.J., Hey, S.: Pavement Recycling Using Foamed Bitumen. Proceeding 17th ARRB Conference, Part 3, 1994.
- Milton, L.J., Earland, M. G.: Design Guide and Specification for Structural Maintenance of Highway Pavements by Cold In-Situ Recycling, TRL Report TRL 386, Transport Research Laboratory, Crowthorne, 1999.
- Mofreh, F., Saleh: Effect of rheology on the bitumen foamability and mechanical properties of foam bitumen stabilised mixes, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 8, Iss. 2, 2007.
- Medvecová J., Mužík P. (2004): Nová surovina – fluidní popílek z tepelné elektrárny Hodonín. — příspěvek na konferenci Juniorstav 2004/6, FAST VUT, Brno.
- Medvecová J., Mužík P. (2004): Nová surovina – fluidní popílek z tepelné elektrárny Hodonín. — příspěvek na konferenci Juniorstav 2004/6, FAST VUT, Brno, CD-ROM.
- Nejeschlebová L., Komplexní zhodnocení vlivu odkaliště Bělov na životní prostředí, Univerzita Palackého v Olomouci, Diplomová práce, 2013
- Ormsby K. Monney , Hussain A. Khalid & Ignacio Artamendi (2007) Assessment of Fracture Properties of Emulsified Asphalt Mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 8:1, 87-102



Opravišová, L., Všianský, D., and Kubátová, D., „Impact Testing of Risk Components on Volume Changes of Cement Composites“ Proceedings of the 14th International Conference on Ecology and New Buildings Materials and Products, Telč, Czech Republic, June 8–10, 2010.

Polach V., Parní kotle, ZČU, pp. 77, (2012), [online]. Dostupné z: [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01\\_Stavba-a-provoz-stroju\\_1-3/1\\_IUT/005\\_Parn-kotle---Polach---P0.pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf).

Piau, J.-M., et al.: SAMARIS - Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure, Final Report, LCPC and FEHRL, 2006.

Politika druhotných surovin, Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2004

Plzeňská teplárenská, [on-line] Dostupné z: <https://energetika.plzen.eu/energetika-ve-meste/tepelna-energie/tepelna-energie.aspx>

Pérez-Jiménez F., Botella R., Moon K-H., Marasteanu M., Effect of load application rate and temperature on the fracture energy of asphalt mixtures. Fénix and semi-circular bending tests, In Construction and Building Materials, Volume 48, 2013, Pages 1067-1071, ISSN 0950-0618

Pernerová M., Tvorba a vizualizace 3D bodového mračna z neměřických snímků, bakalářská práce, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, 2014

Regionální rozvojová agentura Ústeckého kraje, a.s., et al. Analýza využívání stavebních odpadů z těžby a energetických odpadů, predikce poptávky po jejich využití. 2003, 4, s. 56.

Ruckel, P.J., Acott, S.M., Bowering, R.H.: Foamed- Asphalt Paving Mixtures: Preparation of Design Mixes and Treatment of Test Specimens. In: Asphalt materials, mixtures, construction, moisture effects and sulfur. Washington, DC: Transportation Research Board. (Transportation Research Record; 911), pp 88-95. 1982.

Ruenkairergsa, T., Phromsorn, C., Silarom, P. and Ketnoot, W.: Engineering Properties of Foamed Bitumen Mixtures in Thailand. Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavement for Southern Africa (CAPSA '04), ISBN No. 1-920-01718-6, 12-16 September 2004, Sun City, South Africa, 2004.

Rowe G.M.; Bouldin M. G., Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, 2000 pp. 754-763

Ramme B. W., Wen H., Naik T. R., Kraus R. N., In-situ recycling of deteriorated asphalt concrete for new pavement base courses, Report No. CBU-2005-21, REP-592, 2005

Rashad A. M., A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer, In International Journal of Sustainable Built Environment, Volume 4, Issue 2, 2015, Pages 278-306, ISSN 2212-6090.

Shiea, J.; Eser, S.; Liu, Y.; Firouzkouhi, F.; Arumugam, R.; Hatcher, P.G. Aging of cold-mix asphalt pavement. Fuel Science Program, Department of Materials Science and Engineering, Pennsylvania State University, pp 1390-1396, 1992, [https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/37\\_3\\_WASHINGTON%20DC\\_08-92\\_1390.pdf](https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/37_3_WASHINGTON%20DC_08-92_1390.pdf)

Stripple H., Life Cycle Assessment of Road, A Pilot Study for Inventory Analysis, IVL report, Swedish National Road Administration, March 2001, Gothenburg, Sweden



Serfass J. -P., Poirier J. -E., Henrat J. -P., Carbonneau X., Influence of curing on cold mix mechanical performance, *Materials and Structures*, June 2004, Volume 37, Issue 5, pp 365-368

Suda J., Čížková Z., Valentin J., Šedina J., Valentová T., Influence of test specimen compaction and curing condition for pavement cold recycled mixtures, In: 12th International Symposium on Concrete Roads 2014. Praha: Výzkumný ústav maltovin s.r.o., 2014, art. no. ID156, p. 148-149.

Suda J., Valentin J., "The Effects of Bituminous Binders on Cold Recycled Mixes Prepared by the Foamed Bitumen Technology", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 802, pp. 315-320, 2015

Serfass, J.-P., Carbonneau, X., Delfosse, F., Triquigneaux, J.-P.: Comportement et methodologie d'evaluation - Enrobes a l'emulsion, fruits d'une federation de competences, *RGRA 2010-2011*.

Sahu S., Brown S.A., Lee R.J., Thaumaside formation in stabilized coal combustion by-products, In *Cement and Concrete Composites*, Volume 24, Issues 3–4, 2002, Pages 385-391, ISSN 0958-9465

Scullion T., Guthrie S., Sebesta S., Field performance and design recommendations for full depth recycling in Texas, *Performing Organization Report No. Report 4182-1*, Texas Transportation Institute, 2003

Shen S., Gordon A., Carpenter H. S., Huang H., (2006). A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation. *Road Materials and Pavement Design*. 7. 47-69. 10.1080/14680629.2006.9690026

Studie vlastností směsí s asfaltovou emulzí: Spolupráce veřejného a soukromého sektoru - Výroba směsí, odběr vzorků a uložení v laboratoři, *Silnice a mosty 3/2012*, pp 43-46.

Suda, J.; Čížková, Z.; Žák, J.; Šedina, J.; Krpálek, O.; Valentová, T. Vztah mezi pevností v tlaku a pevností v příčném tahu u podkladních vrstev recyklovaných za studena, In: *Podkladní vrstvy a podloží vozovek*. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic, 2014, pp. 125-130. ISBN 978-80-903925-4-0

Suda J., Diplomová práce, Využití fluidních popílků ve směsích recyklace za studena, ČVUT, 2010.

Salou M., Siffert B., Jada A., Study of the stability of bitumen emulsions by application of DLVO theory, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 142, Issue 1, 30 November 1998, Pages 9-16, ISSN 0927-7757, 10.1016/S0927-7757(98)00406-3.

Stehlík D., Recykláty do vozovek pozemních komunikací, *Recycling 2015*, Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin, pp. 4-11, 2015, ISBN 978-80-214-5141-4.

Souček V., Suda J., Matoušek D., Kubinčanová L., Směsi stmelené alternativními pojivy s uplatněním vedlejších produktů v silničním stavitelství, *Juniorstav 2011*, VUT - Brno, ISBN: 978-80-214-4232- 0.

Solomon D. R. *Asphalt Emulsion Technology*. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2006, Pages 58. ISSN 0097-8515

Sunarjono, S.: *The Influence Foamed Bitumen Characteristics on Cold Mix Asphalt*





Properties. 32 PhD thesis, University of Nottingham, 2008.

Sunarjono, S., Laboratory Mixture Design for Foamed Asphalt, Dinamika TEKNIK SIPIL, Akreditasi BAN DIKTI No : 110/DIKTI/Kep/, 2009.

Stamboliadis E. T., The energy distribution theory of comminution specific surface energy, mill efficiency and distribution mode, In Minerals Engineering, Volume 20, Issue 2, 2007, Pages 140-145, ISSN 0892-6875.

Sekulić Ž., Popov S., Đuričić M., Rosić A., Mechanical activation of cement with addition of fly ash, Materials Letters, Volume 39, Issue 2, April 1999, Pages 115-121, ISSN 0167-577X.

Snow R. H., Allen T., Ennis B. J., Litster J. D.: Size Reduction and Size Enlargement, Chapter 20, 1999, PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK, [http://chc.edu.vn/forum/uploads/file//2009-08-16\\_092142\\_Chap20.pdf](http://chc.edu.vn/forum/uploads/file//2009-08-16_092142_Chap20.pdf).

Sear, L.K.A.: Properties and Use of Coal Fly Ash: A Valuable Industrial By-product, Thomas Telford Ltd, London, United Kingdom, 2001.

Sheng G., Li Q., Zhai J., Investigation on the hydration of CFBC fly ash, Fuel, Volume 98, August 2012, Pages 61-66, ISSN 0016-2361.

Sheng G., Li Q., Zhai J., Feihu Li, Self-cementitious properties of fly ashes from CFBC boilers co-firing coal and high-sulphur petroleum coke, Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 6, June 2007, Pages 871-876, ISSN 0008-8846.

Stehlík, D., Valentin, J. et al.: Systém hospodaření s druhotnými materiály do pozemních komunikací pro ČR, průběžná zpráva projektu VaV CG712-043-910, Brno, 2008.

Svaz výrobců cementu, [online]. Dostupné z: [www.svcement.cz](http://www.svcement.cz).

Surovinová politika České republiky v oblasti nerostných surovin a jejich zdrojů, Ministerstvo Průmyslu a Obchodu, 2017, [online]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/stavebnictvi-a-suroviny/surovinova-politika/statni-surovinova-politika-nerostne-suroviny-v-cr/2017/4/170228--Material\\_surovinova\\_politika-upraveny-po-pripom-VP--.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/stavebnictvi-a-suroviny/surovinova-politika/statni-surovinova-politika-nerostne-suroviny-v-cr/2017/4/170228--Material_surovinova_politika-upraveny-po-pripom-VP--.pdf).

Škopán, M.: Recykláty ze stavebních a demoličních odpadů jako alternativa k přírodnímu kamenivu. Sborník Ekonomika a realizace staveb. s. 46, 2010.

Škvára, F. Alkali activated materials or geopolymers. Ceramics - Silikáty. Říčany: SK Press, 2007, roč. 51, č. 3, s. 173-177. ISSN 0862-5468.

Škvára F. a kol. :Fluidní sulfovápenatý popílek, sborník Popílky ve stavebnictví, Brno 2015, str. 201 - 212.

Ševčíková P., Příprava emulzí. Zlín, 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati., Pages 84.

Thanaya I. N. A., Zoorob S. E.2009, In: A Laboratory Study on Cold-Mix, Cold-lay Emulsion Mixtures, In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, s. 47–55.

Tschoegl, N. W., 1989. The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior: An Introduction. Springer-Verlag.

Tharwat F., Tadros W.: Emulsion science and technology, Wiley-VCH, 2009, ISBN:978-3-527-32525-2, pp. 326

- Townsend, T.G.: Leaching characteristics of asphalt road waste. Final report No. 98-2, State University System of Florida, Florida center for solid and hazardous waste management, Gainesville, Florida, 1999.
- Tung Shi.-H., Shih M.-H., Sung W.-P., (2008). Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall. *Sadhana*. 33. 767-779. 10.1007/s12046-008-0033-2.
- Transport and Main Roads Specifications, MRTS07C, Insitu Stabilised Pavements Using Foamed Bitumen, State of Queensland (Department of Transport and Main Roads), October 2014.
- Tavares L.M, King R.P, Single-particle fracture under impact loading, In *International Journal of Mineral Processing*, Volume 54, Issue 1, 1998, Pages 1-28, ISSN 0301-7516.
- Teysler J. (1988): Spalování popelnatých hnědých uhlí. — Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 274 s.
- Thomas M., Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete, *Concrete*, pp. 24, 1999, [online] Dostupné z: [http://www.cement.org/docs/default-source/fc\\_concrete\\_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf](http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf).
- Underwood, B. Shane, Taeyoung Yun, and Y. Richard Kim. 2011. "Experimental Investigations of the Viscoelastic and Damage Behaviors of Hot-Mix Asphalt in Compression." *Journal of Materials in Civil Engineering* 23 (4) (April): 459–466. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000197.
- Vaníček M. (2003) Contaminant transport in the host rock, numerical modelling and laboratory work. Ph.D. thesis. Prague: Czech Technical University in Prague, 128 p.;
- Valentin, J., Rohovec, J.: Alternative Leaching Test for Selected Secondary Materials Used in Road Construction. In: *ENVIROAD [CD-ROM]*. Warszawa: Road and Bridge Research Institute, 2009, p. 1-11. ISBN 83-89252-02-3.
- Vlk, M., Florian Z. Mezní stavy a spolehlivost. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2007, pp. 235.
- Valentin J., Problematika směsí recyklace za studena z hlediska vybraných funkčních charakteristik, dísertační práce, České vysoké učení technické v Praze, 2009
- Valentin J., Suda J., Faltus M., Karra G., Je mechano-chemická aktivace cesta k novým typům jemnozrnných materiálů v dopravním stavitelství?, *Asfaltové vozovky*, 2013, ISBN: 978-80-903925-3- 3.
- Vrbová M. a kol., Strategický analytický dokument pro oblast využívání druhotných surovin, závěrečná zpráv, IEEP, VŠE, EKOKOM, pp. 460, 2011.
- Venhoda T. (2010): Technologie pro přípravu a spalování biomasy. — MS, bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství VUT, Brno, 27 s.
- Vehovská L., Fluidní popílek pro přípravu směsného cementu, *Juniorstav 2007*, VUT Brno, ISBN: 978-80-214-3337-3, pp. 294-300.
- Veverková M., Závěrečná etapová zpráva o řešení projektu SP/2f3/118/08 v roce 2009 + přílohová část, odpovědný řešitel, Univerza-Středisko odpadů Praha, s.r.o.
- Wirtgen Cold Recycling Technology 2012, Wirtgen GmbH, first edition, Windhagen, Germany, 2012.



- Winter H. H., Analysis of dynamic mechanical data: inversion into a relaxation time spectrum and consistency check, In *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Volume 68, Issues 2–3, 1997, Pages 225-239, ISSN 0377-0257, [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(96\)01512-1](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(96)01512-1).
- Wendling, L., Gaschet, J., Ollier, S., Maguet, E., Gallier, S., Gineys, P.: Compactibility of cold bituminous mixes: A new device devoted to emulsion - Treated gravel characterization, 2008.
- Wolfe W. E., Butalia T.S., Use of lime-activated class F fly ash in full depth reclamation of asphalt pavements, Final Report for Project CDO/D-05-8/9, 2010
- Yoon, S. , Balunaini , U. and Prezzi, M.: Forensic Examination of the Severe Heaving of an Embankment Constructed with Fluidized-Bed-Combustion (FBC) Ash, *Journal of the Transportation Research Board (TRB)*, National Research Council, Washington, D.C., 2007.
- Yu Z., Ma Y., Shi H., Shen X., Delayed Ettringite Formation in Fly Ash Concrete under Moist Curing Conditions, 5th International Conference on Durability of Concrete Structures, Jun 30–Jul 1, 2016
- Zhang Z., Qian J., You C, Hu C., Use of circulating fluidized bed combustion fly ash and slag in autoclaved brick, *Construction and Building Materials*, Volume 35, October 2012, Pages 109-116, ISSN 0950-0618.
- Zatloukal T., Vliv procesních parametrů na přípravu emulzí. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati. Pages 93.
- Zou, G., X. Zhang, J. Xu, and F. Chi. 2010. "Morphology of Asphalt Mixture Rheological Master Curves." *Journal of Materials in Civil Engineering* 22 (8): 806–810. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000024.
- Žák J., 2012. "IRIS Rheo-Hub, program description". ČVUT, FSv, Department of Road Structures.
- Žák J., Valentin J., Mondschein P., (2013). Analýza únavového chování asfaltových hutněných směsí – současné trendy a metody. *Silniční obzor*, Česká silniční společnost. 2013. 31 - 34.
- Žák J., Monismith C.L., Jarušková D., Consideration of fatigue resistance tests variability in pavement design methodology, *International Journal of Pavement Engineering* Vol. 16 , Iss. 1, 2015
- Žák, Josef & Suda, Jan & Mondschein, Petr & Stoklasek, Svatopluk & Vacin, Otakar. (2013). Fatigue Resistance of Asphalt Binders in Hot Mix Asphalt.
- Žák J., Monismith C. L., Jarušková D., Consideration of fatigue resistance tests variability in pavement design methodology, *International Journal of Pavement Engineering* Vol. 16 , Iss. 1, 2015
- Žák, Josef & Valentin, Jan & Mondschein, Petr. (2013). Analýza únavového chování asfaltových hutněných směsí – současné trendy a metody. *Silniční obzor*, Česká silniční společnost. 2013. 31 - 34.



## Příloha A

Fournisseur granulats : Université Prague

Date essais :		technicien					
	1	2	3	4	Filer (%)	verification	
Coupoires	0/4	2/5	4/8	8/11			
Carrière	Libodrice	Libodrice	Libodrice	Libodrice			
Masse volumique	2,864	2,876	2,872	2,864	2,65		
Recomposition (%)	50	0	24	23	3	100	
Théorique (%)							

coupure	1	2	3	4
Water Content %	0,00	0,00	0,00	0,00
tare (g)	0	0	0	3,75
Mh + tare	1	1	1	1
Ms + tare	1	1	1	1

Sieving	tare (g)	1	2	3	4
tare (g)	0	0	0	0	0
Mh + tare	1	1	1	1	1
Ms (g)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Vb

Taille en mm	Ref	C	Rec	Ref	C	Rec	Ref	C	Rec	Ref	C	Rec	C	Recompo.	Spécifications
25,00		100	50,0		100	0,0		100	24,0		100	23,0	100	3	100,0
20,00		100	50,0		100	0,0		100	24,0		100	23,0	100	3	100,0
16,00		100	50,0		100	0,0		100	24,0		100	23,0	100	3	100,0
12,50		100	50,0		100	0,0		100	24,0		100	23,0	100	3	100,0
10,00		100	50,0		100	0,0		100	24,0		92	21,0	100	3	98,0
8,00		100	50,0		100	0,0		99	23,7		8	1,9	100	3	78,6
6,30		100	50,0		100	0,0		49	11,8		1	0,3	100	3	65,0
5,00		100	50,0		100	0,0		30	7,2		1	0,2	100	3	60,4
4,00		92	46,2		91	0,0		10	2,4		1	0,2	100	3	51,7
3,15		88	44,0		51	0,0		7	1,7		1	0,2	100	3	48,9
2,00		51	25,4		11	0,0		4	1,0		1	0,2	100	3	29,6
1,00		36	17,3		5	0,0		3	0,8		1	0,2	100	3	21,5
0,50		29	14,7		4	0,0		3	0,7		1	0,2	100	3	18,5
0,32		23	11,5		3	0,0		3	0,6		1	0,2	100	3	15,3
0,20		14	7,1		3	0,0		2	0,5		1	0,2	100	3	10,8
0,08		9	4,5		3	0,0		2	0,5		1	0,2	100	3	8,2
0,06		7	3,7		2	0,0		2	0,5		1	0,2	100	3	6,2
													91,2	2,736	7,1

Teneur en eau totale : 7,40

eau apport (%) 3,53  
Eau Granulat (%) 0  
Eau émulsion (%) 3,87

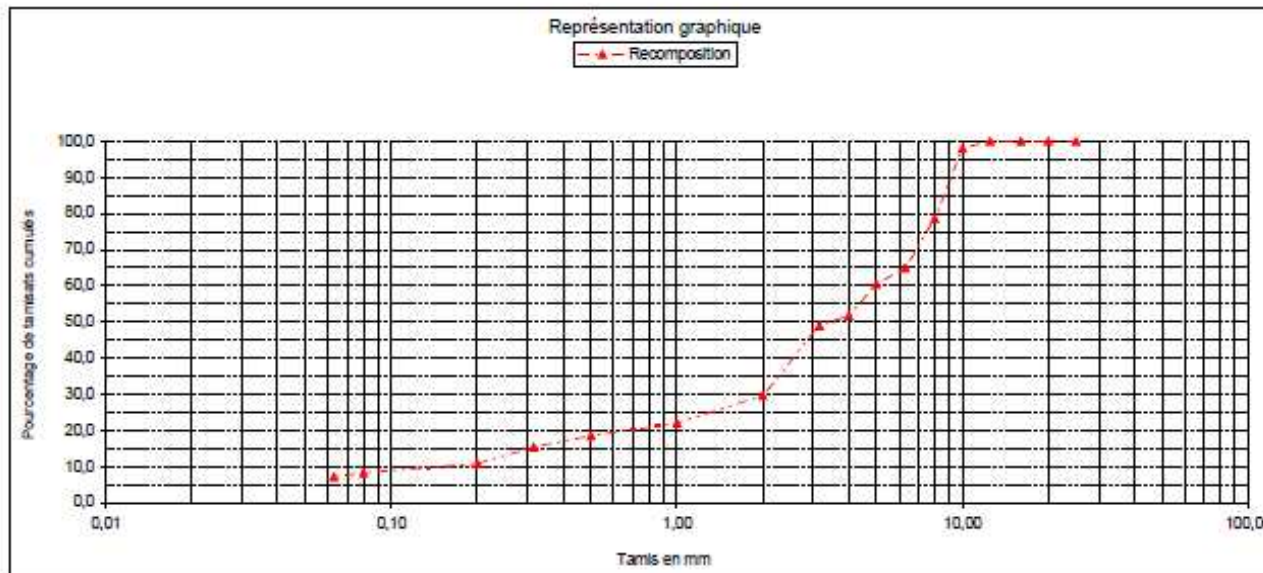
Teneur en eau enrobé 6,99

Masse enrobé à introduire dans le moule (g)

1000 ou 3500 g 1070

	2,86	Teneur en bitume résiduel (%)	5,8	Teneur en émulsion	9,7%
Masse volumique des granulats	2,86		5,8		9,7%
Masse volumique liant (g/cm <sup>3</sup> )	1,035	Surface spécifique (m <sup>2</sup> /Kg)	13,16	Module richesse (K)	3,74
Masse volumique réelle enrobé	2,608	Racine cinquième	1,57	spécification K >= 3,6	

Type emulsion 50





Laboratoire Européen MWV Lille  
 14 rue Hergé F-59650 Villeneuve d'Ascq tél : +333 28 761 890 fax :  
 +333 20 640 652

### Rapport d'essai

Essai de maniabilité-Pressé à Compactage Giratoire



EN 12697-31  
 XP P-98-121  
 NF P-98-139

Client :	Université Prague		Demandeur		Jan Valentin	
Adresse:	Prague			Tél/fax		-
Date essai	semaine 34	N°Projet	P12031		Granulats :	Libodrice
Couche de	roul	Technique	BBE		Liant:	BBE60%

Paramètres d'essai		Formule:	BBE 60%	$\rho_m$ :	-	
Mode de malaxage	Hobart A200	Constituants		N°ech.	Classe granulaire	%
constituants	G/E/E	Nature	Origine			
référence	-	Libodrice	Rep Tchèque	-	filler	3
fabrication	-	-	-	-	0/4	50
et début compactage	-	-	-	-	2/5	0
Observations :	-	-	-	-	4/8	24
					8/11	23

Teneur en eau totale : **7,40** Masse volumique Mélange (kg/m³) **2701,79**

eau apport (%) **3,53**

Eau Granulat (%) **0** Moule **150**

Eau émulsion (%) **3,87**

Teneur en eau/enrobé **6,99** Masse enrobé à introduire dans le moule (g)

Sec **5,726** Humide **6,127**

% de vide	Specifications		Résultats			Moyenne
	min	max				
10 girations	>12		17,14	16,68	15,61	16,37
20 girations						
25 girations						
40 girations						
60 girations	5	12	9,10	8,57	7,97	8,53
80 girations						
100 girations						
120 girations						
200 girations						

Conformité : **OK**

Visa Responsable Etude :

Commentaires: pH eau de rupture = 7,5



Laboratoire Européen MWV Lille  
14 rue Hergé F-59650 Villeneuve d'Ascq tél : +333 28 761 890 fax : +333 20 640 652

**Rapport d'essai**

Sensibilité à l'eau  
Essai Duriez sur mélanges  
Hydrocarbonnés confectionnés à froid avec une émulsion de bitume



NF P98-251-4  
Août 2004  
Modalité 1

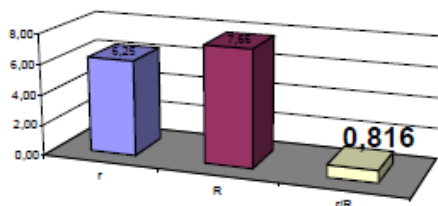
Client :	Université Prague		Demandeur		Jan Valentin	
Adresse:	Prague			Tél/fax		-
Date essai:	semaine 34	N°Projet	P12031		Granulats :	Libodrice
Couche de:	roul	Technique:	BBE		Liant:	BBE60%

Paramètres d'essai		Formule:	BBE 60%	$\rho_m$ :	-	
Mode de malaxage	Hobart A200	Constituants		N°ech.	Classe granulaire	%
Ordre introduction constituants	G/E/E	Nature	Origine			
Température de référence	-	Libodrice	Rep Tchèque	-	filler	3
Température réelle fabrication	-	-	-	-	0/4	50
Délai entre fin malaxage et début compactage	2 min	-	-	-	2/5	0
Observations :	-	-	-	-	4/8	24
-	-	-	-	-	8/11	23
Eau contenue Enrobé (%)		Masse enrobé à introduire dans le moule (g)				

Pourcentage d'imbibition		Résultats		Spécifications
Nb éprouvettes sèches/humides :	5/5	Sèche (W)	Humide (W')	
Teneur en eau à J+1 $W_{J+1}$ (%)		1,47	1,42	
Teneur en eau à J+8 $W_{J+8}$ (%)		0,12	0,00	
Teneur en Eau à J+15 $W_{J+15}$ (%)		0,05	1,25	

Pourcentage de vides		Résultats		Spécifications
Diamètre (cm)		7,98	7,98	
Hauteur/Longueur (cm)		7,72	7,74	
Masse volumique apparente géométrique moyenne éprouvettes $MVA$ ( $g/cm^3$ )		2,6	2,6	
Masse volumique apparente de l'éprouvette par pesée hydrosatique, $MVA$ ( $g/cm^3$ )		2,60		
<b>Pourcentage de vides (à partir de MVA), <math>v\%</math> (%)</b>		3,63		6<% vide<11
Masse volumique réelle du mélange $MVR$ ( $g/cm^3$ )		2,70		
Masse volumique apparente du granulat dans éprouvette, $MVA_g$ ( $g/cm^3$ )		2,46		
Pourcentage de vide occupés par l'air et par le liant, $V_{MA}$ (%)		13,95		
Pourcentage de vide comblés par le liant, $V_L$ (%)		74,01		

Résistances en compression (MPa)		Résultats		Spécifications
Résistance moyenne "r" (7 jours immergées dans l'eau à 18°C)		6,25		
Résistance moyenne "R" (7 jours dans une ambiance à 50% d'humidité et 18°C)		7,66		>4
<b>Rapport r/R (%)</b>		<b>81,60</b>		<b>&gt;70</b>



Visa Responsable Etude :



## Příloha B



## Výpočet spektra materiálu

V rámci analýzy procesů a dějů, které jsou zaznamenány při experimentech nebo při modelování odezvy materiálů a konstrukcí, je vhodné stanovit relaxační nebo retardační časové spektrum  $G(t)$  nebo  $D(t)$ , které lze poměrně snadno interpretovat, avšak problematické je jejich měření. Naproti tomu dynamické komplexní moduly  $E_1$  a  $E_2$ , lze snadno měřit, avšak interpretace je složitější. Proto komplexní křivky elastického a ztrátového modulu  $E_1$ ,  $E_2$  byly převedeny do diskretního relaxačního spektra s použitím softwaru IRIS Rheo Hub. Mluvíme tedy o konverzi dat z frekvenčního rozsahu do časového rozsahu. Tato konverze dat by měla být přednostně prováděna prostřednictvím samostatného počítačového programu, který nevyžaduje žádný vstup specifický pro materiál za datovou množinu  $E_1$  a  $E_2$ . Dynamické měření jsou obecně neúčinnější pro měření relaxačních režimů polymerních kapalin a tuhých látek v širokém rozsahu frekvencí. Relaxační spektrum může být považované za funkci objemové hmotnosti, která představuje moduly v průběhu času, přičemž všechny viskoelastické funkce mohou být odvozené z relaxačního spektra. Relaxační spektrum je využíváno jako základní přístup k matematickému modelování viskoelastické odezvy. Obecně pro lineární polymery jednotné délky jsou relaxační režimy přesně stanoveny. Ovšem ve spektru skutečných polymerů jsou "rozšířeny ven" kvůli nejednotnosti řetězců a tím relaxační režimy ztrácejí jejich zřetelný fyzikální význam [Baumgaertel 1989]. Relaxační modul  $E(t)$ , je obvykle vyjádřený jako diskretní soubor exponenciálních rozkladů.  $N$  relaxačních Maxwellových režimů je definováno jako relaxační napětí  $g_i$  a jako relaxační doba  $\lambda_i$  [Baumgaertel 1989].

$$E(t) = E_e + \sum_{i=1}^N \left( g_i \exp\left(\frac{-t}{\lambda_i}\right) \right) \quad (67)$$

Modul rovnováhy  $E_e$  je konečný pro pevné látky  $E_e > 0$  a pro kapaliny  $E_e = 0$ . Použitím tohoto diskretního spektra se dynamické moduly  $E_1$  a  $E_2$  stanoví jako:

$$E_1(\omega) = E_e + \sum_{i=1}^N \left( g_i \frac{(\omega\lambda_i)^2}{1+(\omega\lambda_i)^2} \right) \quad (68)$$

$$E_2(\omega) = \sum_{i=1}^N \left( g_i \frac{\omega\lambda_i}{1+(\omega\lambda_i)^2} \right) \quad (69)$$

Z těchto dvou rovnic, je patrné, že diskretní relaxační spektrum může být stanoveno z měřených hodnot dynamických modulů a naopak [Baumgaertel 1989, Winter 1997].

## Převod z frekvenčního do časového rozsahu

Existuje více konverzních metod, ale v rámci výpočtu spektra materiálu v softwaru IRIS Rheo Hub je zde zmíněna jen jedna metoda, která je v tomto softwaru implementována. Parametry diskretního relaxačního spektra se vypočítají z rovnic (68), (69). Relaxační napětí  $g_i$  a relaxační doba  $\lambda_i$ , jsou stanoveny tak, že průměrná čtvercová odchylka mezi vypočítanými hodnotami  $E_1$ ,  $E_2$  a měřenými hodnotami  $E_1$ ,  $E_2$  je minimální (metoda nejmenších čtverců):

$$\min = \sum_{j=1}^m \left( \left[ \frac{E_1(\omega_j)}{E_{1j}^0} - 1 \right]^2 + \left[ \frac{E_2(\omega_j)}{E_{2j}^0} - 1 \right]^2 \right) \quad (70)$$



kde,

$E_{1j}^0, E_{2j}^0$  měřená data při  $m$  frekvencích  
 $E_1, E_2$  vypočítané hodnoty.

Dosažením do rovnice (70) je získána soustava lineárních rovnic, která může být vyřešena numericky. Je nutné ještě poznamenat, že počet relaxačních režimů  $N$ , musí být volně nastavitelný parametr. Vyplývající součinitelé jsou vždy kladné hodnoty a  $N$  je rozhodující pro úspěch této metody. Navíc interval mezi relaxačními časy není ekvidistantní [Baumgaertel 1989, Winter 1997].

### Výpočet funkce poddajnosti $D(t)$

Nejjednodušší teorií popisující časově závislé chování materiálů je teorie lineární viskoelastivity, která představuje nejjednodušší rozšíření teorie lineární pružnosti. Proto je nutné vyšetřovat vztah mezi napětím a deformací v závislosti na čase. Základním předpokladem lineární viskoelastivity je platnost principu superpozice. Chování materiálu je možno, s jistou mírou přesnosti, popsat matematickými vztahy, které odpovídají určitému reologickému modelu. Reologický model je materiálová funkce, jejímž základem je spektrum - diskrétní, nebo spojitě (závisí na typu modelu). Reologické modely jsou používány z mnoha důvodů:

- spojitá charakteristika materiálu popisující diskrétně naměřené hodnoty;
- výpočet s daty jako s funkcí - modelování odezvy materiálu;
- možnost stanovení charakteristických vlastností na základě struktury reologického modelu.

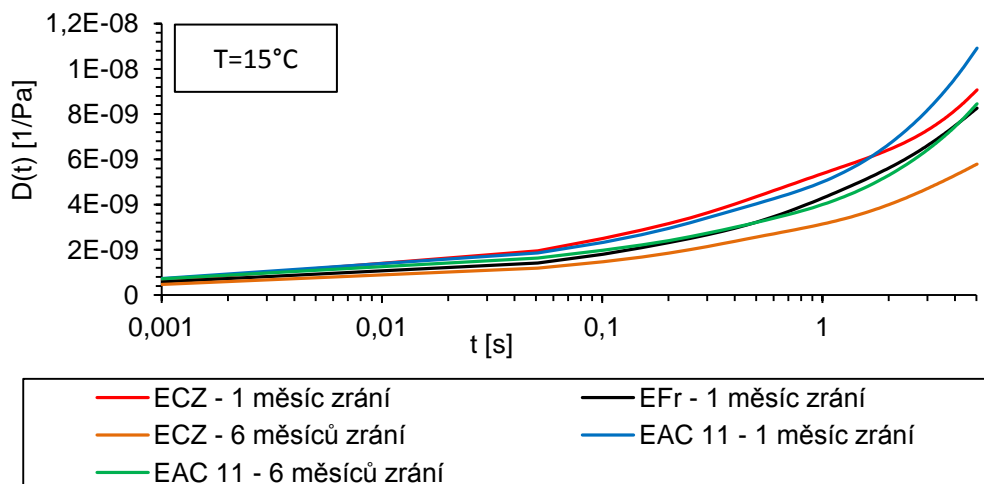
Funkce dynamické poddajnosti  $D(t)$  je obrácená funkce relaxačního modulu  $E(t)$ .

$$D(t) = \frac{1}{E(t)} \quad (60)$$

Relaxační modul  $E(t)$  je reprezentovaný rovnicí (60). Rovnice (59) představuje reologický model obsahující jednu pružinu s tuhostí  $E_0$  a Maxwellův řetězec s  $N$  články. Funkce dynamické poddajnosti  $D(t)$  je reprezentována rovnicí:

$$D(t) = \frac{1}{E_0 + \sum_{i=1}^N \left( g_i \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \right)} \quad (61)$$

Znázorněná funkce poddajnosti na obrázku 113 je vypočtena nelineární regresí komplexních křivek Maxwellovým řetězcem o  $N$  člancích z diskrétního relaxačního spektra materiálu [Baumgaertel 1989]. Parametry diskrétního relaxačního spektra materiálu byly vypočteny pomocí programu IRIS Rheo Hub [Žák 2012]. Vzhledem k referenční teplotě 15 °C a úzkému naměřenému rozsahu použitých zkušebních teplot je poddajnost zobrazena pouze do hodnoty 5,0 s. Počet  $N$  relaxačních režimů, relaxační napětí  $g_i$  a relaxační doby  $\lambda_i$  jsou uvedeny v tabulce 78.



Obrázek 113: Funkce poddajnosti D(t)

N	$g_i$ [Pa]	$\lambda_i$ [s]	N	$g_i$ [Pa]	$\lambda_i$ [s]
E <sub>CZ</sub> - 1 měsíc zrání			E <sub>CZ</sub> - 6 měsíců zrání		
1	5,73E+08	3,34E-04	1	9,73E+08	3,14E-03
2	5,46E+08	1,60E-03	2	4,47E+08	1,60E-01
3	4,11E+08	6,60E-03	3	5,69E+08	2,63E-02
4	4,23E+08	2,89E-02	4	2,20E+08	1,37E+00
5	1,53E+08	1,19E-01	5	1,57E+08	1,09E+01
6	1,59E+08	3,45E-01	6	6,84E+07	8,21E+02
7	1,37E+08	4,58E+00			
8	6,81E+07	9,69E+01			
E <sub>FR</sub> - 1 měsíc zrání			EAC 11 - 6 měsíců zrání		
1	2,79E+08	2,90E-04	1	4,60E+08	2,35E-03
2	6,28E+08	1,32E-03	2	4,80E+08	2,25E-02
3	4,42E+08	1,17E-02	3	2,70E+08	1,48E-01
4	4,81E+08	5,79E-02	4	1,70E+08	5,19E+00
5	2,68E+08	3,70E-01	5	1,60E+08	9,44E-01
6	1,56E+08	2,28E+00	6	5,30E+07	3,50E+02
7	1,18E+08	3,95E+01			
EAC 11 - 1 měsíc zrání					
1	3,11E+08	4,52E-04			
2	4,27E+08	2,22E-02			
3	4,69E+08	2,88E-03			
4	2,92E+08	1,33E-01			
5	1,14E+08	9,89E-01			
6	1,28E+08	3,86E+00			
7	6,08E+07	6,38E+01			

Tabulka 78: Diskrétní relaxační spektrum materiálu