



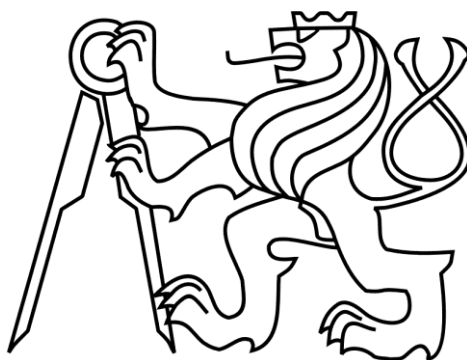
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

## **Analýza trvanlivosti stability asfaltových směsí**

Analysis of the durability stability of asphalt mixtures



---

## **DISERTAČNÍ PRÁCE**

---

Ing. Tereza Valentová

Doktorský studijní program: **Stavební inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce a dopravní stavby**

Školitel: **Ing. Jan Valentin, Ph.D.**

---

PRAHA, 2021



## PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Tereza Valentová

Název disertační práce: Analýza trvanlivosti stability asfaltových směsí

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracovala 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 projektů:

GA ČR 18-13830S: Podrobný výzkum fyzikálně-chemické interakce a souvisejících jevů mezi asfaltem a kamenivem pomocí pokročilých experimentálních metod

TA ČR TE01020168: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)

SGS18/048/OHK1/1T/11: Vliv stárnutí na stabilitu vybraných typů adhezivních přísad a trvanlivost asfaltové směsi

SGS16/055/OHK1/1T/11: Optimalizace pokročilých postupů ověřování dlouhodobé přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu, řešení projektu jako hlavní řešitel

SGS15/049/OHK1/1T/11: Vývoj laboratorní metody ověření dlouhodobého účinku přilnavostních přísad u asfaltových směsí, řešení projektu jako hlavní řešitel

V Praze dne: 31. 8. 2021

-----  
Podpis



### Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala zejména mému školiteli, Ing. Janu Valentinovi, Ph.D. za jeho cenné rady, vedení, připomínky, obrovskou ochotu a trpělivost během zpracování této disertační práce. Dále bych ráda poděkovala celému osazenstvu silniční laboratoře FSv ČVUT za jejich zkušené rady, velkou ochotu a pomoc při jakémkoliv problému. Nemalé poděkování patří i Ing. Janu Trejbalovi, Ph.D. a Ing. Václavu Nežerkovi, Ph.D. za jejichž spolupráce mohla vzniknout tato disertační práce. A v neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině za neutuchající podporu při studiu.



## ABSTRAKT

Problematika přilnavosti mezi kamenivem a asfaltovým pojivem, jakož i úzce související komplexnější aspekt trvanlivosti asfaltové směsi, ověřovaný dnes nejčastěji její odolností proti účinkům vody nebo vody a mrazu, zůstává jedním z nejdéle a nejintenzivněji studovaných technických a materiálově podmíněných fenoménů asfaltových směsí. V dnešní době existuje celá řada zkušebních postupů, které velmi zjednodušeně simulují reálné podmínky působící na asfaltové směsi během její životnosti a dávají nám určitou představu o chování asfaltových směsí, přičemž v používaných zkušebních metodách a postupech zůstává ve velké míře opomenut faktor dlouhodobého účinku faktorů, mezi které patří teplotní stálost, dlouhodobé stárnutí, chemická stabilita apod. Obdobně jako v případě stárnutí asfaltového pojiva, ani v tomto případě dosud neumíme jednoznačně popsat a s jistotou opakovaně potvrdit veškeré jevy a příčiny ovlivňující vlastní adhezi či kohezi, jelikož samotná problematika má rozměr jak fyzikálně-mechanický, tak i chemický a mechano-chemický. Je proto snaha nadále rozvíjet doposud zavedené poměrně jednoduché a pro zkušebnictví v oblasti asfaltových pojiv a směsí zavedené zkušební postupy pro posuzování trvanlivosti asfaltových směsí v laboratorních podmínkách, jež by navíc simulovaly stárnutí, působení negativního účinku vody a mrazu, a které by v konečném důsledku odpovídaly skutečným podmínkám u existujících asfaltové vrstvy v konstrukci vozovky. V této souvislosti je také snaha eliminovat značnou závislost výsledků na subjektivním hodnocení, kterou s sebou, vlastní zkouška stanovení adheze mezi pojivem a kamenivem po desetiletí přináší a nalézt tak vhodnou metodiku využívající, pokud možno jednoduché zkušební postupy ověření dlouhodobé účinnosti přilnavostních přísad, tedy i požadované trvanlivosti asfaltové směsi.





## ABSTRACT

The problem of adhesion between aggregate and bituminous binder, as well as the closely related aspect of the durability of asphalt mixtures, verified by its resistance to the effects of climatic conditions, e.g., the effect of water immersion or water and frost impact, remains one of the longest and most intensively studied phenomena of asphalt mixtures. At the present time, there is a number of laboratory procedures that simulate real conditions of the asphalt layers in a pavement construction in a very simplified manner, giving us some idea of the behaviour of asphalt mixtures. For better understanding, it is necessary to include the factors of long-term effect, temperature stability, ageing, chemical stability, etc. We are not yet able to describe and confidently reconfirm all the phenomena and effects influencing the actual adhesion as well as we cannot provide sufficient information in the case of ageing of bituminous binder and asphalt mixtures. The actual issue has both physical-mechanical and chemical dimensions. There is an endeavour to continue with the development of test procedures established to date for assessing the durability of asphalt mixtures under laboratory conditions, which would simulate ageing and the negative effects of water and frost, and which would ultimately correspond to the real conditions of the asphalt layer in the road construction. In this context, there is also an effort to eliminate the considerable dependence of the results on subjective evaluation that the actual testing and assessment of adhesion between bituminous binder and aggregate delivers, and thus to find a suitable methodology using, if possible, simple test procedures to verify the long-term effectiveness of the adhesion promoters (additives), and therefore the required durability of the asphalt mixture.



## OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>1</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1 Motivace výzkumu</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2 Cíle disertační práce</b> .....	<b>12</b>
<b>2 ROZBOR VSTUPNÍCH MATERIÁLŮ ASFALTOVÉ SMĚSI</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Asfaltové pojivo</b> .....	<b>14</b>
2.1.1 Chování asfaltového pojiva .....	14
2.1.2 Chemické složení asfaltového pojiva.....	15
2.1.2.1 Maltény.....	17
2.1.2.2 Asfaltény .....	17
2.1.2.3 Asfaltové pryskyřice .....	17
2.1.3 Rozdělení asfaltových pojiv .....	17
<b>2.2 Kamenivo</b> .....	<b>19</b>
1.1.1 Kamenivo z lomu Chlum .....	21
1.1.2 Kamenivo z lomu Brant .....	21
1.1.3 Kamenivo z lomu Kobylí Hora.....	22
1.1.4 Kamenivo z lomu Libodřice .....	22
1.1.5 Kamenivo z lomu Litice.....	23
1.1.6 Kamenivo z lomu Markovice .....	24
1.1.7 Kamenivo z lomu Měřunice.....	25
1.1.8 Kamenivo z lomu Sýkořice – Zbečno .....	25
1.1.9 Kamenivo z lomu Zbraslav.....	26
1.1.10 Kamenivo z lomu Svrčovec .....	26
1.1.11 Kamenivo z lomu Mladovice .....	27
1.1.12 Kamenivo z lomu Skuteč - Litická .....	28
<b>2.3 PŘILNAVOSTNÍ PŘÍŠADY A JEJICH ROZDĚLENÍ</b> .....	<b>28</b>
2.3.1 Tekuté přilnavostní přísady (chemické povrchově aktivní látky) .....	29
2.3.1.1 ValoJames A/Rhodoval DP500T .....	29
2.3.1.2 Anova 1420 Anti-Strip .....	29
2.3.1.3 AdHere LOF 65-00 EU.....	30
2.3.1.4 Wetfix BE.....	31
2.3.1.5 Zycotherm .....	32
2.3.1.6 Impact 8000 .....	33
2.3.1.7 Iterlene SL/100 PLUS.....	33
2.3.1.8 AD-2 .....	34
2.3.1.9 ADHESIL Z.....	34



2.3.1.10	BITUSIL .....	35
2.3.2	Mikrofilery a náhrady tradičního plniva .....	35
2.3.2.1	Vratný filer – Brant.....	36
2.3.2.2	Vratný filer – Zbraslav .....	36
2.3.2.3	Vratný filer – Bystřec.....	36
2.3.2.4	Vratný filer – Chornice .....	37
2.3.2.5	Odprašky z lomu Plešovice .....	37
2.3.2.6	Filer Velké Hydčice .....	38
2.3.2.7	Filer Čertovy schody.....	38
2.3.2.8	Mletý betonový recyklát .....	38
2.3.2.9	Vysokopecní struska.....	40
2.3.2.10	Pěnové sklo .....	41
2.3.2.11	Sklo získané z fotovoltaických panelů .....	41
<b>3</b>	<b>TRVANLIVOST ASFALTOVÝCH SMĚSÍ .....</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Problematika přilnavosti asfaltu ke kamenivu .....</b>	<b>43</b>
3.1.1	Definice adheze .....	43
3.1.2	Definice koheze .....	44
3.1.3	Základní interakce asfaltu a kameniva .....	45
3.1.3.1	Elektrostatická interakce mezi ionty .....	46
3.1.3.2	Elektrodynamická interakce pomocí van der Waalsovy síly.....	46
3.1.4	Modely přilnavosti.....	47
3.1.4.1	Teorie mechanická .....	48
3.1.4.2	Teorie chemické reakce .....	49
3.1.4.2.1	Funkční skupiny asfaltu .....	50
3.1.4.2.2	Funkční skupiny povrchu kameniva .....	51
3.1.4.2.3	Interakce asfalt-kamenivo.....	52
3.1.4.3	Teorie povrchové energie .....	53
3.1.4.3.1	Měření kontaktního úhlu .....	56
3.1.4.3.2	Metody měření kontaktního úhlu.....	57
3.1.4.4	Teorie molekulární orientace .....	57
3.1.5	Hlavní mechanismy procesu „obnažování“ .....	57
3.1.5.1	Oddělení, přemístění .....	58
3.1.5.2	Spontánní emulgace.....	58
3.1.5.3	Pórový tlak .....	59
3.1.5.4	Porušení chemické vazby .....	60
3.1.6	Faktory ovlivňující adhezi mezi pojivem a kamenivem .....	60
3.1.6.1	Vliv kameniva mineralogického složení kameniva .....	61
3.1.6.2	Vliv vody.....	64
3.1.6.3	Vliv přilnavostních přísad .....	65



3.1.6.4	Další aspekty .....	65
<b>3.2</b>	<b>Problematika stárnutí asfaltových pojiv a asfaltových směsí .....</b>	<b>65</b>
3.2.1	Základní procesy stárnutí .....	66
3.2.1.1	Stárnutí odpařováním .....	67
3.2.1.2	Oxidační stárnutí .....	67
3.2.1.3	Strukturální stárnutí .....	68
3.2.1.4	Fyzikální stárnutí .....	68
3.2.2	Druhy stárnutí .....	68
3.2.3	Co ovlivňuje stárnutí.....	69
3.2.4	Metody laboratorního stárnutí dle platných předpisů.....	71
3.2.4.1	Stárnutí asfaltového pojiva .....	71
3.2.4.2	Metody simulující krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva.....	72
3.2.4.3	Metody simulující dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva.....	73
3.2.5	Stárnutí asfaltové směsi .....	74
3.2.5.1	Stárnutí volně ložené směsi .....	74
3.2.5.2	Stárnutí zhutněné asfaltové směsi .....	75
3.2.5.3	Zkušební metodika použitá v rámci této práce .....	75
<b>4</b>	<b>Zavedené zkušební postupy a metody.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>Zkušební metody na nezhutněných směsích.....</b>	<b>79</b>
4.1.1	Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu dle ČSN 73 6161.....	79
4.1.1.1	Hodnocení zkoušky přilnavosti.....	80
4.1.2	Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem dle ČSN EN 12697-11 .....	81
4.1.2.1	Metoda statická .....	82
4.1.2.2	Metoda obnažování vroucí vodou .....	82
4.1.2.3	Metoda otáčení lahví .....	83
4.1.3	„PEEL TEST“ (zkouška odlupování) dle normy ASTM D6862-11 .....	84
4.1.4	„PATTI TEST“ (pneumatická zkouška adheze v tahu) dle ASTM D4541.....	86
4.1.5	„Asphalt bond strength test (ABS)“ – Stanovení pevnosti spojení asfaltového pojiva ..	90
4.1.6	„Pul-off test“ .....	91
<b>4.2</b>	<b>Zkušební metody na zhutněných zkušebních vzorcích použitých v této práci .....</b>	<b>93</b>
4.2.1	STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ASFALTOVÉHO ZKUŠEBNÍHO TĚLESA .....	93
4.2.1.1	Postup zkoušky.....	93
4.2.1.2	Výpočet objemové hmotnosti.....	94
4.2.2	STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ.....	94
4.2.2.1	Postup zkoušky.....	95
4.2.2.2	Výpočet maximální objemové hmotnosti .....	96
4.2.3	STANOVENÍ MEZEROVITOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ .....	97
4.2.4	STANOVENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU .....	97
4.2.4.1	Postup zkoušky.....	97



4.2.4.2	Výpočet pevnosti v příčném tahu .....	98
4.2.5	STANOVENÍ ODOLNOSTI ZKUŠEBNÍHO TĚLESA VŮČI ÚČINKŮM VODY .....	98
4.2.5.1	Postup zkoušky.....	98
4.2.5.2	Výpočet poměru pevností v příčném tahu .....	99
4.2.6	STANOVENÍ ODOLNOSTI ZKUŠEBNÍHO TĚLESA VŮČI ÚČINKŮM VODY S JEDNÍM ZMRAZOVAČÍM CYKLEM .....	100
4.2.6.1	Postup zkoušky.....	100
4.2.7	STANOVENÍ MODULU TUHOSTI .....	101
4.2.7.1	Postup zkoušky.....	101
4.2.7.2	Výpočet modulu tuhosti.....	103
4.2.8	STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI ŠÍŘENÍ TRHLINY .....	103
4.2.8.1	Příprava zkušebního tělesa .....	104
4.2.8.2	Postup a vyhodnocení zkoušky .....	104
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI .....</b>	<b>106</b>
<b>5.1</b>	<b>Vliv dlouhodobého stárnutí asfaltových pojiv včetně ověření stability adhezního účinku vybraných chemických přísad u zestárlé asfaltové směsi [143, 170, 171, 172] 107</b>	
5.1.1	Rozbor vstupních materiálů a návrh směsi .....	107
5.1.2	Simulace dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi .....	109
5.1.3	Vyhodnocení zkoušky přilnavosti mezi pojivem a kamenivem pro různé typy kameniva.....	109
5.1.4	Vyhodnocení zkoušky stanovení vodní citlivosti .....	111
5.1.4.1	Porovnání pevností v příčném tahu .....	111
5.1.4.2	Vyhodnocení odolnosti zkušebních těles vůči účinkům vody dle ČSN EN 12697-12.....	113
5.1.4.3	Vyhodnocení odolnosti zkušebních těles vůči účinkům vody včetně varianty s jedním zmrazovacím cyklem dle AASHTO T-283.....	116
5.1.5	Porovnání rozdílných uložení zkušebních těles v klimatizační komoře při zvýšené teplotě .....	116
5.1.6	Diskuze k dosaženým výsledkům.....	118
5.1.7	Závěr dílčí studie dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi a asfaltového pojiva.....	120
<b>5.2</b>	<b>Ověření stability adhezního účinku vybraných chemických a minerálních přísad u zestárlé asfaltové směsi vybranou metodou laboratorního stárnutí [173, 174, 175, 176] .....</b>	<b>120</b>
5.2.1	Návrh směsi a použité varianty .....	120
5.2.1.1	Varianty přilnavostních přísad a mikrofilerů .....	121
5.2.2	Výsledky experimentální studie .....	122
5.2.2.1	Základní fyzikální vlastnosti navržených směsí, případ ACL 16S.....	122
5.2.2.2	Základní fyzikální vlastnosti navržených směsí, případ ACL 16+ .....	123
5.2.2.3	Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem .....	123
5.2.2.4	Odolnosti vůči účinkům vody – ITSR .....	125
5.2.2.4.1	Porovnání české technické normy a modifikované americké metody.....	126
5.2.2.4.2	Aplikace simulovaného dlouhodobého stárnutí .....	129



5.2.3	Modul tuhosti.....	130
5.2.4	Odolnost proti šíření trhliny .....	132
5.2.5	Diskuze k dosaženým výsledkům.....	132
<b>5.3</b>	<b>Vliv nových typů přilnavostních přísad pro zlepšení adheze asfaltového pojiva [177, 178] .....</b>	<b>133</b>
5.3.1	Návrh směsi a použité varianty .....	133
5.3.1.1	Varianty přilnavostních přísad .....	133
5.3.2	Výsledky experimentální studie vlivu přilnavostních přísad na vybrané charakteristiky asfaltových směsí.....	134
5.3.2.1	Vyhodnocení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem.....	134
5.3.2.2	Vyhodnocení vodní citlivosti asfaltové směsi.....	135
5.3.2.3	Vyhodnocení výsledků modulu tuhosti .....	135
5.3.3	Diskuze k dosaženým výsledkům.....	137
<b>5.4</b>	<b>Využití jemnozrnných složek drceného odpadního materiálu jako minerální přísady do asfaltových směsí [149, 150] .....</b>	<b>137</b>
5.4.1	Návrh směsi a použité varianty .....	137
5.4.2	Výsledky experimentální studie .....	138
5.4.2.1	Základní charakteristiky .....	138
5.4.3	Stanovení odolnosti vůči účinkům vody včetně varianty se zmrazováním .....	139
5.4.4	Stanovení modulu tuhosti .....	140
5.4.5	Stanovení odolnosti asfaltové směsi proti šíření trhliny .....	141
5.4.6	Potenciál využití odpadního materiálu jako náhrady tradičního jemnozrnného plniva.....	142
<b>5.5</b>	<b>Alternativy minerálních přísad v asfaltových směších [179] .....</b>	<b>142</b>
5.5.1	Stanovení základních geometrických, fyzikálních a mechanických vlastností filerů ....	143
5.5.1.1	Posouzení jemných částic – Zkouška methylenovou modří dle ČSN EN 933-9 .....	143
5.5.1.2	Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru dle ČSN EN 1097-4 .....	144
5.5.1.3	Stanovení měrné hmotnosti fileru – pyknometrická zkouška dle ČSN EN 1097-7 .....	145
5.5.2	Stanovení citlivosti na vodu filerů pro asfaltové směsi .....	147
5.5.3	Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 .....	148
5.5.4	Diskuze k dosaženým výsledkům.....	149
<b>5.6</b>	<b>Využití digitální analýzy obrazu jako možného nástroje pro stanovení přilnavosti – „semi-automatické metody“ [184, 188, 189, 190] .....</b>	<b>151</b>
5.6.1	Program „Binder 1.0“ - ověření přilnavosti pomocí digitálního obrazového snímkování na základě stanovení stupně šedi .....	151
5.6.1.1	Příprava vzorku – pořízení digitálního snímku .....	152
5.6.1.2	Úprava digitálního snímku .....	152
5.6.1.3	Digitální analýza obrazu pomocí programu Binder - algoritmus analýzy .....	153
5.6.1.4	Výsledné hodnocení programem Binder 1.0.....	154
5.6.1.5	Porovnání vizuálního a poloautomatického hodnocení (Binder 1.0) přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161.....	155



5.6.1.6	Diskuze k dosaženým výsledkům .....	160
5.6.2	Program PyPAIS - ověření přilnavosti pomocí digitálního obrazového snímkování použitím algoritmu hodnocení lokální entropie snímku .....	160
5.6.2.1	Pořizování snímků .....	160
5.6.2.2	Algoritmus analýzy .....	161
5.6.2.2.1	Prahování intenzity .....	162
5.6.2.2.2	Prahování drsnosti .....	163
5.6.2.2.3	Vyhlazování .....	163
5.6.2.3	Experimentální testování softwaru .....	164
5.6.2.4	Výsledky experimentálního testování použitého softwaru PyPAIS .....	165
5.6.2.5	Porovnání vizuálního a poloautomatického hodnocení (PyPAIS) přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 .....	166
5.6.2.6	Diskuze k dosaženým výsledkům .....	170
<b>5.7 Vliv účinku vybraných přilnavostních přísad v asfaltových směsí ověřený souborem experimentálních metod vlastních a standardizovaných přístupů [188, 189] .....</b>		<b>171</b>
5.7.1	Návrh směsi a použité varianty .....	171
5.7.1.1	Varianty použitých adhezivních aditiv a minerálních přísad .....	171
5.7.1.2	Kamenivo .....	171
5.7.1.3	Asfaltové směsi .....	172
5.7.2	Experimentální metody .....	173
5.7.2.1	FTIR spektroskopie .....	173
5.7.2.2	Měření kontaktního úhlu .....	173
5.7.2.3	Měření volné povrchové energie .....	174
5.7.2.4	Zkouška přilnavosti .....	175
5.7.2.5	Zkouška přímým tahem „Direct pull test“ .....	175
5.7.2.6	Zkouška vodní citlivosti asfaltových směsí a odolnosti vůči vzniku trhlin .....	176
5.7.2.6.1	Příprava zkušebních vzorků .....	176
5.7.2.6.2	Stanovení vodní citlivosti včetně odolnosti vůči vodě s jedním zmrazovacím cyklem .....	176
5.7.2.6.3	Stanovení modulu tuhosti (zkouškou opakovaného namáhání v příčném tahu IT-CY) .....	177
5.7.2.6.4	Stanovení odolnosti proti šíření trhliny (SCB) .....	177
5.7.3	Výsledky experimentálního testování .....	177
5.7.3.1	Výsledky FTIR spektroskopie .....	177
5.7.3.2	Výsledky měření kontaktního úhlu .....	178
5.7.3.3	Výsledky měření volné povrchové energie .....	178
5.7.3.4	Výsledky stanovení přilnavosti mez pojivem a kamenivem .....	179
5.7.3.5	Pevnost spojení .....	180
5.7.3.6	Výsledky stanovení vodní citlivosti a odolnosti proti stárnutí asfaltových směsí .....	181
5.7.3.7	Shrnutí výsledků .....	183
5.7.4	Diskuze k dosaženým výsledkům .....	184

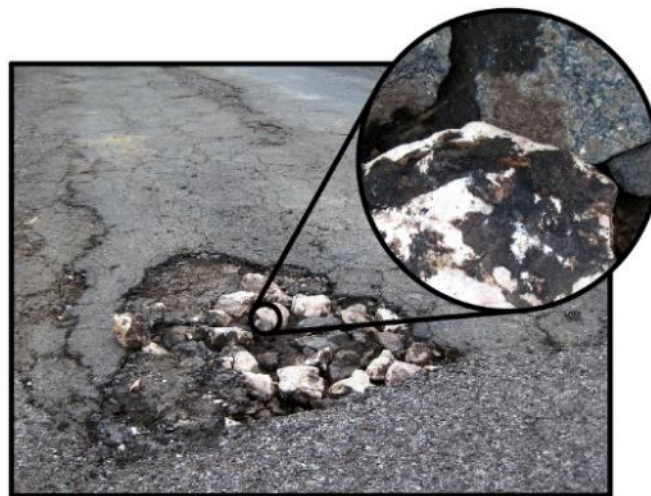


<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>185</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>190</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>202</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>207</b>
<b>Příloha A – Výstupy zkušebních vzorků hodnocené s využitím softwaru Binder 1.0.....</b>	<b>209</b>
<b>Příloha B – Výstupy zkušebních vzorků hodnocené s využitím softwaru PyPAIS.....</b>	<b>239</b>
<b>Příloha C - Diagramy závislosti síly na přetvoření přímou tahovou zkouškou .....</b>	<b>254</b>



## 1 ÚVOD

Na celém světě tvoří převážnou část silniční infrastruktury konstrukce vozovky z asfaltových směsí. Jakékoli kvalitativní nedostatky, které vedou ke vzniku různých konstrukčních poruch (např. únavové nebo mrazové trhliny, výtluky, vyjeté koleje atd.) nebo ke zkrácení životnosti těchto konstrukcí, mají obrovský dopad na plynulost dopravy, dostupnost silniční infrastruktury a uživatelský komfort silniční dopravy. Všechny tyto aspekty lze vyjádřit i ekonomickými veličinami, a pokud bychom tak činili u každé pozemní komunikace, byli bychom překvapeni rozsahem ekonomických ztrát, jež uvedené dopady s sebou nesou. Snaha navrhovat vozovky s dlouhou životností, které se vyznačují dobrou trvanlivostí, v rámci životního cyklu efektivními a co do absolutní výše hospodárnými výdaji na údržbu a možnostmi po dosažení konce životnosti vozovku recyklovat, se v posledních letech zvyšuje. I zde však pohledem inženýrství zdaleka ne razancí a rychlostí, jež by si tato problematika zaslouhovala. V současné době se nadále obecně zvyšuje spotřeba neobnovitelných přírodních zdrojů, mezi které se řadí materiály potřebné pro výrobu asfaltových směsí, roste však i spotřeba finančních, tak i energetických zdrojů. Děje se tak navzdory skutečnosti, že dostupnost velké části těchto zdrojů je omezená (mohou tedy v čase dojít). Současně sílí nezbytnost řešit projevy související se zrychlujícími se klimatickými změnami a obecně negativními dopady na životní prostředí, probíhající v důsledku lidské činnosti. Cílem trvale udržitelného rozvoje je přitom snaha o zefektivnění a optimalizaci těchto nákladů a potřeb v průběhu celého životního cyklu jakékoli stavby, a tedy i konstrukce vozovky.



Obr. 1. Výtluk v krytu vozovky jako důsledek ztráty přilnavosti mezi asfaltovým pojivem a kamenivem.

Nicméně, stejně jako jakákoliv jiná uměle vybudovaná konstrukce, tak i asfaltové vozovky mění s časem své vlastnosti – přirozeně i v důsledků nedokonalostí, které má každý uměle vytvořený i přírodní systém. Porušení vlhkostí je považováno za jednu z hlavních příčin poškození asfaltových vozovek, přičemž na jejich údržbu a obnovu je ročně vynaložena nemalá finanční částka. Jedním z typických mechanismů porušení působením vlhkosti je ztráta mezifázové adheze (vazby) kvůli proniknutí vlhkosti na rozhraní asfaltového pojiva a kameniva, jež způsobuje obnažování jednotlivých zrn kameniva, čímž ovlivňuje celkovou soudržnost

asfaltové směsi, která při zohlednění faktoru času může dospět až k postupnému vytržení kameniva z povrchu vozovky. Obnažování je definováno jako proces, který má za následek fyzické oddělení asfaltového pojiva a kameniva kvůli ztrátě přilnavosti na rozhraní těchto materiálů za přítomnosti vody. [5, 6] Tento jev navíc umožňuje pronikání agresivních látek do mezifáze materiálového systému asfaltové směsi, čímž se spouští řetězová reakce poruch. Mezi hlavní dopady poškození vlivem nepříznivého účinku vody lze zařadit zejména ztrátu hmoty z krytu (ztráta asfaltového tmelu, ztráta kameniva z nátěru). To v konečném důsledku přispívá ke ztrátě drsnosti (ztrátě mikro a makrotextury), k tvorbě výtlučků a ke ztrátě strukturální pevnosti. Následkem těchto dějů je vznik dalších konstrukčních poruch, jako jsou mrazová (teplotně indukovaná) porušení a vznik trhlin. Jakmile tento proces začne, rychlost degradace vozovky rapidně vzrůstá až do vytvoření výtlučků. Rychlost této degradace je pak souběžně silně ovlivněna stárnutím asfaltové směsi. Je proto důležité uvážit i vliv stárnutí při hodnocení vodní citlivosti. Typický příklad poruchy asfaltové vrstvy je znázorněn na Obr. 1. [1, 2, 3, 4]

V průběhu životního cyklu je konstrukce vozovky vystavena negativním vlivům dopravního zatížení, klimatu (teplota, dešťové přeháňky, mráz apod.) a UV záření, které ovlivňují vlastnosti asfaltové směsi. Na asfaltové směsi jsou kladeny stále větší nároky z hlediska trvanlivosti a do popředí se stále více dostávají adhezivní přísady pro zlepšení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem, resp. jako řešení pro snížení vodní citlivosti asfaltových směsí. Již počátkem 20. století se poškození vozovky způsobené účinkem vody a vlhkosti zařadilo mezi hlavní příčiny porušení asfaltových vozovek. Pro vytvoření směsi odolné vůči vodě a ztrátě přilnavosti můžeme přistoupit v zásadě třemi možnými způsoby. Prvním z nich je volba vhodného hydrofobního kameniva, další možností je použití minerální příměsi, která pomáhá zajistit kvalitní pokrytí zrn kameniva asfaltovým filmem. V neposlední řadě lze zvolit vhodnou chemickou přísadu fungující na principu povrchově aktivní látky, která má zajistit zlepšení vazby mezi kamenivem a pojivem. [2, 7, 8]

Návrh asfaltových vozovek se v posledních letech potýká s mnoha novými problémy, které musí technologové řešit. V první řadě se jedná zejména o dostupnost vhodného kameniva, které tvoří základní složku (materiál) asfaltové vozovky, jehož je v některých regionech nedostatek. Současně je snahou upřednostnit, z ekonomických důvodů pro výrobu asfaltových směsí, lokálně dostupné zdroje, které nemusí vždy splňovat nejvyšší požadavky z hlediska přilnavosti a následně tak i trvanlivosti asfaltové směsi. Dalším aspektem jsou vlastnosti asfaltových pojiv a jejich kvalita, která se snižuje na úkor kvality a zejména kvantity rafinérskými procesy získávaných pohonných hmot a dalších destilátů z ropy. V posledních letech se opakovaně diskutuje o nižší kvalitě asfaltů, která se projevuje rychlejším stárnutím, vyšší křehkostí, nižší odolností vůči účinkům vody a mrazu, zhoršenou přilnavostí apod. To lze z jisté části přisuzovat původu a kvalitě ropy, technologii zpracování ropy a samotné výrobě základního asfaltu. S neustálým rozvojem rafinérských technologií je umožněno podstatně efektivněji využívat surovou ropu, zejména s ohledem k výtěžnosti lehkých a středních destilátů, nikoli tedy ropného zbytku, kterým samotný asfalt je. Nicméně díky výzkumu a vývoji jsme dnes schopni tato základní pojiva z destilací chemicky upravit, modifikovat a dodat jim vlastnosti za použití například různých typů přísad tak, aby splňovala i velmi náročné požadavky na kvalitu, výkonnost a životnost prováděné asfaltové vozovky. To je však úzce spjato s vyššími náklady, což se v konečném důsledku odráží na výsledné ceně konstrukce vozovky. Trh v dnešní době nabízí



nepřebornou škálu různých typů přísad, ale ne všechny skutečně splňují potřebné požadavky. Je snaha aplikací vhodné přísady docílit vysoce hodnotného produktu, který bude mít po určitou dobu dobře zajištěnou stabilitu. Kvůli změnám klimatu a náhlým výkyvům počasí je snaha snižovat také emise CO<sub>2</sub>, což se týká i materiálů silničního stavitelství. Změny klimatu vlivem globálního oteplování mají za následek zvýšené srážkové úhrny, nebo extrémnější výkyvy teplot, tím dochází celosvětově ke zvýšení vlhkosti a vozovky jsou často vystavovány většímu množství vody, což má za následek zvýšenou saturaci směsí v konstrukci vozovky. V neposlední řadě je třeba věnovat pozornost zvyšujícímu se dopravnímu zatížení, s čímž souvisí i neustále se zvyšující stupeň motorizace a automobilizace. Podle statistiky Technické správy komunikací hlavního města Prahy se například celkový počet motorových vozidel registrovaných na území ČR výrazně zvyšoval až do roku 1999, poté se nárůst zpomalil, nicméně počínaje rokem 2012 začal počet registrovaných automobilů opět výrazně stoupat (zejména na území hlavního města Prahy). Ke konci roku 2020 připadal v České republice jeden osobní automobil na 1,8 obyvatele (v hlavním městě Praha dokonce 1,4 obyvatele). [9] S přibývajícím dopravním zatížením narůstají i požadavky na únosnost a kapacitu silniční sítě. Pro splnění těchto nároků je třeba volit takové materiály, které odolají zatížení dlouhou řadu let. Tedy odolnost asfaltových vozovek ve smyslu trvanlivosti a životnosti se stává hlavním aspektem a požadavkem pro návrh asfaltových směsí, což odráží potřebu mezinárodně uznávaných a standardizovaných přístupů. Zejména ve fázi návrhu směsi mohou být vybrány optimální materiály a jejich procentuální zastoupení v navržené asfaltové směsi, ke zvýšení celkové trvanlivosti, čímž se sníží potřeba zdrojů a následně může být dosažen delší životní cyklus vozovek. [7, 8]

Zvláště pro adhezní přísady ovšem neexistuje žádný empirický podklad, který by pomohl s výběrem při návrhu trvanlivějších asfaltových směsí, a který by současně zahrnoval i ověření stability této přísady z hlediska dlouhodobého účinku v asfaltové směsi. Abychom měli představu o tom, jak se bude asfaltová směs s využitím adhezivních přísad chovat ke konci návrhového období v konstrukci vozovky, je nezbytné zabývat se ve zvýšené míře právě problematikou přilnavosti mezi pojivem a kamenivem v kombinaci se stárnutím asfaltových směsí. Stejnou problematikou v mikroskopickém měřítku zůstává ztráta adheze (porucha na rozhraní asfaltového pojiva a kameniva) a ztráta koheze (vnitřní porucha asfaltového pojiva). Ačkoli se může na první pohled zdát, že asfaltové pojivo tvoří dokonale nepropustnou vrstvu jednotlivých zrn kameniva, asfaltový film vytváří samostatný pás uvnitř asfaltového tmelu, který je tvořen pouze částicemi fileru po obou stranách asfaltového filmu, jehož tloušťka se pohybuje od 0,5 μm do 2,4 μm. [10] Měření získaná na základě analýzy obrazu pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu ukázala, že asfaltové směsi obsahují převážně asfaltový tmel, což je směs jemných částic, fileru a asfaltového pojiva, v rozmezí od 25 μm do 365 μm v uvažovaných asfaltových směsích. [10] Termín "tloušťka vrstvy asfaltového pojiva" se v případě ztuhnutí asfaltové směsi vztahuje na tloušťku účinného asfaltu, jedná se o celkový obsah asfaltu ve ztuhlé asfaltové směsi snížení o obsah, který byl absorbován do pórové struktury kameniva). Tloušťka vrstvy asfaltového pojiva je v literatuře často zmiňována jako jedno z možných kritérií pro návrh asfaltové směsi a současně zajištění kvality navržené asfaltové směsi, a tedy i výsledné trvanlivosti vozovky. V průběhu let se objevila obecná představa, že průměrná tloušťka filmu asfaltového pojiva, která se pohybuje v rozmezí 8 až 15 mikronů, zajistí dostatečné vlastnosti navržené asfaltové směsi v konstrukci vozovky [11]. Tloušťka asfaltového filmu přitom přímo



souvisí s trvanlivostí asfaltových směsí. Bylo zjištěno, že silnější vrstvy asfaltového pojiva vytvářejí pružné směsi, které jsou schopny odolávat dopravnímu zatížení a klimatickým změnám. Zatímco tenké vrstvy asfaltového filmu vytvářejí směsi, které jsou křehké a náchylné k nadměrné tvorbě trhlin a vyjetým kolejím, majících vliv na trvanlivost asfaltové směsi a snižují tak životnost konstrukce vozovky. Ty jsou daleko náchylnější k působení účinku vody a vlhkosti, která vstupuje do asfaltové vozovky, resp. na rozhraní zrn kameniva a pojiva několika způsoby – dešťovými srážkami, kapilárním vzlínáním, ale také tlakovou vodou. V kombinaci s účinky dopravy se tyto jevy zvyšují a dále umocňují přítomností posypových solí v zimním období. Dostatečná tloušťka asfaltového filmu kolem kameniva působí na rozhraní v asfaltové směsi jako tzv. spojovací prostředek nebo také jako stimulátor adheze pro zajištění kvalitního spojení. V ČR se přitom při vlastním návrhu asfaltových směsí vychází z minimálního obsahu asfaltového pojiva, což může být z pohledu adheze kritický přístup. McLeod [12] dospěl k závěru, že asfaltové směsi je nutné navrhovat spíše na základě průměrné tloušťky asfaltového filmu 8  $\mu\text{m}$  než na základě minimálního obsahu asfaltu. Z jiných studií se ukazuje, že asfaltové směsi, které mají průměrnou tloušťku asfaltového filmu 9–11  $\mu\text{m}$ , mají vyšší odolnost vůči obnažování [13]. Z praktického hlediska uvedené pak má přímou souvislost se skutečnou trvanlivostí a rychlostí, kterou se některé typy poruch u vozovek projevují. Mnohdy je to bohužel důsledek toho, že vliv tloušťky a kvality asfaltového filmu je ignorován nebo podceňován.

## 1.1 Motivace výzkumu

Přilnavost asfaltového pojiva ke kamenivu neboli mezifázová interakce asfaltového pojiva a minerálního kameniva, je jednou z nejdůležitějších aplikačních vlastností asfaltového pojiva a určuje schopnost se chemicky vázat na kamenivo. Schopnost asfaltového pojiva, co nejdokonaleji přilnout k povrchu kameniva, zásadně ovlivňuje schopnost samotné asfaltové směsi odolávat vůči vnějším faktorům, jako je vystavení účinkům vody, mrazu, teplotě a mechanickému namáhání. Proto je velmi důležité dbát na všechny tyto faktory s tím související. Přilnavost (kvalita vazby) asfaltového pojiva ke kamenivu je vlastnost, která zásadně ovlivňuje výsledné parametry asfaltové směsi aplikované na vozovce, určuje nám tedy kvalitu a trvanlivost tohoto kompozitního materiálu použitého v konstrukci vozovky. Je-li tato vazba slabá, dochází k obnažování zrn kameniva. Vzájemné působení těchto dvou materiálů je řízeno komplexními ději odehrávajícími se na molekulární úrovni. Ty vedou k formaci adhezivních sil, které vychází z polárních složek asfaltového pojiva. Na materiálovém rozhraní snižují mezifázovou energii, tedy zvyšují adhezi. V tomto ohledu hrají podstatnou roli fyzikálně-mechanické vlastnosti kameniva samotného (jedná se především o chemické složení, morfologii povrchu, porozitu, tvar apod.). Převažující většina běžně používaného kameniva do asfaltových směsí je na území České republiky tvořena kyselými hydrofilními horninami křemičité báze. Takové kamenivo je charakteristické vysokou afinitou k vodě. Voda postupným působením narušuje vazbu mezi asfaltovým pojivem a kamenivem a působí mezi nimi jako tzv. separační fáze, čímž dochází k postupné destrukci kompozitního systému asfaltových směsí. Tato destrukce vede nejprve k obnažení zrna kameniva a ke ztrátě asfaltového tmelu a později k tvorbě výtluků či výmolů v krytu asfaltové vozovky. K eliminaci těchto procesů se v dnešní době využívají tzv. adhezivní (přilnavostní) přísady přidávané do asfaltového pojiva. Principem těchto přísad je zvýšení



mezimolekulární interakce mezi kamenivem a asfaltovým pojivem, které znesnadňují poškození asfaltové směsi vlivem účinku vody.

Mechanismus způsobující adhezní a kohezní poškození vznikající v konstrukci vozovky se dá do značné míry reflektovat také v laboratorních podmínkách, ale ne ve stejné intenzitě jako tomu je v reálném prostředí. Asfaltová směs je kompozitní materiál, který se skládá z různých druhů kameniva a pojiva, může být hutněn různými způsoby za různých intenzit, což ve výsledku vede k vytvoření v podstatě kompozitu specifických vlastností. Při návrhu samotné asfaltové směsi tak vzniká daleko složitější úloha, kdy je zapotřebí brát v potaz všechny vstupní parametry, jež ovlivňují budoucí charakter asfaltové směsi. Proto se v poslední době daleko více pozornosti upírá na zkušební postupy a metody stanovující povrchové energie, které objektivně posuzují základní vlastnosti kameniva a pojiva a jejich odolnosti vůči vodě. Vlastní zkouška přilnavosti mezi asfaltovým pojivem a kamenivem (dle ČSN 73 6161 nebo ČSN EN 12697-11) nám poskytuje rychlé informace o kvalitě obalení zrn kameniva asfaltem, její nevýhodou je značná závislost na subjektivním vjemu hodnotitele a skutečnost, že lze velmi těžko zvolený postup vztáhnout ke konkrétním reálným vlivům v konstrukci vozovky. Aspekt subjektivního hodnocení lze eliminovat exaktnějšími a náročnějšími metodami na mikroskopické úrovni jako je např. stanovení volné povrchové energie (SFE = "surface free energy") pomocí metody stanovení úhlu smáčení. Tento přístup je založen na analýze mezifázové interakce na vzorcích velmi malých rozměrů. Nejčastěji jde o aplikaci asfaltového pojiva (v řádech mikrolitrů) na planární vzorek kameniva s leštěným povrchem. [3] Následná analýza tvaru kapky asfaltového pojiva sice vypovídá velmi dobře o mezimolekulární interakci mezi pojivem a kamenivem, nicméně izolované podmínky samotné zkoušky (opomíjen je zde vliv vlhkosti, tvar a povrch kameniva a další možné aspekty) zase nereflktují reálné okolnosti asfaltové směsi v konstrukci vozovky.

## 1.2 Cíle disertační práce

Tato disertační práce se zabývá analýzou trvanlivosti stability asfaltových směsí. Pochopení problematiky trvanlivosti asfaltové směsi a stanovení citlivosti asfaltové směsi vůči poškození vodou a zvýšenou přítomností vlhkosti, které přímo souvisí s přilnavostí mezi pojivem a kamenivem, je jeden z dlouhodobě studovaných fenoménů v silničním stavitelství.

Z tohoto důvodu byl jedním z hlavních cílů této práce vývoj a ověření vhodných postupů pro laboratorní posuzování trvanlivosti asfaltových vozovek, získání znalostí o dlouhodobých vlastnostech asfaltových vozovek. Snahou je vytvořit vhodné laboratorní postupy, jež by simulovaly stárnutí (způsobené významnými faktory, jako je oxidace, působení teploty a UV záření), působení negativních účinků vody a mrazu, a současně by v konečném důsledku odpovídaly podmínkám skutečně položené vrstvy v konstrukci vozovky. Aplikací vhodného laboratorního postupu simulujícího, co nejlépe tyto podmínky, nám dávají určitý předpoklad a poznatek o trvanlivosti asfaltové směsi. Přesně odhadnout chování a vlastnosti zestárlé asfaltové vozovky je však kvůli enormnímu množství různých proměnných faktorů praktické nemožné.

Při řešení této práce se vycházelo z metod pro ověření účinku přilnavostních přísad (obecně metody pro zjištění vodní citlivosti a přilnavosti). Ty se dělí podle hodnocení na kvalitativní a kvantitativní a dále podle toho, zda se testují vyrobená zkušební tělesa, nebo se negativní účinek vody hodnotí u volně ložené směsi. Kvalitativní zkušební metody poskytují





subjektivní hodnocení, hodnotí se pozorováním obaleného kameniva, z čehož se stanovuje obnažovací potenciál (hodnocení probíhá převážně na zrnech kameniva obalených pojivem). Kvantitativní zkušební postupy a metody poskytují hodnoty pro určité parametry, jako je například rozdíl pevností změřených před zkouškou a po jejím provedení. Tyto testy jsou většinou prováděny na zhutněných zkušebních tělesech.

Řešení by mělo přinést nové poznatky, a to zejména v oblasti vymezení rámce možného experimentálního posuzování dlouhodobé účinnosti v praxi používaných přílnavostních přísad, stejně jako možného prodlužování trvanlivosti asfaltových směsí. Uplatnění těchto postupů by v konečném důsledku mohlo přispět jako podklad při samotném návrhu trvanlivějších asfaltových směsí, ale také při využívání méně známých chemických nebo minerálních přísad zlepšujících adhezi, představující například mechano-chemicky aktivované mikrofilery s využitím vápenců, dolomitů či recyklací druhotných surovin, uplatňování nových typů nanotechnologických přílnavostních přísad, nebo využívání nových povrchově aktivních látek, které nejsou na českém trhu tak dobře známy. Neexistují však ověřovací postupy, které by prokázaly dlouhodobou účinnost přílnavostních přísad. S ohledem na možnosti posuzování dlouhodobých charakteristik asfaltových směsí byla v praktické části této práce pozornost věnována možnostem simulace dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi, a to v kombinovaném účinku s působením vody na výslednou trvanlivost. Úkolem bylo porovnat různé metody stárnutí, z hlediska použitých laboratorních metod posuzování odolnosti vůči negativnímu působení vody a posuzování přílnavosti mezi pojivem a kamenivem. Současně s tím byla snaha při posuzování parametrů asfaltových směsí, využít nejen běžně používané zkušební postupy, nýbrž vymezit také možný normový rámec pro v ČR dosud nezavedené zkušební postupy ověření přílnavosti, resp. vodní citlivosti. Přílnavost mezi asfaltovým pojivem a kamenivem se nejčastěji hodnotí subjektivně kvantifikací asfaltovým pojivem obalených a obnažených zrn kameniva. Takové hodnocení je ovšem subjektivní a může být nepřesné kvůli různému měřítku posuzovatelů, kteří hodnocení na zkušebních vzorcích provádí. Proto je cílem této dílčící práce nahrazovat je exaktnějšími metodami, například s využitím semi-automatických metod, které vycházejí ze softwarového hodnocení snímků kameniva obaleného asfaltovým pojivem, a to principy, které se dnes používají při subjektivním hodnocení v rámci zkoušky přílnavosti dle ČSN 73 6161. Současně s těmito metodami bylo cílem této práce využít i další metody posuzování přílnavosti mezi asfaltovým pojivem a kamenivem, zaměřené na analýzu mezifázové interakce na vzorcích malých rozměrů, jako například stanovení kontaktního úhlu (nejčastěji jde o aplikaci tekutého asfaltového pojiva na planární vzorek kameniva s leštěným povrchem), za pomoci, něhož se dozvíme velmi přesně o mezimolekulární interakci nebo tzv. peel testy, při kterých se soudržnost mezi těmito dvěma materiály vyšetřuje přímo odtrháváním kovového plátu z povrchu kameniva, ke kterému je přilepeno asfaltovým pojivem.

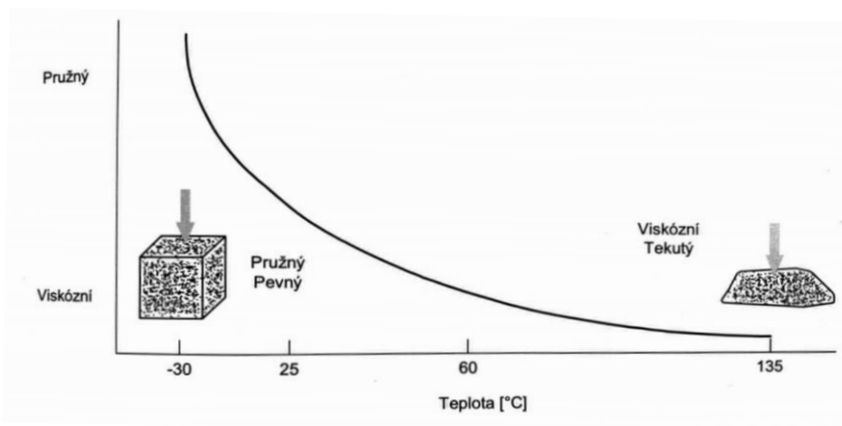
## 2 ROZBOR VSTUPNÍCH MATERIÁLŮ ASFALTOVÉ SMĚSI

### 2.1 Asfaltové pojivo

Asfalt je jedním ze základních stavebních materiálů, využívaný zejména v oblasti silničního stavitelství. Používá se především jako chemicky komplexní organické pojivo do asfaltových směsí, do prolévaných podkladních vrstev či jako materiál pro výrobu asfaltových emulzí. [16] Asfaltové vrstva vzniká zhuštěním čerstvě vyrobené horské asfaltové směsi, která se skládá ze směsi kameniva a asfaltu. Asfaltové pojivo přenáší v asfaltové vrstvě konstrukce vozovky primárně síly v tahu a kostra směsi kameniva přenáší převážně tlakové síly. Vlastnosti navržené asfaltové směsi závisí na druhu a množství obou těchto složek. I přes to, že v samotné asfaltové směsi převládá jako složka kamenivo a pojivo činí ve směsi zpravidla jen 4 až 6 %, tak toto malé množství má rozhodující vliv na chování celé směsi a v konečném důsledku i její trvanlivost. Asfaltová pojiva významnou měrou ovlivňují vlastnosti konstrukcí netuhých vozovek pozemních komunikací, a proto je třeba jim věnovat patřičnou pozornost. S ohledem k neustále rostoucímu dopravnímu zatížení, jsou stále více kladeny vyšší nároky na vlastnosti a kvalitu asfaltových směsí, a tedy i asfaltového pojiva, jakou jsou zajištění kvalitní adheze mezi pojivem a kamenivem a současně koheze asfaltové směsi. Současně s tím se v důsledku jak nároků dopravního zatížení, tak ale i účinků klimatických vlivů velmi často do základního asfaltového pojiva přidávají další aditiva a modifikátory, které celý systém činí ještě více chemicky i reologicky složitým.

#### 2.1.1 Chování asfaltového pojiva

Asfaltová pojiva jsou charakteristická chováním závislým na teplotě a velikosti zatížení, řadí se tak mezi viskoelastické látky, jejichž chování se mění především změnou teploty a času. Za nízkých teplot se asfalt chová jako pružná pevná látka, za vysokých teplot naopak jako kapalina, charakterizovaná viskozitou závislou a teplotě (tedy newtonovská látka), viz Obr. 2. Mezi po desetiletí stanovovaným bodem lámavosti a bodem měknutí – obor plasticity – má tedy asfalt zjednodušeně řečeno viskoelastické chování.

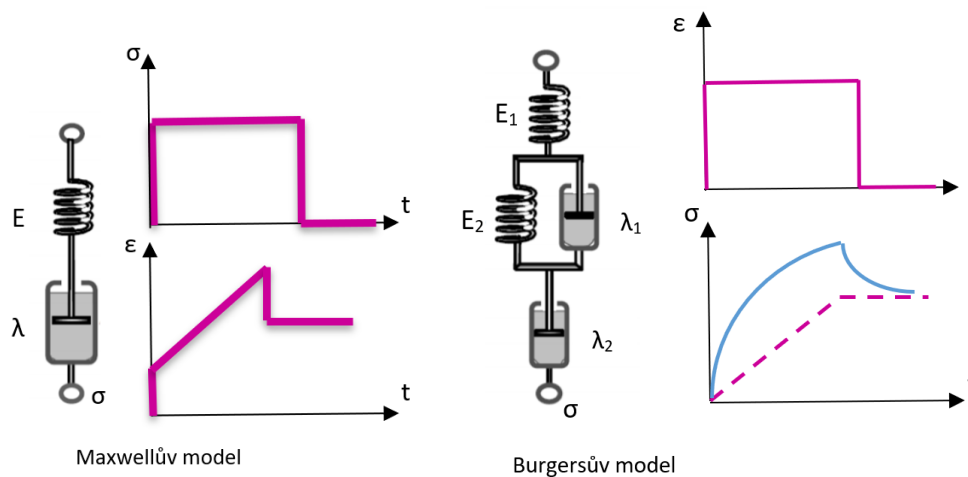


Obr. 2. Visko-elastické chování asfaltu. [16]

U těchto látek potom dále platí princip tzv. superpozice, tedy matematicko-fyzikální vzájemné ekvivalence času a teploty. Chování se na základě uvedeného charakteru asphaltového pojiva dělí do tří skupin podle působící teploty [17, 18]:

- Při vysokých teplotách (či trvalém zatížení) se asphaltové pojivo chová jako viskózní kapalina a určující funkci v asphaltové směsi zajišťuje především kamenná kostra, která je určena křivkou zrnitosti.
- Při nízkých teplotách (či opakujícím se zatížení) se asphaltové pojivo chová pružně, ovšem jen do překročení meze únosnosti, která se projevuje tvorbou smršťovacích trhlin.
- Při středních teplotách se chování, které lze považovat za nejčastější stav, pohybuje mezi výše popsanými extrémy.

Model, odrážející nejlépe tyto visko-elastické a visko-plastické vlastnosti pojiva, je složitý. Ve většině případů je dostačující asphaltové pojivo charakterizovat Burgersovým, případně zjednodušeně tzv. Maxwellovým modelem, které reprezentují visko-elastické chování pojiva. Chování těchto modelů, resp. asfaltu, je vysvětleno na Obr. 3. [17, 19]. Pružina představuje elastickou složku a viskózní složka je znázorněna pístem v nádobě s kapalinou. V literatuře a současném výzkumu asphaltových pojiv samozřejmě lze nalézt i další modely, které mohou v různém pořadí kombinovat pružinový a pístový prvek. Tyto modely se potom kombinují s interpretacemi složitějšího reologického chování asphaltových pojiv. [18, 20]



Obr. 3. Schéma modelů popisující visko-elastické chování asfaltu.

### 2.1.2 Chemické složení asphaltového pojiva

Asfaltové pojivo je komplexní organická směs molekul, převážně uhlovodíků (přes 90 %), různých rozměrů a hmotností s malým množstvím strukturně analogických heterocyklických druhů (heteroatomů). Hlavní heteroatomy jsou síra, dusík a kyslík, [70]. Asphaltové pojivo





obsahuje ještě stopové množství kovů jako je vanad, nikl, železo, hořčík a vápník, které se vyskytují ve formě anorganických solí a oxidů nebo v porfyrinových strukturách. Navíc se v asfaltovém pojivu nachází i různé nečistoty. [21,22]

Složení asfaltového pojiva se liší podle jeho původu a někdy se může lišit i v rámci jednoho zdroje. Převážná většina asfaltových pojiv, využívaná v silničním stavitelství, je získávána z ropy v rafineriích. Asfalt se získává ze surové ropy tak, že se nejprve ropa odsoluje a pak se pomocí atmosférické a vakuové destilace oddělí jednotlivé frakce podle jejich bodu varu. Nejprve jsou v atmosférické destilační koloně oddělovány lehké podíly jako benzíny, petrolej a plynové oleje a zbude atmosférický destilační zbytek – mazut. Mazut se vede přes vakuovou destilační kolonu, ve které se oddestilují za podtlaku tři olejové frakce lišící se viskozitou, zbytkem je asfalt. Pro výrobu asfaltu ze zbytku ropy je nutná vyšší teplota. Za běžného atmosférického tlaku při takových teplotách ovšem dochází ke krakování ropy, a proto se destilace provádí ve vakuu. Za daných podmínek je možné dosáhnout teplot okolo 400°C aniž by docházelo k rozkladu složitějších uhlovodíků. Asfalt získaný destilací ze surové ropy je možné upravovat podle stupně výroby, nejčastěji pomocí řízené oxidace neboli polofoukání nebo modifikací přísadami, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností pro aplikace v silničním stavitelství. Hlavní reakcí probíhající při oxidaci (foukání) ropných zbytků je oxidativní dehydrogenace, při níž dochází k přeměně cykloalkanických kruhů na aromatické za vzniku vody jako vedlejšího reakčního produktu. V důsledku této dehydrogenace se cykloalkanické a cykloalkanoaromatické sloučeniny přeměňují na více aromatické a polární polyaromatické sloučeniny a asfaltény. Polofoukané asfaltý mají ve srovnání s destilačními asfaltý vyrobenými ze stejné ropy nižší (lepší) bod lámavosti, vyšší bod měknutí a větší obsah asfaltenu. [19, 23, 24]

Asfalt je směsí mnoha látek, která má v přirozeném stavu černou nebo hnědou barvu. Jde o viskózní kapalinu, která se za nízkých teplot chová téměř jako pevná látka. Je netěkavý, odolný vůči většině kyselin, zásad a solí, rozpustný v sirouhlíku, benzenu, trichlorethylenu a perchlorethylenu.

Elementární analýzou pojiva získaného z různých druhů surových rop bylo zjištěno, že většina průmyslově používaných asfaltových pojiv má následující složení [19]:

- Uhlík ( ${}_{6}\text{C}$ ) 82 – 88 %
- Vodík ( ${}_{1}\text{H}$ ) 8 – 11 %
- Síra ( ${}_{16}\text{S}$ ) 0 – 6 %
- Ostatní (N, Cl, P, Na, O<sub>2</sub>, Mg, nečistoty apod.) do 1 %

Jednotlivé složky asfaltů, které se mohou lišit podle původu a zdroje, dále rozlišujeme dle obsahu uhlovodíků a jedná se o asfaltény (křehké organické částice, tvořící základní složku asfaltů, na jejich obsahu je závislý obor plasticity), maltény (olejové podíly rozpustné ve všech rozpouštědlech, změkčují asfalt a spolupůsobí na jeho plastickém charakteru), parafíny, asfaltové a olejové pryskyřice (tuhé látky, ovlivňují plastické a pružné vlastnosti asfaltu, jeho lepivost a pojivé vlastnosti) a aromáty.[25]



### 2.1.2.1 *Maltény*

Jedná se o hlavní složku asfaltového pojiva (cca 55 %), vytváří tekutou fázi obsahující převážně oleje a pryskyřice. Jsou zodpovědné za viskoelastické vlastnosti pojiva. Jedná se o alifatickou nepolární olejovitou látku žluté až skořicové barvy, která je rozpustná v rozpouštědlech typu analytického benzínu. Maltény mají poměr mezi atomy uhlíku a vodíku nižší než 0,8 a relativně nízkou molární hmotnost. Struktura těchto molekul je převážně řetězovitá. Maltény fyzikálními a chemickými procesy nevratně stárnou (účinkem kyslíku, teploty nebo ultrafialového záření) a stávají se hustší. Můžeme je dále dělit na nepolární viskózní saturáty a aromáty. [19, 21]

### 2.1.2.2 *Asfaltény*

Asfaltény jsou pevné částice černého nebo hnědého práškového materiálu, které asfalt zahušťují. Představují cca 5-25 % hmotnosti asfaltového pojiva. Jsou produktem oxidace uhlovodíků a tvoří tzv. kostru pojiva. Lze je z roztoku vysrážet pomocí nízkomolekulárních uhlovodíkových rozpouštědel. Jednou z nejdůležitějších vlastností těchto molekul je, že jsou polární, takže mají rozhodující vliv na adhezní vlastnosti pojiva. Z důvodu polaritativy se shlukují do micel. Zahříváním pojiva se porušují adhezní asfalténové vazby a dochází ke snížení viskozity pojiva. Zvýšení množství asfalténů v asfaltu vytvoří tvrdší pojivo s větší viskozitou, menší penetrací a vyšším bodem tání. Ke zvýšení obsahu asfalténů v poměru k malténům dochází např. při stárnutí asfaltového pojiva. Výsledkem nevratného procesu stárnutí pojivo tvrdne, ale také se stává křehčím. [19]

### 2.1.2.3 *Asfaltové pryskyřice*

Asfaltové pryskyřice jsou středně těžké uhlovodíkové molekuly v roztoku. V roztoku tvoří rozhraní mezi asfaltény a maltény. Tvoří cca 20 % asfaltu a běžně se vyskytují ve formě obalu molekul asfalténů. Výrazně ovlivňují vlastnosti jako je tažnost, lepivost a adhezní vlastnosti pojiva. Poměr asfaltových pryskyřic vůči asfalténům do jisté míry rozhoduje, zda jde o roztok typu „sol“ nebo „gel“. Asfaltové pryskyřice mají tmavě hnědou barvu, jsou relativně pevného charakteru a vyznačují se polaritou, která způsobuje jejich silně adhezivní chování. [19]

## 2.1.3 *Rozdělení asfaltových pojiv*

Asfaltová pojiva se dělí dle použití v silničním stavitelství či pro průmyslové aplikace dle (schéma dle Obr. 4) dle normy ČSN EN 12597: Asfalty a asfaltová pojiva – Terminologie.

**Silniční asfalt** – asfalt sloužící k obalení kameniva a/nebo R-materiálu, používá se hlavně při výstavbě a údržbě pozemních komunikací a pro některé aplikace vodohospodářského stavitelství.

**Tvrký silniční asfalt** – asfalt používá se hlavně při výrobě asfaltových směsí s vysokým modulem tuhosti.

**Modifikovaný asfalt** – asfaltové pojivo, jehož reologické vlastnosti jsou při výrobě modifikovány použitím jedné nebo více chemických činidel, např. přírodní kaučuk, syntetické polymery, síra, organokovové sloučeniny, ne však kyslík, katalyzátory oxidace (jako chlorid železitý, kyselina

fosforečná, oxid fosforečný). Modifikované asfalty mohou být vyrobeny přímo nebo ve formě ředěných asfaltů nebo emulzí nebo např. smíchané s přírodním asfaltem.

- *Polymerem modifikovaný asfalt* – modifikovaný asfalt, v němž použitým modifikátorem je jeden nebo více organických polymerů.

**Speciální asfalt** – asfalt vyrobený procesy a ze surovin, poskytující specifické vlastnosti splňující požadavky pro silniční a průmyslové účely; patří sem asfalt s vysokým modulem tuhosti, multigradový asfalt, asfalt vhodný pro emulgaci apod.

- Multigradový asfalt – speciální asfalt pro silniční aplikace s nižší teplotní citlivostí než standardní silniční asfalt, který má penetrační index  $I_p$  kladný

**Ředěné asfalty** – roztoky asfaltů v lehkých (těkavých) ropných frakcích, používají se jako nátěrové hmoty např. k nátěrům střech, ocelových předmětů a k izolaci stěn proti vodě. Asfalt, jehož viskozita je snížena přidáním vhodného typu rozpouštědla.

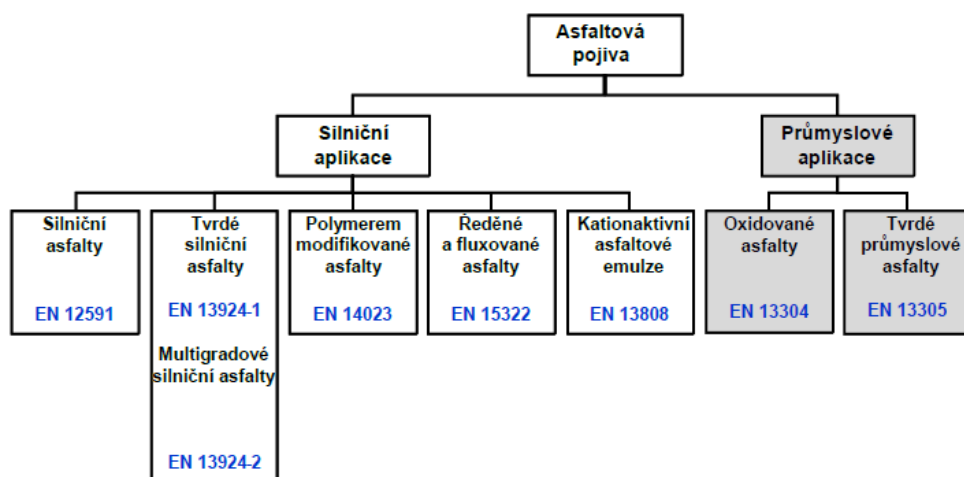
**Fluxované asfalty** – asfalty, jejichž viskozita je snížena přidávkem fluxovadla (např. fluxačním olejem nebo olejí).

**Asfaltové emulze** – jsou nestabilní heterogenní systémy dvou vzájemně nerozpustných kapalných látek (vody a asfaltu), přičemž jedna se v druhé vyskytuje ve formě malých kapiček (1 – 10  $\mu\text{m}$  kapičky asfaltu). Skládají se z disperzní fáze a disperzního prostředí.

- *Kationaktivní asfaltová emulze* – emulze, v níž emulgátor předává dispergovaným asfaltovým částicím kladný náboj.
- *Anionaktivní asfaltová emulze* – emulze, v níž emulgátor předává dispergovaným asfaltovým částicím záporný náboj.

**Průmyslový asfalt** – asfalt používaný pro jiné účely než pro výstavbu a údržbu pozemních komunikací (např. k izolacím staveb, střech, při výrobě střešních a hydroizolačních pásů apod.).

- *Oxidovaný asfalt* – asfalt, jehož reologické vlastnosti byly významně upraveny reakcí se vzduchem při zvýšených teplotách, někdy jsou označovány jako foukané asfalty.
- *Tvrký průmyslový asfalt* – asfalt pro průmyslové účely, který je za normální teploty tvrdý a křehký. [26, 27]



Obr. 4. Dělení asfaltových pojiv. [26]



## 2.2 Kamenivo

Kamenivo je základním a nejrozšířenějším silničním stavebním materiálem, který se používá při výstavbě všech druhů vozovkových vrstev. Z technického hlediska jsou fyzikálně-mechanické vlastnosti kameniva ovlivněny jeho mineralogicko-petrografickým složením, tj. druhem horniny a dále pak technologií jeho výroby. Na území České republiky je evidováno velké množství ložisek přírodního kameniva. Jako surovina pro výrobu drceného kameniva slouží všechny pevné magmatické, sedimentární i metamorfované horniny, pokud jejich technologické vlastnosti odpovídají účelu použití.

Kamenivo je zrnitý materiál, který lze rozdělit dle původu na přírodní, umělé nebo recyklované nebo podle vzniku zrn na těžené, těžené předrcené a drcené. Používá se při výstavbě všech druhů vrstev vozovky a jeho primárním úkolem je v případě asfaltových směsí vytvořit pevnou a odolnou kostru. Technické vlastnosti kameniva jsou ovlivněny zejména mineralogickým složením, tedy druhem horniny, ze kterého daný typ kameniva pochází a dále pak technologií výroby. Výroba drceného kameniva začíná nejprve u povrchové těžby v lomech pomocí clonových odstřelů, kde se vrtnou soupravou navrtají vrty v hlavě stěny a při patě etáže. Po odstřelu je rozval odvážen k drcení. Kamenivo se po drcení dále třídí pomocí různé velikosti sít na jednotlivé frakce (hotové výrobky).

Pro použití kameniva jako stavebního výrobku do asfaltových směsí je zapotřebí, aby splňovalo požadované kvalitativní parametry a aby odpovídalo požadavkům na kamenivo pro konstrukční vrstvy v závislosti na zvoleném typu asfaltové směsi dle normy ČSN 73 6121 a ČSN 73 6120 [28], či dle platných technických podmínek Ministerstva dopravy. Výrobce kameniva musí zajistit ověření vlastností stavebního výrobku počátečními zkouškami typu pro předpokládaný účel použití kameniva s cílem ověření shody s předepsanými požadavky. Počátečními zkouškami typu se ověřují především tyto vlastnosti kameniva: zrnitost, tvarový index, podíl drcených zrn v hrubém kamenivu, kvalita jemných částic, odolnost hrubého kameniva proti drcení, sypná objemová hmotnost, nasákavost, odolnost proti zmrazování a rozmrazování, trvanlivost síranem hořečnatým, ohladitelnost, chemické složení s ohledem na škodlivé látky. [28] Výsledné vlastnosti kameniva jsou v průběhu výroby kameniva ověřovány kontrolními zkouškami a průběžně se ověřují s deklarovanými vlastnostmi výrobce. Důležitou roli na výsledné vlastnosti navržené asfaltové směsi hrají tvarové parametry kameniva, jako je jejich tvar, úhlovitost (popisuje zaoblení zrn kameniva a kvantifikuje odchylky na jejich hranách nebo rozích), struktura a povrchová textura. [29] Struktura závisí obvykle na chemismu a na fyzikálním prostředí, zejména teplotě, tlaku a době tuhnutí magmatu. Textura shrnuje všechny znak, na jejichž utváření se podílejí vnější faktory (gravitace, proudění magmatu, procesy depozice, resp. redepozice materiálu). Texturu je možné ve většině případů pozorovat již makroskopicky ve vzorku horniny. Totéž platí u struktury horniny, která může být patrná makroskopicky, obvykle však lze její povahu bezpečně stanovit teprve mikroskopicky z výbrusů horniny. [30] Povrchová textura popisuje úroveň drsnosti povrchu zrn kameniva a lze ji měřit na základě kvantifikace detailů textury ve třech směrech (horizontální, vertikální a diagonální). Pohybuje se v rozmezí od 0 do 1000, přičemž vyleštěný nebo zcela hladký povrch kameniva má hodnotu 0. [31]

Stejně jako je důležitý aspekt dodržení tvarového indexu použitého kameniva, aby při hutnění konstrukčních vrstev nedocházelo k dalšímu drcení zrn (náchylnost k drcení nají zrna podlouhlého či jehličkovitého tvaru), stejně tak by měla být pozornost věnována struktuře a povrchové textuře kameniva. V článku [31] byl zkoumán vliv tvarových parametrů kameniva z rozdílných zdrojů (odlišné mineralogické složení). Výsledky ukázaly, že kameniva mají navzdory rozdílnému mineralogickému složení podobné tvarové parametry, což bylo přisuzováno shodnému postupu během těžby a následného drcení horniny (shodné použití drtičů při zpracování těžené horniny). Jediným rozdílným parametrem u posuzovaných hornin byla povrchová textura kameniva, která se u posuzovaných hornin lišila bez ohledu na proces zpracování. Dle dosažených výsledků byl fonolit s nejhrubější povrchovou texturou, zatímco žula měla nejhladší povrch.

Podle Kima et al. (2002) může kamenivo s drsnou povrchovou strukturou podporovat kvalitnější spojení částic kameniva s asfaltovým pojivem. [32] Při únavovém testu byla zkoumána oblast povrchu, ve které došlo k poruše a bylo zjištěno, že se nachází mezi asfaltovým pojivem a povrchem kameniva (ztráta adheze) u směsí navržených s hladkým kamenivem. U směsí s drsným povrchem se selhání projevilo mezi samotnými zrny kameniva. [32]

Pro jednotlivé typy zkoušek – zejména provedení přilnavostní zkoušky v souladu s ČSN 73 6161 [33] – byla v této práci zvolena velmi široká sada rozdílných typů kameniva, které jsou v České republice běžně používány pro výrobu asfaltových směsí. Jejich specifikace je pro přehlednost souhrnně uvedena v Tab. 1, dílčí specifikace jednotlivých typů kameniv jsou pak dále ještě popsány a doplněny fotodokumentací. Na základě bližšího výzkumu pak byly, s ohledem na vlastnosti jednotlivých typů kameniva, tedy s ohledem k jejich mineralogickému složení, pro další vybrané zkoušky experimentálně zvoleny již jen některé typy kameniv, které byly dále použity při samotném návrhu asfaltové směsi pro zkoušky zaměřené na stanovení vodní citlivosti.

Tab. 1. Přehled hornin dle jednotlivých kamenolomů v České republice.

Lom	Kamenivo	Typ kameniva	Rozdělení horniny dle původu a způsobu vzniku
Markovice	Amfibolit	bazická až ultrabazická hornina	Metamorfit
Libodřice	Amfibolit	bazická až ultrabazická hornina	Metamorfit
Měrunice	Čedič	bazická až ultrabazická hornina	Výlewná vyvřelina
Kobylí Hora	Granulit	kyselá až neutrální hornina	Metamorfit
Zbraslav	Horninová směs (tufit, metatuf, spilit)	bazická hornina	Spilit (výlewná vyvřelina), tufit (sediment)
Litice	Spilit	bazická hornina	Výlewná vyvřelina
Sýkořice (Zbečno)	Spilit	bazická hornina	Výlewná vyvřelina
Vápenec	Vápenec	bazické až ultrabazické horniny	Organogenní sediment
Chlum	Znělec	neutrální hornina	Výlewná vyvřelina
Brant	Žulový porfyr	kyselá hornina	Žilná vyvřelina
Skuteč	Amfibolicko-biotitický granodiorit	neutrální hornina	Hlubinná vyvřelina
Mladovice	Migmatit	kyselá hornina	Metamorfit
Svrčovec	Metadroba	kyselá až neutrální hornina	Metamorfovaný sediment
Ořechov u Křižanova	Žula (granit)	kyselá hornina	Hlubinná vyvřelina
Olbramovice	Graodiorit	kyselá hornina	Hlubinná vyvřelina



### 1.1.1 Kamenivo z lomu Chlum

Kamenolom Chlum vlastní a provozuje společnost EUROVIA Kamenolomy, a.s., provozovna Chlum se nachází v Doksech, v okrese Česká Lípa. V tomto kamenolomu se nachází znělec neboli fonolit, vyvěřelá výlevná hornina, vzniklá z magmatu bohatého na zásadité sloučeniny, vyznačující se mírně nahnědlou šedou barvou střední tmavosti či světlosti s mírným modravým, jindy hnědavým nádechem (Obr. 5). Znělec je jemnozrnný s vyrostlicemi nefelinu a ortoklasu. Má typický lasturnatý lom, často jsou přítomné proudové struktury, někdy mívá sloupcovitou odlučnost. Znělec se skládá z minerálů, jako jsou například živce, amfiboly, nefelin a další. Na puklinách se objevují tenké bělavé povlaky, patřící kalcitu či zeolitu. Lomné hrany úlomků jsou ostré. [34]



Obr. 5. Znělec – kamenolom Chlum. [34]

### 1.1.2 Kamenivo z lomu Brant

Kamenolom Brant se nachází v k. ú. Senec a Lubná, okres Rakovník, majitelem je společnost Froněk dopravní stavby spol. s r.o., která vyrábí drcené kamenivo z vyvěřelé horniny nazvané žulový porfyr. Podstatnou součástí je křemen, draselný živec (ortoklas) a slída. Vyrostlice světlých nerostů jsou tvořeny hlavně živcem, vyrostlice tmavých nerostů biotitem. Žulové porfyry bývají značně změněny a obsahují pak druhotně chlorit, serpentin, sericit, kaolinit a jiné nerosty. [35]



Obr. 6. Žulový porfyr – kamenolom Brant. [36]

### 1.1.3 Kamenivo z lomu Kobylí Hora

Kamenolom Kobylí Hora je ve vlastnictví společnosti Kámen a písek, spol. s r.o. a nachází se nedaleko Prachatic. Surovinou pro výrobu přírodního drceného kameniva je metamorfovaná hornina šedozelené barvy granulit s akcesorickým výskytem turmalínu a biotitu. Hlavní minerály granulitů jsou křemen, K-živec, plagioklas a biotit, jako vedlejší nebo akcesorické minerály mohou být zastoupeny kyanit, sillimanit, granát nebo rutil. Původními horninami, ze kterých granulity vznikají, jsou kyselé magmatity nebo arkózy. [37, 38]



Obr. 7. Granulit – kamenolom Kobylí Hora. [37]

### 1.1.4 Kamenivo z lomu Libodřice

Lom je ve vlastnictví společnosti Českomoravský štěrk, a.s. Provozovna se nachází v Čechách 9 km jihozápadně od Kolína ve směru na Kouřim. Těženou surovinou je amfibolit. Ložiskovou výplň tvoří nazelenale černošedý amfibolit, středně zrnitý, místy zřetelně plástevnatý s výrazně lesklými zrny amfibolu, který převládá nad světlými minerály. Podle mikroskopického výzkumu je amfibolu asi 60 % průměrné velikosti 0,4 mm, biotit jen místy (0,1 mm) a křemene do 6 % (protáhlá zrna v desetínách mm) v žilkách, plagioklas asi 30 % (oligoklas až kys. andezin 0,1 - 0,2 mm). Mimo drobných žilek křemene jsou v ložiskové výplni i žilky pegmatitu několik centimetrů mocné. [39, 40]



Obr. 8. *Amfibolit – kamenolom Libodřice. [50]*

#### 1.1.5 Kamenivo z lomu Litice

Kamenolom Litice se nachází nedaleko Plzně na okraji stejnojmenné obce a patří společnosti Eurovia Kamenolomy, a. s. Těženou horninou je zde spilit. Jedná se o výlevnou, metamorfovanou horninu nazelenale tmavošedé barvy, s velmi jemnozrnnou strukturou. Na puklinách s hnědavými povlaky hlavně ve vyšších etážích. Výrobce identifikoval v surovině přítomnost aktinolitu a volného  $\text{SiO}_2$ . Dlouhodobá expozice respirabilního prachu s obsahem křemene nebo kristobalitu s podílem nad 5 %  $\text{SiO}_2$  může mít při dlouhodobém kontaktu nepříznivé účinky na lidské zdraví. Surovina (a tedy i produkt) rovněž může obsahovat minerály z řady tzv. azbestových silikátů (zejména aktinolit a tremolit) zdraví rovněž velmi škodlivé. [41]

Spilit má granoblastickou až mikrofibrogranoblastickou texturu, vykazuje barvu šedou, zelenošedou až šedo zelenou, je celistvý až velmi jemnozrnný, místy zřetelně mandlovcovitý (vyplněné druhotným kalcitem a epidotem) nebo brekciovitý. Původní minerální asociace bazaltu byla v průběhu slabé regionální metamorfózy zcela nahrazena novotvořeným amfibolem aktinolitem, albitem, chloritem, kalcitem, epidotem, křemenem, titanitem. [39, 42]





Obr. 9. Spilit – kamenolom Litice. [42]

### 1.1.6 Kamenivo z lomu Markovice

Kamenolom se nachází v Markovicích u Čáslavi, v okrese Kutná Hora. Provozovatelem lomu Markovice je společnost Silnice Čáslav – Holding, a.s. Těženou horninou tohoto lomu jsou páskované amfibolity (Obr. 10), které jsou místy pokryty křídovými sedimenty. Na trhlinách v amfibolitech se nachází minerály alpské parageneze jako např. křemen, epidot, chlorit, titanit, prehnit, kalcit a celá řada dalších minerálů. Amfibolit je kvalitní metamorfovaná hornina vyznačující se střední až hrubou velikostí zrn, černošedé až černo zelené barvy, který se tu už léta těží. [43]



Obr. 10. Amfibolit – kamenolom Markovice. [43]

### 1.1.7 Kamenivo z lomu Měřunice

Lom Měřunice se nachází nedaleko Mostu, vlastníkem je společnost Basalt s.r.o., která vyrábí drcené kamenivo z horniny zvané čedič neboli bazalt. Jedná se o šedočernou vyvřelinu petrograficky tvořenou olivínovým nefelinitem charakteristickou porfyrickou nebo sklovitou strukturou. Hlavními minerály této horniny jsou tvořeny augitem, nefelinem a titanomagnetitem. Hornina rovněž obsahuje drobné vyrostlice olivínu obklopené základní hmotou tvořenou směsí olivínu, klinopyroxenu, magnetitu a xenomorfního nefelínu. [39, 44]



Obr. 11. Čedič. [45]

### 1.1.8 Kamenivo z lomu Sýkořice – Zbečno

Kamenolom Sýkořice se nachází u Zbečna, které leží v CHKO Křivoklátsko. Vlastníkem lomu je společnost Kámen Zbraslav, a.s., kde se těží hornina zvaná spilit neboli metabazalt (viz Obr. 12). Metabazalty jsou jemnozrnné, hustě jemně žilkované a obsahují jako hlavní minerály lišty plagioklasů (andezin) a izometrická zrna pyroxenů. Hojně jsou sekundární žilky s křemenem, kalcitem, chloritem či prehnit – pupellyitem. Některé spility obsahují až 3 mm velké vyrostlice živce (spilitové porfyryty). [39, 46]



Obr. 12. Spilit – kamenolom Sýkořice (Zbečno). [46]

### 1.1.9 Kamenivo z lomu Zbraslav

Kamenolom Zbraslav stejně jako kamenolom Sýkořice spadá do vlastnictví společnosti Kámen Zbraslav, a.s. a nachází se jižně od Prahy. Těží se zde horninová směs tufitů, metatufitů a spilitu. Z vulkanosedimentárních hornin jsou nejvíce zastoupeny popelové tufy s příměsí pískových zrn (křemen, živec – albit). Hlavními minerály jsou živec a křemen, dále kalcit a chlorit. Z tufitů jsou nejhojnější pískovo-popelové s úlomky živců (albit) a křemene v jílových minerálech. Ojedinělé jsou popelové tufity. Sedimenty jsou zastoupeny tufitickými a jílovitými břidlicemi se značnou příměsí sulfidického pigmentu. Vulkanity byly klasifikovány jako spility s vyrostlicemi plagioklasu, v mikrokrytalické směsi zrn živce, chloritu, sericitu a křemene. [39, 47]



Obr. 13. Horninová směs tufitů, metatufitů a spilitu – kamenolom Zbraslav. [47]

### 1.1.10 Kamenivo z lomu Svrčovec

Kamenolom Svrčovec se nachází u obce Svrčovec v okrese Klatovy, stejně jako Chlum ho provozuje společnost EUROVIA Kamenolomy, a.s. V tomto lomu se nachází hornina zvaná metadroba. Ve svrchních partiích ložiska má hornina nahnědle šedozelenou barvu s matně hedvábným leskem, kombinovanou na puklinách rezavě hnědými limonitovými povlaky. Oproti tomu ve spodních etážích ložiska je hornina tmavošedá až černošedá, vyznačující se jemnozrností a tvrdostí s lehkým polohedvábným leskem (Obr. 14). [48]

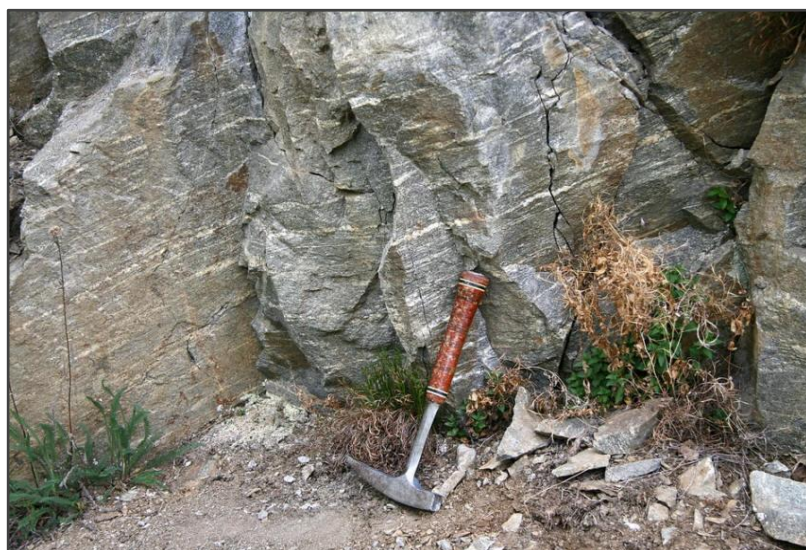




Obr. 14. Metadropa – kamenolom Svrčovec. [48]

### 1.1.11 Kamenivo z lomu Mladovice

Kamenolom Mladovice se nachází v okrese Benešov. Jeho vlastníkem je firma BES s.r.o., která se zabývá především výstavbou pozemních komunikací. Společnost vlastní rozsáhlé technické zázemí v regionu středních Čech na Benešovsku a Příbramsku, které zahrnují vlastní lomy, obalovny asphaltových směsí, výrobu betonových směsí a další objekty nutné pro stavební činnost. V tomto lomu se těží hornina zvaná migmatit (obr. 5), jedná se o přeměněnou horninu tvořenou především rulovou a granitovou složkou. Vzniká tak, že z magmatu unikající plyny a horké roztoky vnikají po plochách břidličnatosti do přeměněných hornin. Po ochlazení se z nich vyloučí minerály, jako jsou živec a křemen, které vytvoří v tmavě šedé hornině světle šedé proužky. Minerálním složením jsou migmatity blízké pararulám, způsobem vzniku zase magmatickým horninám. Používají se jako lomový kámen a při výrobě drceného kameniva. [49, 50, 51, 52]



Obr. 15. Migmatit – kamenolom Mladovice. [52]

### 1.1.12 Kamenivo z lomu Skuteč – Litická

Kamenolom Skuteč – Litická se nachází v okrese Chrudim v Pardubickém kraji, jeho vlastníkem je společnost GRANITA s.r.o. Ložisko stavebního kamene Skuteč – Litická je tvořeno zejména amfibolicko-biotitickým granodioritem. Jedná se o hlubinou vyvřelou horninu, která obsahuje podstatné množství křemene – množství nad 20 % - dále jsou zastoupeny plagioklas, draselný živec a tmavý minerál biotit. Z dalších minerálů je zde typické zastoupení amfibolu a akcesorií, avšak v menším množství. [53, 54, 55]



Obr. 16. Amfibolicko-biotitický granodiorit – kamenolom Skuteč. [56]

## 2.3 PŘILNAVOSTNÍ PŘÍSADY A JEJICH ROZDĚLENÍ

Přilnavostní přísady se používají do horkých asfaltových směsí primárně za účelem zlepšení adheze mezi pojivem a kamenivem. Přidávání aditiv do asfaltové směsi pro zlepšení přilnavosti umožňuje použití lokálních zdrojů materiálů, jako je třeba méně kvalitní kamenivo, což ušetří náklady za přepravu a tím i sníží celkový dopad na životní prostředí. Tyto přísady můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin: tekuté přísady dávkované do asfaltového pojiva nebo na obalovně přímo do výroby asfaltové směsi a sypké přísady v podobě mikrofilérů.

Tekuté přilnavostní přísady jsou chemické povrchově aktivní látky, které snižují povrchové napětí na povrchu kameniva a tím podporují lepší obalení kameniva asfaltovým pojivem. Hlavní funkcí těchto přísad je v principu změna relativních povrchových vlastností a polarity nekompatibilního materiálu, což jsou v tomto případě různé typy kameniva s odlišným petrografickým složením hornin, které se vyznačují převažující hydrofilitou. Tento typ přísad také zvyšuje povrchovou energii u kyselé složky pojiva a tím dochází k zesílení slabší vazby mezi pojivem a kamenivem. Hlavním nosičem těchto látek je asfaltové pojivo, ve kterém jsou tyto přísady velmi často rozmíchány v množství doporučeném výrobcem. [57]



Druhým typem přilnavostních přísad jsou látky sypké – mikrofilery, neboli jemné částice, přidávané do asfaltové směsi pro dosažení určitých vlastností, v našem případě dosažení zlepšení přilnavosti pojiva ke kamenivu a to vhodnou volbou tohoto materiálu. Tímto materiálem mohou být například minerální přísady na bázi vápence a dalších organických látek či využívání recyklace druhotných surovin, jež se aplikují do horké asfaltové směsi a částečně nebo plně tak nahrazují tradiční plniva ve směsi.

### 2.3.1 Tekuté přilnavostní přísady (chemické povrchově aktivní látky)

Aditiva v tekuté podobě přimíchávána do horkého asfaltového pojiva jsou chemické povrchově aktivní látky, které snižující povrchové napětí a tím umožňují kvalitnější obalení jednotlivých zrn kameniva a vzniká tak pevnější vazba mezi pojivem a kamenivem, resp. snižuje se hydrofilita kameniva. Na trhu je celá řada těchto aditiv, výběr vhodné přísady závisí na původu použitého kameniva, jeho mineralogickém složení, stejně tak i na druhu pojiva a teplotě výroby samotné asfaltové směsi. Většina dostupných přísad je také limitována dvěma hlavními nedostatky, jimiž jsou:

- omezená účinnost použitého aditiva v kombinaci s nevhodným typem kameniva (z hlediska mineralogického složení, zásaditý vs. kyselý typ kameniva);
- nízká teplotní stálost a odolnost proti dlouhodobějšímu účinku vyšších teplot.

#### 2.3.1.1 *ValoJames A/Rhodoval DP500T*

S ohledem k stále se rozvíjejícím technologiím a inovativním materiálům byla vyvinuta nová generace adhezivních přísad na bázi fosforu, jež jsou specifické všestranným využitím u různých typů kameniva (široká škála použití) a vyšší teplotní stálostí, umožňují tak odolávat po delší dobu vyšším teplotám.

Jedná se o přilnavostní přísady na bázi fosfátů (kyselina fosforečná, isotridecylester), u níž výrobce uvádí vysokou univerzálnost, co se týká použití různých typů kameniva z hlediska jeho petrografického složení. V případě přísady ValoJames se jedná o tepelně odolnou chemickou látku. Obsah aktivních fosfátových látek je > 98 %, obsah vlhkosti je < 2 %. Číslo kyselosti se pohybuje mezi 200 a 220 mg KOH/g. Hustota kapalné adhezivní přísady je 970 kg/m<sup>3</sup>. Přísada se dodává v kapalné formě žluté barvy s počátečním bodem varu nad 250 °C a je nerozpustná ve vodě. Bod vzplanutí této přísady je > 125 °C. Z hlediska bezpečnosti se jedná o přísadu bez jakýkoliv známých rizik z hlediska jejího použití a během manipulace s ní nedochází k produkci nebezpečných látek. Dávkování přísady se pohybuje v rozmezí 0,2 % až 0,5 % asfaltu. [58]

#### 2.3.1.2 *Anova 1420 Anti-Strip*

Anova 1420 Anti-Strip je přísada pro zlepšení přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu distribuovaná firmou CIUR a.s., přičemž skutečným výrobcem je koncern Cargill nabízející produkty a řešení v oblasti potravinářství, zemědělství a průmyslových produktů. Mezi její vlastnosti se řadí univerzálnost použití s širokou řadou různých typů kameniva. Jedná se o netoxický bio produkt na rostlinné bázi. Obsah účinných látek v této přísadě je > 95 % a je nerozpustná ve vodě.





Obr. 17. Přílnavostní přísada Anova 1420 Anti-Strip. [59]

Tato přísada má za běžných podmínek nízkou viskozitu a je tudíž kapalná, obvykle ji tak není nutné předem zahřívat. Pokud je ovšem přehřívání žádoucí, doporučuje se nepřekračovat teploty vyšší než 60 °C. Použití této přísady do asfaltových pojiv se doporučuje pro asfalty o teplotě nepřesahující 170 °C. Je však možné ji bezpečně kombinovat také s modifikovanými pojivy. Obvyklé dávkování, s ohledem k použitému typu kameniva a požadavkům na přílnavost, se pohybuje v množství 0,1 až 1,0 % z hmotnosti asfaltového pojiva. Tato přísada patří mezi chemické látky, a využije-li se jako přílnavostní přísada do asfaltové směsi, je schopna reagovat i s asfaltovými pojivy modifikovanými kyselinou polyfosforečnou. To bývá problematické v případech, kdy jsou využity právě přílnavostní přísady na bázi aminů. [59]

Tab. 2. Technické parametry přísady Anova 1420 Anti-strip.

barva	hnědá kapalina
hustota při 20 °C	1,02 g/cm <sup>3</sup>
viskozita při 40 °C	1200 až 1400 mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>
bod vzplanutí, otevřený kelímek	> 180 °C
Obsah sumy PAU	0,0 mg/kg

### 2.3.1.3 AdHere LOF 65-00 EU

Ad-Here LOF 65-00 EU je tekutá přílnavostní přísada hnědé barvy a typického zápachu aminových látek, kterou vyrábí společnost ArrMaz Custom Chemicals v USA a je uzpůsobena pro trh EU. Obecně patří do širší produktové řady AdHere. Příklad určená pro evropský trh má extrémně nízkou viskozitu, čímž se výrazně zjednodušuje její rychlé vmíchání do asfaltového pojiva. Její aplikovatelnost je možná i při teplotách okolo bodu mrazu. Tvořena je směsí etylenpolyaminů, které zajišťují zvýšenou stabilitu produktu a současně v důsledku chemického složení lze velmi dobře uzpůsobit dávkování konkrétní potřebě zlepšení vazeb mezi asfaltovým pojivem a kamenivem. Tyto aminové chemické sloučeniny reagují s mastnými kyselinami a lojovým olejem (tekutou látkou získanou jako extrakt z ligninu a smoly). Dávkování probíhá v intervalu 0,15-1 %-hm. asfaltu. Jako všechny příbuzné adhezivní přísady na bázi aminových sloučenin je i Ad-Here mírně toxický, což je podrobněji specifikováno v bezpečnostním listu produktu. Bod vzplanutí je cca 204 °C, bod varu přesahuje 220 °C objemová hmotnost v rozmezí 0,97-1,01 g/cm<sup>3</sup> (při 25 °C). Přílnavostní přísady Ad-Here nemají sklon k polymerizaci a při skladování jsou z hlediska reaktivity stabilní. Nesmí se mísit s nitrily, kyselinami a silně oxidativními činidly. Měl by se vždy omezit kontakt nezpracované přísady s vlhkostí obsaženou

v atmosféře. Z hlediska karcinogenity či mutagenity není tato látka sledována v rámci chemických látek či výrobků Mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny (IARC). [60]

Tab. 3. Technické parametry přísady Ad-Here LOF 65-00 EU.

barva	Tmavě zbarvená kapalina
hustota při 25 °C	0,97 g/cm <sup>3</sup>
viskozita při 25 °C	1650 mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>

Dle technických údajů přísady Ad-Here LOF 65-00 EU, uvádí výrobce uváděné parametry hustoty a viskozity jsou pro tuto přísadu typické. Rozmezí parametru hustoty a viskozity je  $\pm 2\%$  a  $\pm 20\%$ .

Výrobce uvádí, že doporučené dávkování přísady je 0,25 až 0,75 % z hm. asfaltového pojiva ve směsi. Množství přísady dávkované do asfaltové směsi, by měl uživatel volit, na základě výsledků zkoušky stanovení vodní citlivosti asfaltové směsi a s ohledem k výsledkům procentuálního obalení zrna kameniva asfaltovým pojivem. [60]

#### 2.3.1.4 Wetfix BE

Wetfix BE (původně holandské společnosti AkzoNobel, po odštěpení speciálních produktů dnes pod hlavičkou holandského koncernu Nouryon) je hnědá viskózní kapalina získaná kondenzací mastných kyselin talového oleje s polyethylenaminem za vysoké teploty a s odstraněním vody, rozpustná v ethalonu a v acetonu a emulgovatelná ve vodě. Wetfix BE je rozpustný – místelný v asfaltovém pojivu při běžných teplotách, při nichž je asfaltové pojivo v kapalném stavu. Jeho stabilita v horkém asfaltovém pojivu je závislá na čísle kyselosti a teplotě asfaltu, kdy s rostoucím číslem kyselosti a teplotou jeho stabilita klesá.

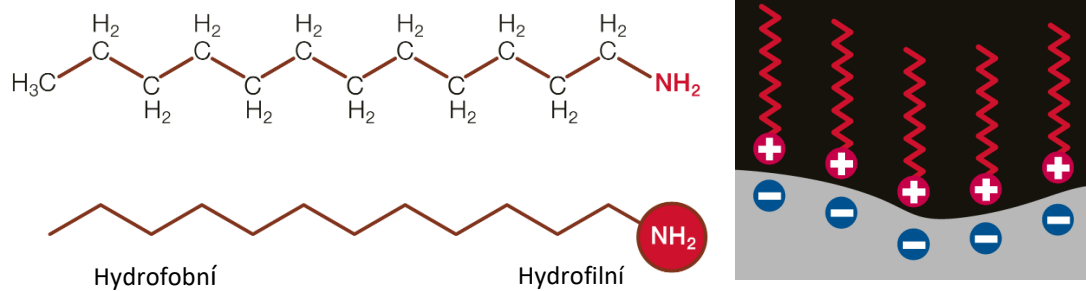
Tab. 4. Technické parametry přísady Wetfix BE.

Číslo kyselosti	< 10 mg KOH.g <sup>-1</sup>
Celkové aminové číslo	160–185 mg KOH.g <sup>-1</sup>
Měrná hmotnost při 20 °C	980 kg.m <sup>-3</sup>
Bod tuhnutí	< -20 °C
Bod varu	> 300 °C
Bod vzplanutí	> 218 °C
Teplota vznícení	> 100 °C
Teplota samovznícení	375 °C
Dynamická viskozita	505 m.Pas

U vysoce kyselých asfaltových pojiv a při teplotě skladování 150 °C je maximální doba skladování podle pokynů výrobce 3 až 7 dní. V originálních a uzavřených obalech je produkt stabilní min. po dobu dvou let. Wetfix BE je možné dávkovat buď do asfaltového pojiva nebo se přidává přímo do vyráběné asfaltové směsi v procesu její výroby ve výrobním centru, které k tomu musí být uzpůsobeno. Obvyklá dávka přísady Wetfix BE je cca 0,2 % hmotnosti pojiva ve směsi. [61]

Z chemického hlediska tuto přísadu tvoří kationaktivní povrchové molekuly, které se koncentrují na rozhraní asfalt-kamenivo. Zatímco pozitivní/hydrofilní skupiny povrchově aktivních látek se silně vážou k negativně nabitým částicím na povrchu kameniva, tak hydrofobní uhlovodíkové „konce“ molekul se zakotví do asfaltu. Přínavostní přísada tak působí jako most nebo lepidlo mezi pojivem a povrchem kameniva, které odolává vytěsňujícímu účinku vody. [62]

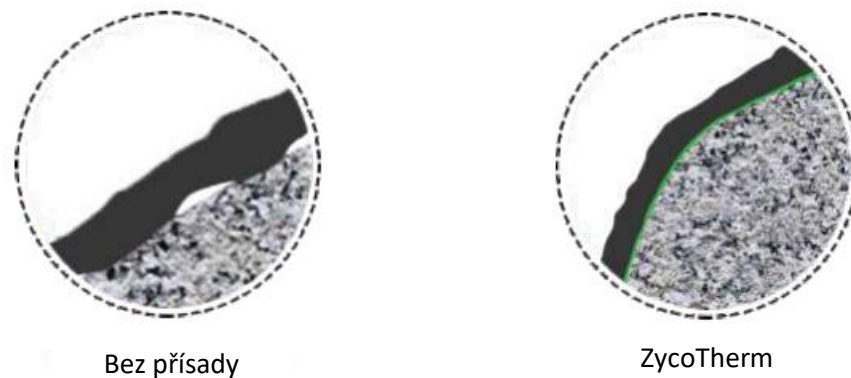




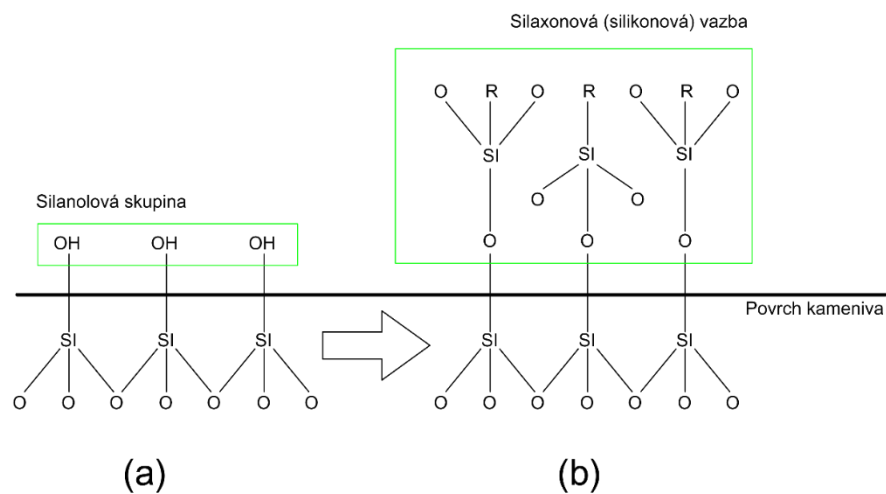
Obr. 18. Chemická složení přísady Wetfix BE. [62]

### 2.3.1.5 Zycotherm

Zycotherm je přísada vyrobená společností Zydex Industries v Indii a je založena na chemických skupinách organických silanů s  $\text{SiO}_2$  vazbami. Hustota silanových skupin, které tato přísada obsahuje, je soustředěna více k povrchu – tudíž jsou tyto skupiny hydrofilní a Zycotherm putuje k polárnímu povrchu kameniva. Tam reaguje se silanovými skupinami a vytvoří vazbu, což je jedna z nejpevnějších přírodních vazeb, vytvoří tak hydrofobní zónu na molekulární úrovni, viz Obr. 19, Obr. 20. [63]



Obr. 19. Aplikace přísady Zycotherm. [63]



Obr. 20. Struktura povrchu kameniva: (a) před použitím přísady, (b) s přísadou. [63]

Příspěvek Zycotherm je kompatibilní se všemi typy kameniva a umožňuje zlepšení přilnavosti asfaltu k povrchu kameniva při výrazně nižším dávkování v porovnání s běžnými typy adhezivních přísad. Zycotherm umožňuje snížení teploty až o 30 °C během výroby asfaltové směsi a následného hutnění. Dle výrobce, použitá nanotechnologie přísady vede k výraznému zlepšení kvality obalení kameniva i při nižším obsahu asfaltového pojiva (udává se možnost snížení množství použitého pojiva až o 0,2 %), má zajistit konzistentní rozprostření a zhutnění asfaltové směsi. Mezi další uváděné výhody patří snižování lepivosti při přepravě a pokládce asfaltové směsi. Typické dávkování přísady Zycotherm je 0,03 až 0,1 % hm. asfaltového pojiva. Dle typu použitého kameniva je možné zvolit množství dle doporučené tabulky výrobce. Množství dávkované přísady je možné dále upravit na základě provedených zkoušek asfaltových směsí. [64]

Tab. 5. Dávkování přísady Zycotherm s ohledem na typ kameniva. [64]

Typ kameniva	Dávkování přísady Zycotherm za účelem zlepšení přilnavosti		
	Absorpce vody na základě typu horniny [%]		
	0,5-0,8	0,9-1,4	1,5-2,0
Vápenec, dolomit	0,03	0,03	0,05
Čedič, Gabro	0,03	0,03	0,05
Žula, granodiorit, ryolit	0,03	0,05	0,05
Kvarcit (křemenec)	0,03	0,05	0,05
Andezit, pískovec	0,03	0,05	0,05

#### 2.3.1.6 Impact 8000

Přilnavostní přísada Impact 8000 od původního amerického výrobce MeadWestVaco Corporation (dnes Ingevity) je podle technických dat vhodná pro použití do všech typů asfaltových směsí, tedy se všemi druhy kameniva a zlepšuje přilnavost mezi asfaltovým pojivem a kamenivem. Použití přísady vede ke zlepšení parametrů vodní citlivosti, které se projeví zvýšeným poměrem pevností v příčném tahu a celkovou delší trvanlivostí asfaltových vozovek. Příspěvek je založená na chemických extraktech ligninu a má charakteristickou tmavě hnědou barvu s viskóznějším charakterem. Mezi dalšími vlastnostmi této přísady je dle výrobce vynikající teplotní stabilita, více než 7 dní při teplotě 160 °C. [65] Původní produktová řada byla v posledních letech nahrazena zcela novými produkty označenými jako MoreLife® a Pave®.

#### 2.3.1.7 Iterlene SL/100 PLUS

Příspěvek Iterlene patří do skupiny silanů, konkrétně se jedná o sloučeninu (3-glycidoxypropyl) trimethoxysilane, která je vyráběná italskou společností Iterchimica. Jedná se o tekutou přísadu, která neobsahuje aromatické oleje, které jsou nebezpečné pro lidské zdraví a které omezují přepravní podmínky přísady. Výrobek by měl zajišťovat vysokou úroveň a stabilitu přilnavosti mezi pojivem a kamenivem při jakýchkoliv pracovních podmínkách. Také by měl zlepšovat zpracovatelnost směsi. Příspěvek se dává do nádrže s asfaltem, nebo při dávkování asfaltu. Velikost dávky je závislá na množství asfaltu, složení kameniva a na provozních podmínkách. [146, 147]

### 2.3.1.8 AD-2

Výrobek AD-2 společnosti ENVIRON, s.r.o., působící na českém trhu od roku 2002 (od roku 2016 se firma zabývá asfaltovou technologií a vývojem aditivních přísad na bázi nanotechnologie a polykondenzovaných aminů pro zlepšení přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu), je nový typ přilnavostní přísady. Jedná se o reakční produkt nenasycených mastných kyselin s diethanolaminem. AD-2 je adhezivní přísada, která zvyšuje přilnavost asfaltu ke kyselému kamenivu. Snáší dlouhodobé zahřívání (150 hodin) na 150 až 160 °C bez změny aktivity. AD-2 je hnědá viskózní kapalina získaná kondenzací nenasycených mastných kyselin za vysoké teploty s odstraněním vody, rozpustná v etanolu a acetonu, je emulgovatelná ve vodě. Je rozpustná v asfaltovém pojivu při běžných teplotách. Dávkování přísady dle doporučení výrobce je v rozmezí 0,2 %-0,5 % z hmotnosti asfaltu. Dávkování AD-2 se provádí současně s dávkováním asfaltu a tato směs se okamžitě míchá s kamenivem po stanovenou dobu dle typu asfaltové směsi. [66]

Tab. 6. Technické parametry adhezivní přísady AD-2. [66]

Parametr	Hodnota	Metodika stanovení
Hustota při 20 °C v kg/m <sup>3</sup>	min. 970	ČSN EN ISO 3675
Číslo kyselosti v mg KOH/g	max. 5	PN-ZM 770/2016
Obsah dusíku v %	min. 2,5	PN-ZM 770/2016

AD-2 se dodává v IBC kontejnerech, skladuje se v uzavřených obalech na místech chráněných před přímými povětrnostními vlivy. Doporučená teplota skladování je +5 až +25 °C. Nesmí se skladovat na slunci ani v blízkosti zdrojů tepla. Skladování při teplotách nižších než 0 °C nemá negativní vliv na aplikační vlastnosti výrobku, v tomto případě se před použitím doporučuje provést temperování obsahu na teplotu cca 25 °C s následnou homogenizací. [66]

### 2.3.1.9 ADHESIL Z

Výrobek ADHESIL Z je produkt společně ENVIRON, s.r.o. stejně jako předchozí přilnavostní přísada. Jedná se o produkt na bázi alkylsilanů. ADHESIL Z je adhezivní přísada, která podstatně zvyšuje přilnavost asfaltu ke kyselému kamenivu, zhutnitelnost asfaltové směsi při nižších teplotách, čistší pracovní plochy finišerů, pracovních a přepravních prostředků, které přicházejí do kontaktu s horkou asfaltovou směsí. Snáší dlouhodobé zahřívání na 150 °C až 160 °C bez změny aktivity. ADHESIL Z je viskózní tmavá kapalina s obsahem alkylsilanů, rozpustná v polárních i nepolárních organických rozpouštědlech. [66]

Tab. 7. Technické parametry adhezivní přísady ADHESIL Z. [66]

Parametr	Hodnota
Hustota při 15°C	900-1050 kg/m <sup>3</sup>
Viskozita při 100°C	10-75 mm <sup>2</sup> /s
Teplota vznícení	cca 250°C

Doporušené dávkování této přísady je dle výrobce 0,2 % - 0,5 % z hmotnosti asfaltu. Dávkování se provádí současně s dávkováním asfaltu a tato směs se okamžitě míchá s kamenivem po stanovenou dobu dle typu asfaltové směsi. [66] V rámci experimentální činnosti, jež je součástí této práce, byla tato přísada v té době ještě ve fázi testování, z tohoto důvodu je použito pracovní označení přísady „TTO-A“.



### 2.3.1.10 BITUSIL

Stejně jako v případě adhezní přísady Adhedil Z se jedná o produkt společnosti ENVIRON, s.r.o. Výrobce uvádí, že se jedná o další produkt z kategorie přílnavostních přísad na bázi alkylsilanů. Parametry této přísady jsou shodné jako v případě výrobku ADHESIL Z. Doporušené dávkování této přísady je dle výrobce 0,2 % - 0,5 % z hmotnosti asfaltu. [66] V rámci experimentální činnosti, jež je součástí této práce, byla tato přísada v té době ještě ve fázi testování, z tohoto důvodu je použito pracovní označení přísady „TTO-C“.

### 2.3.2 Mikrofilery a náhrady tradičního plniva

Zhutněním horké asfaltové směsi vzniká třífázový systém, ve kterém je kamenivo zastoupeno v různých frakcích podle typu asfaltové směsi. Větší částice vytváří vzájemně zaklíněnou kostru a asfaltové pojivo na povrchu zrn kameniva spojuje jednotlivá zrna kostry dohromady. Důležitou roli zde hrají částice kameniva cca do 2 mm, která po obalení společně s asfaltovým pojivem vytváří tzv. asfaltovou maltu neboli mastix. Tato asfaltová malta je tužší než samotný asfalt, podílí se tak na fixaci kostry kameniva. Významnou složkou asfaltové směsi jsou bezesporu jemné částice, které tvoří součást kameniva ve formě filerického podílu. [16] Filer jako jedna ze složek asfaltové směsi je normou ČSN EN 13043 definována jako kamenivo, jehož většina propadne sítí 0,063 mm, které se může přidat ke stavebnímu materiálu pro dosažení určitých vlastností. [16, 67] Filer je v asfaltových směsích používán především pro ztužení a omezení plastických deformací asfaltové směsi. Při výrobě asfaltových směsích je operováno v zásadě se dvěma druhy filerických materiálů. V první řadě se jedná o filer vznikající odlučováním jemných částic z použitého kameniva během procesu sušení a horkého třídění v sušícím bubnu na obalovně. Odprašky ze sušícího bubnu jsou zachytávány pomocí filtrů separační jednotky, ty jsou následně shromažďovány v zásobních silech, odkud mohou být dávkovány zpátky do asfaltové směsi. V tomto případě pak mluvíme o vratném fileru. Vlastnosti tohoto typu fileru závisí na původním zdroji použitého typu kameniva – tedy petrografickém složení mateční horniny. Kvalita drobného kameniva a zejména tedy její filerická část hraje zásadní roli ovlivňující vyráběnou asfaltovou směs.

Jako tradiční plnivo se v České republice nejčastěji využívá vápencový filer vznikající drcením a tříděním běžných vápenců případně dalších hornin. Zásaditý charakter tohoto typu fileru se přidává za účelem příznivého působení na zlepšení vlastností asfaltové směsi, zejména pak zlepšení přílnavosti mezi pojivem a kamenivem. Tento typ fileru řadíme mezi přídatné filery, jedná se o filer minerálního původu vyrobený samostatně, u něhož se zrnitost na síti 0,0125 mm pohybuje mezi 85 až 100 % a na síti 0,063 mm mezi 70 až 100 %. Alternativním ekvivalentem používaným v řadě částech světa je potom i klasický portlandský cement, který lze do asfaltové směsi přidávat obdobně jako vápencové filery. [16]

Funkci fileru v asfaltových směsích je možno posuzovat ze dvou hledisek. Na straně jedné vyplňuje filer jemné dutiny a tím zmenšuje jejich rozměr, na straně druhé má velký vliv na vlastnosti použitého asfaltového pojiva, zvyšuje se viskozita asfaltu a zároveň se snižuje teplotní a vodní citlivost. Jedním z dílčích cílů této práce byla snaha o nalezení plnohodnotné náhrady tradičního jemnozrnného vápencového či dolomitického fileru alternativními příměsmi jiného mineralogického složení, a to v odpovídající potřebné kvalitě. Snaha omezit čerpání

neobnovitelných zdrojů a minimalizovat množství materiálu umístěného na skládkách je jedním z cílů trvale udržitelného rozvoje. Produkce odpadních materiálů každým rokem stoupá, stejně jako tendence o účelné opětovné využití nebo recyklaci těchto materiálů v nejrůznějších stavebních odvětvích. [68, 69] Z tohoto důvodu byla vybrána série několika odpadních materiálů s potenciálem možného využití jako náhrady tradičního jemnozrnného fileru pro účely aplikací v silničním stavitelství. Při správném způsobu použití jsou recyklované materiály v mnoha případech stejně hodnotné jako materiály standardní. K porovnání zvolených jemnozrnných materiálů, zahrnující jak běžně používané filery, tak i alternativy v podobě odpadních materiálů (jako např. drcené pěnové sklo, sklo z fotovoltaických panelů či mletý betonový recyklát) bylo zvoleno několik vhodných zkušebních metod aplikovaných pro vybrané filerické materiály, pomocí nichž bylo možné popsat vlastnosti vybraných vzorků a predikovat jejich možné využití jako plnohodnotné náhrady ověřených stavebních výrobků.

### 2.3.2.1 *Vratný filer – Brant*

Pokud bychom se blíže zaměřili na vlastnosti běžně používaných filerů, tak v případě mateční horniny vratného fileru pocházejícího z lomu Brant se jedná z hlediska převládající horniny o ryolit nebo paleoryolit. Tato hornina je kyselá, jedná se o výlevnou horninu, tzv. výlevný ekvivalent žuly, skládá se převážně z křemene, živců, případně minimálního množství dalších silikátů (oxidy Fe jsou zastoupeny v malé míře, ale v odprašcích se mohou kumulovat). Při těžbě může docházet ke kombinaci s jinou těžbou horninou, jedná se o ložiska slabě metamorfovaných hornin, zejména chloritických fylitů. I v těch však převládá křemen nad chloritem a sericitem. Ve své podstatě se jedná o jemně zrnitý materiál s převahou křemene, a tedy minimální schopností pucolánové reakce, bude se tedy vyznačovat velmi rozdílným chováním oproti běžně používanému mletému vápenci, který má opačný náboj. [35, 70]

### 2.3.2.2 *Vratný filer – Zbraslav*

V případě lomu Zbraslav a zde těžené horniny je situace velmi obdobná jako u předešlého případu. Chemicky se horniny velmi podobají ryolitu, jedná se však o velmi slabě přeměněné ryolitové a dacitové tufy, tedy s převládajícím zastoupením křemene, malým množstvím živců a chloritu. V obou těchto případech je s ohledem k velikosti lomu nasnadě, že se může složení horniny výrazně lišit, protože se zde nacházejí například bazalty, ve kterých převládají živce, amfiboly, slídy, a to v množství tak do 10 %. Vzhledem k jemnozrnějšímu charakteru se může filer vyznačovat reaktivnější schopností pucolanity. [70]

### 2.3.2.3 *Vratný filer – Bystřec*

Vlastní ložisko je tvořeno šedými biotitickými rulami, většinou středně až hrubě zrnitými, po petrografické stránce značně proměnlivými. Dle makroskopického posouzení zde byly rozlišeny dva hlavní typy biotitických rul, kterými jsou:

- (i) tmavě šedá, středně až hrubozrnná biotitická rula s modravým nebo nazelenalým nádechem, s nevýraznou foliací a místy poněkud výraznější lineací živcových proužků. Tato hornina je na ložisku nejvíce rozšířena;
- (ii) jemnozrnná až celistvá rula, která má většinou jemné bílé proužkování a místy má kompaktní rohovcovitý vzhled. Tvoří centimetrové až metrové, dosti ohraničené vločky

ve středně zrnité rule. V obou typech rul je možno místy pozorovat značné prokřemenění. [148]

### 2.3.2.4 Vratný filer – Chornice

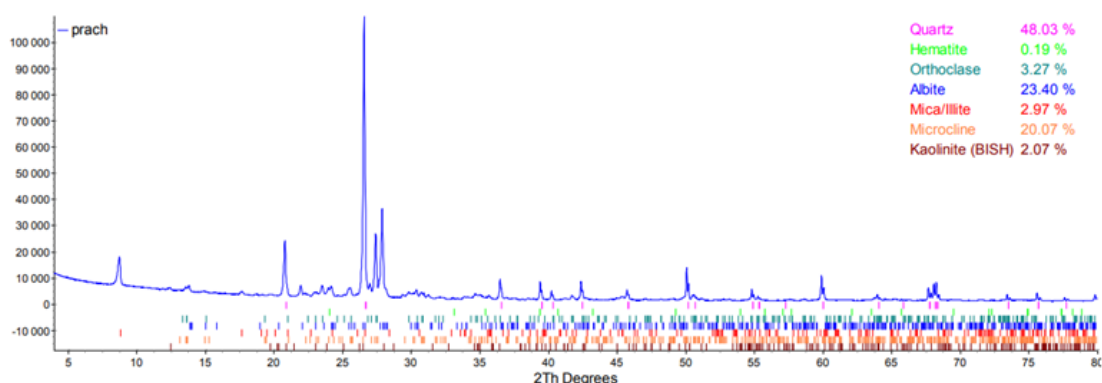
Dle petrografického hlediska je ložisko lomu Chornice tvořeno horninou nazývanou moravská droba. Zrnitost droby kolísá od jemnozrnné do hrubozrnné, nejčastěji je však droba středně zrnitá. Makroskopicky lze v hornině odlišit slídu, křemen, živec a pestré horninové úlomky. [70]

### 2.3.2.5 Odprašky z lomu Plešovice

Dle petrografického složení se jedná o granulitovou rulu – granulit. Minerální složení této horniny zastupuje z převážné části křemen a draselný živec, a dále také plagioklas, biotit, granát a kyanit. Makroskopicky je patrná plošně paralelní stavba, která je podmíněna přednostním uspořádáním šupinek až mázder biotitů, kde tvoří více či méně protažené shluky s průběhem křemen-živcových čoček. K podrobnějšímu stanovení mineralogického složení vzorku (fázové analýzy) byla využita prášková rentgenová difrakce (PXRD). Prášková difrakce využívá krátkovlnné elektromagnetické spektrum z oblasti  $0,1 \cdot 10^{-10}$  až  $100 \cdot 10^{-10}$  m ke studiu uspořádání stavebních částic v pevných látkách. Vlnová délka tohoto ionizujícího záření (označuje se jako „rentgenové“) odpovídá meziatomovým vzdálenostem ve většině struktur pevných látek, a tak může při jeho dopadu docházet k difrakci (ohybu) na elektronech jednotlivých atomů. Analýzou difraktovaného záření lze následně stanovit některé strukturální charakteristiky a případně rozmístění stavebních částic v krystalové mřížce studované pevné fáze (Obr. 21). [70]

Tab. 8. Výsledky kvantitativní fázové analýzy vzorku „prach z odsávání – lom Plešovice“ v hmotnostních procentech, zaokrouhleno na jedno desetinné číslo

Vzorek/fáze	Prach z odsávání – lom Plešovice
Křemen	48,0
Alkalické živce	23,3
Plagioklas	23,4
Slída/ililit	3,0
Kaolinit	2,1
Hematit	0,2



Obr. 21. Difraktogram vzorku „prach z odsávání – lom Plešovice“.





Z výsledků kvantitativní fázové analýzy vzorku je patrné převažující zastoupení křemene. Tento materiál tedy není zcela vhodný z hlediska pozitivní reaktivity systému asphalt-kamenivo, či jeho vlivu na přilnavost mezi pojivem a kamenivem. Proto byly odprašky Plešovice, v rámci dílčí studie této práce, částečně nahrazeny v prvním případě portlandským směsným cementem CEM II 42.5 v poměru 10:1,5 a ve druhém případě mastkem v poměru 10:1.

#### 2.3.2.6 *Filer Velké Hydčice*

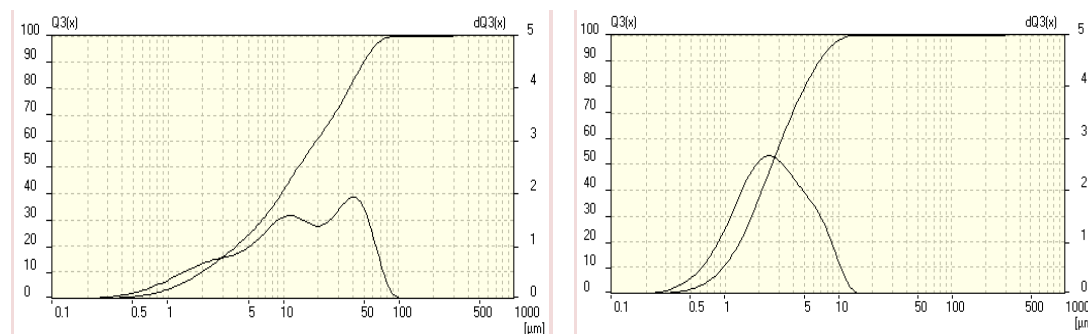
Jedná se o vápencový filer využívaný v asphaltových směsích právě pro své petrografické složení a vlivu na přilnavost mezi asphaltovým pojivem a kamenivem. Vápenec je jemnozrnná až celistvá sedimentární hornina. V převážné míře je složena z uhlíkatu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ ) ať už ve formě kalcitu, nebo aragonitu. Jako příměsí se vyskytují dolomit, siderit, křemen, jílové minerály a úlomky zkamenělin.

#### 2.3.2.7 *Filer Čertovy schody*

Další alternativou vratného fileru může být mletý vápenec z vápenky Čertovy schody a.s., jehož měrná hmotnost odpovídá  $2,57 \text{ mg/m}^3$  ( $2,57 \times 10^{-9} \text{ g/cm}^3$ ), zbytkové hmotnosti na sítích 0,125 mm jsou v rozmezí 5-15 % a 0,063 mm v rozmezí 20-30 %.

#### 2.3.2.8 *Mletý betonový recyklát*

Jednou z možných náhrad tradičního jemnozrnného fileru je snaha o uplatnění betonového recyklátu. Za účelem širšího uplatnění a změny technologických vlastností betonového recyklátu z dálnice D2 bylo provedeno přemletí betonu s použitím mechanochemické aktivace vysokorychlostním mletím v desintegrátoru, s cílem dosáhnout maximální velikosti částic menší než  $50 \mu\text{m}$ . Součástí desintegrátoru je mlecí rotor různé velikosti zpravidla s rozměrem 100-500 mm. U desintegrátoru byly voleny pro účely namletí betonového recyklátu dva protiběžné rotory o průměru 400 mm, které jsou osazeny ocelovými piny, pomocí nichž dochází spolu s vysokými úhlovými rychlostmi k procesu přeměny materiálu vysokorychlostním mletím, což se uplatnilo v případě odsítovaných složek vstupného drceného betonu s maximální velikostí 4 mm. S cílem zajistit dalšího zjemnění tohoto typu materiálu bylo využito možnosti využití dvou cyklů mletí v desintegrátoru, přičemž druhý cyklus probíhal s využitím mlecích rotorů o průměru 150 mm, na kterých byly osazeny speciální patentované typy mlecích elementů. Tímto lze dosáhnout úpravy zrnitosti betonového recyklátu dokonce až na velikost  $2 \mu\text{m}$ . Na základě chemických analýz je pak možno takto upravený materiál zvažovat jako částečnou náhradu cementu či mikrofileru do asphaltových směsí za účelem zlepšení přilnavosti. [71]



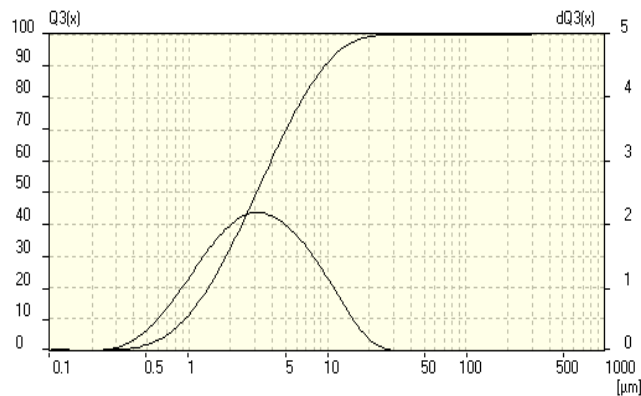
Vlastnosti	Beton (1. cyklus mletí)	Beton (2. cyklus mletí)
Měrný (specifický) povrch [cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ]	11 749,29	31 056,92
Měrná hmotnost [g/cm <sup>3</sup> ]	1,0	1,0
Aritmetický průměr velikosti zrn [μm]	20,47	3,30
Rozsah měření [μm]	0,1 - 302,58	0,1 - 302,58

Obr. 22. Grafické vyjádření distribuce velikosti částic a odpovídající čára zrnitosti recyklovaného betonu (levý obrázek – 1. cyklus mletí, pravý obrázek – 2. cyklus mletí.)

V případě mikromletého betonu byly zjišťovány velikosti zrn pomocí laserové granulometrie. Výstupem vlastního měření je grafické vyjádření diagramů znázorňující četnost zastoupení částic určité velikosti (histogram, Gaussovo rozdělení) doplněné o další hodnoty a několik vypočtených parametrů charakterizující naměřenou velikost částic ve vzorku (Obr. 22 vlevo). U drceného betonu byla využita možnost dvou cyklů mletí v desintegrátoru (Obr. 22 vpravo) s cílem zajistit dalšího zjemnění materiálu, přičemž druhý cyklus probíhal s využitím mlecích rotorů o průměru 150 mm, na kterých byly osazeny speciální patentované typy mlecích elementů. Tímto lze dosáhnout úpravy zrnitosti betonového recyklátu dokonce až na velikost 2 μm. Na základě chemických analýz je možno takto upravený materiál zvažovat jako částečnou náhradu cementu či mikrofileru do asphaltových směsí pro zlepšení přilnavosti. [71] Mikromletý vápenec

Jako náhrada vratných filerů byla v rámci studie použita varianta mikromletého vápence, jehož zdrojem byly odřezky ze zpracování vápence při řezání desek, bloků či dlažeb. Za účelem širšího uplatnění a změny technologických vlastností těchto dvou vybraných materiálů bylo provedeno přemletí vápence shodně jako v případě betonu s použitím mechanochemické aktivace vysokorychlostním mletím v desintegrátoru. [71]

V případě mikromletého vápence byly shodně jako u recyklovaného betonu zjišťovány velikosti zrn pomocí laserové granulometrie. Grafické vyjádření diagramu znázorňující četnost zastoupení částic určité velikosti je patrné z Obr. 23. [71]



Vlastnosti	Vápenec
Měrný (specifický) povrch [cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ]	29 561,71
Měrná hmotnost [g/cm <sup>3</sup> ]	1,0
Aritmetický průměr velikosti zrn [μm]	4,33
Rozsah měření [μm]	0,1 - 302,58

Obr. 23. Grafické vyjádření distribuce velikosti částic a odpovídající čára zrnitosti vápence.

V rámci této práce však bylo pro oba materiály (pro betonový recyklát a vápenec), s ohledem k efektivnímu využití, energetické úspoře a dosaženým rozptylům velikosti zrn, využito pouze jednoho cyklu mletí v desintegrátoru.

### 2.3.2.9 Vysokopecní struska

Jako alternativní náhrada k tradičnímu vápencovému fileru byla, v rámci řešených výzkumných aktivit, použita stabilní kladenská vzduchem chlazená vysokopecní struska. Zvoleny byly odsítované jemnozrné frakce nebo varianta, kdy takový materiál byl dále upraven vysokorychlostním mletím. Obecně se metalurgická struska dělí na dvě základní skupiny – vysokopecní a ocelářskou. Vysokopecní struska je metalurgická kamenitá sypanina, která vzniká jako vedlejší produkt při tavení a rafinaci kovů – při výrobě surového železa ve vysokých pecích. Ve vysoké peci při výrobě surového železa na sebe struska naváže veškeré neželezné části železné rudy. Během takzvaného odpichu vysoké pece vytéká finální vysokopecní struska společně se surovým železem o teplotě 1 450 °C. Oba materiály odděluje odlišná hustota. Struska je od surového železa oddělována v hlavním odpichovém žlabu pomocí přepážky, která lehčí strusku odvádí do struskového žlabu, pomocí něhož je dopravována do struskových pánví nebo k přímému zpracování. Chemické složení strusky je závislé zejména na vstupních surovinách při výrobě. U vysokopecních strusek dále záleží na druhu vyráběného železa a na množství koksu použitého při výrobě. K základním složkám odpichové strusky patří CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a SiO<sub>2</sub>, které tvoří 80-90 % hmotnosti celého systému a na vlastnosti strusky mají rozhodující vliv. Vysokopecní struska má široké využití ve stavebnictví. Jednou z možností je její použití jako zrnitého materiálu pro násypy nebo jako kameniva v konstrukčních vrstvách dopravních staveb. Ocelářská struska má velmi rozličné chemické složení, které se může lišit dodávkou od dodávky. Proto bylo, v rámci dílčí studie zaměřené na porovnání různých náhrad tradičního fileru, pracováno s vysokopecní struskou. [72, 73, 74, 75]

### 2.3.2.10 **Pěnové sklo**

Sklo je homogenní amorfni materiál, který vzniká poměrně rychlým ochlazením taveniny. Ta se skládá obecně ze sklářského skla, jehož hlavní složkou je oxid křemičitý, ale také další přísady, zejména se jedná o uhličitán sodný. Po celém procesu chlazení zachovává materiál strukturu původní taveniny. Sklo je významná druhotná surovina, která je velmi dobře recyklovatelná a mnohonásobně zpětně použitelná. Vzhledem k velkému množství znečišťujících látek, která mohou znehodnotit dané výrobky, není zpět k výrobě základních produktů využito celých 100 % navrácených výrobků. Část z nich je využita k výrobě například pěnového skla. Pěnové sklo se tedy vyrábí z odpadu skelného recyklátu, který již nelze použít pro další výrobu ve sklárnách. Skelný recyklát pro výrobu pěnového skla je podrcen na moučku se zrnem 90  $\mu\text{m}$ , společně s dalšími přísadami je promíchána a nanese na určitý množství na speciální textilii. Takto připravená směs je vystavena teplotě kolem 800 °C po dobu přibližně 50 minut. Výsledným produktem je souvislá deska, která se po rychlém zchlazení rozpadne na kousky do podoby, ve které pěnové sklo nalezneme na trhu stavebnictví. Své uplatnění získalo díky velmi dobrému teplotnímu součiniteli a nenasákavosti, kterými tento materiál disponuje, uplatňuje se jako alternativní náhrada konvenčních izolačních materiálů. [149, 150]

### 2.3.2.11 **Sklo získané z fotovoltaických panelů**

Odlišnou variantou odpadního skla mohou být fotovoltaické panely na bázi křemíku, ať už monokrystalické, polykrystalické či amorfni, které se aplikují v podobě tenkých vrstev. Tenkovrstvé fotovoltaické (FV) technologie se od „klasických“ krystalických technologií zcela liší vlastní geometrií FV článku, způsobem výroby, použitými výrobními materiály a jejich spotřebou, a i dalšími vlastnostmi. Moduly z amorfniho křemíku pro tenkovrstvé panely jsou vyráběny tak, že je ve vakuové komoře při teplotách kolem 200 °C napařením nanese vrstva amorfniho křemíku na skleněnou tabuli. Podkladový materiál nemusí být nutně pouze sklo, ale i plasty nebo kovy. Amorfni panely dosahují oproti monokrystalu přibližně poloviční účinnosti. Pro výrobu FV polykrystalických článků se materiál křemíku roztaví a nalije do formy, kde se nechá pomalu, definovanou rychlostí chladnout. Chladnutí musí být pozvolné a řízené induktivním ohřevem, aby se vytvořila co možná největší monokrystalická zrna a aby bylo v materiálu minimum dislokací, prnutí apod. Tím vzniká polykrystalický ingot, který se nakonec příčně nařeže na destičky, ty tvoří základ FV článků.

Nejběžnější konstrukce FV panelu je následující. Na přední straně panelu je temperované (tzv. kalené) sklo, které je odolné proti nárazu (např. kroupám). Na sklo se pokládá plastová EVA (etylvinylacetát) fólie a na ni se skládají propojené FV články. Etylvinylacetát se po teplotním zpracování rozteče a jako zalévací hmota zalije FV články v prostoru mezi předním sklem a zadní laminátovou stěnou panelu. Nakonec se panely rámují a zatmelují silikonovým tmelem do hliníkových profilů a opatřují krabicí s výstupními kontakty. [76, 77]

Pro recyklaci fotovoltaických panelů existuje několik způsobů, jedním z nich je termická recyklace určená zejména pro konstrukce panelů z krystalických článků, při níž jsou celé panely zahřívány ve speciální peci na teplotu nad 500 °C. Při této teplotě se plastové materiály odpaří, následně jsou v další komoře řízeně spalovány. Ostatní materiály jsou separovány ručně. Jsou-li panely nepoškozené, lze vytěžit až 85 % článků pro nové použití. Druhým způsobem recyklace

panelů je mechano-chemická metoda určená spíše pro tenkovrstvé panely. Na začátku je ručně demontován hliníkový rám, následuje drcení a třídění velikostních frakcí. K oddělení jednotlivých materiálů slouží separační metody – fluidní a mokré splavy a elektrodynamická separace. Výsledkem jsou však pouze drcené suroviny. [78, 79]

Tab. 9. Výsledky analýzy drceného skla z FV polykrystalického panelu. [80]

Nejvýše přípustné koncentrace škodlivin v sušíně odpadů						Zastoupení jednotlivých složek	
Ukazatel	Podíl [mg/kg suš.]	Nejistota	Limitní hodnota	Hodnocení	Metoda	Ukazatel	Podíl [% hm. suš.]
Arsen	<5,0		max. 10	vyhovuje	ČSN EN ISO 11885	z. žíh. 1000 °C	0,29 %
Kadmium	<0,5		max. 1	vyhovuje	ČSN EN ISO 11885	SiO <sub>2</sub>	71,68 %
Chrom	16,6	±20 %	max. 200	vyhovuje	ČSN EN ISO 11885	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08 %
Rtuť	<0,100		max. 0,8	vyhovuje	ČSN 75 7440	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13 %
Nikl	13,5	±20 %	max. 80	vyhovuje	ČSN EN ISO 11885	TiO <sub>2</sub>	<0,01 %
Olovo	76-279	±20 %	max. 100	nevyhovuje	ČSN EN ISO 11885	CaO	7,95 %
Vanad	<5,0		max. 180	vyhovuje	ČSN EN ISO 11885	MgO	6,30 %
Suma BTEX	5,03	±55 %	max. 0,4	nevyhovuje	EPA Method 8260 B	Na <sub>2</sub> O	13,42 %
Suma PAU	0,057	±30 %	max. 6	vyhovuje	ČSN P CEN/TS 16181	K <sub>2</sub> O	<0,05 %
Uhlovodíky C10-C40	46,5	±25 %	max. 300	vyhovuje	ČSN EN 14039		

Pro možnosti využití náhrady tradičního fileru v asfaltové směsi bylo použito drcené tříděné sklo (polykrystalické, amorfni a pěnové sklo) se zrnitostním propadem pod sítím 0,25 mm, jak je standardně získáván při recyklaci FV panelů společnosti Aquatest. [80] Vzorek odpadního skla z FV polykrystalického panelu byl použit pro analýzu složení dle akreditovaného zkušebního protokolu, a současně pro stanovení přítomnosti těžkých kovů v sušíně tohoto odpadu (viz Tab. 9). Pozornost byla zaměřena zejména na přítomnost nebezpečných látek, jako je olovo. Jeho přítomnost byla stanovena v souladu s technickou normou ČSN EN 11885 paralelně na více zkušebních vzorcích. [81] S ohledem k opakovaně provedené analýze zkušebních vzorků pro stanovení maximální přípustné koncentrace škodlivin v sušíně tohoto odpadu byla zjištěna koncentrace olova v rozmezí 76 až 268 mg/kg, přičemž maximální přípustné limitní hodnoty pro přítomnost olova, dle vyhlášky č. 294/2005 Sb., je stanovena na hodnotu 100 mg/kg sušiny. [82] Tento požadavek je zachován i v případě nové vyhlášky č. 273/2021, která vešla v platnost počátkem srpna 2021 a nahradila kompletně více jak 15 let starou předešlou vyhlášku. [83] Mezní hodnota je vztažena k třídě I pro odpady ukládané na terén. Zvýšená koncentrace olova v odpadním skle může vést v případě využití v nestmelených vrstvách cementem k případnému výluhu a kontaminaci podzemní vody a zeminy. V případě aplikace do horké asfaltové směsi je tomuto zabráněno obalením zrn skleněného recyklátu asfaltovým pojivem. [84, 80]



### 3 TRVANLIVOST ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Trvanlivost asfaltové směsi je dána její odolností vůči účinkům klimatických vlivů, jako jsou voda, mráz a UV záření, ale také účinkům dopravního zatížení, a patří mezi základní charakteristiky spolehlivosti konstrukce vozovky. Rozlišujeme dva typy trvanlivosti, a to trvanlivost vůči stárnutí a trvanlivost vůči opotřebení povrchu, pod které patří přilnavost pojiva ke kamenivu a s ní do značné míry úzce související vodní citlivost. Poškození vlivem účinků vody a zvýšené vlhkosti představuje pro technologii jeden z hlavních problémů, obzvláště pak v počátečních fázích životnosti vozovky. Mezi hlavní dopady poškození vlivem nepříznivého účinku vody je zejména ztráta hmoty z krytu (ztráta asfaltového tmelu, ztráta kameniva z nátěru), což v konečném důsledku přispívá ke ztrátě drsnosti (ztrátě mikro a makrotextury), k tvorbě výtluků a ke ztrátě strukturální pevnosti, což vede k dalším konstrukčním poruchám, jako jsou mrazová porušení a vznik trhlin. Stěžejní problematikou v mikroskopickém měřítku zůstává ztráta adheze mezi pojivem a kamenivem, a ač se může na první pohled zdát, že asfaltové pojivo tvoří dokonale nepropustnou vrstvu na povrchu jednotlivých zrn kameniva, asfaltový film utváří potažení zrn v rozdílných tloušťkách a četnostech, například ostré hrany kameniva mají vždy významně tenčí tloušťku asfaltového filmu. Ty jsou daleko náchylnější k působení účinku vody a vlhkosti, která vstupuje do asfaltové vozovky, resp. na rozhraní zrn kameniva a pojiva několika způsoby – dešťovými srážkami, kapilárním vzlínáním, ale také tlakovou vodou. V kombinaci s účinky dopravy se tyto jevy zvyšují a dále umocňují přítomností posypových solí v zimním období.

#### 3.1 Problematika přilnavosti asfaltu ke kamenivu

Přilnavost asfaltu ke kamenivu je jednou z nejdůležitějších aplikačních vlastností asfaltového pojiva a určuje schopnost se chemicky vázat na kamenivo. Schopnost asfaltového pojiva, co nejdokonaleji přilnout k povrchu kameniva, zásadně ovlivňuje schopnost samotné asfaltové směsi odolávat vůči klimatickým podmínkám (např. účinky dešťových srážek, vysokých teplot nebo mrazu), účinkům dopravy a jiným nepředvídatelným okolnostem, které na vozovce vznikají nebo na ni působí. Proto je velmi důležité dbát na všechny tyto faktory s tím související. Přilnavost (kvalita vazby) asfaltového pojiva ke kamenivu je vlastnost, která zásadně ovlivňuje výsledné parametry asfaltové směsi aplikované na vozovce, určuje nám tedy kvalitu a trvanlivost tohoto kompozitního materiálu použitého v konstrukci vozovky. Voda ve formě deště a vlhkosti může poškozovat a reálně vždy v čase vede k postupnému oslabování a poškozování vazby mezi asfaltem a kamenivem, což se děje prostřednictvím zhoršení přilnavosti na rozhraní těchto fází (ztráta adheze), nebo zhoršení soudržnosti asfaltu nebo kameniva (ztráta koheze). Následkem poškození vazby mezi asfaltem a kamenivem dochází k postupnému rozpadu asfaltové ztuhlé vrstvy ve vozovce. Kvalita asfaltové směsi je tak založena na vzájemném působení koheze (soudržnosti) a adheze (přilnavosti) uvnitř systému asfalt – kamenivo. [85]

##### 3.1.1 Definice adheze

V závěrečné zprávě předložené institutem „The National Center for Asphalt Technology NCAT“ shromáždili Kiggundu a Roberts již v roce 1988 [5] několik definic procesu obnažování v asfaltových směsích z pohledu řady výzkumníků (Petersen, 1982, Tunnicliff a Root, 1984): „Zhoršení nebo ztráta přilnavostní vazby mezi asfaltovým pojivem a kamenivem vlivem působení





vody; Fyzikální separace asfaltového pojiva od kameniva způsobená ztrátou adheze především v důsledku působení vody nebo vodní páry; Odstranění asfaltového filmu z povrchu kameniva způsobené vodou za podmínek, při nichž je povrch kameniva snadněji smáčen vodou než asfaltovým pojivem; Porušení vazby mezi povrchem kameniva a asfaltovým pojivem; Ztráta spojení/vazby mezi asfaltovým pojivem a minerálním kamenivem v důsledku oddělení povlaku z asfaltového pojiva za přítomnosti vody; Postupné zhoršení funkčních vlastností asfaltové směsi v konstrukci vozovky ztrátou adheze mezi asfaltovým pojivem a povrchem kameniva nebo ztrátou vnitřní soudržnosti asfaltového pojiva zejména působením vody". [85]

Z výše uvedených definic, je obnažování definováno jako oddělování asfaltu od kameniva nebo popraskání asfaltové textury v asfaltové směsi v kombinaci se současným působením cyklického dopravního zatížení a vlivu účinku vody nebo vodní páry. Podle Kiggundu a Robertsa [5] obsahuje přesnější definice obnažování též proces selhání způsobený ztrátou adheze a vnitřní soudržnosti, které jsou považovány za hlavní příčinu poškození vozovky vlivem vlhkosti. Průnik vlhkosti se tak obvykle považuje za primární příčinu obnažování v asfaltových směsích, protože způsobuje odstranění asfaltového pojiva z povrchu kameniva. [6, 86]

Například z chemického hlediska je adheze interpretována jako důsledek elektrostatického působení Van der Waalsových sil a kovalentních chemických vazeb mezi jednotlivými ionty asfaltového pojiva a kameniva. Z hlediska termodynamiky je adheze vyjádřena jako energie, která se uvolňuje ze styku dvou různých materiálů a v neposlední řadě se dá adheze interpretovat jako síla, kterou je nutno vynaložit k oddělení dvou přiléhajících ploch různých materiálů, přičemž zde je třeba opatrně rozlišovat mezi adhezním a kohezním typem porušení. [87, 92]

### 3.1.2 Definice koheze

Aby bylo docíleno požadovaného spojení jednotlivých komponent asfaltové směsi, je třeba vytvořit kompaktní soudržný systém. Adheze (přilnavost), jak již bylo zmíněno, je tedy vzájemná interakce mezi kamenivem a pojivem, která vede k pevnému přilnutí pojiva k povrchu kameniva. Vzájemnému propojení jednotlivých zrn kameniva obalených asfaltovým pojivem se potom říká koheze (soudržnost). U asfaltových směsí se můžeme setkat s adhezním a kohezním porušením, příp. s jejich kombinací. Adhezní porušení nastává při ztrátě přilnavosti mezi pojivem a zrnem kameniva, naopak při kohezním porušení odlomené zrno zůstává stále obaleno asfaltovým pojivem (Obr. 24). Hlavní příčinou vzniku porušení směsi je vliv atmosférických podmínek, které na asfaltovou směs působí. Vlivem slunečního záření, mechanického opotřebování, díky teplotním změnám a vlivu vody, asfaltová směs degraduje a snižuje se její trvanlivost a tím i životnost. Aby se poruchám předcházelo, jsou stále testovány a vyvíjeny nové typy asfaltových pojiv a přilnavostních přísad, aby se důsledky těmto jevů omezovaly nebo v ideálním případě zcela eliminovaly. Pro pochopení je tedy nezbytné podrobně zkoumat faktory ovlivňující jak adhezi, tak i kohezi v asfaltové směsi. [87, 92]



Obr. 24. Schéma ztráty adheze a koheze v asphaltové směsi.

### 3.1.3 Základní interakce asfaltu a kameniva

Vzájemné působení asfaltu ke kamenivu v asphaltových vozovkách přímo ovlivňuje přilnavost asfaltu ke kamenivu a určuje sílu a kvalitu vazby mezi těmito látkami. Tyto interakce také předurčují trvanlivost vazby v přítomnosti vody. Kamenivo tvoří zpravidla 94-95 %-hm. asphaltových směsí používaných na stavbu vozovek, asphalt tvoří zbývajících 5-6 %-hm. Aditiva, která se používají pro zlepšení užitečných vlastností asphaltových směsí, se přidávají zpravidla (nikoli však výhradně) do asphaltového pojiva. Kamenivo je v asphaltových směsích zastoupeno v různých velikostech, větší částice neboli zrna kameniva vytváří hrubou kostru směsi, zatímco na jemné částice je možno pohlížet jako na plnivo samotného asfaltu, jehož složení mohou za určitých podmínek ovlivnit. Přestože je hmotnost drobných frakcí kameniva nízká v poměru k velkým frakcím, mají vzhledem ke svým mikroskopickým rozměrům relativně velkou specifickou plochu. „Reaktivní“ částice tedy mají na svědomí chemickou modifikaci asfaltu a současně mění jeho fyzikální vlastnosti. To znamená, že i jemné částice kameniva mohou mít nepřímý vliv na vzájemnou interakci mezi asfaltem a hrubým kamenivem. [88]

Když se asphaltové pojivo smíchá s kamenivem, dochází ke vzájemnému působení molekul asfaltu a aktivních míst na povrchu kameniva. Povrchy různých kameniv se vzájemně velmi liší z hlediska chemického složení, velikosti povrchu, velikosti a četnosti pórů a drsnosti. Proto mají různá kameniva značně rozdílný počet a kvalitu aktivních míst na svém povrchu, tj. míst, která jsou schopna vytvářet vazby s asfaltem. Asfalty se také vzájemně liší svým chemickým složením, což je dáno především druhem ropy, ze které jsou vyrobeny a dále také způsobem jejich výroby. Vzájemné působení asfaltu a kameniva je tedy závislé na vlastnostech obou složek.

Během míchání horké směsi asfaltu a kameniva, komponenty asfaltu přilnou k povrchu kameniva prostřednictvím polárnějších sloučenin, které obsahují heteroatomy síry, dusíku nebo kyslíku. U většiny interakcí se uplatňují obvykle spíše fyzikální sorpce než chemisorpce. K fyzikální sorpci dochází prostřednictvím elektrostatických, dipól-dipólových a Van der Waalsových interakcí. Asphalt po vytvoření kontaktu s kamenivem zůstává relativně stabilní, i když za vysokých teplot a tlaků se mohou molekuly pohybovat, ztrácet orientaci a difundovat, [89]. V této oblasti navíc v posledních letech probíhá celá řada výzkumů, které se ve větší míře zaměřují i na chování a děje související s uspořádáním a změnami molekul, které jsou charakteristické pro asphaltové pojivo, kamenivo, ale i různé typy přísad. Tato oblast se označuje jako molekulová dynamika a jejím předmětem jsou v podstatě simulace a modely dějů, které laboratorními metodami neumíme identifikovat nebo zcela přesně postihnout. K dispozici však máme chemické stavby či struktury jednotlivých složek asphaltové směsi nebo asphaltového pojiva,

současně z fyzikálně-chemického hlediska známe řadu zákonitostí a dějů, ke kterým dochází. Kombinací výše uvedeného a vložení vstupů do vhodného typu 3D modelu lze v podstatě simulovat, jak se některé projevy a proměny – i z hlediska přilnavosti – v čase mění či vyvíjejí.

Pro pochopení dalších souvislostí je potřeba stanovit základní vzájemná působení – interakční síly, které mají významný podíl na výsledné adhezi a kohezi asfaltové směsi a pomohou nám lépe porozumět přilnavosti mezi pojivem a kamenivem.

### 3.1.3.1 *Elektrostatická interakce mezi ionty*

Základem pro pochopení mezimolekulárních sil jsou Coulombovy síly. Jedná se o elektrostatickou sílu, která se vyskytuje mezi dvěma odlišně nabitými částicemi – ionty. Tyto síly hrají zásadní roli při tvorbě iontových vazeb. Ideální iontová vazba vzniká tehdy, pokud kationty (kladně nabitě ionty) a anionty (záporně nabitě ionty) vstoupí do interakce (velmi silné vzájemné přitahování), což vychází z Coulombova zákona. Během tohoto procesu tak každá dvojice iontů (aniont plus kationt) dosáhne elektrostatické stability. Výsledná elektrostatické síly jsou velmi silné interakční síly a k narušení této vazby je obvykle potřeba vyvinou značnou energii (obvykle mezi 600 až 1000 kJ/Mol). [85, 87]

### 3.1.3.2 *Elektrodynamická interakce pomocí van der Waalovy síly*

Aby bylo možné lépe porozumět dále uvedenému typu interakcí, je třeba nejprve definovat elektrický dipól. Tím se obvykle rozumí soustava dvou bodových nábojů  $Q_1 < 0$ ,  $Q_2 > 0$  stejné velikosti  $Q$ , ale opačného znamení, které jsou umístěny v bodech  $r_1$ ,  $r_2$  ve vzájemné vzdálenosti  $l$ . Pokud chceme vyšetřit elektrické pole dipólu, označíme k tomu účelu vektor  $l = r_2 - r_1$ . K matematickému vyjádření elektrického dipólu se potom používá vektorová veličina dipólový moment  $p$ . Pro dvojici stejně velkých nábojů s opačným znaménkem  $Q^-$  a  $Q^+$  se vzájemným polohovým vektorem  $d$  je dipólový moment určen následovně:

$$p = Q \times d \quad (1)$$

Existenci mezimolekulárních nekovalentních a neelektrostatických interakcí předpověděl již roku 1873 německý fyzik J. D. van der Waals. Tyto druhy mezimolekulárních sil nejsou tak pevné jako Coulombovy síly, ale jsou všudypřítomné a mezi částicemi vždy přitažlivé. Van der Waalovy síly jsou součtem tří následujících interakcí, které jsou založeny na odlišné dipolární interakci a zahrnují dipól-dipól interakce (Keesomovy orientační síly), dipólově indukované dipólové interakce (Debyeho indukční síly) a dipólově indukované interakce (Londonova disperzní interakce). Van der Waalovy síly působí mezi molekulami těžé látky nebo mezi molekulami různých látek pouze na elektrostatickém základě (přitahování dipólů) [85, 87, 88, 89]:

#### a) Náhodné dipól–dipól interakce

Na základě Keesomovy teorie se dvě molekuly s permanentním dipólem orientují v takovém směru, aby k sobě přitahovaly další molekuly. Jedná se o nejsilnější interakci z van der Waalových sil, která se projevuje zejména u polárních molekul ( $H_2O$ ,  $HCl$ ). Podstatou je elektrostatické přitahování opačně nabitých pólů polárních molekul, tedy v podstatě interakce dvou permanentních dipólů. Uplatňuje se v pevných, kapalných a plynných látkách.



b) Náhodně dipólem indukovaný dipól

Debye pozoroval, že molekula s permanentním dipólem indukuje další dipól v sousední neutrální molekule. Tato interakce se uplatňuje tehdy, jestliže se dostane nepolární molekula do blízkosti polární molekuly. Elektrické pole polární molekuly ovlivní rozložení elektronů v nepolární molekule – polarizuje ji za vzniku indukovaného dipólu. Ten pak interaguje s dalšími dipóly, popřípadě indukovanými dipóly.

c) Londonova disperzní interakce

Nestabilní náhodné fluktuační polarizovatelné molekule jsou příčinou dočasných dipólů, který indukuje odpovídající dipól v sousední molekule. Dělení elektronů na nepolární molekule není jednotná po celou dobu. Současná nerovnováha v rozložení elektronů vede k tvorbě dočasných dipólových momentů. Tento proces může u dalších nepolárních molekul vyvolat indukci dipólových momentů.

Londonova disperzní interakce má ze všech tří výše zmíněných mezimolekulárních sil nejdůležitější roli při procesech adheze a fyzikální adsorpce v makroskopických systémech. Keesomovy a Debyeovy interakce lze nalézt pouze mezi molekulami s permanentním dipól-dipólovým momentem. Celkovou van der Waalsovou interakční energii tak lze zapsat jako součet Keesomovy, Debyeovy a Londonovy interakce. [101, 151]

### 3.1.4 Modely přilnavosti

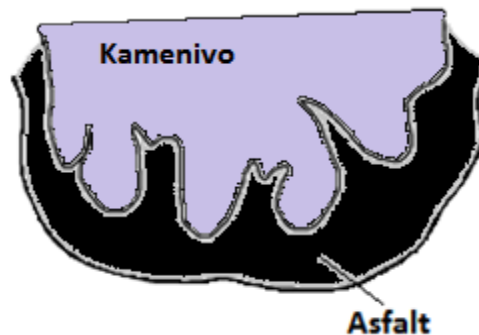
V podstatě existují čtyři obecné teorie vysvětlení adheze, které se pokoušejí vymezit a objasnit vznik vazby mezi asfaltovým pojivem a kamenivem. Výzkum, ze kterého tyto principy vychází, byl proveden v roce 1938 a u každé teorie jsou uvedeny jména výzkumníků, kteří se těmito principy zabývali. Tyto teorie však mohou jen částečně vysvětlit povahu a vznik adheze (Hicks, 1991, Johnson, 2002). [90, 91]

- Teorie mechanická (Knight 1938, Lee a Nicholas 1954, Rice 1958)
- Teorie chemické reakce (Rice 1958, Maupin 1982)
- Teorie molekulární orientace (McBain a Lee 1932, Mack 1957)
- Teorie povrchové energie (Thelen 1958, Ishai a Craus 1977)

Různé výzkumy dospěly k závěru, že problematika přilnavosti mezi pojivem a kamenivem je příliš složitá na to, aby mohla být vysvětlena pouze některou z výše uvedených teorií. [92] Přilnavost asfaltu ke kamenivu je spíše lépe vysvětlitelná kombinací mechanických, chemických a termodynamických principů, které jsou v těchto teoriích rozpracovány. Z tohoto důvodu není použití jednoho modelu dostatečné pro popis reálných systémů. Současně v tomto poznatku lze identifikovat další velmi důležitý závěr či poznatek. Při studiu asfaltových pojiv a jeho interakce s kamenivem a okolním prostředím nelze spoléhat pouze na fyzikálně-mechanické zkoušky a studium reologického chování. Chemické či mechano-chemické aspekty jsou přinejmenším stejně důležité a v zásadě ovlivňují jak vlastní sledované mechanické veličiny, tak i reologické chování.

### 3.1.4.1 *Teorie mechanická*

Mechanická teorie vysvětluje přilnavost pomocí modelových vztahů mezi kamenivem a asfaltem (Obr. 25). Zkapalněný asfalt proniká do dutin, pórů a trhlin v povrchu kameniva. Během ochlazování pojiva dochází k zakotvení obou látek do sebe a vzniká tak pevné spojení asfaltového pojiva ke kamenivu. U této teorie je předpokladem, že kamenivo s drsným povrchem má větší plochu na jednotku objemu a poskytuje více příležitosti pro pevnou vazbu než kamenivo s hladkým povrchem. Dá se tedy říci, že hladký povrch kameniva má horší přilnavost, než kamenivo s porézním a mírně hrubým povrchem. Pro dobrou schopnost potažení a smáčení zrna kameniva pojivem je též rozhodující jeho textura. Ta umožňuje hladkým povrchům potažení snadněji než v případě hrubých povrchů. Smáčivost a vyplnění pórů závisí současně i na viskozitě asfaltového pojiva. Pokud je na povrchu kameniva přítomna vlhkost, může pronikat do asfaltového pojiva a narušovat spojení mezi pojivem a kamenivem, čímž dochází k oslabení mechanického spojení, tím je asfaltová směs více náchylná k obnažování.



Obr. 25. *Princip teorie mechanické spojení v asfaltové směsi.*

Přilnavost asfaltu ke kamenivu zlepšují následující mechanické vlivy [85]:

- Princip zablokování (lock and key):

Tekutá fáze (asfalt) proniká do pórů pevné fáze (kameniva) a vrstvy jsou pak dokonale fyzicky spojeny, dochází k tzv. zakotvení či zaklínění. Pokud nedojde k plastické deformaci asfaltového pojiva je jakýkoliv smykový pohyb mezi oběma fázemi omezen.

- Princip rozdělení napětí:

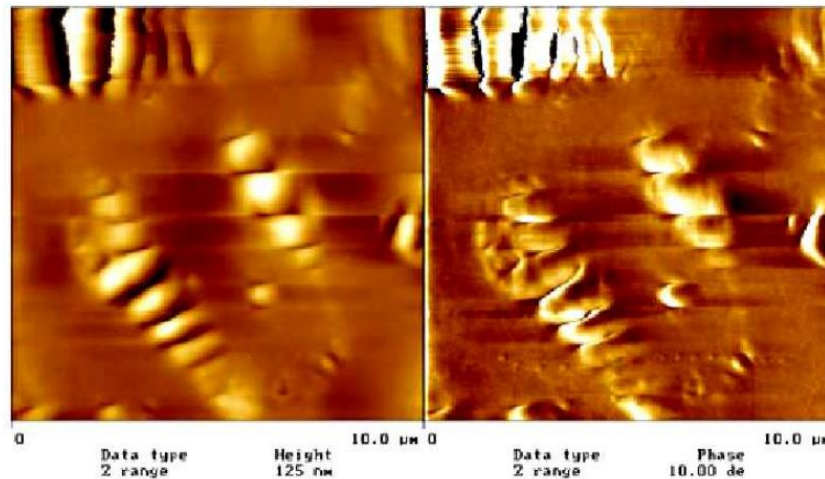
Tento aspekt vychází z předpokladu, že zvýšená drsnost povrchu kameniva zabraňuje náhlému přenosu napětí ve směsi. Napětí v materiálu se rozptýlí do asfaltu pomocí viskoelastického chování pojiva.

- Princip nárůstu specifické plochy povrchu:

Otázka nárůstu specifické plochy je založena na úvaze, která říká, že čím vyšší drsnost povrch vykazuje, tím je fyzická kontaktní plocha větší a tím je i výsledná přilnavost vyšší. Síla vzájemného působení je tedy přímo úměrná této specifické ploše.

Mechanická teorie je použitelná nejen na makroskopické úrovni, ale také v mikroskopickém měřítku. Aplikací mikroskopie atomárních sil byly na většině nespojitých míst povrchu asfaltu detekovány „včelí“ (bee-like) struktury (Obr. 26), k nimž dochází na rozhraní různě tvrdých materiálů. Předpokládá se, že tyto morfologické útvary vznikají na rozhraní

vzduch-pojivo, za čímž stojí asfalteny a jiné polární částice obsažené v asfaltu, které se vlivem teplotních změn při transportu oddělují od zbytku asfaltu. Předpokládá se, že tyto struktury mají důležitou funkci pro přilnavost asfaltu ke kamenivu. [85, 207]



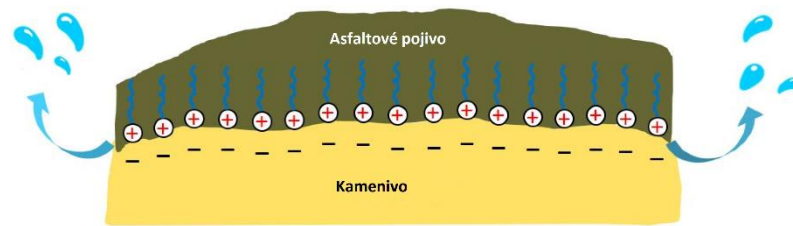
Obr. 26. Snímek asfaltu pořízený metodou mikroskopie atomárních sil znázorňující tzv. „včelí strukturu“ na povrchu asfaltu. [85]

#### 3.1.4.2 Teorie chemické reakce

Asfalt je komplexní materiál, který se skládá především z uhlovodíků a heterosloučenin obsahující atomy síry, dusíku a kyslíku ve formě různých funkčních skupin a kovů (obsahuje stopové množství vanadia, niklu, železa, horčíku a vápníku ve formě anorganických solí a oxidů). Nasycené uhlovodíky jsou označovány jako alkany, parafíny nebo také alifatické (organické) sloučeniny. Nepochárny charakter těchto molekul tkví především v tom, že nasycené sloučeniny spolu tvoří převážně jednoduché vazby. Tyto nepolární molekuly na sebe působí primárně prostřednictvím van der Waalových sil. Pryskyřice a asfalteny představují polární složky asfaltu. Těmto složkám odpovídají molekuly s vysokou molekulovou hmotností označované jako makromolekuly. Během procesu výroby je směs vystavena vysokým teplotám, díky kterým dochází k vytěsňování polárních forem asfaltu na povrch kameniva. Tato reakce vytlačuje hůře vstřebatelné nepolární složky asfaltu z povrchu kameniva. [88]

Koncept chemické reakce vychází z přítomnosti relativních – jak kyselých, tak i zásaditých – sloučenin v systému asfalt-kamenivo. Podle tohoto konceptu se vazba mezi asfaltem a kamenivem vytváří v důsledku reakce těchto polárních sloučenin. K odstraňování asfaltu z kameniva pak dochází v důsledku rozpustnosti těchto sloučenin ve vodě, resp. v důsledku narušení vytvořené vazby negativním účinkem vody a silnější vazby mezi oxidy horniny tvořící kamenivo a molekulami  $H_2O$ . Obecně platí, že kameniva kyselého typu (tedy s vysokým obsahem  $SiO_2$ ) jsou odolná vůči naftalínovým kyselinám, které jsou obsaženy v asfaltu, a přilnavost s takovým kamenivem není dostatečně silná, aby zabránila pronikání vlhkosti na rozhraní pojivo-kamenivo. [85, 88, 207]



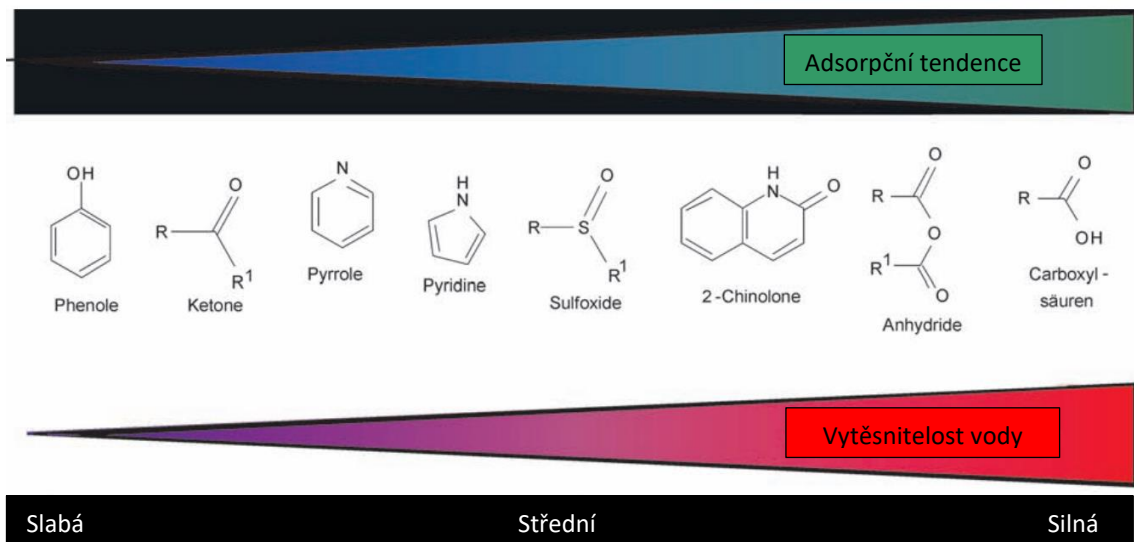


Obr. 27. Princip teorie chemických reakcí (příklad aktivní adheze).

Na Obr. 27 je znázorněn příklad aktivní adheze, která je zajištěna příznivou orientací kladně nabitých povrchově aktivních molekul snížením kontaktního úhlu mezi asfaltovým pojivem a záporně nabitým povrchem kameniva na jejich rozhraní, čímž dochází k vytěsnění vody z tohoto rozhraní a maximalizuje se tak potažená plocha kameniva asfaltovým pojivem.

### 3.1.4.2.1 Funkční skupiny asfaltu

Jak již bylo zmíněno, asfalt je komplexní materiál, který se skládá převážně z nepolárních uhlovodíků a heterosloučenin obsahující atomy síry, dusíku a kyslíku. Stejně tak je v něm obsaženo určité množství kovů, v závislosti na typu ropy, z které je vyroben. Vazba těchto atomů v uhlovodících dává molekulám asfaltu určité polární vlastnosti. Přestože jsou polární sloučeniny přítomny pouze v nízkých koncentracích, mají významný vliv na vlastnosti asfaltu a jeho interakce s povrchem kameniva. Na Obr. 28 jsou znázorněny chemické struktury nejdůležitějších funkčních skupin obsažených v asfaltu, včetně těch, které vznikají oxidací, současně je na obrázku patrná afinita funkčních skupin k povrchu kameniva a jejich vytěsňování vodou. Z toho vyplývá, že sloučeniny, které jsou na povrchu horniny nejsilněji absorbovány povrchem kameniva, jsou také nejsnáze vytěsňovány molekulami vody. To má zásadní význam z pohledu vlivu vody na trvanlivost vazby mezi asfaltem a kamenivem. [85, 93]



Obr. 28. Znáznornění chemických struktur funkčních skupin asfaltu a intenzity adsorpční interakce organických funkčních skupin a povrchu horniny. [85]

Mezi dvě hlavní funkční skupiny lze zařadit zejména karboxylové kyseliny a sulfoxidy, které tvoří téměř polovinu silně absorbovaných složek. Jedná se o silně hydrofilní, alifatické struktury, které neobsahují žádné další polární funkční skupiny. To je pravděpodobně důvod,



proč jsou tyto struktury snadno vytěšňovány vodou. Polyfunkční molekuly asfaltu (sloučeniny obsahující více funkčních skupin) jsou silněji absorbovány. Typické polyfunkční molekuly obsahují keto skupiny, anhydridy a dusík. Určité dusíkaté sloučeniny, jako je pyridin nebo pyroly, jsou velmi silně absorbovány, stejně jako fenoly. Z tohoto principu je pak v zásadě patrný významný vliv účinku organických aminů nebo amidů používaných v případě přílnavostních přísad na zvýšení adheze. Důležitým aspektem je tedy, které z funkčních skupiny asfaltu se dostanou nejdříve a nejrychleji k povrchu kameniva. Pokud jsou na povrch horniny nejprve vázány sloučeniny s funkcí karboxylové kyseliny, pak je pyridin velmi snadno vytěšňován vodou. [85, 207]

#### 3.1.4.2.2 Funkční skupiny povrchu kameniva

Na území České republiky je evidováno velké množství ložisek přírodního kameniva. Současně je toto území charakteristické značnou geologickou rozmanitostí a různorodostí, což znamená, že k dispozici ve stavebnictví máme horniny různého petrografického složení, které se v nemalé míře mohou proměňovat v čase i v rámci jednoho ložiska. Současně platí, že jako surovina pro výrobu drceného kameniva slouží všechny pevné magmatické, sedimentární i metamorfované horniny, pokud jejich technologické vlastnosti odpovídají účelu použití. Horniny musejí mít určité fyzikálně-mechanické vlastnosti, které vyplývají z jejich geneze, mineralogicko-petrografického složení, struktury, textury, druhotných přeměn apod. Horniny dle mineralogicko-petrografického složení tvoří jeden či více minerálů a jsou definovány svým chemickým složením a uspořádáním atomů. [94]

Pokud jsou horniny v krystalické formě, pak je každý atom v krystalové mřížce fixován sousedními atomy prostřednictvím elektrostatických interakcí. Pokud dojde k drcení kameniva, vytvoří se na nově vzniklém povrchu kameniva volné vazby z důvodu nedostatku sousedních atomů. Vznikají tak nové molekuly, které vytvářejí nové koordinační vazby s jinými molekulami. Molekulární popis je základem pro vysvětlení povrchových nábojů a vysvětluje tak povrchovou volnou energii podle termodynamické teorie.

Mohou zde tak vznikat nové koordinační vazby, protože síly jsou orientovány směrem ke krystalové mřížce a tlačí tak atomy takřkajíc blíže k sobě. Další způsob, jak zastoupit přerušené vazby, je navázat například vodu a organické molekuly asfaltu prostřednictvím jejich funkčních skupin. Z několika studií, uvedených v [85] je jedním z méně vhodných minerálů z hlediska citlivosti vůči účinkům vody, výskyt křemene, který je hojně zastoupen v mnoha často využívaných horninách ve stavebnictví.

Oxidy a hydroxylové skupiny působí jako silná adsorpční místa pro molekuly vody. Naopak molekuly vody mohou vázat organické molekuly. V případě dlouhodobého vystavení kameniva okolnímu prostředí, mohou být absorbované molekuly vody nahrazeny nebo obaleny molekulami asfaltu. Z dlouhodobého výzkumu [95] je patrné, že horniny, které byly skladovány po delší dobu v prostorách např. skládek, odolávají efektu „strippingu“ lépe než kamenivo, které bylo právě nadrcené. To představuje další poměrně zajímavý poznatek a v krajním případě může vést k rozdílným výsledkům posouzení přílnavosti. Tedy pokud výrobce asfaltové směsi odebere kamenivo po zimní odstavce výroby z haldy, která měla čas se ve smyslu výše uvedeného stabilizovat, tak může být zjištěná přílnavost jiná než v případě identické horniny, která byla



v měsících hlavní stavební sezony nadrcena a hned zpracována do asfaltové směsi. Prakticky se však tomuto hledisku pozornost z pohledu asfaltové směsi nikdy nevěnuje.

Obecně platí, že chemicky aktivní oblasti na povrchu hornin, které vykazují vysokou afinitu k asfaltu, obsahují prvky jako hliník, železo, hořčík a vápník. Mezi prvky s nízkou afinitou k asfaltu patří sodík a draslík. [96] Všeobecně se tak dá říct, že přilnavost fungující v rámci systému asfalt-kamenivo je dána především vlastnostmi horniny a specifickým povrchem kameniva. Čím je větší specifický povrch kameniva na jednotku hmotnosti tohoto kameniva, tím je k dispozici více plochy pro interakci s asfaltem.

#### 3.1.4.2.3 Interakce asfalt-kamenivo

Interakce mezi asfaltem a povrchem kameniva lze popsat vztahem vycházejícím z principu Lewisovy teorie kyselin a zásad. Tuto teorie publikoval americký chemik Gilbert Newton Lewis v roce 1923. Většina kationtů jsou Lewisovy kyseliny a většina aniontů jsou Lewisovy zásady. Podle Lewisovy teorie je kyselina sloučeninou akceptující volný elektronový pár (poskytuje řečeno chemickou terminologií svůj vakantní orbital), báze je oproti tomu jeho donorem (resp. akceptorem vakantního orbitalu). Přestože jsou karboxylové kyseliny v asfaltu přítomny pouze v malých koncentracích, hrají velmi důležitou roli a významně tak přispívají k pevnějším vazbám asfaltu ke kamenivu.

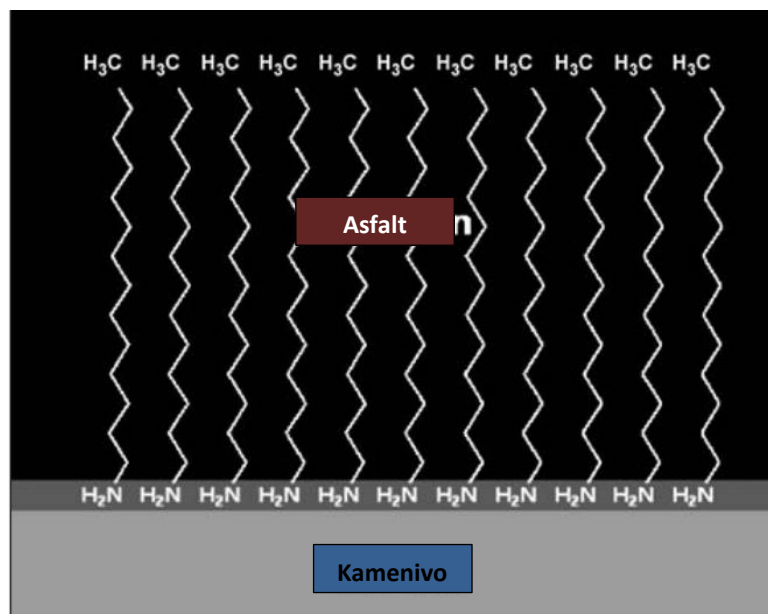
K tomuto dodejme, že tyto kyseliny jsou organické sloučeniny, charakterizované přítomností skupiny – COOH. Ve srovnání s kyselinami anorganickými patří spíše ke kyselinám slabším. Jejich síla (tj. ochota odštěpovat proton) je závislá na délce uhlíkatého řetězce (s délkou řetězce síla kyseliny klesá) a na případných substituentech (např. přítomnost prvku ze skupiny halogenů sílu zvyšuje, jak lze sledovat například při porovnání kyseliny trichloroctové a základní kyseliny octové, kdy prvně jmenovaná je mnohem silnější). Karboxylové kyseliny (či jejich soli) jsou v organických maticích obvykle zastoupené, a kromě asfaltového pojiva je pro nás nejbližším příkladem lidské tělo, kde jsou poměrně hojné. Důležitými funkčními deriváty karboxylových kyselin jsou estery – sloučeniny vzniklé reakcí karboxylové kyseliny a alkoholu (či fenolu), které jsou velmi špatně rozpustné ve vodě.

Tyto kyseliny se zpravidla dále rozdělují na acyklické a aromatické. Je pro ně současně charakteristické, že s nižším počtem obsažených atomů uhlíků se velmi často jedná o kapaliny nepříjemného zápachu. Dvojsytné karboxylové kyseliny (s více skupinami –COOH) a především pak aromatické karboxylové kyseliny jsou krystalické (pevné) látky. Z pohledu vlivu přilnavosti asfaltu může být důležitá skutečnost, že rozpustnost karboxylových kyselin ve vodě klesá společně s rostoucím počtem atomů uhlíku v řetězci, který je tvoří. Na druhou stranu rozpustnost roste se zvyšujícím se počtem karboxylových skupin. V kapalném či pevném skupenství existuje většina karboxylových kyselin ve formě dimeru (dochází ke vzniku vodíkových vazeb mezi karboxyly). Karboxylové kyseliny s dlouhými alifatickými zbytky mají tzv. amfifilní vlastnosti, jsou zároveň hydrofilní i hydrofobní. Takové látky jsou využívány jako detergenty (odmašťovače). V přírodě mohou mít stejnou funkci, především však slouží k tvorbě biologických membrán. [97]

Pokud se v nějaké podobě u asfaltové směsi uplatní hydroxid vápenatý (např. v podobě vápenného hydrátu), tak jeho přídavek mění fyzikální vlastnosti směsi prostřednictvím chemické

interakce s asfaltem. Hydroxid vápenatý reaguje právě s karboxylovou kyselinou a 2-chinolinem za vzniku nerozpustných vápenatých organických solí, což má za následek, zamezení vzniku lehce rozpustné sloučeniny při reakci karboxylové kyseliny s křemičitým povrchem ve vodě. Aktivní oblasti křemičitého povrchu zůstávají volné pro tvorbu silné voděodolné vazbě se skupinami asfaltu obsahující dusík. Tento princip ukazuje, proč může přidavek vápenného hydrátu snížit citlivost vůči poškození vazby mezi pojivem a kamenivem způsobeným vlhkostí. Jiným způsobem snížení vodní citlivosti křemičitého kameniva mohou být přílnavostní přísady pro zlepšení přílnavosti.

Tyto přísady většinou obsahují sloučeniny, které se obvykle skládají z uhlovodíkových řetězců obsahujících alespoň jednu primární, sekundární nebo terciární aminovou nebo amidovou složku. Polární amin/ amid jsou chemicky vázané na křemičitý povrch, zatímco uhlovodíkové řetězce, díky svým vlastnostem (podobným jako u asfaltu) silně interagují s asfaltem (Obr. 29). [85]



Obr. 29. Schematické znázornění orientace aminů k povrchu kameniva. [85]

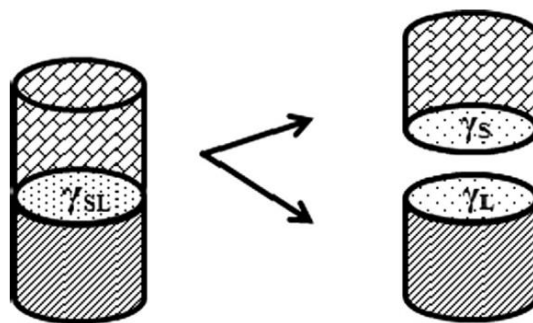
### 3.1.4.3 Teorie povrchové energie

Teorie povrchové energie (nebo také termodynamická teorie) popisuje adhezi systému asfalt-kamenivo prostřednictvím vztahů mezipovrchové energie, kterou lze vyjádřit hodnotou povrchového napětí. Existence vazby asfaltu ke kamenivu je vysvětlována reaktivními hodnotami povrchového napětí asfaltu a mezifázovým napětím systému asfalt-kamenivo. Mezifázové napětí je mírou kohezních účinků uvnitř asfaltu, tj. soudržnosti asfaltu. Optimální vazba mezi asfaltem a kamenivem se podle tohoto modelu vytváří tehdy, existuje-li nízké povrchové napětí v asfaltu a relativně vysoké mezifázové napětí. Jako přílnavostní látky, tj. látky snižující obnažování asfaltu z kameniva, pak působí sloučeniny, které zvyšují mezifázové napětí a tím vylepšují „smáčení“ kameniva asfaltem. V případě, kdy se dostává do kontaktu voda-kamenivo-pojivo, voda – jak již bylo uvedeno dříve v této práci – bude mít tendenci vytěšňovat asfaltové pojivo. To může mít za následek špatné smáčení povrchu kameniva asfaltovým pojivem a povede k obnažování zrn kameniva.

K popisu adhezní interakce mezi pojivem a kamenivem může sloužit jedna z termodynamických veličin - tzv. Gibbsova volná energie, která stanovuje rozdíl mezi počátečním a konečným energetickým stavem a předpovídá, zda daný proces může probíhat za daných teplotních a tlakových podmínek. Pokud je energie záporná, znamená to, že v průběhu procesu došlo k uvolnění energie, která se mění na práci a děj je tedy samovolný. Nastane-li opačný proces, energie je absorbována z okolního prostředí. V případě, kdy je Gibbsova volná energie rovna nule, nastává v procesu rovnovážný stav. Pro tento proces je někdy též známý termín „adhezní práce“ označovaný v terminologii i literatuře jako  $W^a$ . Mezi adhezní prací a povrchovou energií látek existuje důležitá souvislost, kterou popsal Dupré [85]:

$$W^a = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL} \quad (2)$$

Vztah dle rovnice (označení v rovnici: „s“ - solid – pevná látka – kamenivo, „l“ - liquid – kapalná látka – asphaltové pojivo) je interpretován následovně. Pokud mají dva odlišné materiály (v tomto případě pevná a kapalná látka) společnou hraniční plochu, pak je zapotřebí k jejich oddělení určitá energie, jak je znázorněno na Obr. 30. U křehkého rozhraní se použitá energie rovná součtu povrchové energie obou těchto materiálů ( $\gamma_S + \gamma_L$ ). V důsledku oddělení těchto dvou materiálů chybí ve vztahu molekulární síly. Současně musí být nově vzniklá povrchová energie z nově vzniklých povrchů ze vztahu odečtena a tato energie se pak označí mezifázová ( $\gamma_{SL}$ ). Povrchová energie může být stanovena pomocí různých metod. Jednou z nejznámějších metod měření povrchové energie je měření pomocí kontaktního úhlu. Kontaktní úhel je jednoduchý způsob, jak popsat tvar tekuté kapky (asfaltu) na povrchu materiálu, který pomáhá určit smáčivost kameniva.

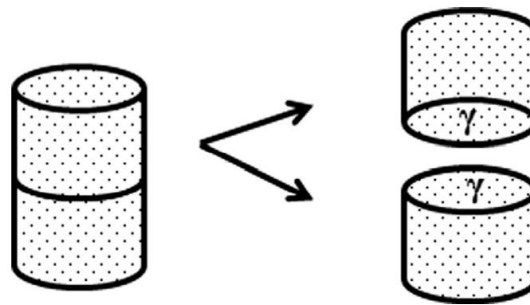


Obr. 30. Adhezní práce potřebná k oddělení povrchů dvou odlišných materiálů (pevné látky „s“ a kapalně látky „l“). [98]

Kohezi lze vysvětlit na základě principu mezimolekulární přitažlivosti vznikající mezi podobnými molekulami. Kohezivní práce, je energie potřebná k porušení vnitřní soudržnosti jednoho materiálu (viz Obr. 31), ať už se jedná o pevnou či kapalnou látku. Kohezivní práce (označovaná jako  $W^c$ ) se vypočítá dle následující rovnice:

$$W^c = 2\gamma \quad (3)$$

kde  $\gamma$  označuje povrchovou energii daného materiálu (asfaltového pojiva nebo kameniva).



Obr. 31. Kohezní práce potřebná k oddělení povrchů stejného materiálu. [98]

Ačkoli měření kontaktního úhlu je vykládáno především na základě termodynamických principů, může být interpretováno také na makroskopické úrovni pro měření smáčení a rozprostření. Termíny smáčivost, rozprostření a kontaktní úhel jsou tedy úzce spjaty s termínem adheze. Povrchová smáčivost (nebo rozprostírání kapaliny po povrchu) je proces, který popisuje interakci látky kapalné s pevným povrchem, se kterým přichází do kontaktu a vytváří se tak adhezní síly. Čím je smáčivost pevného materiálu vyšší, tím je lepší adheze. Při dokonalém rozprostření je kontaktní úhel roven  $0^\circ$  a kapalina se na povrchu šíří rovnoměrně. Do toho však vstupují další parametry, jakou jsou viskozita (a tedy i teplota) kapaliny, drsnost a heterogenita povrchu dané pevné látky. Z termodynamického hlediska závisí smáčení a rozprostření na adhezních silách, resp. energii  $W^a$  kohezní energii  $W^c$  (pomocí těchto sil lze definovat vztah pro koeficient rozprostření SC dle následující rovnice), které si vzájemně konkurují (Moraes et al. 2017; Wasiuddin 2007) [98, 99]:

$$SC = W^a - W^c \quad (4)$$

Čím vyšší je koeficient rozprostření SC, tím vyšší je práce adheze v porovnání s kohezní energií pojiva a tekuté asfaltové pojivo je schopno zcela pokrýt povrch kameniva, a snížit tak jeho povrchovou energii. V opačném případě pojivo vytvoří na povrchu kameniva vrstvu s určitým úhlem smáčení a dochází k částečnému smáčení. Záporná hodnota koeficientu rozprostření SC představuje finální kontaktní úhel. Pokud se koeficient SC rovná nule, jedná se o rovnovážný stav. Rovnovážný stav kapky na podložce je takový, při kterém nedochází k pohybu hranice kapky. [98]

Vodní citlivost asfaltových směsí lze také kvantifikovat výpočtem poměrů adhezní práce  $W^a$  (nebo koeficientu rozprostření) ku adhezí práci za přítomnosti vody (označené  $W_a^{wet}$ ), která je definována jako snížení volné energie na rozhraní pojiva a kameniva za přítomnosti vody (Bhasin et al. 2007; Kakar et al. 2016, Ameri et al. 2020). Vodní citlivost asfaltových směsí je přímo úměrná prvnímu a nepřímo úměrná druhému. Proto vyšší hodnoty těchto poměrů svědčí o lepší odolnosti vůči poškození vlivem účinku vody. Tyto dva poměry se zapisují jako [3, 100, 102]:

$$ER_1 = \left| \frac{W_a}{W_a^{wet}} \right| \quad (5)$$

$$ER_2 = \left| \frac{W_a - W_c}{W_a^{wet}} \right| = \left| \frac{SC}{W_a^{wet}} \right| \quad (6)$$

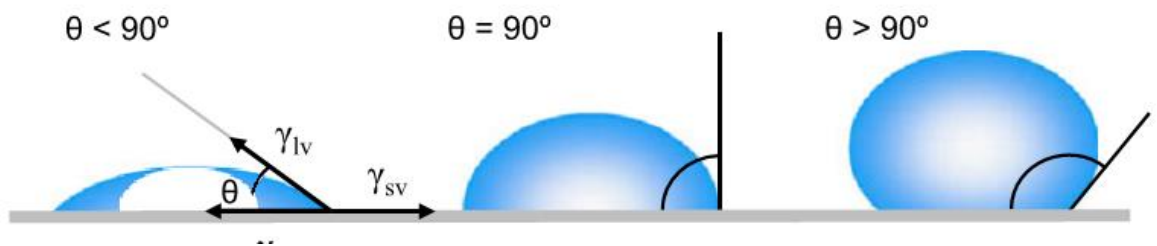


## 3.1.4.3.1 Měření kontaktního úhlu

Kontaktní úhel si lze představit jako kapku kapaliny spočívající na horizontální rovině povrchu pevného tělesa, avšak za předpokladu, že povrch pevného tělesa je zcela rovný. Kapkovitý tvar kapaliny je dán jejím povrchovým napětím. Molekuly na povrchu kapaliny nemohou ze všech stran prostřednictvím svých silových polí shodně interagovat se sousedními molekulami. To způsobuje, že jsou vtahovány do hmoty (jádra) kapky. Systém molekul pak zaujímá takový geometrický tvar, jaký má nejmenší poměr mezi povrchem a objemem – koule, resp. kulovitý segment (Obr. 32). V reálných podmínkách se ale nejedná o skutečnou kouli. Její tvar je zploštělý díky gravitačním silám, které na ni působí. Kontaktní úhel je tedy sevřen mezi rozhraním pevné těleso/kapalina a tečnou mezi rozhraním kapalina/vzduch. Je-li velikost kontaktního úhlu menší než  $90^\circ$ , povrch smáčeného materiálu je označován jako smáčivý. Oproti tomu kontaktní úhel větší než  $90^\circ$  poukazuje na nízkou smáčivost (Obr. 33). [103]



Obr. 32. Princip silové interakce mezi molekulami kapaliny. [103]



Obr. 33. Měření kontaktního úhlu pro stanovení smáčivosti povrchu (vpravo – hydrofobní povrch, uprostřed – hydrofilní povrch). [103]

Rovnovážný stav je v tomto případě popsán Youngovou rovnicí jako rovnost mezifázových povrchových napětí na rozhraní skupenství pevné, plynné a kapalné látky, dle následující rovnice:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$\gamma_{SV}$  – volná povrchová energie pevné látky (podkladu) v rovnováze s roztokem nasycených par

$\gamma_{SL}$  – mezifázové napětí pevné látky v rovnováze s kapalinou

$\gamma_{LV}$  – povrchové napětí kapaliny v rovnováze s výparnou kapalinou

$\theta$  – kontaktní úhel

Pokud má kapalina vysoké povrchové napětí, pevná látka (kamenivo) je pak špatně smáčivá. Pokud má pevná látka nízkou volnou povrchovou energii, smáčivost je také špatná. Předpoklad dobré smáčivosti je proto zajištěn tehdy, pokud kapalina pro smáčení pevné látky bude mít menší nebo stejně velké povrchové napětí jako smáčené pevné těleso. [85, 103]

### 3.1.4.3.2 Metody měření kontaktního úhlu

Pro měření kontaktního úhlu lze aplikovat dva přístupy – přímý a nepřímý. Přímý je založen na optických pozorováních mezifázového rozhraní pevné, kapalné a plynné látky. Velikost kontaktního úhlu se pak stanovuje přímým odečtem z tvaru kapaliny (lze pořídít obrazový záznam a kontaktní úhel měřit pomocí digitální techniky). Nepřímé metody jsou založeny na silovém principu. Sleduje se změna síly (hmotnosti) pevné látky před a po kontaktu s kapalinou. [103]

### 3.1.4.4 Teorie molekulární orientace

Při kontaktu pojiva s kamenivem, molekuly asfaltu mají tendenci orientovat se k iontům na povrchu kameniva, což v podstatě vytváří slabé vazby mezi asfaltovým pojivem a povrchem kameniva. Pokud mají molekuly vody více polaritativity než molekuly asfaltového pojiva, mohou přednostně uspokojit energetické požadavky (nároky) povrchu kameniva. Výsledné slabé spojení vazby kamenivo-pojivo může mít za následek obnažování. [16, 17, 18]

### 3.1.5 Hlavní mechanismy procesu „obnažování“

Fenomén obnažování, jakožto hlavní důsledek selhání adheze mezi pojivem a kamenivem, byl od počátku jeho studia připisován zejména přítomnosti zbytkové vody na rozhraní kamenivo-pojivo [106, 107, 108]. Obnažování je definováno jako proces, který má za následek fyzické oddělení asfaltového pojiva od kameniva kvůli ztrátě přilnavosti na rozhraní těchto materiálů za přítomnosti vody. Průnik vlhkosti se obvykle považuje za primární příčinu obnažování v asfaltových směsích, protože způsobuje odstranění asfaltového pojiva (vytvořeného filmu) z povrchu kameniva. Tab. 10 uvádí možné způsoby, jimiž se voda dostává na rozhraní pojivo-kamenivo, a dokládá jak komplexní problematika přilnavosti je. Způsoby, jimiž se vlhkost dostává na rozhraní kameniva-pojiva, jsou důležité pro správné pochopení procesu obnažování. Proces obnažování vede buď k předčasné degradaci, nebo k předčasné únavě asfaltové směsi a následně k vyšším nákladům na údržbu. Jakmile tento proces začne, rychlost degradace vozovky, která je silně ovlivněna stárnutím asfaltové směsi, rapidně vzrůstá až po vytvoření výtlučků, jak již bylo uvedeno v úvodu této práce. [6, 86]

Tab. 10. Mechanismy vniknutí vody mezi pojivo a kamenivo, [86].

Průběh	Teorie	Mechanismus
Oddělení, přemístění	Termodynamická a chemická reakce	Voda má nižší povrchovou energii a vyšší dipólový moment než asfaltové pojivo, které je vytlačeno nebo odsunuto z povrchu kameniva.
Spontánní emulgace	Elektrostatika	Tvorba emulze kvůli přítomnosti například povlaku jílu, oslabí vazbu mezi pojivem a kamenivem – toto vysvětluje rizika, je s sebou přináší výskyt jemných částic nevhodné kvality.
Pórový tlak	Mechanické porušení	Zvýšený pórový tlak vody za neodvodněných podmínek způsobí poškození asfaltového filmu tím, že umožní vodě přístup do rozhraní mezi asfaltovým pojivem a kamenivem.
Porušení chemické vazby	Chemické reakce a elektrostatika	Chemická a elektrostatická interakce mezi vodou a určitými typy kameniva z nich odstraňuje pojivo.
Mikrobiologická aktivita	Bakteriální metabolismus	Mikrobiologický metabolický proces na rozhraní, při kterém vznikají vedlejší produkty, které narušují přilnavost.
Osmóza	Difuze	Gradient koncentrace v pojivu způsobuje transport vody do rozhraní.

### 3.1.5.1 *Oddělení, přemístění*

Oddělení je definováno jako odtržení či separace asfaltové vrstvy od povrchu kameniva tenkou vrstvou vody, a to bez zjevného porušení asfaltového filmu. Pokud je obnažování zrn kameniva ve směsi způsobeno právě oddělením, může se asfaltový film zcela odloupnout od kameniva, pak mluvíme o úplné ztrátě adheze.

Pokud dojde k porušení asfaltového filmu, voda začne vnikat na rozhraní asfaltového pojiva a kameniva, což může vést až k úplnému vytlačení pojiva a nahrazení pojiva vodou (v tomto případě mluvíme o přemístění či posunutí). Čím více se voda snaží dostat k povrchu kameniva, tím více se působící povrchové síly chtějí vyrovnat a tím je rychlost obnažování kameniva rychlejší.

Oba tyto mechanismy vychází z teorie povrchových sil, která říká, že termodynamicky stabilní systém upřednostňuje rovnovážný stav s nejnižší povrchovou energií. Kanitpong v rámci své studie na Texas A&M University zjistil, že pokud se do asfaltové směsi, potažmo do systému kamenivo-pojivo, dostane voda, dojde k uvolnění energie. Takové uvolnění energie umožňuje, aby se systém dostal do rovnovážného stavu s nižší povrchovou energií, což přináší další důkaz, že povrch kameniva dává zpravidla vždy přednost vodě před asfaltem. [109] Mechanismus přemístění nebo posunutí lze také vysvětlit pomocí teorií chemických reakcí.

Aby se minimalizovaly účinky oddělení či přemístění v asfaltové směsi, je třeba minimalizovat potenciální zdroje porušeného asfaltového filmu nebo mezery na rozhraní asfaltu/kameniva. Mezery v asfaltovém filmu pokrývajícím kamenivo jsou způsobeny neúplným pokrytím kameniva, k němuž může dojít během procesu míchání. K tomu může dojít například použitím zaprášeného kameniva, kdy se po obalení asfaltovým pojivem utvoří drobné dutiny s prachovými částicemi. Tyto drobné dutiny vznikající v důsledku použití zaprášeného kameniva ve směsi lze eliminovat tím, že se kamenivo s vysokým obsahem jemných částic v rámci procesu výroby kameniva dostatečně promyje. Tím se zajistí čistý povrch pro zajištění kvalitního spojení s asfaltovým pojivem. [110]

K oddělení asfaltového filmu může dojít také v případě kameniva s velmi ostrými hranami, jeho použití však není z hlediska kvalitní adheze a její trvanlivosti zcela vhodné. Dále je třeba zajistit, pro kvalitní spojení asfaltového pojiva kameniva, aby byla kontrolována kvalita obou těchto materiálů. Neméně podstatné je také dodržení minimálního množství dávkovaného asfaltového pojiva. Toto množství vychází z typu asfaltové směsi, které předepisují normy ČSN 73 6121 a ČSN 73 6120 či technické podmínky (TP) Ministerstva dopravy a uvádí minimální požadavky pro množství pojiva s ohledem k typu asfaltové směsi (tyto předpisy též zohledňují korelaci množství přidávaného pojiva s ohledem k objemové hmotnosti kameniva). [28, 115]

Eliminací těchto zdrojů ztráty přilnavosti se výrazně sníží pravděpodobnost mechanismu způsobující oddělení/přemístění v asfaltové směsi. [111]

### 3.1.5.2 *Spontánní emulgace*

Obecně se má za to, že přítomnost vody nemá na asfaltové pojivo ve směsi nijak významný efekt. Některá složení asfaltů však umožňují spojení vody a asfaltu, což vede



k vytvoření tzv. inverzní emulze, kde jsou kapičky vody volně rozptýleny v asfaltu. V případě, kdy se dostane emulze na povrch kameniva, emulgace vyvolá mechanismus oddělování (viz kap. 3.1.5.1), voda se dostane k povrchu kameniva a začne vytlačovat asfaltové pojivo. Tento proces je však dočasný, jakmile dojde k vypaření vody, asfaltové pojivo opět přilne k povrchu kameniva.

Na spontánní emulgaci má významný vliv zdroj ropy, ze kterého asfalt byl vyroben a následně tedy i jeho chemické složení. Při volbě asfaltového pojiva je třeba zvážit a správně vyhodnotit potenciální riziko ke spontánní emulgaci. K tomu je třeba znát rafinační procesy použité při výrobě asfaltu, protože během některých metod rafinace ropy jsou použita emulgační činidla. Některé z metod využívají žíraviny k neutralizaci kyselých ropných olejů a odsolování ropy. Při nedostatečném či částečném procesu odsolování zůstávají ve výsledném produktu zbytková množství soli, což může v asfaltovém pojivu působit jako emulgátor, který v přítomnosti vlhkosti podporuje emulgaci. [111, 112]

### 3.1.5.3 Pórový tlak

Mechanismus vzniku pórového tlaku je výsledkem snižování vzduchových dutin vlivem dopravního zatížení a platí pro asfaltové směsi prováděné za horka. Voda přítomná ve vzduchových dutinách (mezerovitost směsi) je vlivem zatížení stlačována, čímž se zvyšuje pórový tlak na asfaltovou vrstvu. Při opakovaném zatěžování může pórový tlak dosáhnout takové úrovně, při které dojde k porušení asfaltového filmu, v jehož důsledku může voda proniknout k povrchu kameniva a začne asfaltové pojivo dále vytlačovat, resp. nastartuje se opět proces obnažování zrn kameniva.

K tomuto mechanismu obvykle dochází u nově položených asfaltových vrstev, kde jsou asfaltové směsi zhutňovány na výslednou mezerovitost přibližně 6-8 % a za předpokladu, že k dohutnění takto položené vrstvy dojde ještě vlivem dopravního zatížení na zhruba 4 % mezerovitosti. Na počátku životnosti vozovky jsou mezery dostatečně velké a díky tomu je umožněno volnému pohybu vody. Jakmile dojde k zahušťování a zmenšování mezer, či k jejich uzavírání, voda se v nich zachytí a nemůže se v nich volně pohybovat, čím vytváří v asfaltové směsi pórový tlak způsobený jak dopravním zatížením, tak i změnou teploty.

Účinky mechanismu pórových tlaků lze eliminovat při návrhu asfaltové směsi, a to s ohledem k predikci dopravní intenzity, ale také s ohledem ke správnému zhutnění asfaltové směsi během pokládky. Shodně je třeba přistupovat k návrhu optimálního množství pojiva v asfaltové směsi a zajistit tak dostatečně silný a odolný asfaltový film potřebný k obalení zrn kameniva. Tenčí vrstva asfaltového pojiva bude více náchylná k účinkům pórového tlaku, [111]. Uvedené je dalším argumentem pro mnohaletou odbornou diskusi a poukazování na úskalí, která má volba či přípustnost nižšího obsahu asfaltového pojiva v asfaltových směsích, jak je uplatňována v České republice. Je to současně důležitý argument proti tradiční strategii výrobců asfaltových směsí dle možností minimalizovat obsah asfaltového pojiva ve směsi. V neposlední řadě se jedná o argument dvojsečnosti přístupů, které například v české republice volíme. Obecně se přijímá jako opodstatněné, že nižší obsah asfaltového pojiva ve směsi napomáhá odolnosti proti trvalé deformaci, která je po velmi dlouhou dobu přijímána jako klíčový sledovaný parametr. Nicméně vyřešením jednoho problému v podstatě mnohdy upozadujeme další příčiny poruch, jež v asfaltové vrstvě mohou vznikat. Tato nerovnováha ve významnosti



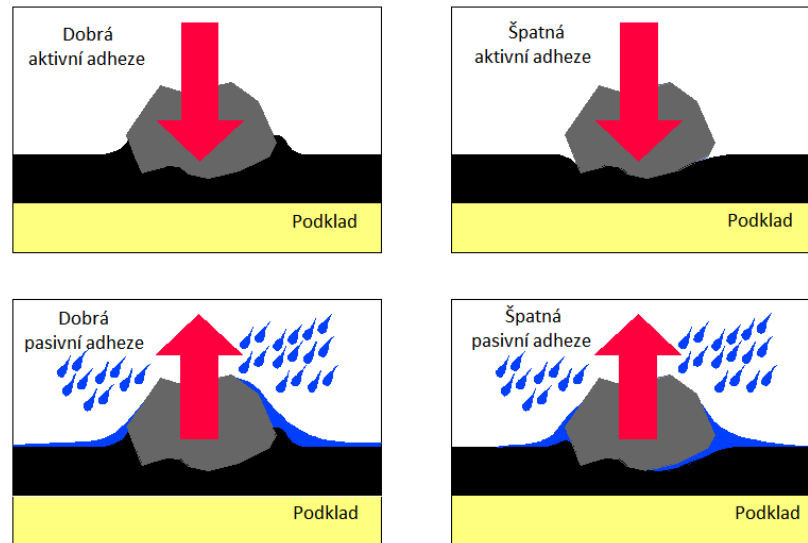
různých faktorů degradace asfaltových vrstev pak vede ke skutečnosti, že sice asfaltové vozovky vykazují menší míru porušení vlivem trvalé deformaci, ale jejich životnost je zkracována dalšími projevy jako je ztráta trvanlivosti a zvýšená náchylnost k účinkům vody, což s sebou přináší celou řadu dalších projevů poruch. Nedostatečně komplexní náhled na chování asfaltové vrstvy tak snižuje celkovou životnost a v konečném důsledku daňového poplatníka stojí mnohem více peněz, pomineme-li snížení komfortu užívání pozemní komunikace.

#### 3.1.5.4 *Porušení chemické vazby*

V tomto případě je povrch horniny z velké části smáčen asfaltovým filmem. Pokud se voda naakumuluje v mezní vrstvě, dochází k oddělování asfaltového filmu. Buď voda difunduje do mezifáze zvenčí, nebo se jedná o zbytkovou vodu pocházející z horniny samotné. Výskyt zbytkové vody je především v horninách s vysokým obsahem křemene nebo živce. Při dostatečném vysušení je tento proces částečně vratný a zejména nízkoviskózní asfalty se opět velmi snadno "přilepí" k povrchu kameniva. [85]

#### 3.1.6 **Faktory ovlivňující adhezi mezi pojivem a kamenivem**

Negativní vliv vody na soudržnost asfaltových úprav je závislý především na teplotě prostředí, viskozitě a chemickém složení asfaltového pojiva a na druhu kameniva. Kvalitní spojení zrna kameniva a pojiva, tedy v této práci studovaná přilnavost asfaltového pojiva ke kamenivu, představuje již dříve vymezenou aktivní adhezi (Obr. 34). Kamenivo a pojivo jsou dva různé materiály, které mají protikladné vlastnosti povrchů, jak bylo uvedeno v předešlých kapitolách, a přilnavost tedy závisí na těsném styku obou těchto materiálů. Pro splnění podmínky aktivní adheze, je zapotřebí zbavit kamenivo ideálně veškeré vody, aby bylo dosaženo dokonalého přilnutí s asfaltovým pojivem. Kamenivo však oproti asfaltu je více anebo méně hydrofilní, to znamená, že snadno pohlcuje vodu. Kdežto asfaltové pojivo oproti kamenivu vodu odpuzuje, říkáme, že je vysoce hydrofobní. Kyselá kameniva jsou přitom obecně více hydrofilní než kameniva zásaditá. Ta můžeme zařadit mezi kameniva slabě hydrofobní. Lze říci, že vápencové kamenivo má dobrou afinitu k asfaltu na rozdíl od kameniva křemičitého s vyšším obsahem  $\text{SiO}_2$ , které má naopak velmi dobrou afinitu s vodou. Al-Shweily ve svém výzkumu [114] stanovil, že vápencové kamenivo má větší odolnost proti poškození způsobené vlivem vody než čedič, a vysvětlil to tím, že vápenec je kladně nabitý, což vede k pevnějším vazbám s asfaltovým pojivem. Chemické složení kameniva ovlivňuje míru vodní citlivosti v kontextu vazby mezi asfaltem a kamenivem, a poznamenal také, že oxid křemičitý obvykle způsobuje snížení pevnosti vazby mezi asfaltem a kamenivem; protože vápencové kamenivo obsahuje méně  $\text{SiO}_2$  než čedič, vykazuje tedy lepší odolnost vůči vodě. Jiná studie s použitím žulového kameniva rovněž ukázala, že mineralogie kameniva má významný vliv na přilnavost k asfaltu [113]. Dalším faktorem ovlivňujícím přilnavost je prach (obecně jemné a ultrajemné minerální částice), kdy se kamenivo obklopí vrstvami prachu, které zabrání přímému styku asfaltového pojiva s pevným povrchem kameniva. V takovém případě pak mluvíme o pasivní přilnavosti, viz Obr. 34. [14, 15, 86]



Obr. 34. Znárodnění působení aktivní a pasivní přilnavosti.

### 3.1.6.1 Vliv kameniva mineralogického složení kameniva

Povrchy různých typů kameniva se vzájemně liší z hlediska mineralogicko-petrografického složení, struktury a textury – velikosti a četnosti pórů, drsnosti. Od této skutečnosti se odvíjí množství, síla a trvanlivost aktivních míst (tj. míst, jež jsou schopna vytvářet spojení s asfaltem), která můžeme detekovat na povrchu kameniva.

Snižování výrobních nákladů a zvýšení efektivity výroby při užití i méně kvalitních materiálů je dnes největším trendem, a to nejen v silničním stavitelství. Samozřejmě tato skutečnost je mnohem složitější, neboť například snižování výrobních nákladů není a priori cílem výrobců a zhotovitelů, je to mnohem více důsledek vytvořeného odběratelsko-dodavatelského řetězce, kde faktor ekonomické hodnoty je obrovský a mnohdy vytěsňuje jak faktor technický, tak i faktor smysluplně udržitelného životního cyklu. Zvyšování efektivity výroby či využití i méně kvalitních materiálů má též více rovin, např. trendy související s co nejhospodárnějším přístupem k dostupným neobnovitelným zdrojům nebo zvyšující se důraz na snižování energetické a emisní náročnosti. Pokud se tyto aspekty v čase potkají a nedojde k jejich vyvážení, resp. i osvětlení důsledků, kdy vyšší kvalita a vyšší míra ochrany prostředí znamenají i přiměřeně zvýšené náklady, potom výsledkem vždy bude ztráta trvanlivosti, obecné odolnosti a životnosti asfaltových směsí.

Rostoucí omezená dostupnost přírodních, finančních a energetických zdrojů na druhé straně zvyšuje potřebu hledat řešení pro efektivní a hospodárnou dopravní infrastrukturu. Přilnavost asfaltového pojiva ke kamenivu je jednou z technických charakteristik asfaltové směsi, jakožto ukazatele trvanlivosti materiálu. Tato skutečnost je dána jednak snahou při výrobě a realizaci asfaltových vozovek využít lokálně dostupné zdroje kameniva, která nemusí být vždy nejvhodnější z hlediska adheze. Zlepšit přilnavost mezi asfaltovým pojivem a kamenivem lze v zásadě třemi způsoby. A jedním z nich je právě volba vhodného typu kameniva. Z ekonomického hlediska je snahou obaloven zcela logicky upřednostnit lokálně dostupné zdroje, které nemusí splňovat nejvyšší požadavky z hlediska adheze. Nicméně jsou určité limity zásob přírodního



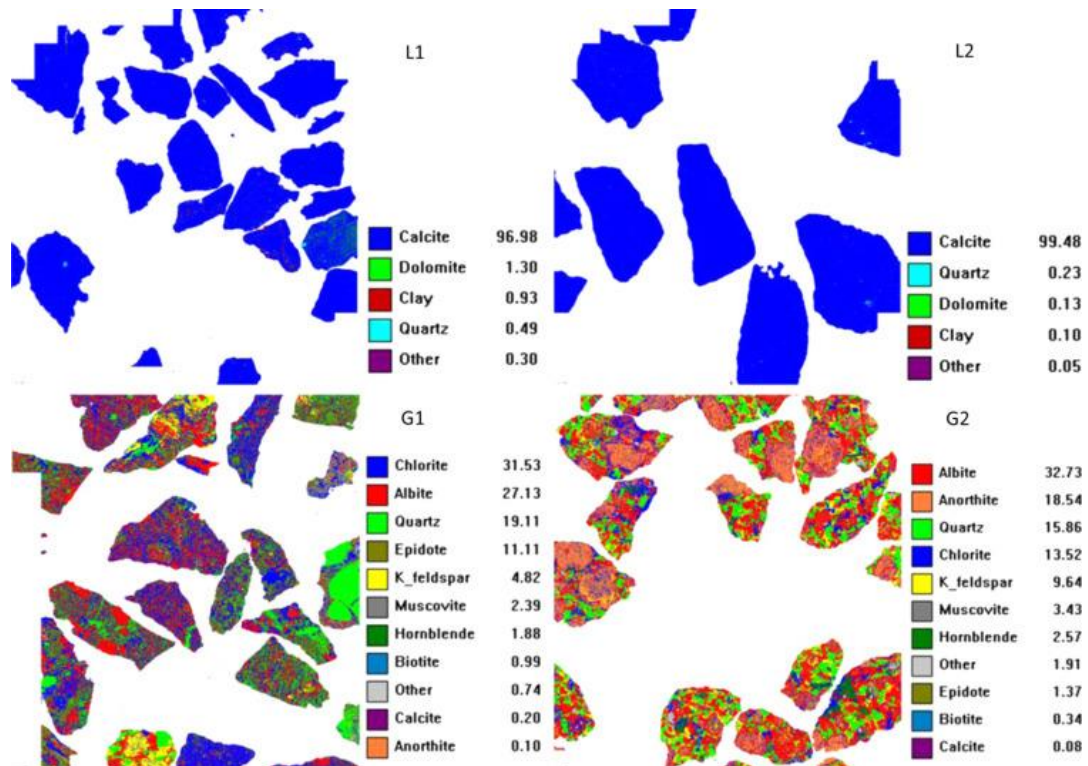


kameniva a není výjimkou i to, že při nedostatku kameniva jsou dodávány na obalovny kameniva z různých zdrojů, které se pak používají při výrobě asfaltové směsi.

Studie [116] zaměřená na porovnání tří mechanických zkoušek pro kvantifikaci poškození na rozhraní kamenivo-pojivo poukázala na rozdílné parametry použitých zdrojů kameniva. Ve studii se autoři zabývali rozdílným mineralogickým složením, které má vliv na poškození vlivem účinku vody na adhezi. Pomocí scanu MLA byla detekována mineralogická struktura čtyř typů kameniv (vápence L1 a L2, žuly G1 a G2), jak je patrné na Obr. 35. Vzorky použité pro samotný scanu byly připraveny následovně.

Experimentální postupy použité pro MLA zahrnovaly následující postupy. Kamenivo bylo nejprve promyto v demineralizované vodě a poté vysušeno při teplotě 40 °C po dobu 24 h. Vysušené kamenivo bylo připevněno pomocí pryskyřice do forem o průměru 25 mm a výšce 20 mm. Takto připravené kamenivo se následně povrchově upravilo leštěním. Nakonec byl na povrch kameniva nanesen uhlíkový povlak, který tak vytvořil elektricky vodivý povrch. Pro analýzu minerálů byl použit skenovací elektronový mikroskop FEI Quanta 600 (SEM) s možností scanu mineralogického složení MLA. Během testování SEM shromažďuje snímky zpětně rozptýlených elektronů (BSE) a data energetického disperzního rentgenového záření pro sérii snímků po celém povrchu vzorku. Měření intenzit zpětně rozptýlených elektronů umožňuje segmentaci minerálních fází v rámci každého řezu částic, zatímco energeticky disperzní rentgenová analýza (EDX) dané fáze umožňuje její identifikaci.

Vzorky žuly vykazují značnou texturu a zobrazené rozložení minerálů je o poznání složitější než v případě vápence, kde celou plochu tvoří téměř souvisle kalcit. U vzorků vápence (L1 a L2) je převažujícím minerálem kalcit ve srovnání s ostatními přítomnými minerály (96,9 %, resp. 99,5 % hm.). Žula se však skládá z řady různých minerálů. Chlorit a albit jsou dominantními minerály v G1 (31,5 % a 27,1 % hm.). Ve vzorku žuly G2 jsou převažujícími minerály naopak albit a anortit (tvoří 32,7 % a 18,5 % hm. horniny), nicméně významný podíl minerálů v této žule má i křemen a chlorit. Nejzřetelnějším rozdílem mezi G1 a G2 je obsah anortitu (koncový člen vápníku z řady živců), který v G2 tvoří téměř 19 % a v G1 pouze 0,1 %. Předpokládá se, že velký podíl albitu a křemene v hornině, má potenciál k nižší adhezi s asfaltovým pojivem. Ačkoli albit může za sucha vytvářet silnou vazbu s asfaltovým pojivem, v přítomnosti vody se tato vazba rychle naruší. Existují také studie, které poukazují na poruchy mezifázového spojení mezi asfaltem a kamenivem, v němž je patrné zastoupení živce. [117, 118]



Obr. 35. Minerální struktura hornin L1, L2 (vápence) a G1 a G2 (žuly). [116]

Dalším důležitým parametrem, který ovlivňuje poškození způsobené vlivem vody v asphaltových směsích, je míra a množství absorpce vody povrchem kameniva, tedy jak rychle a jaké množství vody dokáže daný typ kameniva absorbovat. Většina přístupů pro hodnocení míry poškození vlivem účinku vody zohledňuje pouze dobu kondicionování. Výsledky studie [116] vychází z experimentu, pro který byly použity vzorky čtyř uvedených typů kameniva, z nichž byly vybrány trámečky o rozměrech 100 × 20 × 10 mm. Tyto vzorky byly očištěny demineralizovanou vodou a vysušeny při teplotě 40 °C po dobu 24 h, aby se odstranila veškerá vlhkost. Hmotnost každého trámečku byla změřena pomocí vah s přesností 0,1 µg nejprve v suchém stavu. Poté se vzorky umístily do připravené vodní lázně o teplotě 20 °C, v níž se vzorky ponechaly kondicionovat do ustálení hmotnosti (dle studie až 21 dnů). Ze tří provedených měření byla vypočítána hodnota absorpce vlhkosti kameniva.

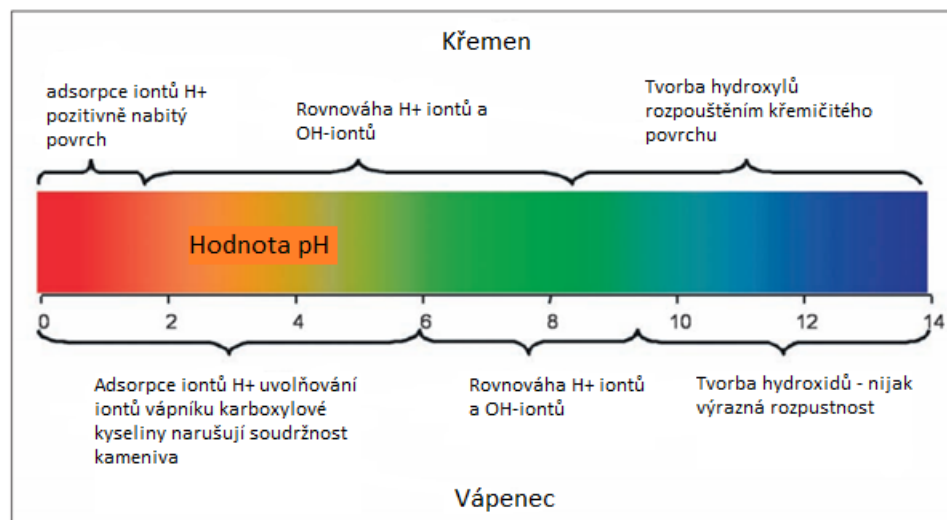
Z výsledků je patrné, že celkové množství absorbované vlhkosti se pohybovalo od přibližně 0,13 % pro kamenivo G1 do přibližně 2,25 % pro kamenivo L1. Na naměřených vzorcích byly patrné velké rozdíly z hlediska absorbované vody, k čemuž dochází právě rozdílnou mineralogií a strukturou jednotlivých typů hornin. Z regresní analýzy byly identifikovány tři minerální složky – kalcit, jíla a anortit – jež se významně podílí na absorpci vlhkosti povrchem kameniva.

Odolnost asphaltové směsi a vliv mineralogického složení kameniva byla také stanovena pomocí tří různých typů tahových zkoušek, o kterých bude v rámci disertační práce pojednáno ještě dále, a to i s ohledem, že jedna z tahových zkoušek byla ověřována a studována i v rámci experimentálních činností této práce. Jednalo se o zkušební metody Peel test, PATTI test and Pull-off test. Z výzkumu vyplynulo, že z hlediska celkové citlivosti asphaltové směsi vůči účinkům

vody hraje významnější vliv mineralogického složení, než vliv samotného asphaltového pojiva. [116]

### 3.1.6.2 Vliv vody

Na interakci asphaltového pojiva a kameniva má bezesporu významný vliv právě voda. Pokud se dostane na povrch kameniva, hornina začne reagovat, což má za následek sníženou adhezi s asphaltovým filmem. Dochází k tvorbě slabě spojených vrstev, na které může mít následně významný vliv pH vody působící na kontakt pojiva-kameniva. Při hodnotě  $\text{pH} < 6$  může dojít k rozpuštění povrchové vrstvy vápence. Naproti tomu, při  $\text{pH} > 8$  dojde k rozpuštění silikátových minerálů (Obr. 36). [85]



Obr. 36. Chemické reakce křemene a vápence v různém pH prostředí vody. [85]

Většina plochy kameniva je v důsledku přítomnosti vody nabitá (vykazuje elektrickou aktivitu). To je způsobeno díky vysokému dipólovému momentu vody. Nabitý povrch vytváří elektrické pole, které začne přitahovat ionty. Vrstva povrchového náboje spolu s odpovídajícími opačně nabitými ionty (protiionty) jsou označeny jako elektrická dvojvrstva [85].

Protiionty mohou být přímo vázány na povrchu kameniva, čímž neutralizují povrchový náboj a vytvoří tak molekulární vrstvu, označovanou jako Helmholtzovu vrstvu. Tento model však nezahrnuje existenci difúzní vrstvy, kdy vlivem teplotního výkyvu dochází k vytlačování protiiontů směrem od nabitého pevného povrchu. Na to poukazuje model podle Sterna, jež difúzní vrstvu zahrnuje, současně zkombinoval obě teorie a elektrickou dvojvrstvu rozdělil do dvou úrovní. Vnitřní vrstva je tvořena jedním či více vrstvami iontů a molekul, které jsou součástí nabitého povrchu (nepohyblivá část). Oproti tomu vnější část (difúzní) je tvořena pohyblivými ionty.

Model tedy dokazuje, že jsou i na suchém povrchu kameniva přítomny molekuly vody. To znamená, že i při běžné teplotě asphaltové směsi zůstává na povrchu kameniva alespoň jedna monomolekulární vrstva vody. Úplné odstranění vrstvy molekul vody by vyžadovalo teplotu vyšší než  $1000^\circ\text{C}$ . Proto je třeba dbát na dostatečné vysušení kameniva před samotnou výrobou

asfaltové směsi, aby se vliv přítomné vody maximálně omezil, eliminovat ho zcela není s ohledem k výše uvedenému možné. [85, 119]

### 3.1.6.3 *Vliv přilnavostních přísad*

Jak již bylo zmíněno výše, zlepšit přilnavost mezi asfaltovým pojivem a kamenivem lze třemi způsoby. Jednou z nich byla volba vhodného typu kameniva. Pokud jsou však omezené zdroje minerálního kameniva a máme k dispozici z hlediska přilnavostních charakteristik ne zcela vhodný typ kameniva, nezbyvá nám nic jiného než přejít k dalším způsobům, jak docílit zlepšení adheze mezi pojivem a kamenivem. A tím je volba přilnavostních přísad, které lze rozdělit na minerální přilnavostní přísady, jako například použití vápenného hydrátu či podobné minerální příměsi, nebo druhý typ přilnavostních přísad a těmi jsou chemická aditiva, založená na principu povrchově aktivních látek.

Co se týká chemických aditiv, na českém i slovenském trhu existují dlouhodobě známé přilnavostní přísady. Tato aditiva byla zahrnuta i v rámci této práce. Pro porovnání a posouzení bylo zahrnuto i využití méně známé skupiny přísad, které představují mechano-chemicky aktivované mikrofilery s využitím vápenců, dolomitů či recyklace druhotných surovin. Mezi zcela nové materiály pak lze zařadit nanotechnologické přilnavostní přísady.

### 3.1.6.4 *Další aspekty*

Dalším aspektem jsou vlastnosti asfaltových pojiv a jejich kvalita, která se snižuje na úkor kvality a zejména kvantity pohonných hmot a dalších destilátů z ropy. Kvůli změnám klimatu a náhlým výkyvům počasí je snaha snižovat také emise CO<sub>2</sub>, což se týká i silničních materiálů. Změny klimatu mají za následek zvýšené srážkové úhrny, i velmi proměnlivá období mrazu, tím dochází celosvětově ke zvýšení vlhkosti a vozovky jsou často vystavovány většímu množství vody a daleko více nasycovány. V neposlední řadě je třeba věnovat pozornost zvyšujícímu se dopravnímu zatížení. Rostoucí ekonomika členských států EU má za následek zvýšení silniční dopravy. Zatímco u stávající silniční sítě je kladen důraz na údržbu, obnovu a rozšiřování, pro nově přijaté členy EU a další sousední země je nutná nová výstavba silnic a dálnic. Kromě toho vývoj nových těžkých dopravních prostředků vede ke zvýšení zatížení vozovek. Proto odolnost asfaltových materiálů hraje v tomto případě dvojí roli, jednak snižování nutných oprav a zásahů, a potom také udržení dostatečné úrovně bezpečnosti silničního provozu. S tím je bezesporu spjatý veřejný rozpočet. Většina států EU i USA v současné době snižují rozpočet pro údržbu a obnovu dopravní infrastruktury. To je však přímo v rozporu s požadavky na trvale udržitelnou výstavbu silnic a dálnic.

## 3.2 **Problematika stárnutí asfaltových pojiv a asfaltových směsí**

Jak již bylo zmíněno, trvanlivost asfaltových směsí potažmo i asfaltových vozovek je dána její odolností vůči vnějším vlivům, mezi které spadá i fenomén stárnutí. Stárnutí asfaltových pojiv a asfaltových směsí je složitý proces zahrnující více odlišných dějů, jejichž hlavní rozdíl je ve zdroji způsobujícím stárnutí, jež se následně projevuje na výsledných vlastnostech asfaltového pojiva.

Pokud máme určitý stavební materiál či výrobek, který chceme použít, předpokládá se, že splňuje předepsané vlastnosti a tyto zůstávají v čase víceméně neměnné. V případě asfaltových pojiv ale tento předpoklad neplatí. Asfalty jako organické látky podléhají během technologických výrobních procesů hutněné asfaltové vrstvy celé řadě komplexních změn, které mohou vést ke změně funkčních vlastností jak asfaltového pojiva, tak zprostředkovaně i hutněné asfaltové vrstvy. Je to důsledek skutečnosti, že výrobní procesy probíhají za zvýšené teploty a současně na asfaltovou směs působí oxidační stárnutí vlivem atmosférického kyslíku. V případě asfaltových pojiv se fyzikálně-chemické změny v důsledku podmínek při skladování, výrobě, transportu, pokládce asfaltových směsí a během jejich předpokládané životnosti považují za degradační – tedy takové, které zhoršují vlastnosti trvanlivosti a provozní způsobilosti materiálů a ovlivňují tak celkovou trvanlivost asfaltové směsi. [16, 120]

Stárnutí se však dá také vyjádřit jednodušeji pomocí spojitosti s mechanickými vlastnostmi směsi jako je pevnost v příčném tahu. Tato zkouška je velmi jednoduchá a levná z hlediska výroby zkušebních těles i odběru vzorků in-situ. Touto zkouškou lze určit tahovou pevnost směsi, která koreluje s vlastnostmi týkající se vytvoření trhlin ve vozovce. Podle studie (Md Rashadul Islam et al.) [144] zaměřené na výzkum týkající se odolnosti zestárých těles pomocí ITS (pevnost v příčném tahu), vychází následující poznatky. Pevnost v příčném tahu zkušebních asfaltových těles, jejichž průměrná mezerovitost byla 5,4 %-obj., se v průběhu stárnutí zvyšuje. Po prvním dni stárnutí se pevnost zvýšila o 18 %, po 5 dnech dokonce o 28 %. Z výzkumu také vyplývá, že k nejvyššímu nárůstu pevnosti během stárnutí dochází během prvních pár dní od počátku stárnutí, zhruba tedy do 5 dnů, po té je již nárůst pevnosti minimální a další stárnutí tak již na další nárůst pevnosti nemá takový vliv. Tento prudký nárůst pevnosti vysvětlují autoři pravděpodobným ztvrdnutím asfaltového filmu. Také křehkost vzorků se v průběhu stárnutí zvyšuje (snižuje se duktilita). Při porovnání zestárých laboratorních vzorků s in-situ odebranými vývrty (Interstate 40, New Mexico) se použily vzorky z vozovky vystavené reálným klimatickým podmínkám a účinkům dopravy po 1 roce. Tyto vzorky vykazovaly zvýšení hodnoty ITS o 19 % oproti referenčním tělesům, což je srovnatelné se vzorky, které byly vystaveny laboratornímu stárnutí po dobu 1 dne. Z této studie tedy plyne, že z hlediska porovnání ITS 1 rok v terénu odpovídání 1 dni stárnutí v temperační komoře.

### 3.2.1 Základní procesy stárnutí

Asfaltové pojivo je směs organických látek vzniklá rozkladem rostlin a živočichů. A stejně jako všechny uspořádané struktury organických sloučenin a živých organismů, tak i asfaltové pojivo podléhá procesu stárnutí. Degradální procesy jsou v případě asfaltů způsobeny vlivem působení vzdušného kyslíku, ultrafialového záření, zvýšené teploty, dopravního zatížení ale i klimatických podmínek, jako je vliv vody a mrazu (vnější faktory). Tyto vlivy způsobují tvrdnutí asfaltů signalizované snižováním hodnoty penetrace, zvyšováním teploty bodu měknutí a snižováním penetračního indexu. Stárnutí je současně ovlivněno i vnitřními faktory, které můžeme ovlivnit již při samotném návrhu asfaltové směsi. Jedná se především o typ asfaltové směsi, vlastnosti vstupních materiálů (asfaltového pojiva, kameniva, přísad), obsah asfaltového pojiva, s čímž je úzce spjatá tloušťka asfaltového filmu a mezerovitost směsi. [16, 120] Podle převažujícího vlivu rozlišujeme tyto základní procesy stárnutí:

- Stárnutí odpařováním (destilační procesy)





- Oxidační stárnutí (termooxidační stárnutí)
- Strukturální stárnutí (migrační procesy)
- Fyzikální stárnutí

### 3.2.1.1 *Stárnutí odpařováním*

Toto stárnutí je způsobováno těkáním (odpařováním) lehkých olejových látek, které jsou nedílnou součástí asfaltových pojiv. Dochází k němu vlivem vysokých teplot a podmínek expozice při zpracování silničních asfaltů za horka – jedná se o nevratný proces. Odpar lehkých olejových podílů se zvyšuje s vyšší gradací asfaltového pojiva, rostoucí teplotou nebo zvětšujícím se povrchem, na kterém dochází k odpařování. Mírou těkání je ztráta hmotnosti při zahřívání pojiva v tenké vrstvě. Asfalty s vyšším podílem asfalténu a obsahem malténu s nižší penetrací mívají vyšší hmotnostní ztrátu vlivem odpařování než asfalty s nižším obsahem asfalténu. Vliv má také tloušťka filmu. Lze říct, že je vhodné, aby asfaltová pojiva obsahovala co nejmenší množství lehkých olejových frakcí, které během procesu odpařování způsobují vyšší tuhost asfaltu. Nicméně vliv odpařování má, na celkovém procesu stárnutí, nejmenší podíl z hlediska celkových změn na vlastnostech asfaltového pojiva. [140, 16]

### 3.2.1.2 *Oxidační stárnutí*

Oxidačnímu stárnutí asfaltového pojiva se přikládá mnohem podstatnější význam než v případě stárnutí odpařováním. V tomto případě se jedná o soubor chemických procesů, které jsou vyvolány vlivem tepla a vzdušného kyslíku. Tento proces nastává pomalu, avšak dlouhodobě působením vzdušného kyslíku a umocňuje se s teplotou. Čím je teplota vyšší, tím se zvyšuje oxidační účinek (nárůst o 10 °C zdvojnásobuje reakční rychlost). Oxidace může probíhat i za nižších teplot s mírně odlišnou kinetikou a rychlostí. Pokud procesy probíhají za zvýšené teploty, než jsou běžné klimatické podmínky, označujeme tuto oxidaci jako termooxidaci, protože je významně umocněna termickými vlivy. Vlivem slunečního záření dochází k urychlení absorpce kyslíku v povrchu asfaltu a k urychlení procesu stárnutí. Oxidace bez přístupu světla probíhá pomalu, oproti tomu v přítomnosti světla a UV záření se urychluje, nicméně v tomto případě působí jen do hloubky 4-5 mikronů. [16, 120]

Rozsah termooxidačního stárnutí je závislý na složení a chemické povaze asfaltu. Je známo, že různé asfalty vykazují různou náchylnost k oxidaci, což bylo prokázáno porovnáním asfaltů z různých ropných zdrojů například pomocí indexu stárnutí asfaltů, vyjádřeném poměrem viskozity před stárnutím a po stárnutí. Termooxidační stárnutí pojiva není spojeno pouze s technologickými procesy, ve kterých je asfaltová směs po určitou dobu udržována při významně zvýšené teplotě, ale pokračuje po celou dobu životnosti asfaltových vrstev vozovky. Zde již vstupují do hry i další faktory jako jsou difúzní odpor asfaltového filmu (stoupá s jeho tloušťkou), permeabilita asfaltové vrstvy pro molekuly vzdušného kyslíku (úměrné mezerovitosti položené asfaltové vrstvy a její tloušťce), vliv ultrafialového slunečního záření atd. Nejzásadnější vliv na změnu vlastností asfaltového pojiva má právě stárnutí termooxidační. [16, 120]





### 3.2.1.3 *Strukturální stárnutí*

Obdobou destilace jsou **migrační procesy**, probíhající ovšem za normálních teplot s podstatně menší rychlostí. Tyto jevy jsou typické pro situace, kdy jsou do asfaltového pojiva přimíchány malé podíly fluxačních olejů, nebo nejsou při výrobě používány dostatečně výkonné destilační kolony, což vede k následnému vytvrzování (křehnutí) asfaltů. Při migračním (strukturálním) stárnutí dochází k nárůstu velikosti koloidních částic, přičemž v asfaltové směsi vnikají oleje do kameniva. Při tomto procesu asfaltové pojivo ztrácí plasticitu, elasticitu a křehne. [16, 120]

### 3.2.1.4 *Fyzikální stárnutí*

Fyzikální stárnutí (tvrdnutí) vzniká, pokud je asfaltové pojivo vystaveno nízkým teplotám po delší časové období. Většinou jde o reverzibilní proces, který není spojen s chemickými změnami v materiálu. Jedná se spíše o zafixování konformace molekul a agregování sloučenin na bázi vodíkových vazeb. Tyto fyzikální procesy vedou ke zdánlivému zvýšení tvrdosti materiálu. V laboratoři se projevuje tím, že výsledná naměřená hodnota např. komplexní smykový modul je závislá na teplotních podmínkách, kterým byl vzorek po celou dobu životnosti vystaven. [16, 120]

## 3.2.2 *Druhy stárnutí*

Znalost procesu stárnutí má významný vliv z hlediska použití asfaltů do asfaltových vozovek. A je tedy třeba rozlišovat dva hlavní druhy stárnutí asfaltových směsí, respektive asfaltového pojiva.:

1. **Krátkodobé stárnutí** (probíhá v řádu několika hodin) – dochází k němu během výroby asfaltových směsí, následně pokračuje dopravou horké asfaltové směsi, její pokládkou a končí zhutněním vrstvy v konstrukci vozovky.
2. **Dlouhodobé stárnutí** (probíhá v řádu několika let) - začne probíhat po skončení krátkodobého procesu stárnutí, tedy po zhutnění asfaltové vrstvy ve vozovce a pokračuje po celou dobu životnosti asfaltové směsi, resp. asfaltové vozovky.

Krátkodobé stárnutí je spojováno s oxidací a odpařováním lehkých složek asfaltového pojiva. Odpařování lehkých nebo snadněji těkavých organických látek z asfaltového pojiva vlivem vysoké teploty způsobuje termické stárnutí. Termické stárnutí na obalovně je dáno teplotou skladování a obalování a dobou skladování asfaltového pojiva a následně asfaltové směsi. Obalování kameniva asfaltovým pojivem je sice krátkodobý proces, avšak asfaltové pojivo se rozprostírá na velký měrný povrch horkého kameniva v relativně malé tloušťce asfaltového filmu (5-15 mikronů), což vede k odpařování těkavějších podílů asfaltu, dostatečným množstvím dodaného kyslíku pak dochází k oxidačním procesům urychlující degradaci asfaltového pojiva, čím dochází k předčasnému tvrdnutí pojiva, které je způsobeno nárůstem podílu asfalténu a silnější interakcí asfaltových micel. Praxe ukázala, že při obalování kameniva asfaltovým pojivem do teploty 180 °C dojde ke zvýšení bodu měknutí o 3,4 °C, při teplotách nad 180 °C to může být až 6,0 °C. [16] Dalším předpokladem pak může být vliv krátkodobého stárnutí při uložení v zásobních silech, v nichž dochází o zvýšení bodu měknutí v průměru o 1,5 až 3,5 °C



v závislosti na typu asfaltového pojiva při skladování do 15 hodin. [16] Méně kvalitní pojiva s vysokým obsahem lehkých těkavých látek jsou více náchylná vůči krátkodobému stárnutí.

Přibližně polovina celkového stárnutí nastane již během krátkodobého stárnutí (tedy během výroby a pokládky asfaltové směsi), další část celkového stárnutí asfaltového pojiva nastane po 10 až 12 letech provozu vozovky. Poté je oxidační potenciál vyčerpán, asfalt dosáhl svého limitního stáří, což znamená, že asfaltová směs již více nestárne nebo jen v minimální míře. Proces stárnutí není časově lineární, ke stárnutí asfaltového pojiva dochází během prvního roku, poté se tento proces začíná zpomalovat. Proto je výzkum příčin a možností, jak omezit důsledek krátkodobého stárnutí z hlediska celkové životnosti vozovky velmi důležitý aspekt při návrhu asfaltové směsi. Z tohoto důvodu je snaha omezit účinek krátkodobého stárnutí pomocí dostupných materiálů a technologií, a zvýšit tak možnost prodloužení trvanlivosti vozovky ve snaze recyklace asfaltových vrstev z konstrukce vozovky po skončení její životnosti. Tomu lze zamezit například snížením pracovní teploty využitím nízkoteplotních asfaltových směsí. [16, 121]

Dlouhodobé stárnutí je do jisté míry ovlivněno krátkodobým stárnutím. Je třeba dbát na to, aby výroba a pokládka asfaltové směsi byla provedena co nejkvalitněji. Při splnění tohoto předpokladu bude směs méně náchylná k vlivu stárnutí během doby životnosti v konstrukci vozovky. Hlavními zdroji dlouhodobého stárnutí je působení ultrafialového záření společně s atmosférickým kyslíkem. Přičemž působení zejména UV záření se omezuje jen na horní vrstvu asfaltové vozovky, a to v řádech nanometrů až mikrometrů. Mimo atmosférického kyslíku, který proniká hlouběji do vrstvy asfaltové vozovky, působí na dlouhodobé stárnutí další reaktivní plyny obsažené v atmosféře. Jedná se zejména o oxidy dusíku a ozon. A přestože je jejich koncentrace na nižší úrovni než v případě atmosférického kyslíku, jejich oxidační potenciál je výrazně vyšší. Vlivem účinku vody mohou rozpustná oxidační činidla jako  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a také  $\text{H}_2\text{O}_2$  pronikat hlouběji do konstrukce vozovky a umocňovat tak proces dlouhodobého stárnutí.

Ukazuje se, že rychlost stárnutí se v případě dlouhodobého stárnutí postupně snižuje, zejména po 2 až 3 letech užívání konstrukce vozovky. [121, 122] Dlouhodobé stárnutí je tedy pozvolna probíhající proces, který lze jen těžko ovlivnit, protože nemůžeme vozovku chránit před oxidačními činidly přirozeně se vyskytujícími v atmosféře. Abychom mohli predikovat trvanlivost asfaltové směsi v konstrukci vozovky, prvním předpokladem pro ověření dlouhodobého stárnutí, je dodržení předepsaného procesu výroby, dopravy a podkládky jak na obalovně tak při ověření v laboratoři. Simulace dlouhodobého stárnutí v laboratorních podmínkách nám pak predikuje vývoj a chování asfaltové směsi v průběhu její životnosti za pomoci zkušebních postupů pro stanovení například odolnosti vůči vodě, pevnosti v příčném tahu či šíření trhlin. [122, 123]

### 3.2.3 Co ovlivňuje stárnutí

Citlivost asfaltového pojiva k procesu stárnutí, ovlivňující trvanlivost asfaltové směsi jako celku, závisí zejména na chemickém složení, tedy na zdroji asfaltu. Každá rafinerie se nachází pod tlakem ekonomických ukazatelů, a proto mnohé zavedly technologie, které umožňují ještě hlubší přepracování destilačních zbytků po frakční destilaci ropy. Mimo to se mezinárodní námořní organizace (IMO) v roce 2016 rozhodla zachovat rok 2020 jako datum vstupu v platnost celosvětového stropu pro obsah síry ve výši 0,5 %, který se tak sníží z 3,5 %. [124] Proto bude



konverze zbytkových frakcí rovněž důležitým ekonomickým aspektem každé rafinérie. Strategie v této oblasti je zaměřena na snížení podílu těžkých a zbytkových produktů a jejich komplexní zpracování. Přičemž je kladen důraz na další růst výroby lehkých a středních frakcí (jako např. motorová nafta a střední topný olej) a alternativních možností zpracování zbytkových frakcí. [125]

Impulzem pro zavedení těchto technologií je tedy ekonomický pohled rafinerií na výtěžnost frakční destilace ropy. Základem těchto postupů je především „visbreak“ technologie (visbreaking), jejíž podstatou je termické štěpení velkých molekul těžkých destilačních zbytků během rychlého ohřevu v trubkových pecích s následným přeorganizováním uhlíkových štěpů. Právě výstupní materiál visbreakingových reziduí se často přimíchává k asfaltovým produktům, protože svojí chemickou podstatou odpovídají velmi tvrdým asfaltům. Příměs visbreakingových reziduí k asfaltové matici může vést ke snížení koloidní stability, zvýšení termické lability a snížení odolnosti proti stárnutí, změně teplotní citlivosti pojiva, změně povrchového napětí a vnitřní koheze, snížení viskozity směsného pojiva, zvýšení adheze a odolnosti proti působení vody v asfaltových směsích a ke změně teploty skelného přechodu. Všechny tyto změny chování základního asfaltového pojiva závisí na množství podílu přidaného visbreakingového rezidua. [120, 124, 125]

Dalším aspektem ovlivňujícím stárnutí asfaltové směsi je použitý typ kameniva, který samotný proces stárnutí zmírňuje. Stárnutí asfaltových směsí s různými typy kameniva (vliv petrografického složení horniny) probíhá zcela odlišně. Tento aspekt úzce souvisí s chemickou vazbou mezi kamenivem a asfaltovým pojivem, tedy přilnavostí, viz kapitola 3.1. Mineralogické složení horniny kameniva a současně struktura povrchu vytváří s asfaltovým pojivem unikátní vazbu, čímž výrazně ovlivňuje citlivost směsi vůči procesu stárnutí, umocněným vlivem klimatických jevů a účinků dopravního zatížení. Z tohoto důvodu je nespočet studií zaměřen na simulaci dlouhodobého stárnutí u asfaltové směsi, jež se blíží více reálným podmínkám, které v konstrukci vozovky mohou nastávat. Důležitým faktorem u použitého kameniva je jeho povrchový náboj, který závisí na chemickém složení daného typu horniny a krystalické mřížce. Dá se říci, že vliv stárnutí bude patrnější v případě kyselého typu hornin se záporným nábojem jako například žula (horniny s vyšším obsahem oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2$ ) než v případě zásaditého typu horniny s kladným nábojem jako například vápenec. [126]

K dalším faktorům ovlivňující proces stárnutí je složení asfaltové směsi – křivka zrnitosti, výsledná mezerovitost směsi, obsah jemných částic fileru a obsah asfaltového pojiva. Důležitým faktorem, který ovlivňuje míru stárnutí, je mezerovitost asfaltové směsi. S rostoucím obsahem vzduchovým mezer vzrůstá citlivost asfaltové směs vůči působení dlouhodobého stárnutí, očekává se tedy vyšší míra poškození vlivem účinku stárnutí, které může pronikat hlouběji do asfaltové směsi. K degradaci asfaltového pojiva dochází u hodně mezerovitých směsí přes celou tloušťku vrstvy, protože atmosférický kyslík v kombinaci s účinkem vody může pronikat hlouběji do konstrukce vozovky. [5] Dle poznatků výzkumu podrobněji uvedeného v [9] se ukazuje, že jemnozrnější asfaltové směsi vykazují vyšší míru oxidace bez ohledu na použitou gradaci asfaltového pojiva a dochází tak ke zvýšení citlivosti asfaltové směsi vůči tvrdnutí. Současně se ukazuje, že vyšší obsah rozpustná asfaltového pojiva vede k vyšší míře oxidace asfaltové směsi. [127] To úzce souvisí i s teplotou asfaltového pojiva, resp. asfaltové směsi – se zvyšující se



teplotou vzrůstá reaktivita pojiva, což vede ke zvýšení míry oxidace. V důsledku změn způsobných stárnutím dochází k tvrdnutí a zkřehnutí pojiva, což napomáhá k tvorbě trhlin, zvláště při opakujícím se zatížení a střídání chladu a tepla. Snaha proto je vytvořit takové pojivo (směs), které bude odolné vůči stárnutí, čímž se zvýší trvanlivost vozovky a zlepší se i její recyklovatelnost, na kterou má stárnutí výrazný vliv. [145]

### 3.2.4 Metody laboratorního stárnutí dle platných předpisů

#### 3.2.4.1 Stárnutí asfaltového pojiva

Aby bylo možné predikovat termooxidační chování asfaltových pojiv v praxi, byly zavedeny metody zrychlených laboratorních postupů, které dokážou principem časově-teplotní závislosti simulovat stárnutí asfaltových pojiv. Snahou těchto laboratorních zkušebních postupů je přiblížit se, co nejlépe reálným degradačním procesům, jež vznikají během krátkodobého a dlouhodobého stárnutí v reálné konstrukci vozovky. [120]

Metody laboratorního stárnutí asfaltových pojiv lze rozdělit na simulace krátkodobého a dlouhodobého stárnutí. Přičemž krátkodobé stárnutí simuluje degradaci asfaltového pojiva během výroby asfaltové směsi, tedy obalování kameniva asfaltovým pojivem, přepravy a při pokládce asfaltové směsi. Oproti tomu simulace dlouhodobého stárnutí modeluje chování asfaltového pojiva v konstrukci vozovky, tedy ve ztuhlenné asfaltové vrstvě. Pro laboratorní modelování krátkodobého stárnutí asfaltových pojiv se nejčastěji využívají metody popisující zkoušku tepelné stálosti v tenké pohyblivé vrstvě RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) dle ČSN EN 12607-1, zkoušku tepelné stálosti tenkého asfaltového filmu TFOT (Thin Film Oven Test) dle ČSN EN 12607-2 a zkoušku krátkodobého stárnutí metodou RFT (Rotating Flask Test) dle ČSN EN 12607-3. [128, 129, 130]

Pro modelování dlouhodobého stárnutí se využívá zkouška urychleného dlouhodobého stárnutí v tlakové nádobě PAV (Pressure Ageing Vessel) dle ČSN EN 14769, která simuluje stárnutí asfaltového pojiva po zhruba 7 až 10 letech nebo urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce RCAT (Rotating Cylinder Ageing Test) dle ČSN EN 15323, popřípadě modifikované metody 3xRTFOT nebo 3xTFOT, při které je doba expozice stárnutí asfaltového pojiva prodloužena na trojnásobek. Souhrn metod laboratorního stárnutí dle platných předpisů souhrnně uvádí Tab. 11. [120, 131, 132]

Tab. 11. Přehled metod laboratorního stárnutí. [120]

Metody urychleného stárnutí	Název Metody (angl.)	Označení normy	Pracovní teplota.	Velikost vzorku	Čas expozice	Podmínky expozice	Rozměr geometrie	Nucená cirkulace	Přívod Vzduchu/ kyslíku
	-	-	[°C]	[g]	[min]	-	[mm]	-	[ml/min]
<b>RTFOT</b>	<b>Rotation Thin Film Oven Test</b>	EN 12607- 1	163	35,0 ± 0,5	75 ± 1	rotující film	140 x Ø 64	<b>Ano</b> (přerušovaná)	<b>Atm. vzduch</b> 4,5
<b>TFOT</b>	<b>Thin Film Oven Test</b>	EN 12607- 2	120 (163)	50 ± 0,5	300 (+ 15)	statický film	9,5 x Ø 140	<b>NE</b>	-
<b>RFT</b>	<b>Rotating Flask Test</b>	EN 12607- 3	165	100 ± 1	150 ± 1	rotující film	1000 ml std. 29/32	<b>ANO</b> permanentní	<b>Atm. vzduch</b> 500
<b>RCAT</b>	<b>Rotating Cylinder Aging Test</b>	EN 15323	163	525 ± 25	235 ± 5	rotující film	300 x Ø 125	<b>ANO</b> permanentní	<b>Kyslík</b> 4,0
<b>PAV</b>	<b>Pressure Aging Vessel</b>	EN 14769	100 (90/110)	50 ± 0,5	1200	statický film	9,5 x Ø 140	<b>Ne/Ano</b> (nucený přetlak)	<b>Atm. vzduch</b> 2,1 MPa

### 3.2.4.2 Metody simulující krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva

#### a) Tepelná stálost v tenké pohybující se vrstvě (RTFOT)

Zkouška tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě popisuje jednu z metod simulovaného krátkodobého stárnutí asfaltového pojiva a je popsána v normě ČSN EN 12607-1. Princip zkoušky vychází z předpokladu, že stárnutí asfaltového pojiva je ovlivněno vzdušným kyslíkem pouze do malých tloušťek (přibližně 50 mikrometrů). Z tohoto důvodu se při zkoušce uplatňuje tenká pohybující se vrstva pojiva, na které se simuluje termooxidační stárnutí. Zkouška laboratorního stárnutí probíhá na 8 připravených vzorcích asfaltového pojiva o hmotnosti  $35,0 \pm 0,5$  g, které je odlito do předem připravených válcových skleněných nádobek, jsou temperovány v sušárně po dobu jedné hodiny při teplotě  $163 \pm 1$  °C a následně jsou umístěny do držáku, který se během testu otáčí s frekvencí  $15 \pm 0,5$  min<sup>-1</sup>. Při zkoušce je po dobu  $75 \pm 1$  minut tenká vrstva asfaltového pojiva vystavena foukání ohřátého vzduchu z trysky o průtoku  $4,0 \pm 0,2$  l/min. [120, 128, 132]

Kombinovaný účinek tepla a vzduchu se stanoví změnou hmotnosti pojiva v nádobkách nebo změnou vlastností asfaltového pojiva, které jsou stanoveny před a po procesu stárnutí. [120] Pro popis změn vlastností asfaltových pojiv se používají nejčastěji tyto zkušební metody: stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426, stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427 nebo dynamické viskozity dle ČSN EN 13302. Změny vlastností asfaltového pojiva po stárnutí je rovněž možné popsat pomocí reologických vlastností v dynamickém smykovém reometru (DSR) dle ČSN EN 14770. [120, 133, 134, 125, 136]

#### b) Tepelná stálost tenkého filmu (TFOT)

Další metodou simulace krátkodobého stárnutí je zkouška tepelné stálosti tenkého filmu, která se provádí podle normy ČSN EN 12607-2. Asfaltové pojivo se nalije na ploché misky (stejně jako v případě zkoušky PAV) tak, aby vytvořilo vrstvu o tloušťce 3,2 mm a následně se



vloží do sušárny s nucenou cirkulací vzduchu na poličky, které se otáčejí rychlostí 5,5 otáček/min. Běžně se zkouška provádí po dobu pěti hodin při teplotě 120 °C popř. 163 °C. Zestárnutí pojiva se stanoví pomocí změny hmotnosti pojiva nebo změny jeho vlastností vzniklou v průběhu stárnutí. Metoda umožňuje nastavení odlišných teplot pro různé typy asfaltových pojiv. [120, 129]

#### **c) Krátkodobé stárnutí metodou rotující baňky (RFT)**

Metoda stárnutí pojiva v rotující baňce je popsána v normě ČSN EN 12607-3, jedná se o další z metod simulující krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva. Při zkoušce se asfaltové pojivo ponechá vlivu stárnutí v baňce rotačního vakuového destilačního zařízení při teplotě nejčastěji 165 °C po dobu 150 minut. Vliv tepla a vzduchu se určí změnou hmotnosti nebo změnou charakteristik pojiva, jako je bod měknutí (KK) a penetrace při 25 °C. [120, 130] Metoda RFT patří do skupiny metod s nuceným obnovováním povrchu obdobně jako běžněji používaná metoda RTFOT. [138]

### **3.2.4.3 Metody simulující dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva**

#### **d) Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)**

Zkouška urychleného dlouhodobého stárnutí podle ČSN EN 14769 simuluje dlouhodobé stárnutí, kterému je asfaltové pojivo vystaveno v průběhu své životnosti. Asfaltové pojivo použité pro tuto zkoušku je nejprve zestárnuje simulací krátkodobého stárnutí například metodou RTFOT. Takto zestárlý vzorek (asfaltového pojivo v tenké vrstvě tloušťky přibližně 3,2 mm) v mističce se umístí do tlakové nádoby předeřáté na zkušební teplotu (běžně 85 °C, 90 °C, 100 °C nebo 110 °C s ohledem na klimatickým podmínkám v dané oblasti) za zvýšeného tlaku vzduchu 2,1 MPa. Běžně používaná doba stárnutí je 20 hodin nebo 65 hodin. Vliv urychleného dlouhodobého stárnutí se určí změnou vlastností asfaltového pojiva, které jsou stanoveny před a po procesu stárnutí. Přetlak v tlakové nádobě zajišťuje zvětšení tlakového spádu, a tedy vynucenou migraci molekul kyslíku hluboko do zkoumaného materiálu. V tomto případě nedochází k degradaci pouze asfaltového filmu na povrchu tenkého asfaltového filmu. Při užití metody PAV nedochází k tak zásadnímu úniku těžkých látek z asfaltového pojiva během procesu stárnutí, k čemuž ve vyšší míře dochází při užití simulací stárnutí tenké vrstvy asfaltového pojiva v peci. [120, 131, 138]

#### **e) Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT)**

Z dalších metod dlouhodobého stárnutí asfaltového pojiva je urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT), která je popsána v normě ČSN EN 15323. Do horizontálně umístěného ocelového rotujícího válce s pojivem v laboratorní sušárně s teplotou 85 °C se vhání kyslík po dobu 140 hodin. Stárnutí pojiva se hodnotí změnou vlastností (např. penetrace nebo bod měknutí) před a po procesu stárnutí. Po úpravě zkušebních podmínek lze metodu použít rovněž pro simulování krátkodobého stárnutí asfaltového pojiva. [120, 132]



### f) *Metoda laboratorního stárnutí asfaltového pojiva metodou TFOT s trojnásobnou dobou trvání (3xTFOT)*

Stárnutí asfaltového pojiva metodou TFOT s trojnásobnou dobou trvání (3xTFOT) vychází z postupu popsaného v normě ČSN EN 12607-2 (Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 2: Metoda TFOT). V rámci ověření stability různých typů adhezivních přísad, dávkovaných do asfaltového pojiva, byla v experimentální části této disertační práce použita metodika pro laboratorní simulaci termooxidační stability asfaltových pojiv využívající modifikovaný postup stárnutí asfaltového pojiva TFOT, ve kterém je prodloužena celková doba simulovaného stárnutí na trojnásobek. Takto zestárlé asfaltové pojivo včetně variant s adhezivními přísadami bylo posouzeno provedením zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 736161 a porovnáno s výsledky zkoušky s nezestárlým asfaltovým pojivem. [129]

#### **3.2.5 Stárnutí asfaltové směsi**

V posledních desetiletích bylo vyvinuto více jak 30 různých metod stárnutí buď volně ložené asfaltové směsi, nebo zhutněných asfaltových zkušebních těles. Při tom se materiál zpravidla skládá z předepsaný počet hodin, dní nebo týdnů při zvýšené teplotě (30 °C až 100 °C), čímž má dojít k urychlení oxidačních procesů, které způsobuje atmosférický kyslík. V některých případech se jako oxidační činidlo používá čistý kyslík nebo ozón, v jiných případech se aplikuje dodatečně vnesený přetlak, aby došlo ke zvýšení rychlosti reakce. Metody stárnutí umožňují vyvolat během několika dní stav dlouhodobého stárnutí a nasimulovat tak stav blížící se účinku na vrstvu asfaltové směsi v konstrukci vozovky po několika letech. [139]

Hlavními faktory pro určení vlastností asfaltové směsi vzhledem ke stárnutí je čas a teplota, které můžeme nasimulovat pomocí principu časově-teplotní závislosti. Tento princip lze vhodně využít v laboratorních podmínkách, kdy proces stárnutí při nižších teplotách po dlouhé časové období odpovídá stárnutí při vyšší teplotě po kratší časový úsek. Platí tentýž princip jako při stárnutí asfaltového pojiva, nicméně v případě asfaltové směsi vstupují do stárnutí i další parametry asfaltové směsi. Laboratorní simulace krátkodobého i dlouhodobého stárnutí popisuje americká norma AASHTO R 30-02. Volně ložená směs je ponechána v sušárně nastavené na teplotu 154 °C po dobu 2 hodin, nebo na 135 °C po dobu 4 hodin pro simulaci krátkodobého stárnutí. Dlouhodobá simulace spočívá v ponechání zhutněných těles asfaltové směsi v sušárně po dobu 5 dnů při teplotě 85 °C.

V připravované normě prEN 12697-52 jsou popsány metody stárnutí na volně ložené směsi a na zhutněné směsi v podobě válcových zkušebních těles (Marshallova tělesa). [139]

##### **3.2.5.1 Stárnutí volně ložené směsi**

V evropských zemích se v současné době pracuje na normě prEN 12697-52, kde se postup pro krátkodobé stárnutí neliší od americké normy (volně ložená směs uložená při teplotě 135 °C po dobu 4 hodin). Pro dlouhodobé stárnutí se volně ložená směs temperuje na 60 °C po dobu 14 dní, nebo při 85 °C po dobu 9 dní. Pro urychlení stárnutí může být volně ložená směs umístěna do tlakové nádoby PAV (Pressure Aging Vessel) po dobu 20 hodin při teplotě 90 °C.

Volně ložená směs se umístí do vhodné plechové nádoby, tak aby tloušťka vrstvy byla přibližně  $25 \pm 5$  mm. Takto připravenou asfaltovou směs vložíme do vyhřívací komory s nucenou ventilací vzduchu, kde je vystavena účinku stárnutí. Stárnutí volně ložené směsi probíhá při zvýšené teplotě pro urychlení procesu stárnutí. Metody stárnutí pro volně loženou směs jsou rozděleny na krátkodobé a dlouhodobé metody stárnutí volně ložené směsi a jsou uvedeny v Tab. 12. [139]

Tab. 12. Tab. Metody stárnutí volně ložené směsi dle prEN 12697-52.

Typ stárnutí volně ložené směsi	Norma/zkušební podmínky stárnutí
Krátkodobé stárnutí	AASTHO R30/02 při teplotě 135 °C po dobu 4 hodin
Dlouhodobé stárnutí	BRRC při teplotě 60 °C po dobu 336 hodin
	RILEM při teplotě 85 °C po dobu 216 hodin
	BSA při teplotě 80 °C po dobu 96 hodin (s perforovanou deskou)

### 3.2.5.2 Stárnutí zhutněné asfaltové směsi

Proces stárnutí je aplikován na zhutněnou asfaltovou směs. Zhutněná asfaltová tělesa (nejčastěji válcová zkušební tělesa) se umístí na rovný povrch, a to buď do ohřívací komory, kde jsou tělesa vystavena teplotě 85 °C po dobu 5 dnů dle SHRP/AASHTO, nebo se tělesa umístí do triaxiální komory za nuceného proudění plynného média, kterým může být například ozon obohacený o stlačený vzduch.

### 3.2.5.3 Zkušební metodika použitá v rámci této práce

V této práci tak byly pro porovnání účinnosti vybraných přínavostních přísad použity tři typy dlouhodobého laboratorního stárnutí, vycházející z výše uvedených norem, které zahrnují následující podmínky:

- uložení volně ložené asfaltové směsi při teplotě 85 °C po dobu 9 dní;
- stárnutí zkušebních těles při teplotě 85 °C po dobu 5 dní;
- stárnutí zkušebních těles při teplotě 85 °C a tlaku 2,1 MPa v přístroji PAV po dobu 20 hodin.

Poslední zvolená metoda pro simulování dlouhodobého stárnutí asfaltových směsí vychází z platné české normy ČSN EN 14769 využívající metodiku pro dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva v přístroji PAV. Oproti výše uvedeným metodám využívá tlaku, kterým jsou zkušební tělesa po celou dobu simulace stárnutí vystavena. Zkušební tělesa jsou nejprve obale ocelovou sítkou a přesně upevněna montážními pásky podle Obr. 37 (úprava navržená v rámci zpracování této práce na ČVUT v Praze). Tímto způsobem zůstane tvar zkušebního tělesa i při působení vyššího tlaku a teploty nezměněný a nedojde k deformaci, která by mohla negativně ovlivnit výslednou pevnost, jak již bylo z předchozích měření zjištěno. Ocelová síťka lépe simuluje reálné podmínky během procesu stárnutí, kdy přístup vzduchu v komoře proniká nejen z horní části, ale současně i ze stran zkušebního tělesa, čímž dochází k rovnoměrnějšímu stárnutí asfaltové směsi. To dokládají výsledky změřené na zkušebních tělesech, která byla pro zpevnění obalena potahem z PVC, viz Obr. 37 (vlevo).

Takto připravená zkušební tělesa jsou následně umístěna na ocelové misky, které za běžných podmínek u klasické zkoušky slouží pro uložení asfaltového pojiva a jsou postupně vkládána do nástavce, viz Obr. 38. Dále je nástavec vložen do komory přístroje, ve kterém se zkušební tělesa temperují na požadovanou teplotu 85 °C. Po dosažení teploty se postupně zvyšuje tlak na 2,1 MPa, který je poté udržován po dobu 20 hodin.



Obr. 37. Příprava zkušebního tělesa umístěním do ochranného límce z PVC (vlevo) a ocelové sítky (vpravo).



Obr. 38. Umístění zkušebních těles do nástavce přístroje PAV.

## 4 Zavedené zkušební postupy a metody

Mechanismus způsobující adhezní a kohezní poškození vznikající v konstrukci vozovky se dá do značné míry reflektovat také v laboratorních podmínkách, ale ne ve stejné intenzitě jako tomu je v reálném prostředí. Tyto testy, ač se zdají být jednoduché a rychlé, jsou velmi subjektivní ke specifickým okrajovým podmínkám zkoušení a nedávají nám žádné bližší pochopení způsobu poškození asfaltové směsi v průběhu času, opomíjejí jeden důležitý faktor, efekt stárnutí. Asfaltová směs je kompozitní materiál, který se skládá z různých druhů kameniva a pojiva, může být hutněn různými způsoby za různých intenzit, což ve výsledku vede k vytvoření v podstatě kompozitu specifických vlastností. Při návrhu samotné asfaltové směsi tak vzniká daleko složitější úloha, kdy je zapotřebí brát v potaz všechny vstupní parametry, jež ovlivňují budoucí charakter směsi aplikované v konstrukci vozovky, ale také zcela jistě udávají trvanlivost samotné směsi. Proto se v poslední době daleko více pozornosti upírá na testy měřící povrchové energie, které objektivně posuzují základní vlastnosti kameniva a pojiva a jejich odolnosti vůči vodě. Ze známých studií je patrné, že vlastní zkouška přilnavosti nám poskytuje rychlé informace o kvalitě obalení zrn kameniva asfaltem, její nevýhodou je značná závislost na subjektivním vjemu hodnotitele a skutečnost, že velmi těžko zvolený postup lze vztáhnout ke konkrétně zvoleným reálným vlivům v konstrukci vozovky. Aspekt subjektivního hodnocení lze jistě eliminovat exaktnějšími a náročnějšími metodami (např. stanovení volné povrchové energie (SFE – „surface free energy“) pomocí metody stanovení úhlu smáčení, které objektivně posuzuje odolnost vůči vodě). Použitím vhodných laboratorních postupů je snaha přiblížit se, co nejvíce reálnému prostředí, tedy zahrnout jednak stárnutí směsi v průběhu životnosti konstrukce vozovky, ale i možné další aspekty, jimiž jsou nejen kombinace vodního prostředí při vyšší teplotě po určitou dobu, ale také zahrnutí použití zmrazovacích cyklů. Problematika vlivu stárnutí asfaltové směsi a posuzování odolnosti proti účinkům vody (příp. vody a mrazu) je obdobně komplikovaná. [140, 141, 142, 143]

Metody pro ověření účinku přilnavostních přísad (obecně metody pro zjištění vodní citlivosti a přilnavosti) můžeme rozdělit podle hodnocení na kvalitativní a kvantitativní a dále podle toho, zda se testují vyrobená zhutněná zkušební tělesa, nebo se negativní účinek vody hodnotí u volně ložené asfaltové směsi. Přehled zkušebních metod včetně krátkého popisu zkoušky je uveden v Tab. 13 pro nezhutněné směsi a Tab. 14 pro zhutněné zkušební vzorky. [57]





Tab. 13. Zkušební metody na nezhutněných směsích.

Metody	Zkušební metoda	Norma	Zkrácený popis
<b>Metody pro ověřování přilnavosti – kvalitativní</b>	Stanovení adheze mezi pojivem a kamenivem (Dynamic immersion)	ČSN 73 6161	Vizuálně hodnotí stupeň obalení nezhutněných zrn kameniva asfaltem po temperování ve vodě.
	Statická metoda (Static immersion)	AASHTO T 182 ČSN EN 12697-11	Vizuálně hodnotí stupeň obalení nezhutněných zrn kameniva asfaltem po vystavení účinkům teplé vody za rozdílných podmínek oproti ČSN 73 6161.
	Metoda ztráty přilnavosti ve vroucí vodě (Boiling water test)	ASTM D 3625 ČSN EN 12697-11	Vizuálně hodnotí stupeň obalení volně ložených zrn kameniva obalených asfaltem po ponoření do vroucí vody.
	Metoda rotující lahve (Rolling bottle method)	ČSN EN 12697-11	Vizuálně hodnotí stupeň obalení nezhutněných zrn kameniva asfaltem po účincích mechanického namáhání za přítomnosti vody.
<b>Metody pro ověřování přilnavosti – nepřímé kvantitativní</b>	Povrchové vstřebání (Net Adsorption Test)		Určení afinity a kompatibility mezi pojivem a kamenivem.
	Chemická metoda (Chemical immersion)		Určení adheze mezi pojivem a kamenivem pomocí postupného považení obaleného kameniva při různých koncentracích roztoku uhličitanu sodného ve vodě.
	Povrchové reakce (Surface reaction)		Určení obnažení na principu chemické reakce vápenatých nebo křemičitých minerálních látek s vhodným reakčním činidlem za vzniku plynu.
	Systém přítlačné síly (Tack Test System (TTS))	ASTM D6195	Měření síly potřebné ke způsobení ztráty přilnavosti v asfaltovém pojivu.
<b>Metody stanovení volné povrchové energie</b>	Stanovení kontaktního úhlu (Contact angle Sessile Drop Test)		Měření povrchové energie kontaktním úhlem u kapky pojiva na rovném povrchu kameniva.
	Metoda odlupování (Peel test)	ASTM D6862-11	Měření přilnavostní lomové energie mezi asfaltovým pojivem a kamenivem po účinku vody.
	Infračervená spektroskopie (FTIR)		Identifikace a charakterizace organických sloučenin i anorganických látek, měřením pohlcení infračerveného světla při průchodu vzorkem.
	Pneumatická přilnavostní tahová metoda (Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument – PATTI, Pull-off Test)	ASTM D4541	Měření energie potřebné ke způsobení ztráty přilnavosti pomocí systému stlačeného vzduchu.
	Dynamicko mechanický analyzátor (Dynamic mechanical analyzer)		Měří mechanické vlastnosti materiálů pomocí funkcí času, teploty a frekvence.
	Analytická metoda plynové chromatografie (Inverse Gas Chromatography)		Pomocí fyzikální charakterizační techniky analyzuje povrch pevných látek.
	Wilhelmyho metoda vyvažování destičky (Wilhemy plate)		Pomocí slabé destičky se měří rovnováha meziplošného napětí mezi vzduchem a pojivem.
	Univerzální sorpční zařízení (Universal Sorption Device - USD)		Měří volnou povrchovou energii kameniva.
	Ultrazvuk (Ultrasonic)		Vizuální stanovení poměru obnaženého povrchu kameniva.
	Spektroskopie nukleární magnetické resonance (Nuclear Magnetic Resonance (NMR))		Fyzikálně-chemická metoda využívající interakce atomových jader s magnetickým polem ke zjištění složení a struktury molekul.
	Elipsometrie (Ellipsometry)		Měří změnu v polarizaci odraženého nebo převedeného světla ze struktury materiálu.
Mikro kalorimetr (Micro calorimeter)		Měří přilnavostní energii složek kameniva a asfaltového pojiva.	

Tab. 14. Zkušební postupy na zhutněných zkušebních vzorcích.

Metody	Zkušební metoda	Zkrácený popis
<b>Destruktivní mechanické testy</b>	Hveem stability	Měření poměru mezi Hveemovou stabilitou po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti.
	Immersion compression	Měření poměru pevností v tlaku po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti.
	Marshall immersion	Měření poměru mezi Marshallovou pevností po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti.
	Freeze-thaw pedestal	Počet zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů potřebných k vytvoření trhliny na vzorku po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti.
	Lottman/Tensile Strength Ratio (TSR)	Měření poměru mezi pevností v tahu po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti se zmrazovacími cykly.
	Root-Tunicliff	Měření poměru mezi pevností v tahu po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti bez zmrazovacích cyklů.
	Double punch	Měření poměru mezi pevností ve stříhu v protlačení po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti.
	Dissipated Creep Strain Energy (DSCE)	Metoda založená na stanovení parametrů lomové mechaniky.
	Např. Wheel tracking Test	Počet cyklů odpovídající průsečíku vrcholů druhá a třetí části křivky dotvarování při zatěžování zkušebního tělesa opakovaným namáháním.
	Direct Tensile Test	Měření poměru mezi pevností v tahu po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti.
	Beam fatigue	Únavová životnost před a po vystavení vlhkosti.
	Cantabro Test	Měření poměru mezi otlukovou pevností po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti.
<b>Nedestruktivní mechanické testy</b>	Environmental Conditioning System (ECS)	Měření propustnosti hutněné asfaltové směsi a změn jejího modulu pružnosti během vystavení zkušebního tělesa teplotním a zatěžovacím cyklům.
	Resilient Modulus	Měření poměru mezi modulem pružnosti po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti.
	Dynamic modulus	Měření dynamického smykového modulu asfaltové směsi.
	SATS	Měření poměru mezi modulem pružnosti po a před vystavením zkušebního tělesa vlhkosti.
<b>Nedestruktivní nemechanické testy</b>	Permeability, CT Scan, Diffusion, Capillary rise	Nepřímé měření vlhkostní citlivosti asfaltové směsi založené na propojení vzdušných mezer.

## 4.1 Zkušební metody na nezhutněných směsích

### 4.1.1 Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu dle ČSN 73 6161

Na provedení zkoušky stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle normy ČSN 73 6161 bylo potřeba předeřhát kamenivo frakce 8/16 mm nebo 8/11 mm o hmotnosti  $300 \pm 3$  g při teplotě  $160 \pm 5$  °C a asfaltové pojivo v požadovaném množství  $12 \pm 0,3$  g a o předepsané teplotě, kterou stanovuje norma dle penetrace asfaltového pojiva (viz Tab. 15). Po důkladném promíchání zrn kameniva a asfaltového pojiva byla takto připravená obalená směs přesunuta do skleněné misky a rovnoměrně rozprostřena. Následně byla ponechána nezakrytá při laboratorní teplotě po dobu 24 hodin. Po uplynutí této doby byl vzorek zalit vodou o teplotě  $60 \pm 3$  °C, která je poté dále udržována po dobu 60 minut. Připravené zkušební vzorky obaleného kameniva byly ihned po uplynutí doby, vystavení negativním účinkům obnažovací vody při teplotě  $60 \pm 3$  °C, vyjmuty z vodní lázně a mohlo se přistoupit k vizuálnímu vyhodnocení přilnavosti jednotlivých vzorků dle normy ČSN 73 6161, která přilnavost asfaltu hodnotí čtyřmi stupni (výborná, dobrá, vyhovující, nevhovující). [33]





Tab. 15. Pracovní teploty. [33]

Druh asfaltového pojiva	Hmotnost asfaltového pojiva v g	Teplota ve ° ***)		
		asfaltové pojivo	kamenivo	obnažovací voda
Asfalt penetrace 151 až 210	12 ± 0,3	140 ± 5	130 ± 5	60 ± 3
Asfalt penetrace 101 až 150	12 ± 0,3	150 ± 5	140 ± 5	60 ± 3
Asfalt penetrace 71 až 100	12 ± 0,3	160 ± 5	150 ± 5	60 ± 3
Asfalt penetrace 51 až 70	12 ± 0,3	170 ± 5	160 ± 5	60 ± 3
Asfalt penetrace 31 až 50	12 ± 0,3	180 ± 5	170 ± 5	60 ± 3
Asfalt penetrace 15 až 30	12 ± 0,3	190 ± 5	180 ± 5	60 ± 3
Ředěný asfalt s dobou výtoku C/5/60 do 170 s	12 ± 0,3	110 ± 5	110 ± 5	40 ± 2
Ředěný asfalt s dobou výtoku C/5/25 do 10 s	12 ± 0,3	50 ± 3	50 ± 3	40 ±
Anioaktivní asfaltová emulze	Pozn. *)	Pozn. **)	Pozn. **)	60 ± 3
Kationaktivní asfaltová emulze	Pozn. *)	Pozn. **)	Pozn. **)	60 ± 3


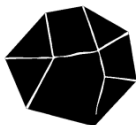




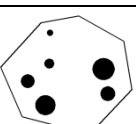
\*) Navažuje se podle obsahu asfaltového pojiva v emulzi tak, aby zbytkového asfaltu byla 18 g  
 \*\*) Temperace se provádí stáním na vzduchu, na stinném místě, při laboratorní teplotě. Asfaltové emulze s obsahem pojiva nad 65% hmotnosti je možno kvůli lepší zpracovatelnosti zahřát na 40 °C.  
 \*\*\*) U modifikovaných pojiv uvádí pracovní teploty asfaltu i kameniva jejich výrobce.

#### 4.1.1.1 Hodnocení zkoušky přilnavosti

Připravené zkušební vzorky obaleného kameniva vyjmuté z vodní lázně se ihned hodnotí vizuálnímu posouzením stupně obalení zrn kameniva asfaltovým pojivem. Vizuální hodnocení se provádí podle Tab. 16 převzaté z normy ČSN 73 6161, která přilnavost asfaltu ke kamenivu hodnotí jako [33]:

- výborná, má-li více než 75 % zrn zkušební vzorku charakteristiku spojení asfaltového filmu s kamenivem A; u zbývajících zrn nesmí být charakteristika nižší než B (procento obalené plochy větší než přibližně 97 %);
- dobrá, má-li více než 75 % zrn zkušební vzorku charakteristiku spojení asfaltového filmu s kamenivem B (nebo lepší); u zbývajících nesmí charakteristika klesnout pod C (procento obalené plochy větší než přibližně 90 %);
- vyhovující, má-li více než 75 % zrn zkušební vzorku charakteristiku C (nebo lepší); u zbývajících zrn nesmí charakteristika klesnout pod D (procento obalené plochy větší než přibližně 80 %);
- nevyhovující, má-li méně než 75 % zrn charakteristiku C.

Tab. 16. Hodnocení přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu dle ČSN 73 6161. [33]

Obalená plocha v %	Asfaltem obalené zrno kameniva	Charakteristika asfaltového spojení filmu se zrnem kameniva	Poznámka
100		A	Celé zrno obaleno, hrany a rohy mohou být slabě potaženy průsvitným filmem.
90		B	Zrno obaleno slabě, na zbylé ploše mohou být drobné obnažená místa (hrany, rohy, drobné plošky).
80		C	Obnažené hrany a rohy, zbylá plocha zrna obalena.
70		D	Obnažené hrany a rohy, na ostatní ploše se ojediněle vyskytují malá neobalená místa.
50		E	Obnažené hrany a rohy, na ostatní ploše se vyskytují neobalená místa, obalená plocha převládá.
40		F	Neobalená plocha převládá, obalená plocha je tvořena ještě jednotlivými souvislými plochami.
20		G	Nesouvislý obalený povrch tvořený jednotlivými kapkami asfaltu.

#### 4.1.2 Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem dle ČSN EN 12697-11

Další metody popisující stanovení afinity mezi asfaltovým pojivem a kamenivem předepisuje momentálně platná evropská norma ČSN EN 12697-11. Za zmínku určitě stojí 3 metody vykonávání samotné zkoušky na stanovení přilnavosti. První metoda nazývaná též statická, vizuálně hodnotí stupeň obalení nezhotněných zrn kameniva asfaltem po temperování ve vodě. Metoda obnažování vroucí vodou vizuálně hodnotí stupeň obalení nezhotněných zrn kameniva asfaltem po ponoření do vroucí vody. Poslední metoda, metoda otáčení lahví, vizuálně hodnotí stupeň obalení nezhotněných zrn kameniva asfaltem po účincích mechanického namáhání za přítomnosti vody. Tyto tři různé postupy hodnotí schopnost asfaltového pojiva dokonale přilnout k různým druhům kameniva a mají být jakousi pomůckou pro navrhování asfaltových směsí spíše nežli jako zkoušky typu. [153]

#### 4.1.2.1 *Metoda statická*

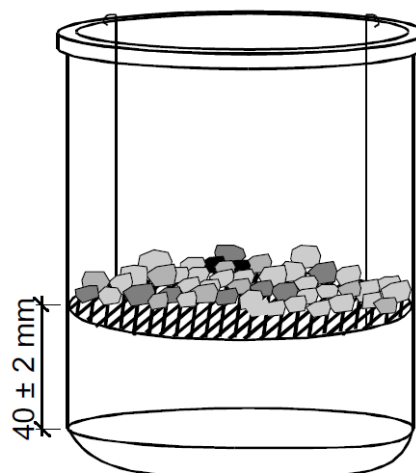
První metoda nazývaná též statická, vizuálně hodnotí stupeň obalení nezahutněných zrn kameniva asfaltem po temperování ve vodě. Je to subjektivní zkouška, která je všeobecně méně přesná, ale může stačit pro kamenivo s vysokou hodnotou ohladitelnosti kameniva PSV. [153]

Při statické metodě se kamenivo obalí asfaltovým pojivem. Pro tento test je potřeba 150 zrn kameniva o velikosti v rozmezí 8 až 11,2 mm nebo 6,3 až 10 mm. Množství přidávaného pojiva se rovná 4% hmotnosti celkové navážky kameniva. Zahřáté částice kameniva a asfaltové pojivo nesmí mít menší teplotu, než je teplota míchání, kterou definuje norma EN 12697-35 s tolerancí  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Nejsou-li zrna kameniva zcela pokryta asfaltovým pojivem po uplynutí doby 5 minut, míchání provedeme s novým kamenivem a zvýšíme podíl přidávaného pojiva. Je-li potřeba, na připravené ploché dno nádoby nanese tenkou vrstvu glycerolu, dextrinu nebo jinou podobnou aplikaci, která zamezí nežádoucímu přichycení obaleného zrna kameniva ke dnu nádoby. Při ukládání obalené směsi dbáme na to, aby byla jednotlivá zrna kameniva zcela oddělena od sousedních částic. Oddělené částice necháme stát v nádobě 1 hodinu  $\pm$  5 minut, poté vrstvu vzorku opatrně zalijeme destilovanou vodou o teplotě  $19 \pm 1^\circ\text{C}$ , kterou udržujeme po dobu  $48 \pm 1$  hodinu. Po uplynutí stanovené doby slijeme veškerou vodu z nádoby a vzorek necháme vyschnout. Suchý vzorek je nyní možno zhodnotit a stanovit tak stupeň pokrytí asfaltového pojiva na jednotlivých zrnech kameniva.

#### 4.1.2.2 *Metoda obnažování vroucí vodou*

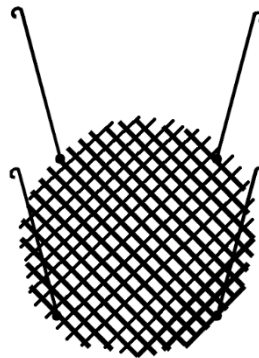
Metoda obnažování vroucí vodou vizuálně hodnotí stupeň obalení nezahutněných zrn kameniva asfaltem po ponoření do vroucí vody. Je to objektivní zkouška a má vysokou přesnost, je určená pro specialisty a vyžaduje větší zkušenosti pracovníků. [153]

Tato metoda dle platné evropské normy ČSN EN 12697-11 vyžaduje použití chemických látek, jako je kyselina chlorovodíková nebo kyselina fluorovodíková, tato činidla mohou být nebezpečná, proto je zapotřebí věnovat pozornost bezpečnostním opatřením. Proto by tento test měli provádět jen dostatečně vyškolení pracovníci.



Obr. 39. Zkušební vzorek umístěný na podpurné mřížce zavěšené na skleněnou nádobu.

Jako při statické metodě je nejprve nutné připravit potřebné množství kameniva (nejméně 2.000 g) a asfaltového pojiva (asi 50 g), míchací teplota je stanovena dle platné normy ČSN EN 12697-35. Připravené a zahřáté složky intenzivně promísíme pomocí stěrky a ujistíme se, že povrch kameniva je zcela pokryt asfaltovým pojivem. Po promíchání je nezbytné ihned ponořit nádobu s promísenou směsí do chladné vodní lázně, aby se zabránilo celkovému slepení jednotlivých zrn kameniva. Takto oddělené kamenivo obalené pojivem je nezbytné přemístit na rovný povrch dna kovové nádoby. Pro testování jsou potřeba dva zkušební vzorky (200 g), skleněná kádinka o objemu 800 ml, do které se umístí podpůrná mřížka pro zachycení zkušební vzorku, jak je znázorněno na Obr. 40. Do nádoby se nalije 600 ml destilované vody, ta se následně na varné desce přivede k varu. Jakmile se začne voda v nádobě vařit, přendáme  $200 \pm 0,5$  g obaleného kameniva do kádinky na zavěšenou mřížku (Obr. 39) a spustíme stopky. Rychle přivedeme vodu opět k varu (zhruba do jedné minuty) a necháme ji vařit 10 minut. Přimícháváním studené vody ochladíme vzorek, který následně necháme zaschnout. Další postup se odvíjí od použitého typu kameniva. Při použití vápenitého kameniva necháme na kamenivo působit kyselinu chlorovodíkovou po dobu 5 minut, u křemičito-manganového až vápnného kameniva nebo křemičitého kameniva naopak kyselinu fluorovodíkovou po dobu 1 hodiny  $\pm$  1 minuty. Po uplynutí uvedených časů opatrně odlijeme kyselinu a nyní můžeme přistoupit k titraci pomocí hydroxidu sodného (hydroxidu draselného) a fenolftaleinu a určíme průměrný objem použitého hydroxidu potřebného pro titraci s přesností na 0,05 ml. Ze zjištěných hodnot spotřebovaného hydroxidu dopočteme objem spotřebované kyseliny, který společně s procentuálním zastoupením obnaženého kameniva v testovací směsi vyneseme do grafu pro sestrojení kalibrační křivky. Za použití sestrojené kalibrační křivky je nyní možné vypočítat stupeň obalení kameniva asfaltovým pojivem.



Obr. 40. Podpůrná mřížka s háčky.

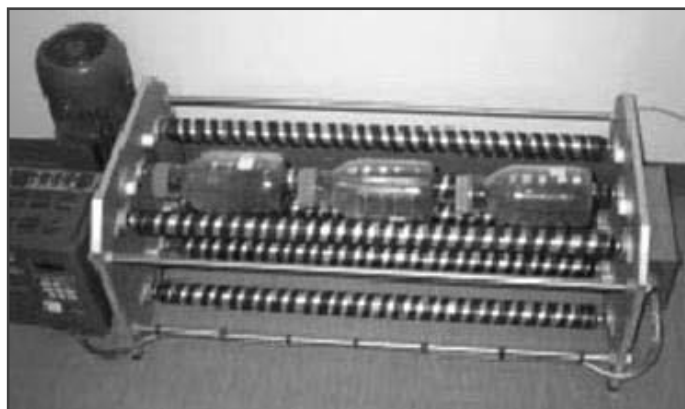
#### 4.1.2.3 *Metoda otáčení lahví*

Metoda otáčení lahví, vizuálně hodnotí stupeň obalení nezhuťných zrn kameniva asfaltem po účincích mechanického namáhání za přítomnosti vody. Je to subjektivní zkouška, používaná pro rutinnější zkoušení. Principiálně tato metoda spočívá v mechanickém namáhání (míšení) obaleného kameniva uzavřeného v otáčející se zkušební lahvi naplněné vodou předepsanou rychlostí 40 nebo 60 otáček za minutu, podle typu použitého pojiva. [153]

U metody otáčení lahví je kamenivo (o hmotnosti minimálně 600 g) dokonale obalené asfaltovým pojivem (povrch kameniva musí být zcela pokryt asfaltovým pojivem, jakékoliv tenké či nahnědlé průsvitné plochy na okrajích agregátů se považují za plně pokryté), které je ihned umístěno volně na kovové desce anebo na silikonovém křídovém papíru s povrchovou úpravou. Takto obalené kamenivo musí volně ležet na podložce a tvořit tak samostatné jednotlivé částice. Rozprostřený materiál musí být uložen při laboratorní teplotě  $20\pm 5$  °C po dobu 12 až 64 hodin a dbá se na zamezení přímého vystavení slunci a možnému zanesení prachem. Po uplynutí této doby je směs rozdělena na tři části vzorků k dalšímu rozboru, každá část o hmotnosti  $150\pm 2$  g. Mezitím je potřeba označit zkušební lahve a naplnit je přibližně z 50 % objemu, a to destilovanou vodou o teplotě  $5\pm 2$  °C. Zkušební vzorek přemístíme do láhve naplněné destilovanou vodou (Obr. 41), ta se následně uzavře a umístí se do zařízení určenému k otáčení lahví (Obr. 42). Lahve jsou otáčeny při laboratorní teplotě a při stanovené rychlosti otáčení lahví 40 nebo 60 otáček za minutu, podle typu použitého pojiva.



Obr. 41. Testovací lahev.



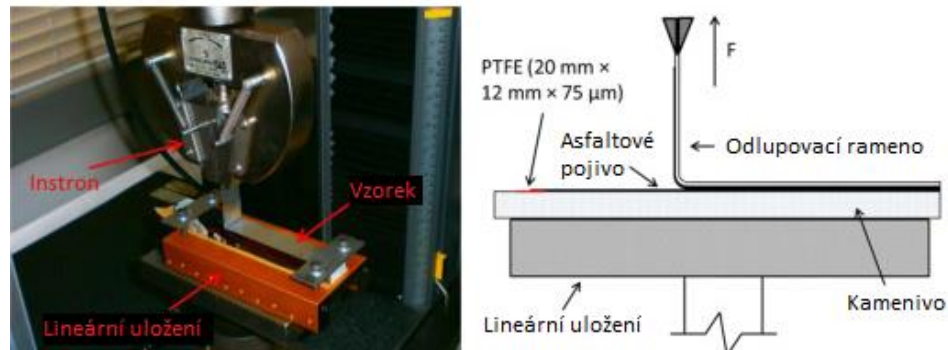
Obr. 42. Zařízení určené k otáčení lahví.

Ve stanovených intervalech se pak vizuálně zhodnotí míra pokrytí asfaltového pojiva na kamenivu a to tak, že se testované částice přemístí z lahve do připravené misky a naplní se čerstvou destilovanou vodou, pro lepší vizuální určení pokrytí kameniva asfaltovým pojivem. Po stanovení vizuálního hodnocení se testované částice vrátí zpět do lahve a zalijí se původní vodou z kádinky, lahev se dokonale zašroubuje a vrátí se zpět do zařízení pro otáčení a celý postup se opakuje. Pozorování může být zvoleno v různých intervalech, například ( $6\pm 1$ ) hodin, ( $24\pm 1$ ) hodin, ( $48\pm 1$ ) hodin, a pokud je to nutné i další časové intervaly. Stanovení probíhá dvěma zkušenými laboratorními pracovníky, a to nezávisle na sobě. [152, 153]

#### 4.1.3 „PEEL TEST“ (zkouška odlupování) dle normy ASTM D6862-11

Zkouška Peel test (popsaná v normě ASTM D6862-11) se používá k charakterizaci lepených spojů a je široce využívána v leteckém a automobilovém průmyslu a v elektronice. Horgnies a kol. provedli zkoušku odlupování asfaltu z povrchu kameniva s použitím membrány z

polyethylentereftalátu (PET). Blackman et al. provedli podobnou zkoušku odlupování, ale místo PET membrány použili hliníkový plech, které slouží k odtrhávání lepeného spoje (peel arm). [113, 116]



Obr. 43. Vybavení pro zkoušení metody Peel testu. [116]

Peel test pro stanovení soudržnosti mezi asphaltovým pojivem a kamenivem využívá sestavu pro měření, která je znázorněna na Obr. 43. Jako vzorek se využívají trámečky vyřezávané z kameniva o rozměrech  $200 \times 20 \times 10$  mm. Tyto trámečky jsou poté nalepeny na hliníkové rameno s použitím asphaltového pojiva jako lepicí vrstvy. Tloušťka asphaltové vrstvy je kontrolována umístěním pěti drátěných distančních podložek na kamenivo tak, aby vznikla vrstva o tloušťce 0,25 mm. Příprava vzorku se skládá z následujících kroků [4]:

- Úprava povrchu: povrch kameniva a odlupovacího ramene se jemně otře vlhkým papírovým ručníkem, aby se odstranil veškerý prach.
- Předehřátí kameniva a asphaltového pojiva: kamenivo a hliníkové rameno se vloží do sušárny na jednu hodinu při teplotě  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , před provedením spoje se asphaltové pojivo předehřeje na teplotu  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Umístění iniciátoru trhlin: na povrch kameniva se na jednom konci umístí separační fólie z polytetrafluorethylenu (PTFE) o rozměrech  $20\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 75\text{ }\mu\text{m}$ .
- Na kamenivo se umístí pět drátěných distančních podložek o délce 20 mm, jejich průměr pak řídí tloušťku asphaltové vrstvy.
- Tekuté asphaltové pojivo se nanáší (při  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) rovnoměrně po povrchu kameniva.
- Předehřátý hliníkový plech (s délkou o 50 mm více než délka trámečku kameniva a tloušťkou 0,2 mm) se položí na vrchní část asphaltové vrstvy.
- Velmi lehce se přitlačí na lepený spoj, aby se zajistila správná tloušťka asphaltové vrstvy a došlo tak ke kvalitnímu spoji. Tlak musí být rovnoměrně rozložen po celé ploše spoje. Takto slepený spoj se přes noc ochladí při laboratorní teplotě. Přebytečné asphaltové pojivo na okraji vzorku je seříznuto nahřátým nožem.

K měření tahové síly během provádění peel testu se použije například univerzální zkušební stroj (na Obr. 43 značky např. značky Instron), který umožňuje konstantní rychlost zatěžování během odtrhávání. Vzorek je upevněn lineárně na celou délku zkušební vzorku, aby se během zkoušky dosáhlo přesného a plynulého pohybu během odtrhávání. Ve studii [116] byl volný konec hliníkového plechu ohýbán do úhlu  $90^{\circ}$  a tento úhle byl udržován ložiskovým systémem (viz Obr. 43). Při této zkoušce byla použita rychlost odtrhávání  $10\text{ mm/min}$ . Během

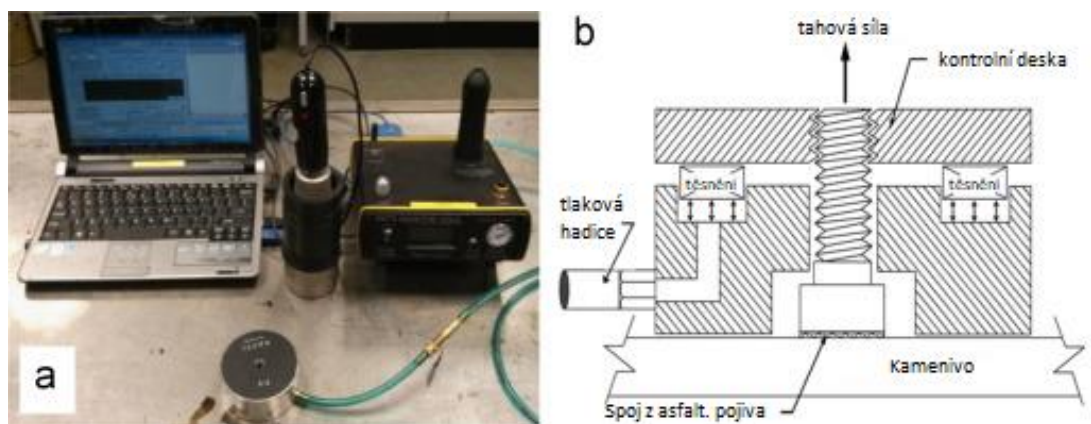


zkoušky byla zaznamenávána tahová síla, která slouží k výpočtu lomové energie spojení asfaltového pojiva a kameniva. Přičemž u výpočtu lomové energie nesmí být opomenuta korekce plastické práce způsobená hliníkovým plechem.

Ve studii [116] byly dále posuzovány rozdílné horniny (žula a vápence) pomocí peel testu a rozdílné typy asfaltových pojiv. Z výsledků je patrné, že vzorky připravené se stejným asfaltovým pojivem mají téměř stejnou lomovou energii v suchém stavu bez ohledu na to, jaké kamenivo bylo pro tuto zkoušku použito. Z výsledků této studie je patrné, že k porušení během této zkoušky dochází uvnitř asfaltového pojiva, což dokazují i další studie, zabývající se stejnou problematikou. [4, 113] Vzorky připravené s asfaltovým pojivem 70/100 mají výrazně nižší lomovou energii než vzorky s asfaltovým pojivem 40/60. Důvodem je tvrdší asfaltové pojivo, takže k odtržení je zapotřebí vyšší lomová energie (v suchém stavu).

#### 4.1.4 „PATTI TEST“ (pneumatická zkouška adheze v tahu) dle ASTM D4541

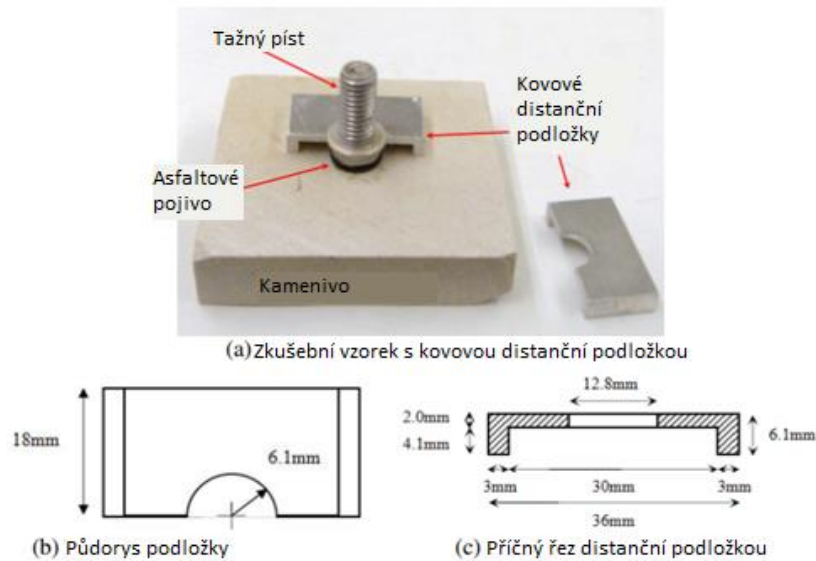
Zkušební metoda „PATTI test“ se využívá k hodnocení lomové pevnosti vzorku asfaltu-kameniva, a to buď z hlediska kohezni pevnosti asfaltového pojiva anebo adhezní pevnosti na rozhraní asfaltového pojiva a kameniva. Zařízení pro PATTI test bylo vyvinuto Národním institutem (NIST), viz Obr. 44a. Zařízení pro tuto zkušební metodu se používá k měření pevnosti v tahu, přičemž kamera slouží k analýze a záznamu poruch, vytvořených na povrchu zkušebního vzorku. Na obr. 2b je příčný řez uspořádání zkušebního zařízení PATTI. Píst je připevněn k tažnému čepu a ten je asfaltovým pojivem přilepena k vzorku kameniva. [154]



Obr. 44. PATTI test: a) zkušební sestava, b) příčný řez zkušebního zařízení se vzorkem. [154]

Pro zajištění kvalitního spoje, je potřeba povrch kameniva (deska o rozměrech 100 × 100 × 20 mm), a tažného čepu očistit a zbavit se tak veškerých prachových částic. Vzorek kameniva a tažný čep se temperují při teplotě 70 °C po dobu jedné hodiny. Asfaltové pojivo je zahříváno při teplotě 150 °C po dobu 1 hodiny, pojivo musí být dostatečně tekuté. Rozehřáté asfaltové pojivo se ihned nalije na připravenou desku kameniva, ta se okamžitě stlačí tažným pístem, čímž se zajistí pevné spojení mezi asfaltovým pojivem a kamenivem. Při tomto zkušebním postupu je tloušťka asfaltového filmu 0,8 mm, jak je znázorněno na Obr. 45. Přebytečné asfaltové pojivo je odříznuto nožem. [116]

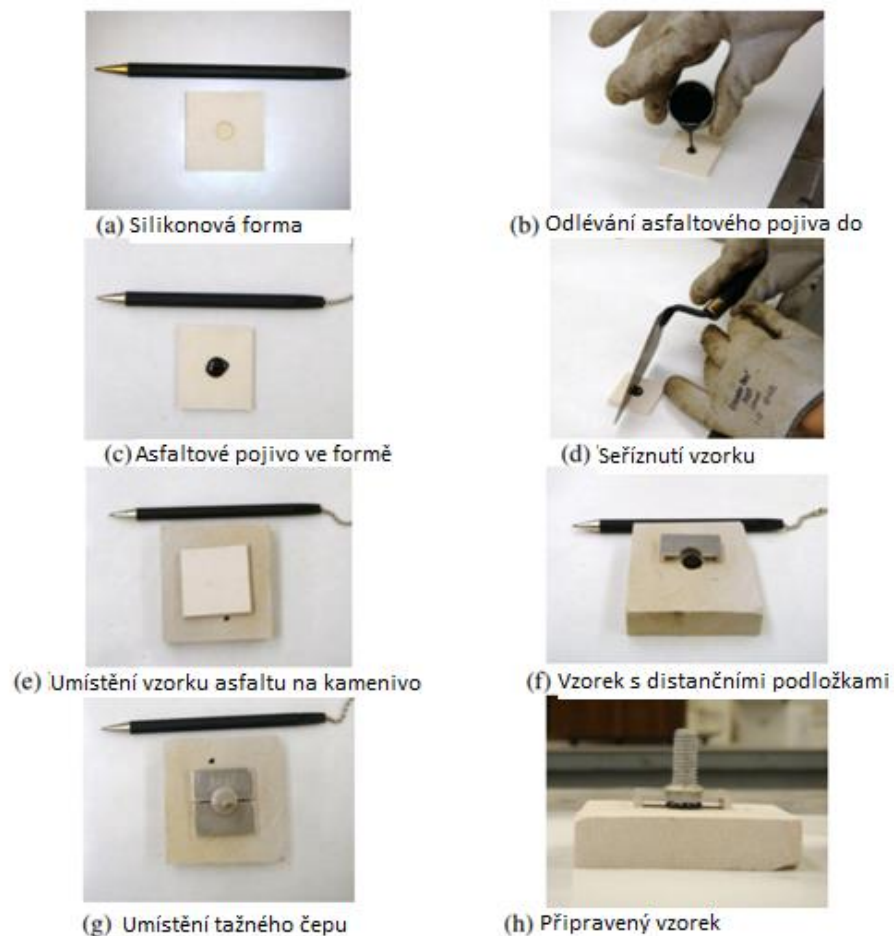




Obr. 46. Zajištění a kontrola tloušťky asphaltové vrstvy pomocí distanční podložky. [155]

V rámci výzkumu popsaného v [156] se nahřáté pojivo odlije nejprve do připravených silikonových forem (Obr. 47), přebytečné pojivo je seříznuto, aby se tak zajistil stejný objem každého vzorku připraveného asphaltového pojiva. Asphaltové pojivo v silikonové formě se následně umístí na povrch kameniva lícem dolů na předem nahřátý povrch kameniva (Obr. 47). Po vychladnutí kameniva se odstraní z asphaltového pojiva silikonová forma. Nyní se kolem asphaltového pojiva umístí kovová distanční podložka. Předehřátým pístem se zatlačí na asphaltové pojivo, aby došlo k pevnému spojení (vymezení tloušťky je v tomto případě zajištěno právě distanční podložkou), pomocí podložky je zajištěna stejná tloušťka asphaltového pojiva 0,4 mm. Pro samotnou zkoušku jsou tělesa temperována při laboratorní teplotě po dobu 24 hodin (u nekondiciovaných vzorků). V případě kondicionování zkušební vzorků se tělesa uloží do vodní lázně po dobu alespoň 1 hodiny. Po vyjmutí z vodní lázně se musí vzorek okamžitě odzkoušet.

Copeland (2007) použil metodu PATTI k hodnocení pevnosti spojení kameniva s asphaltovým pojivem, včetně variant s použitím vybraných typů adhezivních přísad. Asphaltové pojivo bylo smícháno se skleněnými kuličkami o velikosti 200  $\mu\text{m}$ , pro zajištění přesné tloušťky asphaltového pojiva. Poté byl materiál asphaltového pojiva stlačen mezi skleněnou podložku a porézní keramický čep, který umožňuje konzistentní průnik vody do asphaltového filmu. U každého zkušební vzorku byla stanovena pevnost v tahu. Aby bylo možné porovnat vliv jednotlivých adhezivních přísad vlivem působení účinku vlhkosti, byly zkušební vzorky uloženy do vodní lázně. Uvedené se ukázalo jako jeden z nevýznamnějších faktorů ovlivňující pevnost spojení asphaltového pojiva s kamenivem. [157]



Obr. 47. Příprava vzorku. [156]

Kanitpong a Bahia (2005) hodnotili adhezi a poruchy soudržnosti asfaltových pojiv s přidavkem přilnavostních přísad a polymerem-modifikovaných pojiv k vápencovým a žulovým podkladům pomocí PATTI. Vzorky byly testovány bez kondicionování a s kondicionováním vodou po dobu 24 hodin při teplotě 25°C. Výsledky zkoušek prokázaly, že vlastnosti pojiva a zdroj kameniva jsou významnými faktory ovlivňujícími náchylnost asfaltových směsí k poškození způsobené vlivem vlhkosti. Použitím přilnavostních přísad došlo ke zlepšení adheze, stejně tak i u polymerem modifikovaného pojiva. Kohezní vlastnosti asfaltového pojiva se s přidáním přilnavostních přísad výrazně nezměnily, zatímco polymery modifikovaná pojiva vykazovala značné změny kohezních vlastností. Snahou mnoha vědců v tomto ohledu zůstává pochopení problematiky adheze a koheze v menším měřítku (asfaltové pojivo-rozhraní-kamenivo), než je tomu u mechanismů komplexní asfaltové směsi HMA, do kterých vstupují i další proměnné parametry (objemová hmotnost zhutněné asfaltové směsi, geometrické charakteristiky kameniva apod.). [158]

Jak již bylo zmíněno, z výsledků PATTI testu je možné stanovit, k jakému typu poruchy došlo během odtrhnutí – adhezivní či kohezivní. Podle studie Kanitponga a Bahii (2005) vyplynulo, že v případech, kdy dojde u více než 50 % vzorků k obnažení desky kameniva odtržením asfaltového pojiva, lze typ poruchy klasifikovat jako adhezivní, v opačném případě, pokud

zůstane na obou plochách část asfaltového pojiva, lze takové porušení klasifikovat jako narušení koheze. [158]



Porucha koheze

Porucha adheze

Obr. 48. Typ poruchy na rozhraní asfaltového pojiva a kameniva. [156]

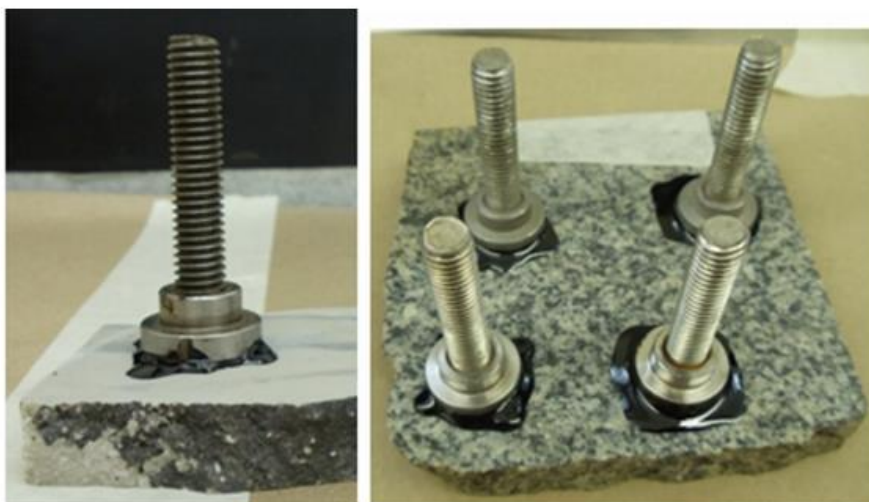
Jak ukazuje příklad na Obr. 48, nekondicionované vzorky vykazovaly ve většině případů kohezní typ porušení, zatímco adhezní porušení bylo častější u vzorků, které byly kondicionovány po dobu 48 hodin. Z tohoto poznatku vyplývá, že přítomnost vody způsobuje snížení pevnosti na spojení asfaltové pojivo-kamenivo. Ze závěrů studie je patrná významná korelace hodnot z metody PATTI test a hodnot pevností v příčném tahu při stanovení vodní citlivosti dle americké zkušební metody AASHTO T-283 na zkušebních tělesech. Závislost byla porovnána pouze u nekondicionovaných zkušebních těles, jelikož AASHTO T-283 nemá totožný postup kondicionování zkušebních těles jako PATTI test. [156]

#### 4.1.5 „Asphalt bond strength test (ABS)“ – Stanovení pevnosti spojení asfaltového pojiva

Moraes et al., 2016 použil ve svém výzkumu zkušební metodu „Asphalt bond strength test (ABS)“ dle AASHTO T 361-16 pro stanovení pevnosti spojení asfaltového pojiva. Jedná se o modifikovanou zkoušku PATTI testu. Vzorek asfaltového pojiva mezi kovovým dříkem a kamenivem je namáhán konstantní silou v tahu, dokud působící napětí nedosáhne mezní hodnoty, a to buď ztrátou koheze asfaltového pojiva (nebo kameniva) anebo ztráty adheze mezi pojivem a kamenivem. Pro zkoušku ABS byly vzorky kameniva a kovového dříku povrchově ošetřeny acetonem pro povrchové očištění a zbavení se vlhkosti a prachu, které by mohly ovlivnit přilnavost s asfaltovým pojivem. Vzorek kameniva a dříku, opatřeného distančními výstupky po svém obvodu (pro zajištění požadované tloušťky asfaltového pojiva), byl temperován v komoře s nucenou cirkulací vzduchu při teplotě 145 °C po dobu min. 45 minut, aby se z povrchu kameniva odstranila veškerá absorbovaná vlhkost. Asfaltové pojivo o teplotě 150 °C bylo okamžitě dávkováno na hlavu dříku a ponecháno přibližně 10 s. Ihned poté se na vytemperovanou destičku kameniva přiloží hlava dříku s asfaltovým pojivem a přimáčkne se k povrchu kameniva, aby se vytlačilo přebytečné pojivo (Obr. 49). Je třeba, aby se dřík zatlačil rovnoměrně, aby se omezil vznik vzduchových bublin uvnitř vzorku a minimalizovalo se napětí způsobené kroucením dříku. Před zkouškou se suché vzorky ponechají při laboratorní teplotě po dobu 24 h v laboratorním prostředí. Vodou kondicionované vzorky se ponechají 1 hodinu při laboratorní teplotě, aby se dosáhlo nejprve srovnatelné teploty všech složek a prvků zkoušky, a



poté jsou vloženy do vody o teplotě 40 °C. Před samotným zkoušením se vzorky nechají při laboratorní teplotě po dobu alespoň 1 hodiny. [98]



Obr. 49. „Asphalt bond strength test“ - Příprava vzorku. [98]

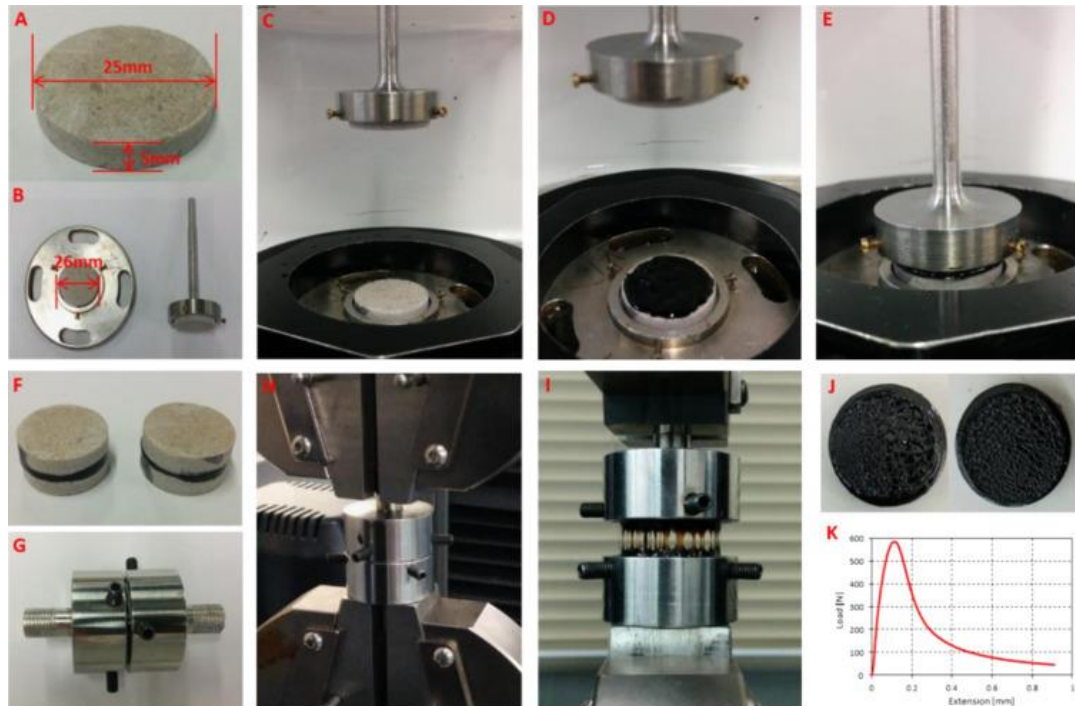
V rámci toho výzkumu byl na různých typech kameniva (žula a vápenec) v kombinaci s různými typy asphaltových pojiv, měřen současně i kontaktní úhel. Porovnání měření kontaktních úhlů, které lze použít jako kvantitativní odhad smáčivosti, a metodou ABS ukázalo, že obecně pojiva s vyšší pevností v tahu odpovídají pojivům s vyšší smáčivostí (tj. s nižšími kontaktními úhly). [98] Je však důležité zmínit, že nikde není definována míra úpravy textury povrchu. Tedy jak má v případě provádění těchto zkušebních postupů vypadat povrch kameniva (jak má být drsný nebo hladký, resp. na jakou úroveň má být zbrúšen a leštěn). Jak již bylo zmíněno dříve, textura povrchu by v rámci těchto zkušebních postupů neměla být rozhodně opomíjena. Protože dle výzkumů [29, 30, 31, 32] je to jeden z hlavních ukazatelů pro možnou predikci ztráty adheze mezi asphaltovým pojivem a povrchem kameniva. Kdy se ukazuje, že vyšší drsnost textury povrchu kameniva zjišťuje kvalitnější spojení s asphaltovým pojivem.

#### 4.1.6 „Pull-off test“

Zkouška „Pull-off test“ vychází ze stejného principu jako metoda „PATTI test“, co se týká namáhání tenké vrstvy asphaltového pojiva. Rozdíl je, že tenká vrstva asphaltového pojiva spojuje dva vzorky kameniva. V tomto případě je možno využít například dynamický smykový reometr k určení přesně tloušťky asphaltového filmu. [117]

Na Obr. 50 je znázorněn celý postup z hlediska přípravy vzorku a průběhu zkoušení. Pro přípravu vzorků byly z balvanů použitého kameniva odvrtny válcová tělesa o průměru 25 mm. Válcové vývrty kameniva se rozřezaly na plátky o tloušťce 5 mm. Pro dosažení relativně konstantní drsnosti povrchu byly oba povrchy kameniva vyleštěny pomocí rotačního lešticího stroje a následně čišťeny v ultrazvukovém čisticím stroji po dobu 15 min. Poté se vysušily při teplotě 40 °C po dobu 24 h. Vzorek hotového vyleštěného zkušební vzorku kameniva je zobrazen na Obr. 50 A. [116]





Obr. 50. Pull-off test – příprava vzorku a průběh zkoušky. [116]

Pro přesnou kontrolu nanesené vrstvy asphaltového pojiva byly nařezané plátky kruhového průměru uchyceny do hliníkových objímek, jež byly speciálně navrženy a vyrobeny tak, aby se daly uchytnout do dynamického smykového reometru (DSR). Pro tuto zkušební metodu byla v rámci výzkumu [116] zvolena tloušťka asphaltové vrstvy 20  $\mu\text{m}$  (simulace skutečné tloušťky asphaltového filmu v asphaltové směsi). Vzorek byl po přibližně 15 minutách chlazení vyjmut z DSR a poté bylo přebytečné asphaltové pojivo odstraněno pomocí zahřátého nože. Takto připravený vzorek byl na každé straně uchycen do připravených objímek se třemi upínacími šrouby. Každá z objímek pak byla uchycena do lisu, kde mohlo dojít k postupnému zatěžování. Při zkoušce byla použita rychlost roztážení 10 mm/min při teplotě 20  $^{\circ}\text{C}$  až do úplného porušení vzorku, jak je patrné Obr. 50 (příklad I a J). Pro každou kombinaci kameniva a asphaltového pojiva byly provedeny nejméně čtyři opakované zkoušky. Výsledky byly použity k výpočtu pevnosti v tahu. Pevnost v tahu byla vypočtena jako poměr maximálního zatížení vs. plocha průřezu asphaltové vrstvy, jak ukazuje rovnice (9):

$$TS = \frac{F}{\pi \cdot r^2} \quad (9)$$

$TS$  – pevnost v tahu [kPa],

$F$  – maximální tahová síla při porušení vzorku [N],

$r$  – poloměr vzorku kameniva [mm].

Ze studie [116] byl zaznamenán problém s uchycením vzorků v případě vápence, který se ukázal jako nedostatečně pevný a měl tendenci se lámat již při upevňování vzorků do připravených objímek. Veškerá porušení těchto vzorků nastala přímo v hornině.

Vzorky připravené s asphaltovým pojivem 40/60 mají vyšší pevnost v tahu ve srovnání s asphaltovým pojivem 70/100. Tento jev dobře koreluje se zkouškami odlupování a PATTI testu.



Pokud jde o stejný asfalt, vzorky připravené s různým kamenivem (zde porovnání vápence a žuly) dosahují téměř stejných hodnot pevnosti v tahu. To poukazuje na skutečnost, že v suchém stavu je pevnost v tahu zkušebních vzorků řízena především vlastnostmi použitého asfaltového pojiva, vliv kameniva je tedy minimální. Z výsledků studie provedené na čtyřech typech kameniva a dvou typech asfaltového pojiva došlo k poruše ztrátou koheze uvnitř asfaltového pojiva, nikoliv tedy poruchou adheze mezifázového spojení. [116]

Vzorky připravené z kameniva L2 (vápenec) nebo G1 (žula), vykazují dobrou odolnost proti působení vlhkosti s více než 75 % zachované pevnosti v tahu po 7 dnech kondicionování. Naopak vliv vlhkosti se výrazněji projevil u vzorků obsahujících kamenivo G2 (žula), kde pevnost poklesla o více než 80 % u asfaltu 40/60 a 40 % u asfaltu 70/100. Kamenivo L2 a G2 mají podobné absorpční vlastnosti v přítomnosti vody, ale vykazují zjevně odlišnou vodní citlivost. Tento výsledek naznačuje, že samotná nasákavost není indikátorem poškození způsobeného vlhkostí, důležitá je také mineralogické složení horniny. Dalším důvodem rozdílů pozorovaných u kameniva L2 a G2 je přisuzováno obsahu minerálů v hornině žuly G2 – velké množství albitu a křemene v žule způsobuje rychlejší přerušování vazby s asfaltovým pojivem. Hornina G1 žula má nižší absorpci vlhkosti, a tudíž je pro vodu obtížné difundovat přes horninu na rozhraní kamenivo-asfaltové pojivo, takže nemůže dojít k oslabení vazby. Z těchto závěrů lze konstatovat, že poškození vlivem účinku vody není řízeno výhradně mineralogickým složením horniny, ale je třeba brát v úvahu i její nasákavost. [116, 117]

## 4.2 Zkušební metody na zhutněných zkušebních vzorcích použitých v této práci

### 4.2.1 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ASFALTOVÉHO ZKUŠEBNÍHO TĚLESA

Pro stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa se postupovalo dle zkušebních metod pro asfaltové směsi za horka uvedené v normě ČSN EN 12697-6. Objemová hmotnost jednotlivých zhutněných asfaltových zkušebních vzorků se stanovila z hmotnosti zkušebního tělesa a jeho objemu. Hmotnost suchého vzorku se získala vážením suchého vzorku na vzduchu. [159]

#### 4.2.1.1 *Postup zkoušky*

Dle normy byl pro zhutněná (2x25 úderů) asfaltová zkušební tělesa využit postup stanovení objemové hmotnosti podle rozměrů. Nejprve jsme stanovili rozměry válcových zkušebních těles v milimetrech dle normy ČSN EN 12697-29. Poté se stanovila hmotnost suchého zkušebního tělesa. [160]

#### 4.2.1.2 Výpočet objemové hmotnosti

Ze zjištěných údajů v odstavci 4.2.1.1 již bylo možné vypočítat objemovou hmotnost jednotlivých vzorků s přesností na  $1 \text{ kg/m}^3$  dle následujícího vzorce (10) [159]:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \cdot 10^6 \quad (10)$$

$\rho_{b,dim}$  – objemová hmotnost zkušebního tělesa dle rozměrů [ $\text{kg/m}^3$ ]

$m_1$  – hmotnost suchého tělesa [g]

$h$  – výška zkušebního tělesa [mm]

$d$  – průměr tělesa [mm]

#### 4.2.2 STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

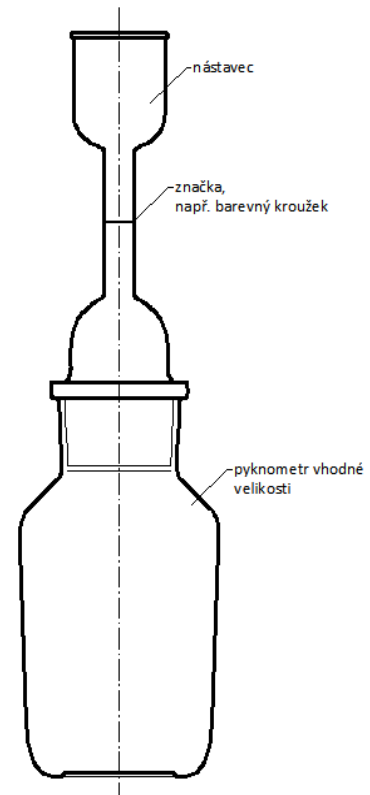
Pro jednotlivé asphaltové směsi připravené v rámci této práce bylo potřeba v souladu s normou ČSN EN 12697-5, týkající se zkušebních metod pro asphaltové směsi za horka, stanovit maximální objemovou hmotnost. Ta se společně s objemovou hmotností používá k výpočtu obsahu mezer ve ztuhnutém vzorku a dalších vlastností ztuhnuté asphaltové směsi, které se vztahují k jejímu objemu. [161]



Obr. 51. Oddělená zrna kameniva (asfaltová směs s přínavostní přísadou Ad-Here LOF 65-00 EU).

#### 4.2.2.1 Postup zkoušky

Ke stanovení maximální objemové hmotnosti byl dle normy ČSN EN 12697-5 zvolen volumetrický postup. K této zkoušce byl potřeba pyknometr vhodné velikosti (Obr. 52) s těsně přiléhajícím nástavcem, jak nám určuje norma, kdy objem pyknometru musí být takový. Aby vzorek asfaltové směsi zaujímal nejvýše 2/3 objemu. Nejprve bylo tedy potřeba stanovit hmotnost  $m_1$  prázdného pyknometru s nástavcem o známém objemu  $V_p$ . Mezitím bylo třeba rozehrát a vysušit obalenou asfaltovou směs, aby bylo možné oddělit jednotlivá zrna kameniva, patrné z Obr. 51. Takto připravenými oddělenými zrny, vytemperovaných na okolní teplotu, se naplnil pyknometr do 2/3 svého objemu. Poté se stanovila jeho hmotnost  $m_2$  spolu s nástavcem. Pyknometr se naplnil odvzdušněnou destilovanou vodou do výšky maximálně 30 mm pod okraj a pomocí míchání se odstranil vzduch z přístupných mezer. Zbýlý zachycený vzduch musel být odstraněn pomocí vakua v připravené vakuové komoře (Obr. 53) při podtlaku 4kPa po dobu  $15 \pm 1$  minuty. Po uplynutí této doby byl pyknometr se zkušebním vzorkem a destilovanou vodou vyjmut z vakuové komory. Na takto připravený pyknometr se mohl nasadit nástavec a zbylý prostor v pyknometru bylo možno opatrně doplnit odvzdušněnou destilovanou vodou až po referenční značku (Obr. 54), tak aby nedošlo k vniknutí vzduchu. Poté se stanovila poslední hmotnost  $m_3$ .



Obr. 52. Schéma pyknometru.



Obr. 53. Vakuová komora sloužící k odstranění zbylého zachyceného vzduchu v asfaltové směsi uložené v pyknometru.



Obr. 54. Pyknometr naplněný odvzdušněnou destilovanou vodou po referenční značce.

#### 4.2.2.2 Výpočet maximální objemové hmotnosti

Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi stanovená za použití volumetrického postupu se vypočítá s přesností na  $1 \text{ kg/m}^3$  dle následujícího vzorce (11) [161]:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000(V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w})} \quad (11)$$

$\rho_{mv}$  – maximální objemová hmotnost asfaltové směsi stanovená [ $\text{kg/m}^3$ ] stanovená volumetrickým postupem s přesností na  $0,1 \text{ kg/m}^3$

$m_1$  – hmotnost pyknometru a nástavce [g]

$m_2$  – hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku [g]

$m_3$  – hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a vody [g]

$V_p$  – objem pyknometru při naplnění po referenční značce [ $\text{m}^3$ ]

$\rho_w$  – hustota vody při zkušební teplotě [ $\text{kg/m}^3$ ] s přesností  $0,1 \text{ kg/m}^3$



### 4.2.3 STANOVENÍ MEZEROVITOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Zkouška stanovení mezerovitosti asfaltových směsí vychází z normy ČSN EN 12697-8 a její výpočet vychází ze dvou již zmíněných veličin. Mezerovitost se tedy vypočítá pomocí objemové hmotnosti zkušební tělesa (odstavec 4.2.1) a maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi (odstavec 4.2.2). Pro výpočet mezerovitosti využijeme následujícího vzorce (12) [162]:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100\% \quad (12)$$

$V_m$  – mezerovitost asfaltové směsi s přesností 0,1%

$\rho_m$  – maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_b$  – objemová hmotnost zkušební tělesa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

### 4.2.4 STANOVENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU

#### 4.2.4.1 Postup zkoušky

Na vytemperovaných zkušebních tělesech se dle odstavce 4.2.6.1 a 4.2.5.1. stanovila pevnost v příčném tahu podle postupu uvedeném v normě ČSN EN 12697-23. Zkouška se provedla ihned poté, co byla zkušební tělesa vyjmuta z místa temperace, nejdéle však do 2 minut. Takto temperovaná zkušební tělesa se vložila do tlačných čelistí v místnosti při laboratorní teplotě 15 až 25°C. Takto připravené zkušební těleso se umístilo do lisu (Obr. 55) mezi dva zatěžovací pásy a mohlo se přistoupit k samotnému stlačování zkušební tělesa. Vzorek byl zatěžován podél středové osy na jeho průměr, konstantní rychlostí zatěžování 50 mm za minutu do okamžiku porušení. [164]



Obr. 55. Lis s dvěma tlačnými pásy pro stanovení pevnosti v příčném tahu.



#### 4.2.4.2 Výpočet pevnosti v příčném tahu

Pro každé zkušební těleso se vypočítala pevnost v příčném tahu ITS, která se rovná maximálnímu tahovému napětí, vypočítaném z nejvyššího zatížení, které vedlo k porušení zkušební tělesa a z jeho naměřených rozměrů. [164]

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (17)$$

*ITS – pevnost v příčném tahu [MPa], zaokrouhlená na tři platné číslice*

*P – maximální zatížení [N], zaokrouhlená na celá čísla*

*D – průměr zkušební tělesa [mm], na jedno desetinné místo*

*H – výška zkušební tělesa [mm], na jedno desetinné místo*

#### 4.2.5 STANOVENÍ ODOLNOSTI ZKUŠEBNÍHO TĚLESA VŮČI ÚČINKŮM VODY

Zkouška stanovení odolnosti zkušební tělesa vůči vodě byla provedena v souladu s technickou normou ČSN EN 12697-12 platnou od března roku 2005. Podstatou zkoušky stanovení odolnosti zkušebních těles vůči vodě je rozdělení připravených vzorků z každé připravované asfaltové směsi do dvou skupin o stejné velikosti a je temperována. Jedna skupina je udržována na vzduchu při laboratorní teplotě. Druhá skupina je nasycena vodou a uložena do vodní lázně se zvýšenou teplotou. Od každé směsi bylo vyrobeno po devíti zkušebních tělesech, která se rozdělila následovně. První a druhá skupina obsahovala po 3 vzorcích a 3 zbylé vzorky byly použity pro stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči účinkům vody s jedním zmrazovacím cyklem, popsané v odstavci 4.5. Po temperování se stanovila pevnost v příčném tahu na každé ze dvou skupin podle EN 12697-23 při předepsané zkušební teplotě. Stanovil se poměr pevností v příčném tahu skupiny zkušebních těles temperovaných ve vodní lázni v porovnání s pevností v příčném tahu skupiny zkušebních těles udržovaných na vzduchu a vyjádří se v procentech. [163, 164]

##### 4.2.5.1 Postup zkoušky

Zkušební tělesa byla rozdělena do dvou skupin, které mají stejnou průměrnou výšku a průměrnou objemovou hmotnost. Rozdíl průměrné výšky by neměl být větší než 5 mm a rozdíl průměrných objemových hmotností by neměl být vyšší než 30 kg/m<sup>3</sup>.

První skupina, suchá zkušební tělesa, se uložila na rovný povrch při laboratorní teplotě 20±5 °C. Druhá skupina, mokrá zkušební tělesa, se umístila na perforovanou podložku do skleněné vakuové komory (Obr. 56) naplněné destilovanou vodou o teplotě 20±2 °C do úrovně nejméně 20 mm nad horním povrchem zkušebních těles.



Obr. 56. Skleněná vakuová nádoba na sycení zkušebních těles.

Vakuovou komoru bylo třeba dokonale utěsnit pomocí „rampsy“ tuku (neboli kohoutího sádla), aby horní poklop vakuové komory dobře přilnul ke spodní nádobě. Ve vakuové komoře se vyvolal absolutní tlak  $6,7 \pm 0,3 \text{ kPa}$ , což odpovídá přibližně 50 mm rtuťového sloupce (Hg). Tlak se snižoval postupně, po dobu  $10 \pm 1$  minut, aby nedošlo k případnému poškození zkušebních těles, vlivem rozpínajícího se vzduchu ve vakuové komoře. Po dosažení absolutního tlaku byla tato hodnota nadále udržována  $30 \pm 5$  minut. Po skončení sycení zkušebních těles, se mohlo přejít k pozvolnému zvyšování tlaku ve vakuové komoře až na tlak atmosférický. Zkušební vzorky se poté ještě ponechaly ponořené ve vodě po dobu dalších  $30 \pm 5$  minut, poté je bylo možné vyjmout a vložit do připravené vodní lázně o teplotě  $40 \pm 1$  °C na dobu  $70 \pm 2$  hodin.

První skupina, suchá zkušební tělesa, byla přemístěna do termostaticky regulované vzduchové komory při teplotě  $15 \pm 2$  °C na dobu nejméně dvou hodin. Oproti tomu druhá skupina, mokrá zkušební tělesa, byla přesunuta z vodní lázně při teplotě  $40 \pm 1$  °C, kde byla ponechána 68 až 72 hodin, do téže regulované komory s tím rozdílem, že zde byla připravená nádoba s vodní lázní o teplotě  $15 \pm 2$  °C. Po uplynutí stanovené doby se ihned stanovila pevnost v příčném tahu popsanému v odstavci 4.2.5.2.

#### 4.2.5.2 Výpočet poměru pevností v příčném tahu

Podle odstavce 4.2.4 byly stanoveny pevnosti v příčném tahu, a to na první skupině suchých těles a druhé skupině mokrých těles. A mohlo se přistoupit k samotnému výpočtu poměru pevností v příčném tahu. Poměr pevností v příčném tahu ITSR se stanovil podle vzorce (13) [163]:

$$ITSR = 100x \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (13)$$

*ITSR* – poměr pevností v příčném tahu [%]

*ITS<sub>w</sub>* – průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles [kPa]

*ITS<sub>d</sub>* – průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles [kPa]

#### 4.2.6 STANOVENÍ ODOLNOSTI ZKUŠEBNÍHO TĚLESA VŮČI ÚČINKŮM VODY S JEDNÍM ZMRAZOVACÍM CYKLEM

Zkouška stanovení odolnosti zkušební tělesa vůči účinkům vody s jedním zmrazovacím cyklem byla provedena v souladu se severoamerickou technickou normou AASHTO T 283-03 platnou od ledna roku 2007. Podstatou zkoušky je opět porovnání vlastností dvou skupin zkušebních vzorků ze ztuhlé asfaltové směsi, kdy je první skupina vzorků ponechána na suchu a druhá skupina vzorků je vystavena zrychlenému nasycení vodou s jedním zmrazovacím cyklem. Americký postup vychází z principů hutnění zkušebních těles popsaných např. metodikou California, tedy pomocí hutnění válcem, popsanou v normě AASHTO T 312, nebo metodikou Superpave využívající především gyrátor, uvedenou v normě AASHTO T 247, aby bylo dosaženo požadované mezerovitosti  $7,0 \pm 0,5$  %. V případě aplikace této zkušební metody pro asfaltové směsi, popsané v této práci a obecně mnoho let využívané v ČR, byla zkušební tělesa hutněna 2x25 údery Marshallovým pěchem. Z této skutečnosti tedy vyplývá dílčí modifikace americké zkušební metody. [165]

##### 4.2.6.1 Postup zkoušky

Prvotním úkolem bylo vytvoření alespoň šesti vzorků pro každý test, polovina se ozkoušela na suchu a zbývající část má být testována po nasycení vodou se zmrazovacím cyklem. Vzorky se rozdělily tak, aby průměrná hodnota mezerovitosti těchto dvou skupin byla přibližně stejná. Pro ty vzorky, které bylo třeba podrobit vakuovému nasycení, cyklu zmrazení a cyklu namáčení v teplé vodě, se vypočetl objem mezer s použitím následující rovnice (14):

$$V_a = \frac{P_a E}{100} \quad (14)$$

$V_a$  – objem vzduchových mezer [ $\text{cm}^3$ ]

$P_a$  – mezerovitost [%]

$E$  – objem vzorku [ $\text{cm}^3$ ]

První skupina vzorků, suchá zkušební tělesa, byla po vyjmutí z formy uložena na rovný podklad při laboratorní teplotě  $20 \pm 5$  °C po dobu  $24 \pm 3$  hodiny. Následně se zkušební tělesa umístila do regulované vzduchové komory při teplotě  $15 \pm 0,5$  °C po dobu 2 hodin  $\pm$  10 minut. Poté se vzorky bezodkladně odzkoušely, jak je popsáno v odstavci 4.2.4.

Druhá skupina vzorků, zkušební tělesa vystavená sycení vodou s následným zmrazovacím cyklem, se umístila do vakuové komory na perforovanou podložku. Nádoba se naplnila destilovanou vodou laboratorní teploty tak, aby její hladina dosahovala alespoň 25 mm nad povrchem zkušebních těles. Ve vakuové komoře se vyvolal absolutní tlak 13-67 kPa na krátkou dobu (přibližně 5 až 10 minut). Po vniknutí atmosférického tlaku se nechaly vzorky na krátkou dobu (přibližně 5 až 10 minut) ještě ponořeny ve vodě. Po nasycení bylo potřeba určit hmotnost zkušebních těles, ze které se stanovil objem vody v pórech po nasycení, dle následujícího vzorce (15):

$$J' = B' - A \quad (15)$$

$J'$  - objem absorbované vody [ $\text{cm}^3$ ]

$B'$  - hmotnost suchého vzorku po částečném vakuovém nasycení [g]

$A$  - hmotnost suchého vzorku [g]

Dále se stanovil stupeň nasycení, srovnáním objemu absorbované vody s objemem vzduchových mezer podle této rovnice (16):

$$S' = \frac{100J'}{V_a} \quad (16)$$

$S'$  - stupeň nasycení [%]

$J'$  - objem absorbované vody [ $\text{cm}^3$ ]

$V_a$  - objem vzduchových mezer [ $\text{cm}^3$ ]

Každé těleso se po nasycení ve vakuové komoře umístilo do plastového sáčku, který obsahoval  $10 \pm 0,5$  ml vody a sáček se poté dokonale utěsnil. Plastové sáčky obsahující vzorek se umístil do mrazničky při teplotě  $-18 \pm 3$  °C po dobu minimálně 16 hodin. Po uplynutí této doby se vzorky vyjmulý z mrazničky a odstranily plastové sáčky. Již samotné zkušební vzorky se bezodkladně poté vložily do lázně obsahující destilovanou vodu při teplotě  $60 \pm 1$  °C po dobu  $24 \pm 1$  hodiny. Vodní hladina opět dosahovala minimálně 25 mm na povrch vzorků. Po  $24 \pm 1$  hodinách ve vodní lázni při uvedené teplotě se vzorky přesunuly do vodní lázně s regulovanou teplotou  $15 \pm 0,5$  °C po dobu 2 hodin  $\pm 10$  minut. Hladina vodní lázně opět musela dosahovat hodnoty minimálně 25 mm nad povrchem vzorků. Bezprostředně po uplynutí této doby se mohlo přistoupit ke zkoušce stanovení pevnosti v příčném tahu dle odstavce 4.2.4. [165]

#### 4.2.7 STANOVENÍ MODULU TUHOSTI

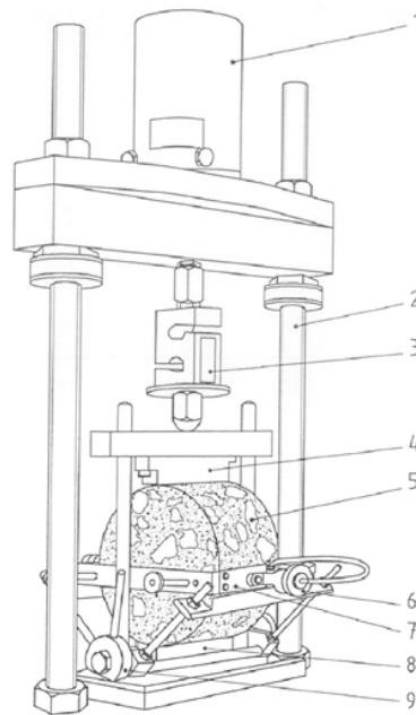
Tuhost asfaltových směsí se měří z důvodu zjištění přibližného deformačního chování asfaltové směsi ve vozovce a tím odhadu chování konstrukce vozovky jako celku. Norma ČSN EN 12697-26 předepisuje možné postupy měření tuhosti v závislosti na dostupném zkušebním zařízení a podmínkách. Při zkoušce se měří amplituda napětí a poměrného přetvoření spolu s fázovým úhlem mezi napětím a poměrným přetvořením. Podstatou zkoušky je deformace tělesa v rozsahu lineárního přetvoření, a to buď vyvozováním harmonického zatěžování, nebo zatěžováním konstantním přetvořením. Podle toho, o jaký typ zatěžování se jedná, norma popisuje zkušební metody, které je možno použít. Modul tuhosti se v případě analýz provedených v rámci této disertační práce zjišťoval zkouškou v příčném tahu na válcových tělesech (IT-CY). Těleso je vystaveno zatěžování závislém na sinusové amplitudě, jež je konstantní v čase. Měří se síla a fázové zpoždění. [166]

##### 4.2.7.1 Postup zkoušky

Zkoušku lze provádět na zařízení, které značujeme jako univerzální teste a z minulosti je známé též jako „Nottingham Asphalt Tester“ (NAT). Technickou normou popisující zvolenou metodu zkoušky opakovaného namáhání v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY) je ČSN EN 12697-26. Obecně se charakteristika tuhosti vztahuje k popisu přetvárného chování asfaltové směsi, a to při různých teplotách a úrovních zatížení. Podstatou zkoušek

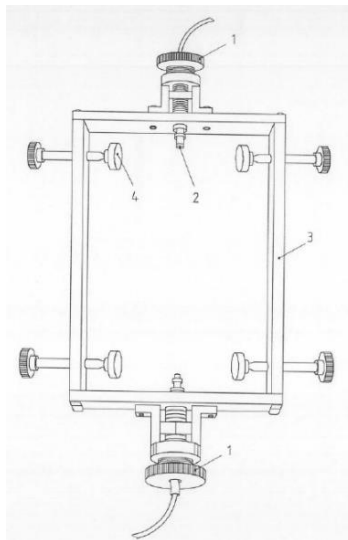
tuhosti je deformace vzorků v rozsahu lineárního přetvoření, a to buď při vyvozování stejného zatěžování, nebo při zatěžování konstantním přetvořením.

Zkouška byla prováděna přístroji s pomocí univerzálního testeru od společnosti Cooper Technology a měření bylo zpracovááno v softwaru ITSM EN. Přístroj byl umístěn v prostředí s řízenou teplotou. Zařízení se skládá z ocelového rámu, pneumatické jednotky, upínacího a měřicího zařízení. Schematický popis částí se nachází na Obr. 57. Součástí upínacího rámečku jsou sondy LVDT. Příklad upínacího rámečku je na Obr. 58. Pro nastavení správné polohy tělesa se používá podpěra (Obr. 59). Temperované těleso se osadí do podpěry a upne se do rámečku. Dále se na těleso nasadí horní čelist a tento celek se zasune pod zatěžovací zařízení. LVDT sondy se nastaví na měřitelný rozsah. Po nastavení se provádí alespoň 10 iniciačních zatěžovacích pulzů tak, aby se nastavilo zařízení na velikost zatížení a dobu pulzu k dosažení horizontální deformace průměru a doby náběhu. Doba náběhu musí být  $124 \pm 4$  ms. Maximum zatížení musí být nastaveno tak, aby bylo dosaženo horizontální deformace 0,005 % průměru tělesa. Po iniciačních pulzech se provede 5 dalších zkušebních pulzů, ze kterých se vypočítá naměřený modul tuhosti pro každý zatěžovací pulz.



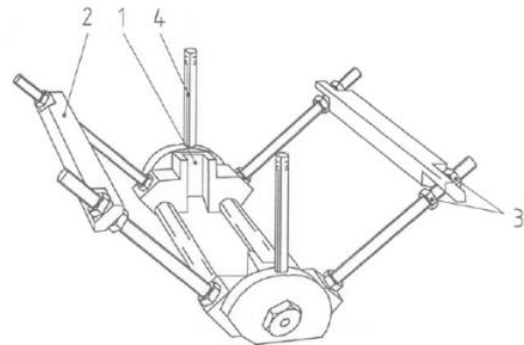
Legenda: 1 - pneumatický zdroj zatížení 6 - LVDT nastavovací šroub 2 - ocelový zatěžovací rám 7 - rámeček s LVDT snímači 3 - snímač síly 8 - spodní čelist 4 - horní čelist 9 - nastavovací podpěra rámečku 5 - zkušební těleso

Obr. 57. Schéma zkušebního zařízení univerzálního testeru s osazením pomůcek a tělesa pro provedení zkoušky IT-CY. [166]



Legenda: 1 - nastavovací šroub, 2 - LVDT snímač, 3 - rámeček s LVDT snímači, 4 - upínací šroub

Obr. 58. Schéma sestavy pro měření vodorovné deformace. [166]



Legenda: 1 - vodící drážka, 2 - podpora LVDT rámečku, 3 - zajišťovací matky, 4 - uvolňovací mechanismus

Obr. 59. Schéma nastavovací podpěry rámečku. [166]

#### 4.2.7.2 Výpočet modulu tuhosti

Na základě měření z 5 zatěžovacích pulzů se vypočítá naměřený modul tuhosti pro každý zatěžovací pulz pomocí následující rovnice (18):

$$S_m = \frac{F \cdot (v + 0,27)}{z \cdot h} \quad (18)$$

$S_m$  – modul tuhosti v [MPa]

$F$  – maximální hodnota použitého svislého zatížení [N]

$z$  – amplituda horizontální deformace [mm]

$h$  – průměrná výška (tloušťka) tělesa [mm]

$v$  – Poissonovo číslo (pro teplotu 15 °C je Poissonovo číslo rovno 0,31)

Naměřený modul tuhosti musí být upraven podle součinitele plochy zatížení 0,60 pomocí vzorce (19) zde uvedeného:

$$S'_m = S_m \cdot (1 - 0,322 \cdot (\log(S_m) - 1,82) \cdot (0,60 - k)) \quad (19)$$

$S'_m$  – upravený modul tuhosti vyjádřený [MPa]

$k$  – naměřený součinitel plochy zatížení

$S_m$  – modul tuhosti [MPa]

#### 4.2.8 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI ŠÍŘENÍ TRHLINY

V rámci dalšího posouzení chování asphaltových směsí byla pozornost zaměřena i na vlastnosti, které se stanovují v oboru nízkých teplot. V této souvislosti byla prováděna zkouška stanovení odolnosti proti šíření trhliny při teplotě 0 °C v souladu s ČSN EN 12697-44. [167] Pro tuto zkoušky jsou použita půlválcová zkušební tělesa s průměrem 100 mm, a to včetně modifikovaného postupu, který je na ČVUT v Praze využíván a popsán. [206]

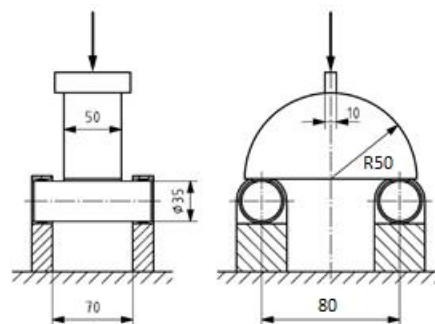


#### 4.2.8.1 Příprava zkušebního tělesa

Zkouška šíření trhlin ohybem byla provedena na zkušebních tělesech, na kterých se nejprve stanovil modul tuhosti. Zkušební tělesa se po změření modulu tuhosti při různých teplotách nechala rozřezat na půlválcová tělesa. V každém půlválcovém tělese se uprostřed vyřízla drážka hluboká 10 mm pomocí kotoučové pilky. U takto připravených těles se změřily rozměry a poté se nechala půlválcová tělesa vytemperovat na zkušební teplotu 0 °C.

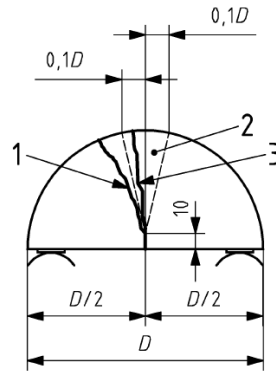
#### 4.2.8.2 Postup a vyhodnocení zkoušky

Na vytemperované těleso se nalepí dva ocelové plíšky v místě krajních podpěr tělesa, tak aby střed každého pásku byl umístěn nad středem každého válcového ložiska. Po umístění tělesa na válcová ložiska se na těleso položí rám se zatěžovacím páskem. Půlválcové těleso s nalepenými plíškami se nechá zatěžovat 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 nebo 2,5 mm/min v souladu s poznatkami prezentovanými v [206]. Postupným zatěžováním se zvyšuje deformace a síla až do okamžiku vzniku první trhliny, kdy dojde k porušení půlválcového tělesa. Při porušení se zaznamená maximální síla ( $F_{max}$ ) a svislý posun ( $\Delta W$ ). Na Obr. 60 je uveden příklad zkušebního rámu a zkušebního tělesa. [167, 168]



Obr. 60. Příklad zkušebního a zkušebního tělesa pro zkoušku šíření trhliny. [167]

Zkouška je vyhodnocena jako platná, pokud se trhlina vyskytne v oblasti  $\pm 15$  mm (= 10 % průměru zkušebního tělesa) od středu zkušebního tělesa. Pokud je trhlina vně této plochy (viz Obr. 61), pak má 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. Zkouška musí být provedena nejméně na čtyřech zkušebních tělesech s platnými výsledky.



Obr. 61. Schéma pro vyhodnocení výsledku zkoušky stanovení odolnosti proti šíření trhliny (1 - neplatná zkouška, 2 - oblast pro platný výsledek zkoušky, 3 - platná zkouška). [167]

Výpočet přetvoření ( $\epsilon_{max}$ ) při maximální síle ( $F_{max}$ ) dle rovnice (20):

$$\epsilon_{max} = \frac{\Delta W}{h} \cdot 100\% \quad (20)$$

$h$  - výška zkušební tělesa [mm]

$\Delta W$  - svislý posun zkušební tělesa [mm]

Výpočet maximálního napětí ( $\sigma_{max}$ ) při porušení dle rovnice (21):

$$\sigma_{max} = \frac{4,263 \cdot F_{max}}{D \cdot t} \quad (21)$$

$\sigma_{max}$  - maximální napětí při porušení [ $N/mm^2$ ]

$D$  - průměr zkušební tělesa [mm]

$t$  - tloušťka zkušební tělesa [mm]

$F_{max}$  - maximální síla zkušební tělesa [N]

Výpočet odolnosti vůči lomu (lomové houževnatosti -  $K_{IC}$ ) zkušební tělesa dle rovnice (22):

$$K_{IC} = \sigma_{max} \cdot f\left(\frac{a_i}{h_i}\right) \quad (22)$$

$K_{IC}$  - odolnost vůči lomu [ $N/mm^{3/2}$ ]

$h$  - výška zkušební tělesa [mm]

$a$  - hloubka drážky zkušební tělesa [mm]

$\sigma_{max}$  - napětí při porušení zkušební tělesa [ $N/mm^2$ ]

$f(a_i/h_i)$  - geometrický faktor zkušební tělesa [-]

Výpočet geometrického faktoru zkušební tělesa dle rovnice (23):

$$f\left(\frac{a_i}{h_i}\right) = -4,9965 + 155,58 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right) - 799,94 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right)^2 + 2141,9 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right)^3 - 2709,1 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right)^4 + 1398,6 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right)^5 \quad (23)$$

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 zkušební tělesa vůči vzniku trhliny. Celkem

byly upraveny dvě rovnice, a to pro výpočet geometrického faktoru zkušební tělesa a pro výpočet odolnosti vůči lomu. Výpočet odolnosti vůči lomu (lomové houževnatosti -  $K_{IC}$ ) zkušební tělesa je uveden v rovnici (24):

$$K_{IC} = \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi a_i} \cdot f\left(\frac{a_i}{h_i}\right) \quad (24)$$

Výpočet geometrického faktoru zkušební tělesa dle rovnice (25):

$$f\left(\frac{a_i}{h_i}\right) = -0,623 + 29,29 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right) - 171,2 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right)^2 + 457,1 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right)^3 - 561,2 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right)^4 + 265,54 \cdot \left(\frac{a_i}{h_i}\right)^5 \quad (25)$$

Rovnice pro výpočet houževnatosti se změnila přidáním odmocniny, která se dříve uvažovala hodnotou 1. Hodnota pod odmocninou závisí na hloubce drážky zkušební tělesa, která v našem případě je 10 mm, prakticky však může při jejím řezání nastat odchylka. Dále výpočet houževnatosti závisí na geometrickém faktoru, který se dle předběžné revidované normy prEN také změnil. U geometrického faktoru se změnila konstanty, které jsou před závorkami. Tyto hodnoty se snížily. Geometrický faktor dle normy ČSN EN pro asfaltové směsi výše uvedené vycházel  $\pm 7,5$ . Geometrický faktor dle návrhu revidované normy vycházel s ustálenou hodnotou 1,23 pro asfaltové směsi výše uvedené. [167, 168]

V roce 2019 pak vešla v platnost již revidovaná norma ČSN EN 12697-44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese.

## 5 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI

V rámci disertační práce byla snaha vytvořit přehled možných zkušebních postupů pro ověření trvanlivosti stability asfaltové směsi. Praktickou část disertační práce, týkající se výsledků experimentální činnosti v průběhu doktorského studia, lze rozdělit na tři hlavní části.

První část experimentální činnosti (kap. 5.1, 5.2, 5.3) byla věnována posouzení parametrů asfaltových směsí s využitím běžně používaných zkušebních postupů v ČR vycházejících z požadavků technických norem. Aby bylo možné prokázat vlastnosti daných asfaltových směsí, případně porovnání navržených směsí mezi sebou, byla provedena řada zkušebních testů. Jednalo se o zjištění fyzikálních (objemová hmotnost zhutněná, maximální objemová hmotnost, mezerovitost) a mechanických (modul tuhosti, odolnost vůči účinkům vody, odolnost proti šíření trhliny) vlastností a stanovení adheze mezi pojivem a kamenivem. V rámci ověření trvanlivosti stability asfaltové směsi byla první část experimentálních aktivit věnována simulaci dlouhodobého stárnutí jak v případě asfaltového pojiva, tak i v případě asfaltové směsi v kombinaci s různými typy příslušných přísad, zejména chemických aditiv. Vlastnosti různých typů asfaltových směsí byly porovnány před a po simulaci dlouhodobého stárnutí vybranými zkušebními postupy.

Druhá část experimentální činnosti (kap. 5.4, 5.5) této disertační práce je zaměřena na možné využití náhrad tradičního jemnozrnného fileru v asfaltové směsi. V rámci této části byla

snaha o porovnání různých typů jemnozrnných materiálů jako alternativ minerálních přísad v asfaltových směsích. Jako tradiční plnivo se nejčastěji využívá vápencový filer vznikající drcením a tříděním běžných vápenců případně dalších hornin. Z hlediska trvale udržitelného rozvoje je snahou omezit čerpání neobnovitelných zdrojů a minimalizovat množství materiálů umístěného na skládkách a je tedy tendence o účelné opětovné využití nebo recyklaci těchto materiálů do nejrůznějších stavebních produktů. Jednou z oblastí potenciálního využití odpadních materiálů přeměněných na druhotné suroviny, je jejich použití v podobě příměsí, přísad či jako samotného plniva pro účely aplikací v silničním stavitelství. Z tohoto důvodu bylo v rámci uplatnění recyklace odpadních materiálů experimentálně zvoleno několik typů těchto materiálů. K porovnání jemnozrnných náhrad tradičního fileru bylo zvoleno několik vhodných zkušebních metod aplikovaných pro vybrané filerické materiály a pomocí nichž bylo možné popsat vlastnosti vybraných vzorků.

Poslední třetí část (kap. 5.6, 5.7) je pak věnována vývoji vhodných laboratorních postupů ověření trvanlivosti stability asfaltové směsi, v níž byla snaha o vymezení rámce normově v ČR dosud nezavedených zkušebních postupů ověření přilnavosti, resp. vodní citlivosti. V této části byla snaha o využití semi-automatických metod, založených na analýze digitálních snímků vzorků kameniva obaleného asfaltovým pojivem, které hodnotí stupeň obalení kameniva pojivem. Tyto metody eliminují subjektivní hodnocení pozorovatelů, z kterého norma ČSN 73 6161, pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem, vychází. Tento přístup nám poskytuje rychlé informace o kvalitě obalení zrn kameniva asfaltem, avšak jen velmi těžko lze zvolený postup vztáhnout ke konkrétním reálným vlivům v konstrukci vozovky. Aspekt subjektivního hodnocení lze eliminovat exaktnějšími a náročnějšími metodami na mikroskopické úrovni. Proto bylo tato část věnována i dalším zkušebním metodám, jako měření povrchové energie pomocí metody stanovení kontaktního úhlu smáčení, či metodiky zkušebního postupu „pull-off“ testu založeného na principu odtrhávání dvou zkušebních těles tvaru válce, které jsou spojeny tenkou vrstvou asfaltového pojiva.

## **5.1 Vliv dlouhodobého stárnutí asfaltových pojiv včetně ověření stability adhezního účinku vybraných chemických přísad u zestárlé asfaltové směsi [143, 170, 171, 172]**

### **5.1.1 Rozbor vstupních materiálů a návrh směsi**

V rámci této studie byl použit nejčastěji silniční asfalt 50/70, který odpovídá výrobní normě ČSN EN 12591. Pro jednotlivé typy zkoušek – zejména provedení přilnavostní zkoušky v souladu s ČSN 73 6161 – bylo zvoleno několik rozdílných typů kameniva, které jsou v České republice běžně používány pro výrobu asfaltových směsí. Jejich specifikace je blíže uvedena v Tab. 17 (detailní popis jednotlivých hornin uvádí kap. 2.2). Na základě bližšího výzkumu pak bylo s ohledem na vlastnosti jednotlivých typů kameniva, tedy na jejich mineralogickém složení, experimentálně zvolen jeden vybraný typ, který byl použit při samotném návrhu asfaltové směsi.

Tab. 17. Základní charakteristika použitých typů kameniva

Lom	Kamenivo	Typ kameniva	Krátký popis horniny
Markovice	Amfibolit	bazická až ultrabazická hornina	Jemnozrnný metamorfovaný minerál, šedé barvy.
Chlum	Znělec	neutrální hornina	Extruzivní vulkanický minerál fosforitového původu, šedé barvy.
Libodřice	Amfibolit	bazická až ultrabazická hornina	Středně zrnitý minerál částečně tvořený pláštvi s lesklými částicemi, šedé barvy.
Litice	Spilit	bazická hornina	Extruzivní metamorfovaný minerál zelenošedé barvy.
Kobylí Hora	Granulit	Kyselá až neutrální hornina	Granulit šedozelené barvy se vzhledem turmalínu a biotitu.
Měrunice	Čedič	bazická až ultrabazická hornina	Šedá až černá vyvřelá hornina.
Zbraslav	Horninová směs (tufit, metatuf, spilit)	bazická hornina	Slabě metamorfovaná, obsahuje převážně pelitické a psamitické horniny, minerály kyselých a alkalických minerálů.
Zbečno	Spilit	bazická hornina	Sedimentární horniny s vyšším obsahem břidlic, jílovců a šedých břidlic.

Pro zajištění trvanlivosti směsi jsou některé typy kameniva více či méně vhodné z hlediska přilnavosti mezi asfaltovým pojivem a kamenivem. Proto byly experimentálně zvoleny vybrané přilnavostní přísady, jež by měly zajistit kvalitní spojení na rozhraní zrno kameniva – pojivo. V tomto případě se tak jedná o aktivní adhezi. Kamenivo a pojivo jsou dva různé materiály, které mají často protikladné vlastnosti povrchů, přilnavost tedy závisí na těsném styku obou těchto materiálů. Pro splnění podmínky aktivní adheze, je zapotřebí zbavit kamenivo veškeré vody, aby bylo dosaženo dokonalého přilnutí s asfaltovým pojivem. Kamenivo je oproti asfaltu často hydrofilní, to znamená, že snadno pohlcuje vodu. Kdežto asfaltové pojivo v porovnání s kamenivem vodu odpuzuje, je hydrofobní. Na základě výše uvedených předpokladů byly použity následující přilnavostní přísady: Impact 8000 v dávkování 0,30 %-hm. pojiva, AdHere LOF 65-00 v dávkování 0,30 %-hm., Zycothermu v dávkování 0,10 %-hm., Wetfix BE dávkovaný v množství 0,3 %-hm. pojiva. Poslední zvolenou přísadou, a zároveň jako inteligentní náhrada tradičního plniva, byl použit mechanicky chemicky aktivovaný mikrofiler pocházející z vápencových odprašků z Palestiny. Jedná se o vysušený kal řezání vápencových mramorů, který byl upraven mletím ve speciálním typu vysokorychlostního mlecího zařízení (desintegrátoru).

Pro posouzení vlivu stárnutí na účinky přilnavostních přísad, z hlediska přilnavosti a vodní citlivosti byla navržena směs ACL 16+ určená do ložní vrstvy konstrukce vozovky. Kamenivo frakcí 8/16, 4/8 a 0/5 pocházelo z lomu Chlum, těžené kamenivo 0/4 pocházelo ze Sojovic. Jednotlivá zastoupení frakcí jsou uvedena v Tab. 18, přičemž požadavky na jednotlivé propady dle ČSN 73 6121 byly splněny. Takto navržena asfaltová směs byla použita pro výrobu zkušebních marshallových těles dle normy ČSN EN 12697-30. [28, 169]

Tab. 18. Návrh směsi ACL 16+ dle požadavků ČSN 73 6121.

Návrh směsi	Množství [%]	Obsah v asfaltové směsi [%]
HDK Chlum 8/16	37,0	35,08
HDK Chlum 4/8	16,0	15,17
SDK Chlum 0/5	30,0	28,44
STK Sojovice 0/4	10,0	9,48
Filer Velké Hydčice	7,0	6,64
Asfaltové pojivo 50/70	-	<b>5,20</b>

### 5.1.2 Simulace dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi

V této studii tak byly pro porovnání účinnosti vybraných přílnavostních přísad použity tři typy dlouhodobého laboratorního stárnutí, vycházející z výše uvedených norem, které zahrnují následující podmínky:

- stárnutí zkušebních těles při teplotě 85 °C podobu 5 dní;
- uložení volně ložené asfaltové směsi při teplotě 85 °C po dobu 9 dní;
- stárnutí zkušebních těles při teplotě 85 °C a tlaku 2,1 MPa v přístroji PAV po dobu 20 hodin.

Poslední zvolená metoda pro simulování dlouhodobého stárnutí asfaltových směsí vychází z platné české normy ČSN EN 14769 využívající metodiku pro dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva v přístroji PAV. Oproti výše uvedeným metodám využívá tlaku, kterým jsou zkušební tělesa po celou dobu simulace stárnutí vystavena.

Jeden z hlavních bodů zkoumaných v této studii byl zaměřen právě na ověření dlouhodobého účinku vybraných přílnavostních přísad v asfaltové směsi a jak na ně působí vybraná metoda dlouhodobého laboratorního stárnutí. Pro ověření účinku přílnavostních přísad byla současně vyrobena série nezestárlé asfaltové směsi, aby bylo možné provést porovnání.

Dále byl zkoumán vliv takto vysoké teploty, na soudržnost zkušebních těles a změnu objemové hmotnosti či pevnostních charakteristik, po procesu stárnutí. Jedna sada zkušebních těles byla pro jednoduché porovnání volně uložena do temperační komory, u další sady těles byl za pomoci obalu z PVC a stahovacích pásek vytvořen ochranný límec, zabraňující deformaci vlivem teploty. V případě poslední sady zkušebních těles byla vrstva PVC obalu nahrazena odolnou kovovou sítkou, která měla lépe simulovat reálné podmínky, tedy přístup vzduchu v temperační komoře nejen z horní a spodní části tělesa, ale také ze stran, aby docházelo k rovnoměrnému stárnutí zkušebních těles.

### 5.1.3 Vyhodnocení zkoušky přílnavosti mezi pojivem a kamenivem pro různé typy kameniva

Zkouška stanovení přílnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu dle ČSN 73 6161 byla nejprve stanovena na nezestárlém pojivu. Při této zkoušce bylo použito 8 rozdílných typů kameniva, která se v ČR běžně používají, přičemž každý typ je specifický svým mineralogickým složením. Pro ověření stability přílnavostních přísad byly tyto varianty pojiv vystaveny účinkům stárnutí při teplotě 163 °C po dobu 3x5 hodin simulující naopak dlouhodobé stárnutí pojiva (metoda TFOT dle ČSN EN 12607-2).





Tab. 19. Porovnání stanovení adheze mezi pojivem a kamenivem podle ČSN 73 6161 pro nezestárlé pojivo

Kamenivo	50/70 bez přísady			50/70 + 0,3% AdHere 65-00 LOF			50/70 + 0,6% AdHere			50/70 + 0,3% Wetfix		
Markovice	B-C	85%	Vyhovující	B	90%	Velmi dobrá	B-	87%	Vyhovující	B-	87%	Vyhovující
Litice	B	90%	Velmi dobrá	B-C	85%	Vyhovující	C-D	75%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující
Libodřice	C	80%	Vyhovující	A-	97%	Výborná	C+	83%	Vyhovující	B	90%	Velmi dobrá
Chlum	D+	73%	Nevyhovující	C	80%	Vyhovující	A-B	95%	Velmi dobrá	C	80%	Vyhovující
Kobylí Hora	E	50%	Nevyhovující	C	80%	Vyhovující	C-D	75%	Vyhovující	C	80%	Vyhovující
Měrunice	C-	77%	Vyhovující	B-	87%	Vyhovující	A-B	95%	Velmi dobrá	B-C	85%	Vyhovující
Zbraslav	D	70%	Nevyhovující	B-	87%	Vyhovující	C+	83%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující
Zbečno	C	80%	Vyhovující	C+	83%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující
Kamenivo	50/70 + 0,3% Impact			50/70 + 0,6% Impact			50/70 + 0,1% Zycotherm					
Markovice	A-B	95%	Velmi dobrá	B-	87%	Vyhovující	B+	93%	Velmi dobrá			
Litice	B-	87%	Vyhovující	B-	87%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující			
Libodřice	A-	97%	Výborná	C+	83%	Vyhovující	A-B	95%	Velmi dobrá			
Chlum	C-	77%	Vyhovující	C	80%	Vyhovující	C-	77%	Vyhovující			
Kobylí Hora	C	80%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující	C	80%	Vyhovující			
Měrunice	A-B	95%	Velmi dobrá	B	90%	Velmi dobrá	B+	93%	Velmi dobrá			
Zbraslav	B-C	85%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující	C+	83%	Vyhovující			
Zbečno	B-C	85%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující			

Tab. 19 shrnuje výsledky nezestárlých variant asfaltových pojiv s vybranou přilnavostní přísadou. Hodnocení výsledků jako nevyhovující bylo dosaženo v případě varianty pojivo bez přísady a kamenivo z lokalit Chlum (znělec) a Zbraslav (horninová směs tufitu, metatufu a spilitu). Nejhorších výsledků dosáhlo kamenivo z kamenolomu Kobylí hora (granulit), kdy po provedení zkoušky přilnavosti zůstalo pojivem obaleno pouze 50 % kameniva. Kamenivo z lomů Markovice, Libodřice, Měrunice a Zbečno dosáhlo dle výsledků vyhovujícího hodnocení, procento obalení zrn kameniva se pohybovalo kolem 80 %. Nejlepší výsledek byl zaznamenán při použití kameniva z lomu Litic (spilit), v tomto případě došlo k obnažení povrchu zrn kameniva v cca 10 %. Kamenivo má tedy velmi dobrou afinitu k asfaltovému pojivu. Zlepšení/zhoršení přilnavosti asfaltu ke kamenivu je závislé na typu použitého kameniva (na mineralogickém složení) a k němu vybrané přilnavostní přísadě, tedy na zvolené kombinaci těchto dvou složek.

Tab. 20. Porovnání stanovení adheze mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 pro zestárlé asfaltové pojivo

Kamenivo	50/70 bez přísady			50/70 + 0,3% AdHere 65-00 LOF			50/70 + 0,6% AdHere			50/70 + 0,3% Wetfix		
Markovice	B	90%	Velmi dobrá	A-B	95%	Velmi dobrá	B+	93%	Velmi dobrá	A-	97%	Výborná
Litice	C-	77%	Vyhovující	C	80%	Vyhovující	C	80%	Vyhovující	B	90%	Velmi dobrá
Libodřice	B-C	85%	Vyhovující	B-	87%	Vyhovující	B-	87%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující
Chlum	A-	97%	Výborná	A-B	95%	Velmi dobrá	B	90%	Velmi dobrá	B+	93%	Velmi dobrá
Kobylí Hora	C-	77%	Vyhovující	C+	83%	Vyhovující	C	80%	Vyhovující	A-B	95%	Velmi dobrá
Měrunice	B	90%	Velmi dobrá	B-	87%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující	B+	93%	Velmi dobrá
Zbraslav	B-C	85%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující	C+	83%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující
Zbečno	C	80%	Vyhovující	B	90%	Velmi dobrá	B-C	85%	Vyhovující	B-	87%	Vyhovující
Kamenivo	50/70 + 0,3% Impact			50/70 + 0,6% Impact			50/70 + 0,1% Zycotherm					
Markovice	A-B	95%	Velmi dobrá	B+	93%	Velmi dobrá	B	90%	Velmi dobrá			
Litice	B	90%	Velmi dobrá	A-	97%	Výborná	B	90%	Velmi dobrá			
Libodřice	B	90%	Velmi dobrá	A-B	95%	Velmi dobrá	C+	83%	Vyhovující			
Chlum	C	80%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující	C	80%	Vyhovující			
Kobylí Hora	C-D	75%	Vyhovující	C+	83%	Vyhovující	B-C	85%	Vyhovující			
Měrunice	B	90%	Velmi dobrá	B	90%	Velmi dobrá	B	90%	Velmi dobrá			
Zbraslav	C+	83%	Vyhovující	B	90%	Velmi dobrá	B-C	85%	Vyhovující			
Zbečno	B-	87%	Vyhovující	B-	87%	Vyhovující	B	90%	Velmi dobrá			

Pokud se zaměříme na porovnání zestárlého pojiva, výsledky jsou uspořádány v logickém pořadí, jako tomu bylo v předchozím případě, Tab. 20. Stárnutí asfaltového pojiva metodou

3xTFOT poněkud paradoxně vede ke zlepšení přilnavosti, které je patrné i u referenčního pojiva, bez přidání přilnavostní přísady. Jako nejstabilnější přísada se u této metody jeví chemické aditivum AdHere 65-00 LOF a vybraná minerální přísada v podobě hydratovaného vápna, obecně lze usuzovat na vyšší stálost minerálních přísad v porovnání s tekutými chemickými přísadami, jež se spíše vyznačují teplotní nestabilitou při vyšších teplotách, kdy dochází ke změně jejich vlastností nebo k postupnému vytěkání některých složek.

#### 5.1.4 Vyhodnocení zkoušky stanovení vodní citlivosti

V rámci této studie byla vyrobena jedna série zkušebních těles s referenčním pojivem a dále 6 variant asfaltové směsi s přísadami pro zlepšení přilnavosti. Na všech variantách směsi ACL16 byly odzkoušeny vybrané metody laboratorního stárnutí a pro porovnání byla též vyrobena série zkušebních těles nezestárlých. Pomocí jednoduchého porovnání pevností v příčném tahu se pak porovnával účinek jednotlivých variant zlepšení přilnavosti, a to jak před samotným stárnutím, tak po zvolených simulacích stárnutí zkušebních těles nebo volně ložené vrstvy.

##### 5.1.4.1 Porovnání pevností v příčném tahu

V následujících tabulkách (Tab. 21 a Tab. 22) jsou porovnány pevnosti v příčném tahu zkušebních těles ponechaných na vzduchu a to jak, pro varianty nezestárlé asfaltové směsi, tak pro vybrané varianty laboratorního stárnutí.

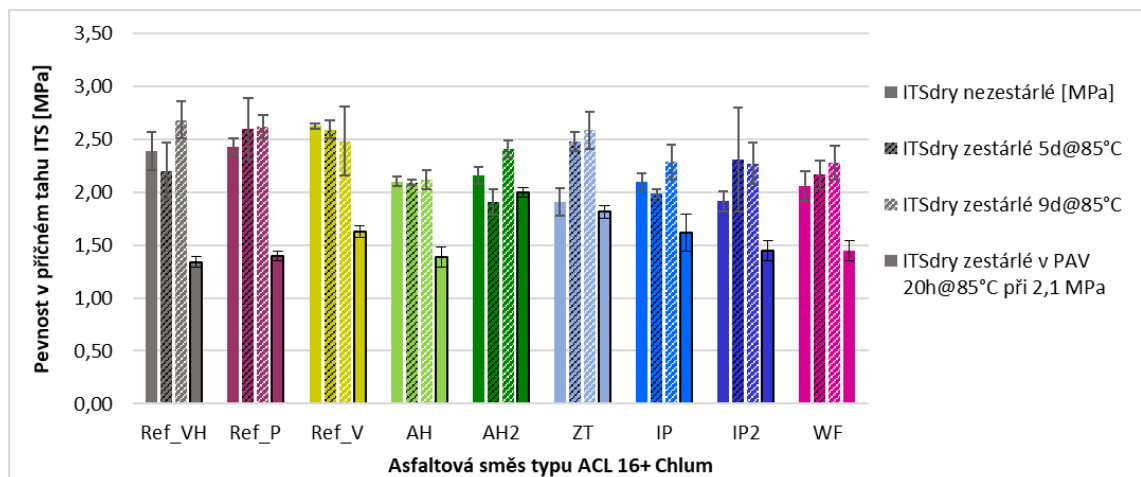
Tab. 21. Posuzované varianty asfaltových směsí ACL 16+ (nezestárlé ITS, zestárlé ITS 5d@85°C)

Asfaltová směs	Označení	ITSdry nezestárlé [MPa]	Směrodatná odchylka [-]	ITSdry zestárlé 5d@85°C [MPa]	Směrodatná odchylka [-]
ACL 16+ Chlum_Ref_filer Velké Hydčice	Ref_VH	2,39	0,18	2,20	0,27
ACL16+ Chlum_Ref_mikrofiler Palestina	Ref_P	2,43	0,08	2,60	0,29
ACL 16+ Chlum_0,3% vápenný hydrát	Ref_V	2,63	0,02	2,59	0,08
ACL 16+ Chlum_0,3 % AdHere 65-00 LOF	AH	2,10	0,05	2,09	0,03
ACL16+ Chlum_0,6 % Ad-Here 65-00 LOF	AH2	2,15	0,08	1,91	0,12
ACL 16+ Chlum_0,1 % Zycotherm	ZT	1,91	0,13	2,48	0,09
ACL 16+ Chlum_0,3 % ImPact 8000	IP	2,09	0,09	1,99	0,04
ACL16+ Chlum_0,6 % ImPact 8000	IP2	1,91	0,10	2,31	0,49
ACL 16+ Chlum_0,3 % WetFix	WF	2,06	0,14	2,16	0,13

Tab. 22. Posuzované varianty asfaltových směsí ACL 16+ (zestárlé ITS 9d@85°C, zestárlé ITS 20h@85°C při 2,1 MPa)

Asfaltová směs	Označení	ITSdry zestárlé 9d@85°C [MPa]	Směrodatná odchylka [-]	ITSdry zestárlé v PAV 20h@85°C při 2,1 MPa [MPa]	Směrodatná odchylka [-]
ACL 16+ Chlum_Ref_filer Velké Hydčice	Ref_VH	2,68	0,17	1,34	0,05
ACL16+ Chlum_Ref_mikrofiler Palestina	Ref_P	2,62	0,11	1,40	0,05
ACL 16+ Chlum_0,3 % vápenný hydrát	Ref_V	2,48	0,32	1,63	0,06
ACL 16+ Chlum_0,3 % AdHere 65-00 LOF	AH	2,12	0,09	1,38	0,10
ACL16+ Chlum_0,6 % Ad-Here 65-00 LOF	AH2	2,40	0,08	2,00	0,05
ACL 16+ Chlum_0,1 % Zycotherm	ZT	2,58	0,17	1,81	0,06
ACL 16+ Chlum_0,3 % ImPact 8000	IP	2,28	0,17	1,62	0,18
ACL16+ Chlum_0,6 % ImPact 8000	IP2	2,27	0,20	1,44	0,10
ACL 16+ Chlum_0,3 % WetFix	WF	2,27	0,16	1,44	0,10

Graf na Obr. 62 porovnává pevnosti v příčném tahu vyrobených zkušebních těles ponechaných na vzduchu při laboratorní teplotě a to jak, pro varianty nezestárlé asfaltové směsi, tak pro tři metody laboratorního stárnutí, které byly pro ověření dlouhodobého účinku přísad použity. První sloupec grafu jednotlivých variant znázorňuje směsi, na které nepůsobil vliv stárnutí. Referenční směs dosáhla pevnosti v příčném tahu 2,39 MPa. Varianta směsi za použití mechanicko-chemicky aktivovaného mikrofileru dosáhla téměř stejného výsledku jako směs referenční, vyšší pevnosti pak dosáhlo použití hydratovaného vápna 2,63 MPa; je tedy patrný pozitivní vliv minerálních přísad. Oproti tomu použitím chemických přínavostních přísad dochází ke snížení pevnost v příčném tahu zkušebních těles v porovnání se směsí referenční. To ukazují výsledky naměřených pevností při použití přísady Zycotherm a Impact, které vedlo ke snížení pevnosti zhruba o 0,5 MPa.



Obr. 62. Porovnání pevností v příčném tahu s ohledem k použité metodě stárnutí.

Druhé sloupce (černě šrafované) znázorňují pevnosti v příčném tahu zkušebních těles, u kterých byla použita první metoda laboratorního stárnutí. Tato metoda spočívala ve výrobě zkušebních Marshallových těles, která jsou poté přesunuta do teplotní komory s nucenou cirkulací při teplotě 85 °C po dobu 5 dnů. Z výsledků je patrné, že v případě referenční směsi a

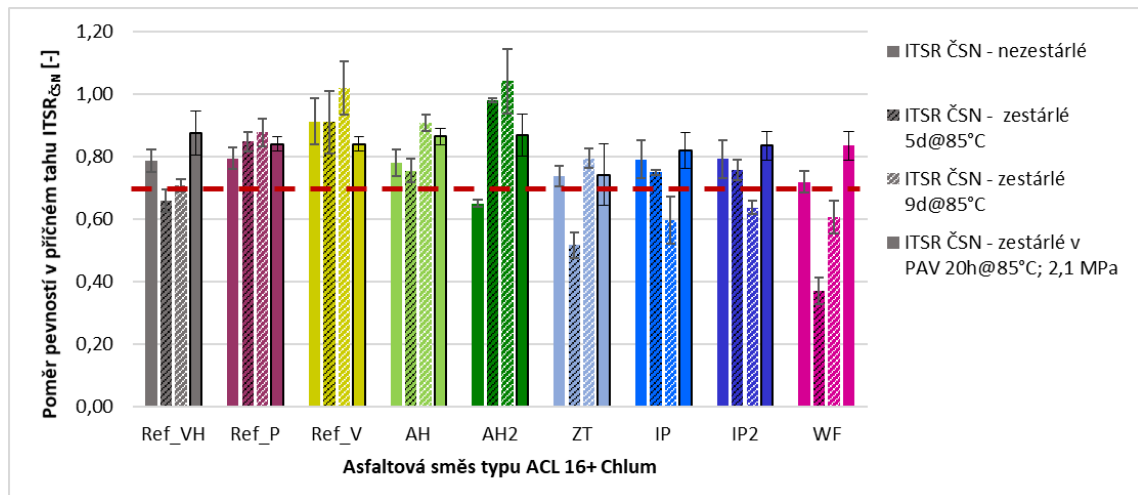
směsi za použití vyššího dávkování přísady AdHere došlo ke snížení pevnosti oproti směsi nezestárlé, u zbylých směsí se pevnosti v příčném tahu naopak zvýšily, což byl jeden z předpokladů. Při vzájemném porovnání výsledků zestárlých zkušebních těles varianty s přísadou Zycotherm (o 0,28 MPa) a mikrofilerem (o 0,40 MPa), shodně i hydratovaným vápnem nabývají vyšších hodnot oproti směsi referenční. Ostatní hodnoty jsou v průměru podobné, popřípadě nižší.

Třetí sloupce (bílé šrafy) znázorňují výsledky druhé metody laboratorního stárnutí, kdy vyrobená asfaltová směs byla rovnoměrně rozprostřena na předem připravenou podložku, kde směs stárla v temperační komoře s nucenou cirkulací při teplotě 85 °C po dobu 9 dnů. Po uplynutí této doby byla ze směsi vyrobena zkušební tělesa na Marshallově pěchu 2x25 údery, na kterých se následně stanovila odolnost vůči účinkům vody. Z této série výsledků je patrné, že referenční směs dosáhla nejvyšších hodnot pevností v příčném tahu 2,68 MPa, směsi s použitím mikrofileru a hydratovaného vápna a přísady Zycotherm dosahují téměř shodných výsledků. V případě ostatních směsí byly výsledky pevností v příčném tahu oproti směsi referenční nižší. Při porovnání variant mezi sebou je zřejmé, že stárnutí volně ložené vrstvy má vliv na následné hutnění zkušebních těles a jejich pevnosti v porovnání s nezestárlými zkušebními tělesy, kdy nabývají v průměru o 10 % vyšších hodnot (v případě Zycotherm cca o 35 %).

Poslední sloupce porovnávají pevnosti těles vystavených účinkům vyššího tlaku v nádobě PAV po dobu 20 hodin při teplotě 85 °C. V tomto případě jsou tělesa vystavena nejméně příznivým podmínkám, které mají vliv na snížení pevnosti v příčném tahu. V případě použití minerálních přísad vede tato metoda k poklesu pevnosti oproti ostatním metodám simulace stárnutí o 35 % až 45 %, u chemických přísad je snížení v průměru o 25 % až 35 %, ovšem použití přísady AdHere ve vyšším dávkování dosáhlo nejvyšší pevnosti v příčném tahu.

#### 5.1.4.2 *Vyhodnocení odolnosti zkušebních těles vůči účinkům vody dle ČSN EN 12697-12*

Porovnání vlivu přílnavostních přísad na odolnost asfaltové směsi vůči negativním účinkům vody znázorňuje graf na Obr. 63 (viz podrobnosti Tab. 23, Tab. 24, Tab. 25, Tab. 26) pro nezestárlá i zestárlá zkušební tělesa odlišnými způsoby. Na výsledky bylo pohlíženo hned z několika hledisek. První otázkou bylo, jaký vliv mají použité přílnavostní přísady z hlediska odolnosti vůči negativnímu působení vody, zda poměr pevností v příčném tahu zlepšují, či nikoliv. Dále se posuzovalo, zda poměry pevností v příčném tahu vyhoví z hlediska minimální požadované hodnoty pro ITSR, kterou předepisuje ČSN 73 6121 pro asfaltové směsi ACL16+ (minimálně 70 %).



Obr. 63. Vyhodnocení zkoušky vodní citlivosti dle ČSN EN 12697-12.

Při porovnání poměru pevností v příčném tahu zkušebních těles nezestárlých lze konstatovat, že tělesa vystavená nepříznivému účinku vody v případě téměř všech variant dosáhla na hranici  $ITSR = 0,70$  (dle ČSN 73 6121), vyjma vyššího dávkování přísady AdHere 65-00 LOF EU, u které došlo k nelogickému snížení  $ITSR$  na hodnotu 0,65. Z použitých přílnavostních přísad není patrný vliv na zlepšení vodní citlivosti v porovnání se směsí referenční. Z výsledků  $ITSR$  těles vystavených účinkům stárnutí po dobu 5 dnů lze konstatovat příznivý účinek přísady AdHere ve vyšším dávkování (0,98), ale také použití obou typů minerálních přísad, v případě mikrofileru 0,85, a v případě hydratovaného vápna 0,91. Nejhorších výsledků dosažených poměrů pevnosti v příčném tahu dosáhla směs s přísadou Wetfix, u níž byl stanoven poměr pevností 0,37 dle ČSN EN 12 697-12 a dle amerického zkušebního postupu AASHTO T-283 potom 0,29, což je téměř o padesát procent nižší než u směsi referenční. Uvedený výsledek je přinejmenším zážející a může poukazovat na omezení, která tato zkušební metoda má. Varianta směsi s přísadou Zycotherm dosáhla oproti Wetfix lepších výsledků (0,52 a 0,40), nicméně i přesto tyto směsi nedosahují požadované minimální hranice  $ITSR$ . Z hodnot  $ITSR$ , stanovených na zkušebních tělesech vyrobených ze zestárlé volně ložené směsi, plynou následující závěry. Při porovnání s referenční směsí, kde dosahuje poměr pevností v příčném tahu hodnoty 0,70, použití přísady Impact 8000 v dávkování 0,3 i 0,6 % a Wetfix nevedly ke zlepšení přílnavosti, poměr pevnosti v příčném tahu dosahuje v průměru hodnoty 0,60. Ke zlepšení došlo v případě mikrofileru a přísady AdHere v dávkování 0,3 %, poměr pevností v těchto případech dosahuje zhruba hodnoty 0,90. Vyšší dávkování přísady AdHere vedlo k dalšímu zlepšení (1,04) shodně jako u hydratovaného vápna (1,02). Poslední sloupce grafu na obrázku 5 znázorňují  $ITSR$  těles vystavených účinkům tlaku a teploty v PAV, tedy nejméně příznivým podmínkám. Z výsledků je patrné, že v průměru nabývají poměry pevností v příčném tahu velmi podobných hodnot, u všech směsí byl splněn požadavek na minimální hranici, a to i přes výrazné snížení pevnosti v příčném tahu.



Tab. 23. Výsledky vodní citlivosti - nezestárlé – varianty ACL 16 +.

Směs	Označení směsí	ITSR <sub>ČSN EN</sub>	Směrodatná odchylka	ITSR <sub>AASHTO</sub>	Směrodatná odchylka	Objemová hmotnost	Směrodatná odchylka
ACL 16+ Chlum_Ref_filer Velké Hydčice	Ref_VH	0,79	0,04	0,79	0,02	2,07	0,02
ACL16+ Chlum_Ref_mikrofiler Palestina	Ref_P	0,79	0,03	0,80	0,04	2,06	0,03
ACL 16+ Chlum_0,3% AdHere 65-00 LOF	AH	0,78	0,04	0,71	0,02	1,97	0,02
ACL16+ Chlum_0,6% Ad-Here 65-00 LOF	AH2	0,65	0,01	0,71	0,02	2,02	0,01
ACL 16+ Chlum_0,1% Zycotherm	ZT	0,74	0,03	0,80	0,03	2,03	0,03
ACL 16+ Chlum_0,3% ImPact 8000	IP	0,79	0,06	0,71	0,02	2,01	0,02
ACL16+ Chlum_0,6% ImPact 8000	IP2	0,79	0,06	0,74	0,03	2,03	0,02
ACL 16+ Chlum_0,3% WetFix	WF	0,72	0,04	0,78	0,04	2,02	0,01
ACL 16+ Chlum_0,3% vápenný hydrát	V	0,91	0,07	0,80	0,01	2,10	0,01

Tab. 24. Výsledky vodní citlivosti - zestárlá MT 5d@85°C – varianty ACL 16 +.

Směs	Označení směsí	ITSR <sub>ČSN EN</sub>	Směrodatná odchylka	ITSR <sub>AASHTO</sub>	Směrodatná odchylka	Objemová hmotnost	Směrodatná odchylka
ACL 16+ Chlum_Ref_filer Velké Hydčice	Ref_VH	0,66	0,04	0,54	0,07	2,00	0,03
ACL16+ Chlum_Ref_mikrofiler Palestina	Ref_P	0,85	0,03	0,70	0,10	2,07	0,03
ACL 16+ Chlum_0,3% AdHere 65-00 LOF	AH	0,76	0,04	0,63	0,04	2,05	0,02
ACL16+ Chlum_0,6% Ad-Here 65-00 LOF	AH2	0,98	0,01	0,98	0,05	2,05	0,02
ACL 16+ Chlum_0,1% Zycotherm	ZT	0,52	0,04	0,40	0,03	2,03	0,02
ACL 16+ Chlum_0,3% ImPact 8000	IP	0,75	0,01	0,53	0,02	2,03	0,02
ACL16+ Chlum_0,6% ImPact 8000	IP2	0,76	0,03	0,63	0,04	1,99	0,04
ACL 16+ Chlum_0,3% WetFix	WF	0,37	0,04	0,29	0,03	1,99	0,03
ACL 16+ Chlum_0,3% vápenný hydrát	V	0,91	0,10	0,91	0,07	2,09	0,02

Tab. 25. Výsledky vodní citlivosti - zestárlá volně ložená směs 9d@85°C – varianty ACL 16 +.

Směs	Označení směsí	ITSR <sub>ČSN EN</sub>	Směrodatná odchylka	ITSR <sub>AASHTO</sub>	Směrodatná odchylka	Objemová hmotnost	Směrodatná odchylka
ACL 16+ Chlum_Ref_filer Velké Hydčice	Ref_VH	0,71	0,02	0,68	0,05	2,04	0,01
ACL16+ Chlum_Ref_mikrofiler Palestina	Ref_P	0,88	0,04	0,87	0,05	2,03	0,01
ACL 16+ Chlum_0,3% AdHere 65-00 LOF	AH	0,91	0,03	0,90	0,04	2,02	0,01
ACL16+ Chlum_0,6% Ad-Here 65-00 LOF	AH2	1,04	0,10	0,94	0,05	2,03	0,02
ACL 16+ Chlum_0,1% Zycotherm	ZT	0,79	0,03	0,76	0,07	2,04	0,01
ACL 16+ Chlum_0,3% ImPact 8000	IP	0,60	0,08	0,61	0,05	1,97	0,03
ACL16+ Chlum_0,6% ImPact 8000	IP2	0,64	0,02	0,60	0,02	2,00	0,02
ACL 16+ Chlum_0,3% WetFix	WF	0,61	0,05	0,59	0,01	1,98	0,02
ACL 16+ Chlum_0,3% vápenný hydrát	V	1,02	0,08	0,97	0,02	2,06	0,01

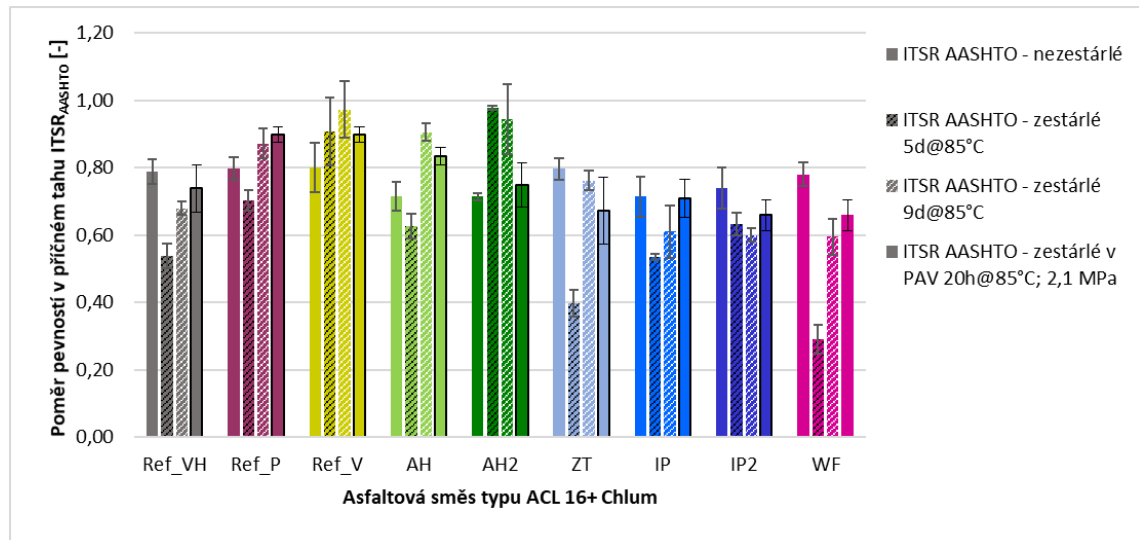
Tab. 26. Výsledky vodní citlivosti - zestárlá MT 5h@85°C v PAV při 2,1 MPa – varianty ACL 16 +.

Asfaltová směs	Označení	ITSR <sub>ČSN</sub>	Směrodatná odchylka	ITSR <sub>AASHTO</sub>	Směrodatná odchylka	Objemová hmotnost [g.cm <sup>-3</sup> ]	Směrodatná odchylka
		[-]	ITSR <sub>ČSN</sub> [-]	ITSR <sub>AASHTO</sub> [-]	ITSR <sub>AASHTO</sub> [-]		[-]
ACL 16+ Chlum_Ref_filer Velké Hydčice	Ref_VH	0,87	0,07	0,74	0,06	1,91	0,01
ACL16+ Chlum_Ref_mikrofiler Palestina	Ref_P	0,84	0,02	0,90	0,07	2,04	0,03
ACL 16+ Chlum_0,3% vápenný hydrát	Ref_V	0,84	0,02	0,90	0,07	2,04	0,03
ACL 16+ Chlum_0,3% AdHere 65-00 LOF	AH	0,87	0,03	0,83	0,11	1,92	0,03
ACL16+ Chlum_0,6% Ad-Here 65-00 LOF	AH2	0,87	0,07	0,75	0,05	2,09	0,01
ACL 16+ Chlum_0,1% Zycotherm	ZT	0,74	0,10	0,67	0,06	1,99	0,02
ACL 16+ Chlum_0,3% ImPact 8000	IP	0,82	0,06	0,71	0,04	2,00	0,03
ACL16+ Chlum_0,6% ImPact 8000	IP2	0,84	0,05	0,66	0,07	2,05	0,02
ACL 16+ Chlum_0,3% WetFix	WF	0,84	0,05	0,66	0,07	2,05	0,02



#### 5.1.4.3 Vyhodnocení odolnosti zkušebních těles vůči účinkům vody včetně varianty s jedním zmrazovacím cyklem dle AASHTO T-283

V případě hodnocení zkušebních těles vystavených nepříznivému účinku vody s jedním zmrazovacím cyklem, nestanovuje americká norma AASHTO T 283-03 ani norma ČSN 73 6121 požadavek pro minimální hranici ITSR.



Obr. 64. Vyhodnocení zkoušky vodní citlivosti s jedním zmrazovacím cyklem dle AASHTO T-283.

Porovnání dosažených hodnot poměrů pevností v příčném tahu při vystavení zkušebních těles zmrazovacímu cyklu podle americké normy AASHTO T-283 je patrné z grafu na Obr. 64 (viz podrobnosti Tab. 23, Tab. 24, Tab. 25, Tab. 26). V případě nezestárlých zkušebních těles dosahují směsi referenční i varianty se zlepšením přilnavosti velmi podobných hodnot a vykazují výsledky ITSR nad 70 %. Použitím metody stárnutí zkušebních těles dosahuje poměr pevností u směsi s vápenným hydrátem 0,91, shodně je tomu tak i u vyššího dávkování přísady AdHere 0,98. Naopak nejhorších výsledků, nejméně vhodné z hlediska vodní citlivosti se jeví použití přísady Wetfix a Zycotherm, které dosahují ITSR méně než 0,40. Naopak při použití metody stárnutí volně ložené vrstvy dosahují tyto dvě přísady daleko lepších hodnot ITSR, v případě Wetfix 0,59 a Zycotherm 0,76. Zlepšení vodní citlivosti však nejlépe interpretuje použití přísad AdHere a vápenným hydrátem, u kterých je hranice vyšší než 0,90. Metoda PAV oproti předešlé metodě poukazuje na vyšší hodnoty ITSR ve všech případech. Nejlepších výsledků oproti směsi referenční je dosaženo v případě použití minerálních přísad, u kterých došlo ke zvýšení poměru ITSR. U směsi za použití chemických přísad nedošlo ke snížení ITSR oproti směsi referenční.

#### 5.1.5 Porovnání rozdílných uložení zkušebních těles v klimatizační komoře při zvýšené teplotě

V rámci této studie byl zkoumán také vliv zvýšené teploty, resp. teploty 85 °C, při uložení zkušebních těles do klimatizační komory během procesu stárnutí po dobu 5 dnů. Za účelem porovnání byly vyrobeny tři sady zkušebních těles, přičemž první sada zkušebních těles byla volně uložena do klimatizační komory, u další sady těles byl za pomoci obalu z PVC a stahovacích pásek vytvořen ochranný límec, zabraňující deformaci vlivem teploty. V případě poslední sady zkušebních těles byla vrstva PVC obalu nahrazena odolnou ocelovou sítí, která měla lépe

simulovat reálné podmínky, tedy přístup vzduchu v klimatizační komoře nejen z horní a spodní části tělesa, ale také ze stran, aby docházelo k rovnoměrnému stárnutí zkušebních těles. Oba typy obalení zkušebních těles jsou zdokumentována na Obr. 65 a Obr. 66.



Obr. 65. Zkušební těleso s ochrannou ocelovou sítkou.



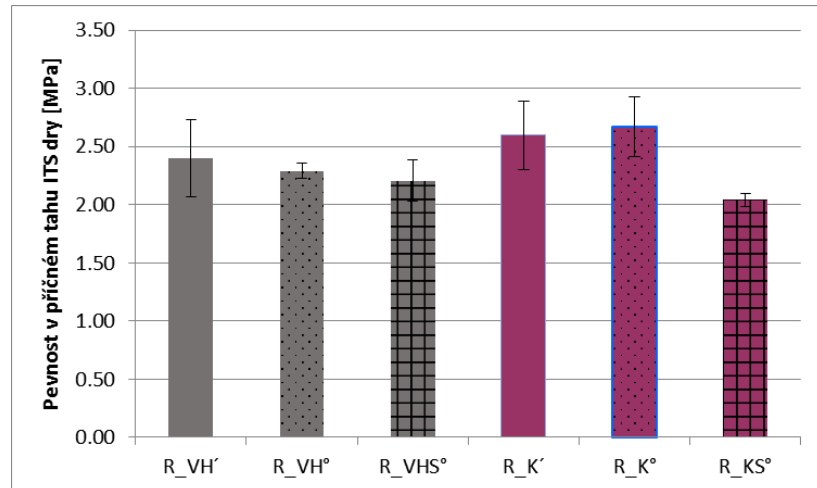
Obr. 66. Zkušební těleso s obalem z PVC.

Na těchto zkušebních tělesech tak byl sledován vliv na změnu objemové hmotnosti a pro jednoduché porovnání byla u všech těles stanovena pevnost v příčném tahu. Tyto výsledky shrnuje Tab. 27.

Tab. 27. Porovnání odlišně uložených zkušebních těles do temperační komory 5d@85 °C.

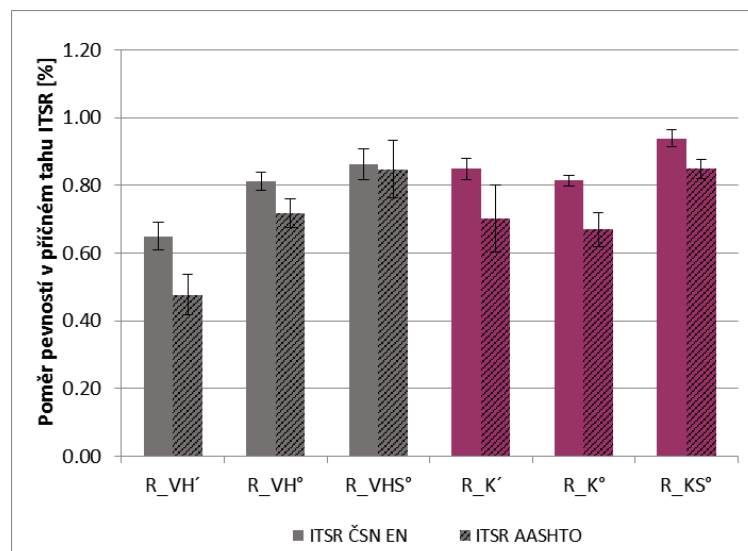
Typ směsi ACL 16+ Chlum	Označení směsí v grafu	ITS <sub>dry</sub>	Směrodatná odchylka	ITSR ČSN EN	Směrodatná odchylka	ITSR AASHTO	Směrodatná odchylka
filer Velké Hydčice	R_VH'	2.40	0.33	0.65	0.04	0.48	0.06
filer Velké Hydčice_PVC	R_VH°	2.29	0.07	0.81	0.03	0.72	0.04
filer Velké Hydčice_ocelová síťka	R_VHS°	2.21	0.18	0.86	0.05	0.85	0.08
mikrofiler Palestina	R_K'	2.60	0.29	0.85	0.03	0.70	0.10
mikrofiler Palestina_PVC	R_K°	2.67	0.26	0.81	0.02	0.67	0.05
mikrofiler Palestina_ocelová síťka	R_KS°	2.04	0.05	0.94	0.03	0.85	0.03

Pokud se zaměříme na změnu objemové hmotnosti při zvýšené teplotě stárnutí zkušebních těles, je zřejmé, že bez použití ochranného límce došlo u některých těles k deformaci a v některých případech dokonce i k úplnému rozpadnutí. Lze tedy předpokládat pozitivní vliv stažení zkušebního tělesa do ochranného límce, přičemž příznivější podmínky jsou zajištěny za použití ocelové sítky, která přesněji simuluje podmínky, které vznikají v reálné konstrukci vozovky. Pro porovnání vlivu PVC a ocelové sítky byly stanoveny pevnosti v příčném tahu, který znázorňuje Obr. 67. Je patrné, že v případě směsi referenční jsou pevnosti v příčném tahu, po stárnutí při teplotě 85 °C po dobu 5 dnů, v průměru stejné – 2,30 MPa. U směsi za použití mikrofileru dosahují nižších hodnot zkušební tělesa obalená ocelovou sítkou, o zhruba 0,5 MPa.



Obr. 67. Porovnání pevností v příčném tahu odlišně uložených zkušebních těles – stárnutí 5d@85 °C.

U obou zvolených směsí byl také sledován vliv na vodní citlivost, jak je znázorněno na Obr. 68. Přičemž nejlepších výsledků poměru pevností je dosaženo za použití ocelové sítě. V tomto případě je zkušebních tělesům umožněno stárnout rovnoměrně, cirkulací vzduchu dochází k rovnoměrnému stárnutí, stejně jako je tomu v případě volně uložených těles, avšak v případě sítě již nedochází k dalším deformacím, popřípadě rozpadu. Obalením zkušebních těles do obalu z PVC zamezí přístupu vzduchu v klimatizační komoře s nucenou cirkulací vzduchu a u těles tak nedochází k rovnoměrnému stárnutí. Z výsledků lze usuzovat pozitivní vliv ochranného límce z ocelové sítě, avšak významný vliv hraje roli v metodě laboratorního stárnutí zkušebních těles v PAV, kde je kromě zvýšené teploty uvažován i tlak, jenž působí daleko méně příznivě na stárnutá zkušební tělesa, a ta jsou daleko více náchylná k deformaci, popřípadě jejich úplnému rozpadnutí.



Obr. 68. Porovnání poměrů pevností v příčném tahu.

### 5.1.6 Diskuze k dosaženým výsledkům

Z provedené studie a dosažených výsledků je patrné, že vlastní zkouška přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu nám poskytuje rychlé informace o kvalitě obalení zrn kameniva



asfaltem, pomůžou nám vyloučit kameniva, která s daným pojivem nevytváří dostatečně pevnou a kvalitní vazbu. Pomocí této zkoušky můžeme také potvrdit funkčnost přílnavostních přísad, její nevýhodou je však značná závislost na subjektivním vjemu hodnotitele a skutečnost, že lze jen velmi těžko zvolený postup vztáhnout k nějakým reálným vlivům v konstrukci vozovky. Existují i jiné způsoby exaktního určení procenta obalené plochy kameniva, jsou však časově náročné a často vyžadují speciální laboratorní vybavení. U zkoušky přílnavosti je stárnutí ovlivněno nejen použitou přísadou, ale také typem kameniva, tedy jeho mineralogickým složením. Adheze zestárlého pojiva se v případě samotného pojiva 50/70 paradoxně zlepšuje, použité přílnavostní přísady tento efekt naopak snižují.

Z výsledků zkoušek vodní citlivosti nejen zestárlých asfaltových směsí vyplývá, jak je obtížné určit, zda daná směs v reálné konstrukci vozovky po delším časovém období vyhoví, či nikoliv. Také je důležité provádět zkoušku vodní citlivosti i se zmrazovacím cyklem, jež nám může o skutečném chování směsi více napovědět, včetně ohodnocení stupně nasycení tělesa. Žádná obecná souvislost ve spojitosti se stárnutím však z těchto údajů není patrná. Různé metody stárnutí nám poskytují odlišné výsledky, je proto důležité je správně interpretovat a vhodně kombinovat. Z výsledků jsou patrné následující závěry:

- Zlepšení/zhoršení přílnavosti asfaltu ke kamenivu je závislé na typu použitého kameniva (na mineralogickém složení) a k němu vybrané přílnavostní přísadě, tedy na zvolené kombinaci těchto dvou složek.
- Stárnutí asfaltového pojiva metodou 3xTFOT poněkud paradoxně vede ke zlepšení přílnavosti, které je patrné i u referenčního pojiva, bez přidání přílnavostní přísady. Jako nejstabilnější přísada se u této metody jeví chemické aditivum AdHere 65-00 LOF a vybraná minerální přísada v podobě hydratovaného vápna, obecně lze usuzovat na vyšší stálost minerálních přísad v porovnání s tekutými chemickými přísadami, jež se spíše vyznačují teplotní nestabilitou při vyšších teplotách, kdy dochází ke změně jejich vlastností nebo k postupnému vytěkání některých složek.
- Pokus se zaměříme na porovnání nezestárlé asfaltové směsi ACL 16+ s kamenivem z lokality Chlum, vede použití vybraných chemických přílnavostních přísad ke snížení pevnosti v příčném tahu zkušebních těles oproti směsi referenční směsi, to ovšem neplatí v případě dávkování minerálních přísad, které naopak pevnosti v příčném tahu zvyšují.

Exaktnějších výsledků dosahuje hodnocení zkoušky vodní citlivosti, jež nám dává bližší informace o stabilitě jednotlivých přísad přímo v asfaltové směsi, jež bylo reflektováno v této studii za použití odlišných metod stárnutí. Nelze tedy přímo určit nejvhodnější metodu stárnutí asfaltové směsi, všechny tři uvedené metody stanovují určité podmínky, jež nám dávají určitou představu o chování směsi v konstrukci vozovky, mají však své výhody i nevýhody. Předně je třeba říci, že bez ohledu na interpretaci toho, jaké období konkrétní metoda stárnutí simuluje, je vhodné, aby se posuzovala asfaltová směs v zestárlém stavu. Tento účinek v konstrukci vozovky bezesporu nastává a z hlediska její životnosti a účinku přílnavostních přísad není důležité, co se děje např. první rok, ale jak efektivní bude jejich vliv a celkové chování směsi po 5 a více letech. Stárnutí zhuštěných zkušebních těles pravděpodobně lépe simuluje skutečný stav ve vozovce, ačkoli na druhé straně míra zhuštění asfaltové vrstvy ve vozovce je vyšší než zvolený přístup s 2x25 údery, který se uvažuje za účelem simulace urychlení působení vody.



V případě volně ložené směsi se dosažené výsledky jeví konzistentnější, vlastní provedení tohoto přístupu stárnutí je jednodušší a nehrozí jakákoli deformace zkušebních těles. Na druhé straně dochází k rovnoměrnému stárnutí asfaltového filmu v celé směsi, což neodpovídá pravděpodobné skutečnosti u ztuhlé asfaltové vrstvy. Je tedy pouze věcí interpretace, co tímto přístupem simulujeme. V neposlední řadě je potom třeba zejména pro oblasti se střídáním teplého i chladného klimatu podpořit úpravu stávající metodiky posuzování odolnosti proti účinkům vody s vnesením zmrazovacího cyklu do zkoušky, neboť tento účinek na konstrukci vozovky působí a na trvanlivost asfaltové směsi vliv bude mít.

### 5.1.7 Závěr dílčí studie dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi a asfaltového pojiva

Problematika přilnavosti mezi kamenivem a asfaltovým pojivem, jakož i úzce související aspekt trvanlivosti ověřovaný odolností asfaltové směsi proti účinkům vody zůstává jedním z nejdéle a nejintenzivněji studovaných fenoménů asfaltových směsí. Obdobně jako v případě stárnutí asfaltového pojiva a směsi ani v tomto případě dosud neumíme jednoznačně popsat a s jistotou opakovaně potvrdit veškeré jevy a příčiny ovlivňující vlastní adhezi, jelikož vlastní problematika má rozměr fyzikálně-mechanický, ale i chemický. Pokud navíc oba fenomény kombinujeme, mnohem lépe sice reflektujeme reálné podmínky, vytváříme však daleko složitější úlohu.

Závěrem bych jen chtěla zdůraznit, že cílem této studie bylo primárně jakkoli klasifikovat účinnost různých přísad. Proto ani nebyla věnována pozornost chemickému složení jednotlivých přísad a zda byly zvoleny přísady se obdobným podílem účinné látky. Pro takový účel by bylo nezbytné studii definovat odlišným způsobem. Bylo by proto chybné a v rozporu se zvoleným přístupem, na základě této studie činit jakékoli závěry o výhodnosti jednotlivých přísad. Zvolené zkušební postupy samy ukazují, že takové hodnocení je přinejmenším nejednoznačné. [143, 170, 171, 172]

## 5.2 Ověření stability adhezního účinku vybraných chemických a minerálních přísad u zestárlé asfaltové směsi vybranou metodou laboratorního stárnutí [173, 174, 175, 176]

### 5.2.1 Návrh směsi a použité varianty

V rámci posuzování vlivu vybraných přilnavostních přísad a speciálně mikromletých filerů, resp. minerálních materiálů, na vlastnosti asfaltové směsi byly zvoleny dva typy podobné směsi. V prvním případě se jednalo o asfaltový beton ACL16S určený pro ložní vrstvy vozovek třídy dopravního zatížení S (nejvyšší třída dopravního zatížení). V druhém případě byla posuzována asfaltová směs ACL 16+, která je běžně využívána pro standardní typy ložních asfaltových vrstev. Obrusná vrstva je vystavena přímo působení klimatických vlivů a dopravnímu zatížení, proto jsou na ni kladeny vyšší nároky z hlediska její trvanlivosti. Ne jinak je to u ložní vrstvy vozovky, do níž klimatické vlivy nepřímo zasahují. Dopady způsobené tímto namáháním mohou být výrazně menší, nicméně musíme brát v potaz celkovou dobu působení těchto vlivů, která je u ložní vrstvy výrazně delší než u obrusné. Kamenivo pro asfaltovou směs bylo použito z lomu Sýkořice u Zbečna (spilit, viz kap. 1.1.8) a lomu Brant nedaleko Rakovníka (žulový porfyr, viz kap. 1.1.2) v případě první směsi a z lomu Chlum (zželec, viz kap. 1.1.1) v případě druhé směsi.



Současně bylo zvoleno asfaltové pojivo 50/70, které bylo souběžně aplikováno i v při provádění standardních přilnavostních zkoušek dle postupu uvedeného v ČSN 73 6161. Referenční asfaltová směs v případě ACL 16S byla vyrobena s vratným filerem dostupným z obalovny Kladno - Dříň. U směsi ACL 16+ se pro referenční směs dávalo standardně používaný vápencový filer Velké Hydčice. Návrh asfaltové směsi, včetně procentuálního zastoupení jednotlivých složek, byl v souladu s požadavky ČSN 73 6121 a je uveden v tabulkách (Tab. 28, Tab. 29). Takto navržené asfaltové směsi byly použity pro výrobu zkušebních válcových těles (dle normy ČSN EN 12697-30) pomocí rázového zhutňovače, přičemž tělesa jsou hutněna 2x75 úderů (2x25 úderů) u směsi ACL 16S a 2x50 úderů (2x25 úderů) u směsi ACL 16+ v závislosti na typu prováděné zkoušky, pro kterou byly dané zkušební vzorky použity.

Tab. 28. Složení asfaltové směsi ACL16S v souladu s požadavky ČSN 73 6121.

Návrh směsi	Množství [%]	Obsah v asfaltové směsi [%]
HDK 11/16 Brant	30,00	28,57
HDK 8/11 Brant	16,00	15,24
HDK 4/8 Sýkořice	6,00	5,71
HDK 2/5 Sýkořice	19,00	18,09
DDK 0/2 Sýkořice	26,00	24,76
Filer	3,00	2,86
<b>Asfaltové pojivo 50/70</b>		<b>4,78</b>

Tab. 29. Složení asfaltové směsi ACL16+ v souladu s požadavky ČSN 73 6121.

Návrh směsi	Množství [%]	Obsah v asfaltové směsi [%]
HDK 8/16 Chlum	37,00	35,08
HDK 4/8 Chlum	16,00	15,17
SDK 0/5 Chlum	30,00	28,44
STK 0/4 Sojovice	10,00	9,48
Filer Velké Hydčice	7,00	6,64
<b>Asfaltové pojivo 50/70</b>		<b>5,20</b>

#### 5.2.1.1 Varianty přilnavostních přísad a mikrofilerů

Jako náhrada tradičního plniva v asfaltové směsi (v referenční směsi v podobě vratného fileru), byla zvolena varianta mikromletého vápence, jehož zdrojem byly odřezky ze zpracování vápence při řezání desek, bloků či dlažeb, ale také varianta betonového recyklátu z dálnice D2 (Brno – Bratislava). Za účelem širšího uplatnění a změny technologických vlastností těchto dvou vybraných materiálů bylo provedeno přemletí vápence i betonu s použitím mechano-chemické aktivace vysokorychlostním mletím v desintegrátoru (uplatnění vysokých úhlových rychlostí protiběžných rotorů s mezerou <1 mm), s cílem dosáhnout maximální velikosti částic menší než 50 µm.

S ohledem k stále se rozvíjejícím technologiím a inovativním materiálům byla vyvinuta nová generace adhezních přísad na bázi fosforu, jež jsou specifické všestranným využitím u různých typů kameniva (široká škála použití) a vyšší teplotní stálostí, umožňují tak odolávat po delší dobu vyšším teplotám. Pro posouzení účinku těchto přísad byly zvoleny primárně dva typy těchto aditiv, jedná se o přísady s označením Rhodoval DP500T a ValoJames A. Obě tyto přísady



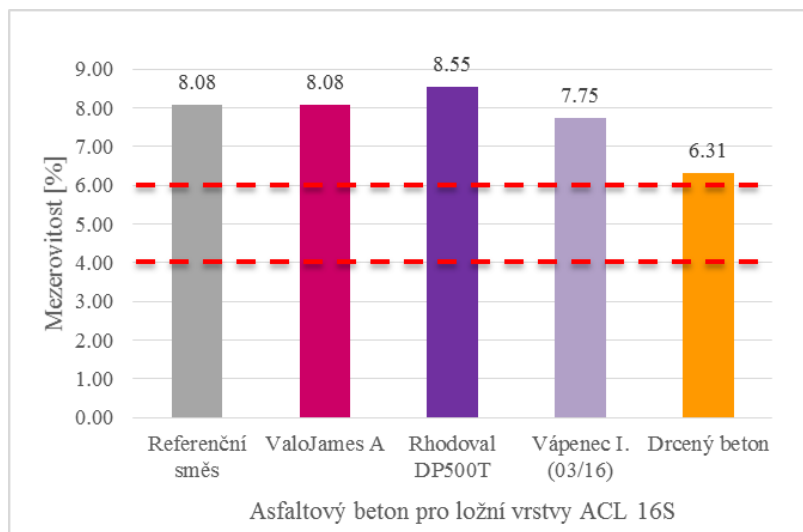
byly dávkovány do asfaltového pojiva v množství 0,3 %-hm. Pro širší porovnání účinku uvedených dvou přísad byly dále použity i přísady AdHere 65-00 LOF, Impact 8000 a Wetfix BE se stejným dávkováním těchto povrchově aktivních látek v pojivu, jakož i nanochemická přísada Zycotherm v množství 0,1 %-hm. pojiva.

## 5.2.2 Výsledky experimentální studie

Pro stanovení vlastností navržených asfaltových směsí a následného porovnání, byla provedena řada zkušebních testů, zaměřených na stanovení vlastností fyzikálních (objemová hmotnost zhutněná, maximální objemová hmotnost, mezerovitost) a mechanických (modul tuhosti, odolnost vůči účinkům vody, odolnost proti šíření trhliny). Na základě zkušeností z výzkumné činnosti (odst. 5.1) v silniční laboratoři ČVUT v Praze, byla zvolena jedna ze simulací dlouhodobého stárnutí. Tato metoda zahrnuje podmínky temperování zkušebních těles v teplotní komoře s nucenou cirkulací vzduchu při teplotě 85 °C po dobu 120 hodin (5 dní), jak je uvedeno a popsáno v normě prEN 12697-52. Zkušební tělesa během procesu stárnutí nejsou nijak chráněna proti případné deformaci vlivem vysoké teploty.

### 5.2.2.1 Základní fyzikální vlastnosti navržených směsí, případ ACL 16S

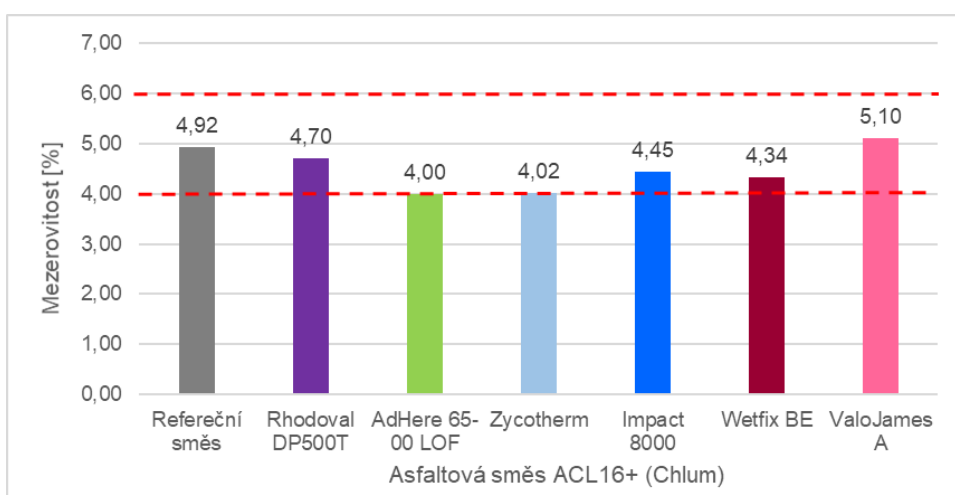
Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí vychází z normy ČSN EN 12697-8 a její výpočet závisí na objemové hmotnosti zhutněného zkušebního tělesa a maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi, viz Obr. 69. Maximální objemové hmotnosti nabývají u všech variant, v průměru stejných hodnot – 2,355 g/cm<sup>3</sup>, liší se tedy převážně ve zhutněných objemových hmotnostech. Norma ČSN 73 6121 předepisuje pro asfaltové betony ACL16S přípustný interval pro mezerovitost v rozpětí 4,0-6,0 %-obj.. S ohledem ke zvolené čáře zrnitosti a stanovenému množství pojiva, použitého v rámci tohoto výzkumu vychází mezerovitosti všech variant nad požadovanou horní mez. Důvod takto vysoké mezerovitosti lze přisuzovat použitému návrhu asfaltové směsi, který vycházel z receptury dodané výrobce (návrh tedy neprošel optimalizací asfaltové směsi) a vysokovou mezerovitost zapříčinila odlišná zrnitost jednotlivých frakcí kameniva použitého při výrobě asfaltových směsí. Nejbližší této hranici dosahuje hodnotou 6,3 %-obj. varianta s drceným betonovým recyklátem. Naopak nejvyšší mezerovitosti 8,6 %-obj. dosáhla aplikace přísady Rhodoval. Příliš vysoký obsah mezer může vést k nežádoucím účinkům způsobených vodou a zvýšenou vlhkostí, které může vést až k postupnému narušení spojení mezi asfaltovým pojivem a kamenivem.



Obr. 69. Porovnání mezerovitosti navržených variant směsi ACL 16S s požadavky dle ČSN 73 6121.

#### 5.2.2.2 Základní fyzikální vlastnosti navržených směsí, případ ACL 16+

V případě asfaltové směsi typu ACL 16+ platí tytéž požadavky pro přípustný interval mezerovitosti v rozmezí 4,0-6,0 %-obj. stanoveném dle technické normy ČSN 73 6121. S ohledem k minimální a maximální hranici mezerovitosti lze konstatovat, že všechny uvedené varianty těmto požadavkům vyhovují. Oproti referenční směsi dochází u varianty s přísadou ValoJames A ke zvýšení mezerovitosti, tato varianta dosahuje hodnoty mezi posuzovanými variantami 5,1 %-obj. V případě ostatních variant s vybranými příslavnými přísadami dochází ke snížení této charakteristiky v porovnání s referenční směsí.



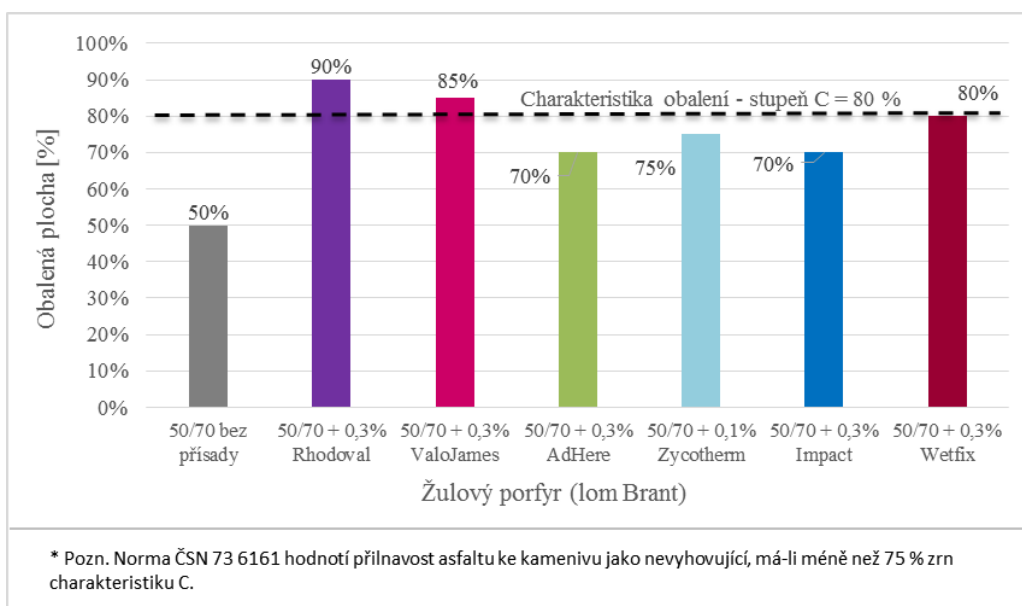
Obr. 70. Porovnání mezerovitosti navržených variant směsi ACL 16+ s požadavky dle ČSN 73 6121.

#### 5.2.2.3 Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem

Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem bylo provedeno s čistým asfaltovým pojivem (bez přidání aditiv) a dále s přísadou ValoJames a Rhodoval, minerální přísady pro tuto zkoušku použity nebyly. Hodnocení stupně obalení zrn kameniva pojivem bylo však v rámci srovnání doplněno o výsledky u již běžně používaných přísad, jak je patrné z následujících dvou grafů na Obr. 71 a Obr. 72. Graf na Obr. 71 znázorňuje charakteristiku asfaltového spojení se

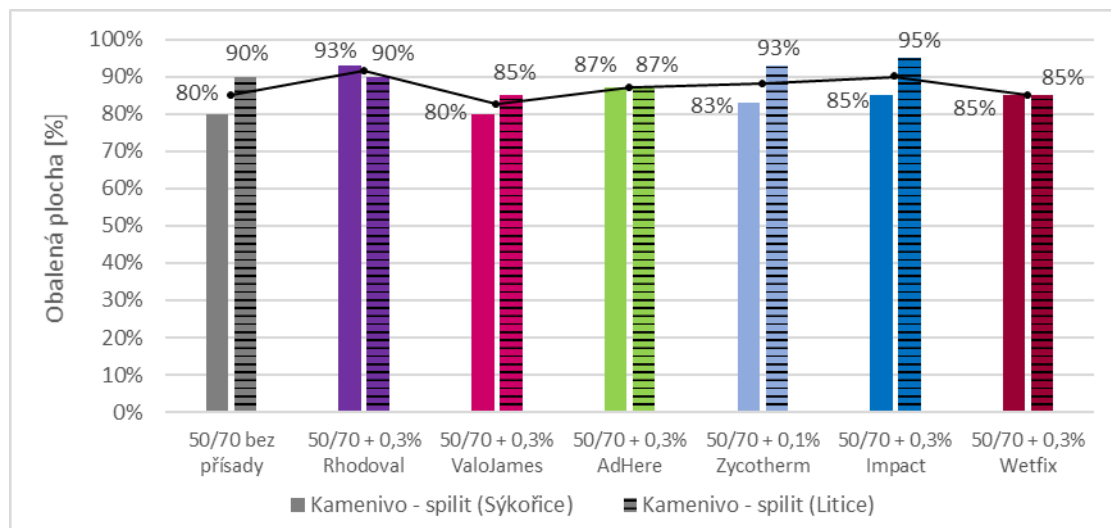
povrchem zrna u kameniva z lomu Brant, tedy pro žulový porfyr. Totéž porovnání bylo provedeno u kameniva z lomu Sýkořice u Zbečna – pro spilit (obr. 5), výsledky jsou však doplněny o další srovnání se stejným typem horniny, avšak z jiné lokality. Hodnocení zkoušky bylo vždy provedeno nezávisle dvěma hodnotiteli.

Z výsledků dosaženého stupně obalení zrn kameniva pojivem, který se udává v procentech obalené plochy, vyplývají následující závěry. V případě obalení zrna kameniva pojivem 50/70 bez aditiv lze přilnavost hodnotit jako nevyhovující, povrch kameniva obalený pojivem dosahuje pouze 50 % celkové plochy, tedy nejhoršího možného výsledku z posuzovaných variant. To bylo jednou z motivací pro aplikaci přísad zlepšující přilnavost, což se i prokázalo (u všech použitých přísad došlo ke zlepšení), nicméně přesto u některých variant nebylo dosaženo požadované přilnavosti s hodnocením vyhovující. Nejvyššího zlepšení přilnavosti v kombinaci s žulovým porfyrem bylo dosaženo dávkováním přísady Rhodoval (90 %), která podle normy hodnotí přilnavost ke kamenivu jako dobrou, jako vyhovující se ukázalo také použití přísady ValoJames (85 %) a Wetfixu (80 %).



Obr. 71. Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 pro žulový porfyr.

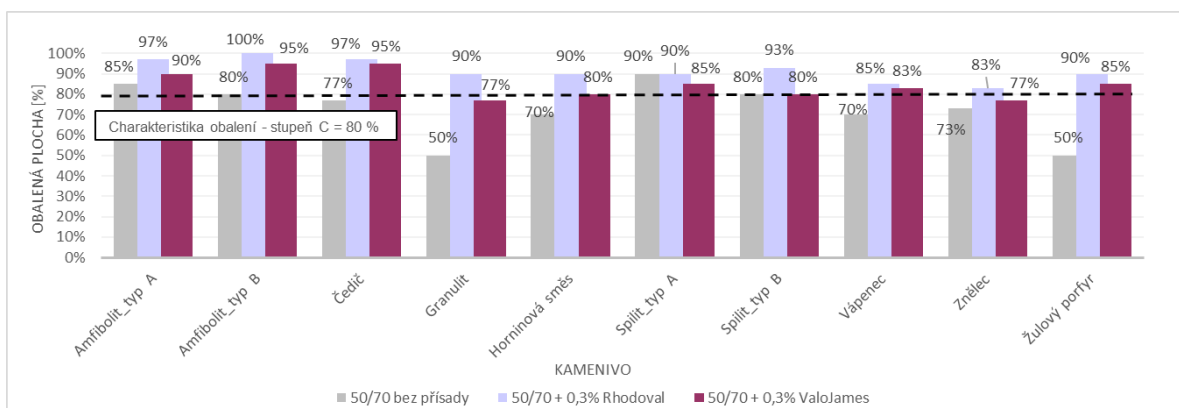
Při porovnání přilnavosti pojiva včetně variant s vybranými přilnavostními přísadami s kamenivem z lomu Sýkořice (spilit), dosahují přilnavosti lepších výsledků než v předchozím případě. Vyšší stupeň obalené plochy je zřejmý i u varianty s pojivem 50/70 bez aditiv, kde dosahuje přilnavost 80 % a hodnotí ji jako vyhovující. Další zlepšení je možné pozorovat při použití všech přidávaných přísad. Při aplikaci přísady ValoJames nedošlo oproti referenčnímu vzorku ke zhoršení přilnavosti. Také se prokázal tentýž trend jako v předchozím případě, kdy použitím přísady Rhodoval došlo k nejvýraznějšímu zlepšení přilnavosti oproti ostatním variantám (93 %). Ostatní přísady dosáhly v kombinaci se spilitem v průměru podobných výsledků. Posledním porovnáním přilnavosti jsou výsledky pro drcené kamenivo z odlišné lokality (lom Litice), avšak pro stejnou horninu – spilit. Výsledky přilnavosti ukazují podobný trend, u pojiva 50/70 bez aditiv, jakož i s přísadami Zycotherm a Impact lze pozorovat výraznější zlepšení přilnavosti.



Obr. 72. Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 pro spilit.

(Pozn: Technická norma ČSN 73 6161 hodnotí přilnavost mezi pojivem a kamenivem jako nevyhovující, má-li méně než 75 % zm charakteristiku C)

Samostatně je v grafu na Obr. 73 uvedeno porovnání vlivu přilnavostních přísad Rhodoval DP500T a ValoJames (dávkováno se stejným množstvím v asfaltovém pojivu) při aplikaci s různými typy kameniva, které se běžně v České republice pro výrobu asfaltových směsí používají. Zkušební postup byl ve všech případech shodný tomu, který je uveden výše v této části zprávy. U všech typů sledovaných hornin je patrný přínos obou přísad (s výjimkou splitu z lokality Zbečno – spilit\_type B). Tento přínos je patrný zejména v případě granulitu (Kobylí Hora) a žulového porfyru (Brant). Současně je z výsledného porovnání patrné, že ve všech případech se jako vhodnější jeví přísada Rhodoval DP500T, která má z hlediska adheze větší účinek.



Obr. 73. Porovnání přilnavosti mezi pojivem a kamenivem různého původu dle ČSN 73 6161.

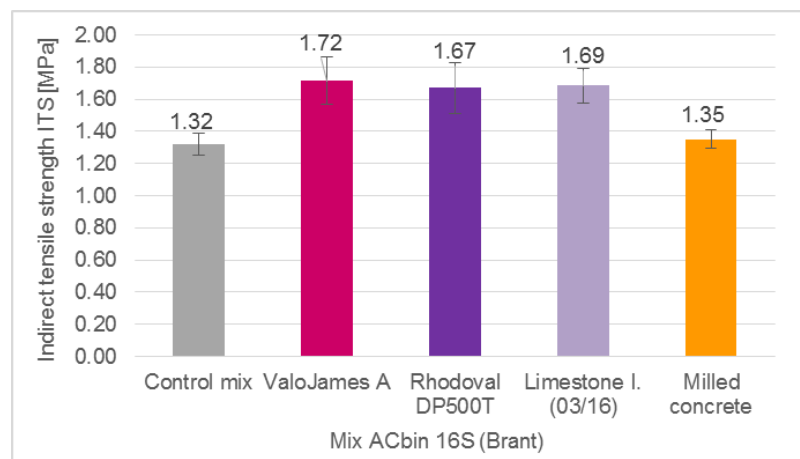
#### 5.2.2.4 Odolnosti vůči účinkům vody – ITSR

Proces uváděný pod pojmem poškození vlivem účinků vody je obecně definován jako degradace mechanických vlastností materiálu v důsledku přítomnosti vlhkosti v mikrostruktuře a významně přispívá k předčasnému porušení asfaltových vozovek. Tento fenomén se týká termodynamických, chemických, fyzikálních i mechanických složek asfaltové směsi a je nutné s ním počítat při návrhu. Studie ukazují, že struktura, stáří a mezerovitost směsi ve vozovce společně s množstvím a četností vodních srážek mají na poškození největší vliv. Naproti tomu

opakované dopravní zatížení a kumulovaná doprava těžkých nákladních vozidel mají v tomto směru pouze okrajový efekt.

#### 5.2.2.4.1 Porovnání české technické normy a modifikované americké metody

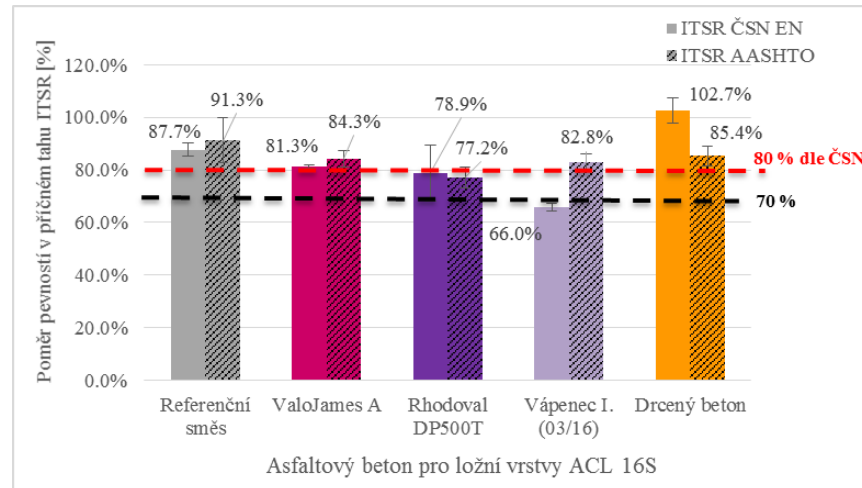
Zkouška stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě byla provedena v souladu s technickou normou ČSN EN 12697-12 a modifikovanou metodou dle AASHTO T-283. Na Obr. 74 jsou znázorněny pevnosti v příčném tahu suchých zkušebních těles variant směsi ACL 16S. Na toto znázornění navazuje graf na Obr. 75 a Obr. 76, kde jsou procentuálně vyneseny poměry pevností v příčném tahu pro obě zkušební metody a oba typy sledovaných asfaltových směsí (šrafovaně varianta dle AASHTO T-283).



Obr. 74. Porovnání pevností v příčném tahu těles na suchu – ITS směsí ACL 16 S (Brant).

Dle získaných výsledků pevností v příčném tahu dosahuje nejnižších hodnot referenční směs bez přidání jakéhokoli přílnavostního aditiva (1,32 MPa). Velmi podobné pevnosti je dosaženo při aplikaci náhrady vratného fileru za drcený beton. Z výsledků je však patrný pozitivní efekt použité náhrady v podobě mechano-chemicky aktivovaného vápence, který dosahuje v průměru stejných hodnot pevností v příčném tahu (1,70 MPa) jako aditiva ValoJames A a Rhodoval DP500T dávovaná přímo do asfaltového pojiva.

Z hlediska odolnosti asfaltové směsi proti účinkům vody je důležitějším kritériem pro hodnocení jednotlivých variant směsi poměr pevností v příčném tahu, norma ČSN 73 6121 pro směsi ACL16S požaduje minimální hodnotu ITSR 80 %, pro asfaltové směsi ACL 16+ se následně připouští hodnota 70 %.

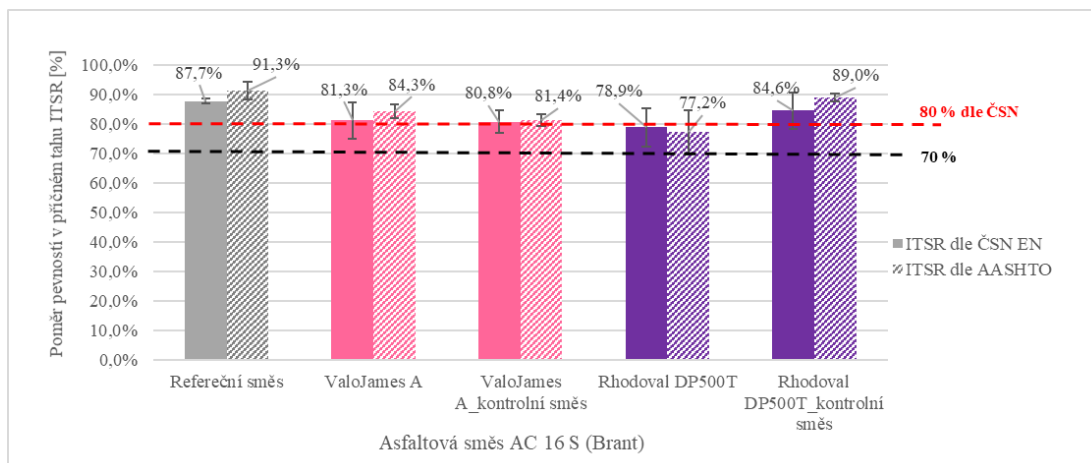


Obr. 75. Porovnání poměru pevností v příčném tahu dle ČSN EN 12 697-12 a AASHTO T-283 pro varianty směsi ACL 16S.

V případě asfaltové směsi ACL 16S nebyla splněna mezní hodnota v případě aplikovaného vápence jako náhrady plniva v asfaltové směsi, kdy dosáhla pouze 66 % ITSR. Vyššího poměru bylo dosaženo naopak při použití přísady Rhodoval DP500T, nicméně i v tomto případě byla hodnota pod hranicí 80 %. Všechny ostatní varianty tuto hodnotu splnily. Jako výrazně přínosnou je třeba zdůraznit náhradu fileru v podobě mechanicky aktivovaného betonového recyklátu (mikrofileru). V tomto případě se prokázala vyšší odolnost směsi vůči účinkům vody. Pokud bychom se zaměřili na porovnání variant, kde byla použita modifikace americké zkušební metody dle AASHTO T-283, tak americká norma nestanovuje minimální požadované hranice pro tyto hodnoty. V rámci možného porovnání v tomto příspěvku byla však hodnota, s ohledem na méně příznivé podmínky, kterým jsou zkušební tělesa vystavena, zvolena hranice 70 % ISTR. I přes méně příznivé podmínky s využitím jednoho zmrazovacího cyklu je však patrné, že všechny varianty, dosahují této hranice. Při porovnání obou metod je patrné, že některé varianty dosahují o poznání lepších výsledků v případě americké zkušební metody.

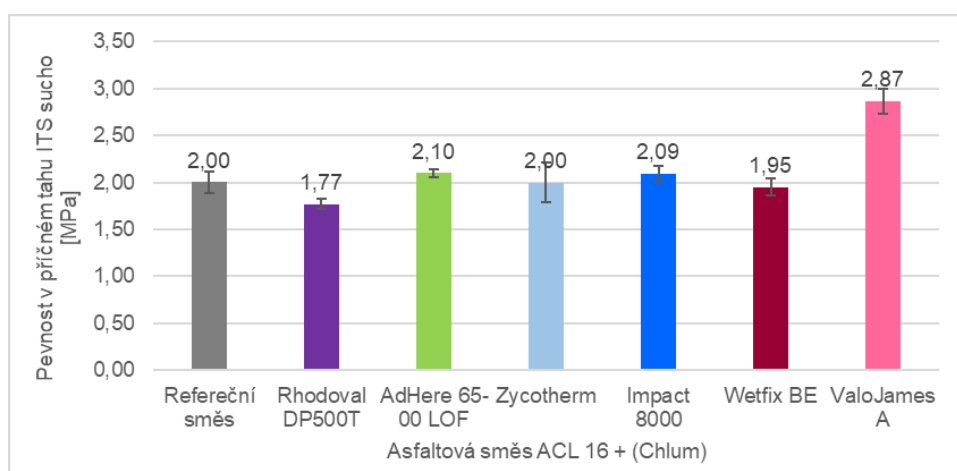
S ohledem k do jisté míry nelogickému výsledku, který uvádí obrázek Obr. 75 byla pro varianty s přísadami Rhodoval DP500T a ValoJames A měření opakována. Z opakovaného měření se výsledek pro přísadu ValoJames A potvrdil, přičemž současně ukazuje velmi dobrou stabilitu této přísady z hlediska vlivu různé metody stanovení poměru pevnosti v příčném tahu. U přísady Rhodoval DP500T kontrolní směs deklarovala mírně lepší výsledek srovnatelný s referenční směsí. Porovnání kontrolních asfaltových směsí obou přísad potom lépe koresponduje s výsledky přílnavostní zkoušky.



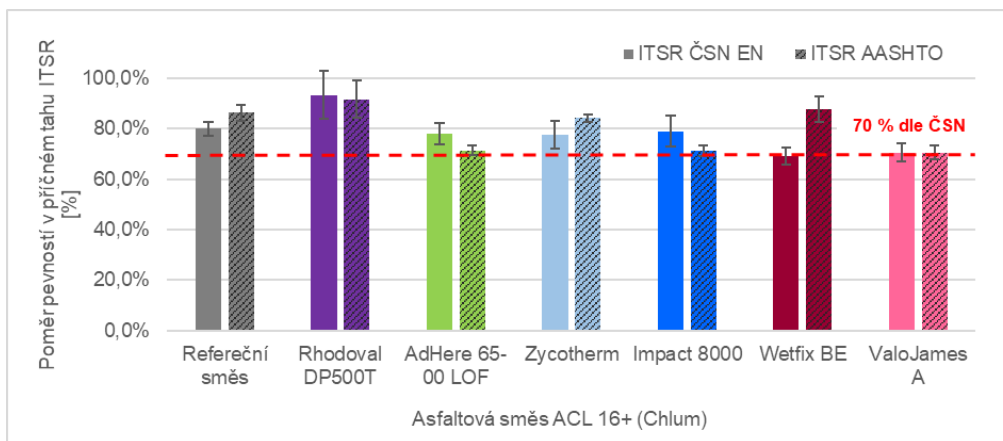


Obr. 76. Opakované měření pro stanovení ITSr dle ČSN EN 12 697-12 a AASHTO T-283.

V případě porovnání variant asfaltové směsi ACL 16+ z hlediska charakteristiky odolnosti směsi proti účinkům vody jsou výsledky odlišné. Předně byl v tomto případě porovnáván vliv různých přilnavostních přísad. Dále je ale patrné, že oproti výše uvedenému případu je u asfaltové směsi ACL 16+ patrné zlepšení charakteristiky ITSr aplikací jedné z přísad, naopak poněkud nelogické a překvapující je docílení v zásadě stejné hodnoty u tří z pěti zbývajících přísad a dokonce ve třech případech zhoršení charakteristiky ITSr, pokud se tělesa kondicionovala podle metodiky AASHTO T-283. Zajímavé přitom je, že z hlediska pevnosti v příčném tahu suchých těles asfaltová směs s přísadou Rhodoval DP500T dosáhla nejnížší hodnoty (pokles přibližně o 12 % v porovnání s referenční směsí a dalšími testovanými variantami – viz Obr. 77, Tab. 30). K opačnému trendu vedla aplikace přísady ValoJames A, u které došlo oproti směsi referenční k nárůstu hodnoty pevnosti v příčném tahu přibližně o 44 %. V případě varianty s přísadou ValoJames A se jedná o směs, jenž byla vyrobena dodatečně oproti všem ostatním variantám. Tato směs dosahuje nejvyšší mezerovitosti, avšak současně také nejvyšší pevnosti v příčném tahu. Pokud se hodnota ITSr dle ČSN EN 12697-12 porovná s normovými požadavky, jak je patrné z grafu na Obr. 78, Tab. 30, potom s výjimkou varianty Wetfix BE (69,2 % ITSr) splnily všechny posuzované asfaltové směsi mezní hodnotu poklesu pevnosti v příčném tahu stanovenou 70 %.



Obr. 77. Porovnání pevností v příčném tahu těles na suchu – ITS směsí ACL 16+ (Chlum).



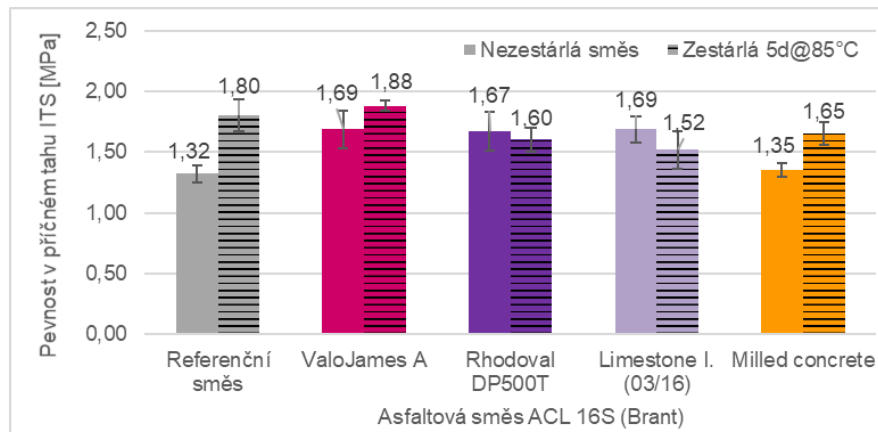
Obr. 78. Porovnání poměru pevností v příčném tahu dle ČSN EN 12 697-12 a AASHTO T-283 pro varianty směsí ACL 16+.

Tab. 30. Charakteristiky posuzované směsi ACL 16 + (Chlum).

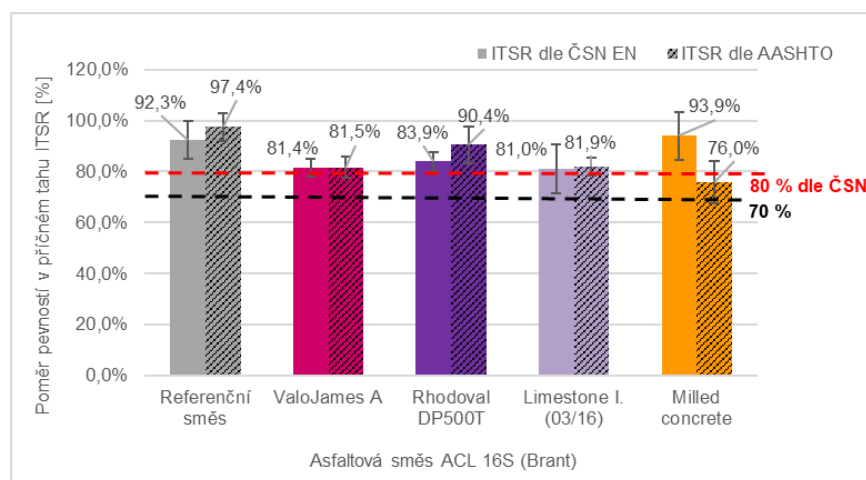
Označení	ITS <sub>dry</sub>	Směrodatná odchylka	ITSR <sub>ČSN EN</sub>	Směrodatná odchylka	ITSR <sub>AASHTO</sub>	Směrodatná odchylka	Objem. hmotnost	Směrodatná odchylka	Mezerovitost
[-]	[MPa]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[-]	[%]
Referenční směs	2,00	0,11	80,1%	0,03	86,3%	0,03	2,036	0,02	<b>4,92</b>
Rhodoval DP500T	1,77	0,06	93,4%	0,10	91,7%	0,07	2,044	0,03	<b>4,70</b>
AdHere 65-00 LOF	2,10	0,05	78,1%	0,04	71,5%	0,02	1,966	0,02	<b>4,00</b>
Zycotherm	2,00	0,21	77,7%	0,06	84,2%	0,01	2,065	0,02	<b>4,02</b>
Impact 8000	2,09	0,09	79,1%	0,06	71,4%	0,02	2,014	0,02	<b>4,45</b>
Wetfix BE	1,95	0,09	69,2%	0,03	87,8%	0,05	2,013	0,01	<b>4,34</b>
ValoJames A	2,87	0,13	70,5%	0,04	70,6%	0,03	2,113	0,01	<b>5,10</b>

#### 5.2.2.4.2 Aplikace simulovaného dlouhodobého stárnutí

Další porovnání vodní citlivosti bylo provedeno shodně s výše výsledky, avšak pevnosti zkušebních těles byly získávány po aplikaci simulovaného dlouhodobého stárnutí. Tato metoda spočívala ve výrobě zkušebních Marshallových těles, která jsou po vychladnutí přesunuta do teplotní komory s nucenou cirkulací vzduchu při teplotě 85 °C po dobu 5 dnů. Výsledky pevností v příčném tahu jsou porovnány s nezestárlou směsí na Obr. 79. Z výsledků je patrné, že u asfaltové směsi s náhradou vápence a u směsi s dávkováním přísady Rhodoval DP500T došlo ke snížení pevnosti oproti směsi nezestárlé, u zbylých směsí se pevnosti v příčném tahu naopak zvýšily, což byl jeden z předpokladů. Nejvyššího nárůstu pevnosti bylo dosaženo v případě asfaltové směsi s přísadou ValoJames A, kde byl nárůst pevnosti v příčném tahu zaznamenán hodnotou 1,88 MPa.



Obr. 79. Porovnání pevnosti v příčném tahu nezestárlých a zestárlých zkušebních těles.



Obr. 80. Porovnání poměru pevností v příčném tahu dle ČSN EN 12 697-12 a AASHTO T-283 – zestárlá zkušební tělesa 5d@85°C.

Na Obr. 80 jsou graficky znázorněny výsledky ITSR zkušebních těles vystavených účinkům stárnutí 5 dnů při teplotě 85 °C. Pokud se zaměříme na výsledky poměrů pevností dle ČSN EN 12 697-12, můžeme konstatovat, že nejlepší výsledků dosáhla opět varianta s drceným betonem (93,9 % ITSR). Stárnutí však mělo pozitivní vliv na zvýšení ITSR v případě aplikace mletého vápence, kdy se oproti nezestárlé směsi ITSR zvýšilo na 80,1 %, a splnilo tak podmínky stanovené normou pro minimální požadovanou mez. U ostatních přísad došlo k nepatrnému zlepšení ISTR, což potvrzují i výsledky, při posuzování postupu dle AASHTO T-283. Výjimku v tom případě tvoří pouze varianta s drceným betonem, kdy se poměr pevností v příčném tahu snížil na 76,0 %.

### 5.2.3 Modul tuhosti

Charakteristika modulu tuhosti byla stanovena v souladu s ČSN EN 12697-26 metodou opakované namáhání v příčném tahu IT-CY nedestruktivní zkouškou při čtyřech různých teplotách (0 °C, 15 °C, 27 °C, 40 °C) a to pouze pro varianty asfaltové směsi ACL 16S. V níže uvedené Tab. 31 jsou zaznamenány hodnoty naměřených modulů tuhosti pro všechny teploty, přičemž první část tabulky je věnována modulům tuhosti pro Marshallova tělesa nezestárlá. V případě druhé části tabulky jsou stanoveny moduly tuhosti u těles zestárlých při teplotě 85 °C po dobu 5 dnů. Jak je patrné, tabulka je také doplněna o hodnoty teplotní citlivosti.

Tab. 31. Charakteristiky modulu tuhosti pro nezestárlá a zestárlá zkušební tělesa.

Směs	Modul tuhosti nezestárlých těles [MPa]				Teplotní citlivost	Modul tuhosti těles zestárlých 5d@85 °C [MPa]				Teplotní citlivost
	0	15	27	40		0	15	27	40	
Referenční směs	20 294	10 302	3 371	1 022	19,9	21 737	11 196	4 407	1385	15,7
Rhodoval DP500T	19 981	9 812	3 267	1 183	16,9	20 284	10 646	4 813	1304	15,6
ValoJames A	21 197	9 824	3 111	881	24,1	21 759	11 224	3 730	1350	16,1
Vápenec I.	20 352	10 601	3 591	1 171	17,4	21 344	11 069	3 763	1241	17,2
Drcený beton	19 001	9 465	3 622	1 211	15,7	18 613	9 936	4 357	1620	11,5

Z dosažených výsledků pro nezestárlá tělesa je patrné, že při porovnání hodnot modulů tuhosti při teplotě 15 °C dosahují varianty s oběma tekutými aditivami v průměru stejných hodnot blízkých se 9 800 MPa, přičemž této hodnotě se blíží i varianta s aplikací mletého betonového recyklátu (drcený beton; 9 465 MPa). Nejvyšších hodnot modulu tuhosti, i když jen nepatrně je dosaženo u referenční směsi a varianty s vápencem, v průměru 10 400 MPa. Tentýž trend se uplatňuje i při měření modulů tuhosti při teplotě 27 °C, výjimku však tvoří drcený beton, který v tomto případě dosahuje nejvyšších hodnot. V případě nejnižší teploty 0 °C nabývá nejvyšších hodnot přísada ValoJames A (21 197 MPa), nicméně při porovnání výsledků při teplotě 40 °C dosahuje naopak nejnižší hodnoty modulu tuhosti (881 MPa – což je při trendu, jaký tato směs má při jiných teplotách, včetně hodnot modulů tuhosti po stárnutí, méně očekávaný výsledek, který by bylo potřeba ověřit), projevuje se u této přísady vyšší teplotní citlivost.

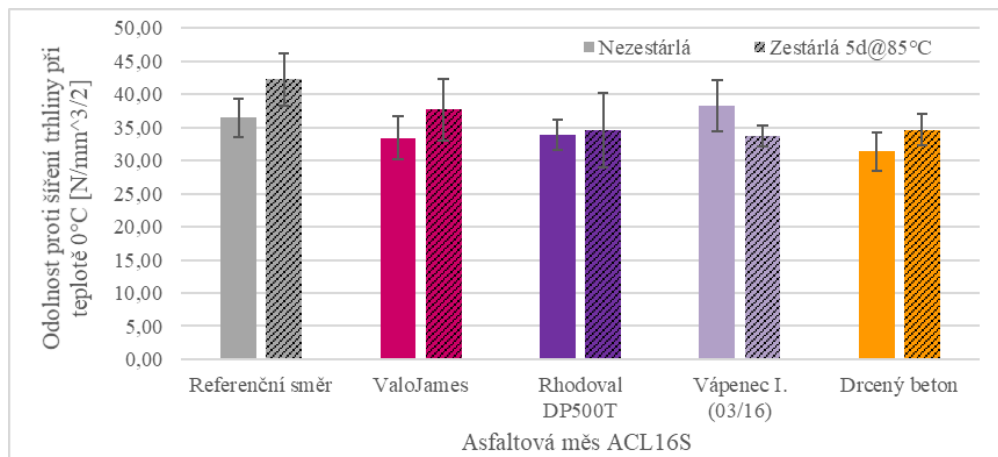
Pokud bychom se zaměřili na druhou část tabulky, kde bylo využito simulovaného dlouhodobého stárnutí zkušebních těles, je zřejmé, že hodnoty modulů tuhosti při 15 °C mají tentýž trend, jako tomu bylo v případě nezestárlých těles. Stárnutí zkušebních těles vede podle předpokladu ke zvýšení modulů tuhosti řádově o 1.000 MPa u všech variant, mimo varianty s drceným betonem, kde toto navýšení bylo minimální. Pokud bychom se zaměřili na přísadu ValoJames A, tato přísada při dané teplotě dosahuje v průměru nejvyšších modulů stejně jako v případě referenční směsi. Uvedená tvrzení lépe vystihuje Tab. 32, která udává poměr dosažených hodnot modulu tuhosti po stárnutí k modulu tuhosti před stárnutím.

Tab. 32. Index stárnutí asfaltové směsi (ageing index = AI).

Asfaltová směs – přínavostní přísada/mikrofiler	AI pro tuhost (-) při teplotě				Teplotní citlivost
	0	15	27	40	
Referenční směs	1,07	1,09	1,31	1,35	0,8
ValoJames A	1,03	1,14	1,20	1,53	0,7
Rhodoval DP500T	1,02	1,09	1,47	1,10	0,9
Vápenec I. (03/16)	1,05	1,04	1,05	1,06	1,0
Drcený beton	0,98	1,05	1,20	1,34	0,7

### 5.2.4 Odolnost proti šíření trhliny

V rámci dalšího posouzení chování asfaltových směsí při nízkých teplotách, byla provedena zkouška stanovení odolnosti proti šíření trhliny při teplotě 0 °C v souladu s ČSN EN 12697-44. Pro tuto zkoušky jsou použita půlválcová zkušební tělesa s průměrem 100 mm. Zkouška byla vyhodnocena současně pro nezestárlá a zestárlá zkušební tělesa, jak je patrné z následujícího grafu na Obr. 81.



Obr. 81. Stanovení odolnosti proti šíření trhliny při zkušební teplotě 0 °C.

Positivní efekt v případě dosažené odolnosti proti šíření trhliny při nízkých teplotách je patrný u směsí referenční a směsí s mikromletým vápencem. Aditiva ValoJames A a Rhodoval DP500T dosahují v průměru podobných hodnot. Pokud bychom se zaměřili na zestárlá zkušební tělesa, patrný efekt na zvýšení odolnosti proti šíření trhliny po stárnutí je v rámci všech připravených variant, mimo varianty s vápencem. Zde se opět jako u předchozích zkoušek prokázal negativní vliv uložení zkušebních těles při zvýšené teplotě, to znamená, že simulace dlouhodobého stárnutí vede ke snížené odolnosti proti šíření trhliny při nižších teplotách.

### 5.2.5 Diskuze k dosaženým výsledkům

Pochopení problematiky trvanlivosti asfaltové směsi a stanovení citlivosti asfaltové směsi vůči poškození vodou a zvýšenou vlhkostí, které přímo souvisí s přilnavostí mezi pojivem a kamenivem, je jeden z dlouhodobě studovaných fenoménů v silničním stavitelství. Mezi tyto aspekty lze zařadit i vliv stárnutí pojiva, resp. asfaltové směsi jako celku, které je pro správný návrh trvanlivé vozovky bezesporu nezbytné zahrnout.

V této části byla snaha porovnat několik typů přísad pro zlepšení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem, přičemž jednu skupinu tvořily minerální přísady a druhou skupiny pak aditiva přimíchávaná přímo do asfaltového pojiva. Vlastnosti navržených směsí byly ověřeny za pomoci celé série zkušebních postupů, které zahrnovaly různé metody ověřování přilnavosti a vodní citlivosti. Pro pochopením účinku vybraných přísad byla v rámci výzkumu využita i simulace dlouhodobého stárnutí. Tato simulace měla přiblížit chování směsí v konstrukci vozovky blízcí se životnosti vozovky a blíže nám specifikovat vlastnosti směsí s použitými přísadami a jejich teplotní stálost v průběhu životnosti vozovky.

Vybraná tekutá aditiva aplikovaná do asfaltového pojiva prokázala zlepšení přilnavosti podle zkoušky dle ČSN 73 6161 pro oba uvedené typy kameniva, přičemž žulový porfyr se z hlediska dosažené přilnavosti ukázal jako nejméně vhodná hornina při použití čistého pojiva 50/70. Vyhodnocení zkoušky pro stanovení vodní citlivosti však oproti směsi referenční směsi nevedlo k vyšším poměrům pevností v příčném tahu použitím obou těchto aditiv, hodnota minimálních poměrů pevností byla však dosažena. Zlepšení ITSR se prokázalo při aplikaci mikromletého (drceného) betonu, oproti tomu použití mletého vápence v tomto případě vedlo ke snížení této hodnoty. Simulace dlouhodobého stárnutí neměla v případě této zkoušky vliv na dosaženou vodní citlivost směsí, prokázal se zde obdobný trend jako u nezestárých zkušebních těles. Výjimku tvořila směs s mikromletým vápencem, z výsledků je patrné, že vystavení zkušebních těles zvýšené teplotě vede ke snížení pevnosti, což potvrzuje i odolnost těles vůči šíření trhliny, která se po procesu stárnutí snížila pouze u této varianty. Z výsledku plyne také možnost využití druhotných surovin, jako je mletý betonový recyklát, který v případě posouzení vodní citlivosti vede oproti ostatním přísadám k lepším výsledkům, což je dobře vidět i na jeho odolnosti při vyšších teplotách (snížená teplotní citlivost). [173, 174, 175, 176]

### 5.3 Vliv nových typů přilnavostních přísad pro zlepšení adheze asfaltového pojiva [177, 178]

#### 5.3.1 Návrh směsi a použité varianty

Pro posouzení vlivu vybraných typů přilnavostních přísad v asfaltové směsi byla vybrána směs typu asfaltové beton pro obrusné vrstvy ACO 11+ s kamenivem z lomu Brant (žulový porfyr) a lomu Sýkořice (spilit). Složení navržených asfaltových směsí uvádí Tab. 33. Současně bylo využito standardní silniční asfaltové pojivo 50/70.

Tab. 33. Složení asfaltové směsi ACO 11+ v souladu s požadavky ČSN 73 6121.

Návrh směsi ACO 11+	Množství [%]	Obsah v asfaltové směsi [%]
HDK 8/11 Brant	24,00	22,56
HDK 4/8 Sýkořice	10,00	9,40
HDK 2/5 Sýkořice	15,00	14,10
DDK 0/2 Sýkořice	47,00	44,18
Filer	4,00	3,76
Asfaltové pojivo 50/70		6,00

##### 5.3.1.1 Varianty přilnavostních přísad

V rámci této dílčí experimentální studie byla snaha ověřit funkčnost a potenciál nově vyvíjených typů chemických přísad s uplatněním principu nanotechnologie a polykondenzovaných aminů za účelem zlepšení přilnavosti mezi asfaltovým pojivem a kamenivem. Jedná se o tekutá aditiva přidávaná do horkého asfaltového pojiva, snižující povrchové napětí, čímž umožňují kvalitnější obalení jednotlivých zrn kameniva a vzniká tak pevnější vazba mezi pojivem a kamenivem, resp. se snižuje hydrofilita kameniva. První skupinu adhezivních přísad tvoří aditiva s označením AD-2 (viz kap. 2.3.1.8) a AD-2M (modifikace přísady AD-2 výrobcem), jedná se o reakční produkty nenasycených mastných kyselin s diethanolaminem. Jedná se o hnědou viskózní kapalinu získanou kondenzací nenasycených



mastných kyselin za vysoké teploty s odstraněním vody, která je rozpustná v etanolu a acetonu, a je emulgovatelná ve vodě. V asfaltovém pojivu je rozpustná při běžných pracovních teplotách. Snáší dlouhodobé zahřívání (150 hodin) na 150 až 160 °C bez změny aktivity. Druhou skupinu tvoří adhezní přísady TTO-A (viz kap. 2.3.1.9) a TTO-C (viz kap. 2.3.1.10) na bázi alkylsilanů, které zvyšují přilnavost asfaltu ke kyselému kamenivu a zlepšují zpracovatelnost a zhutnitelnost asfaltové směsi při nižších teplotách. Snáší dlouhodobé zahřívání na 150 °C až 160 °C bez změny aktivity. Aditiva TTO-A a TTO-C jsou viskózní tmavé kapaliny s obsahem alkylsilanů, rozpustné v polárních i nepolárních organických rozpouštědlech. Tato aditiva byla dávkována dle výrobce v množství 0,2 % a 0,4 % asfaltového pojiva penetrace 50/70. Pro porovnání různých typů přísad byl současně testován i referenční vzorek s čistým asfaltovým pojivem.

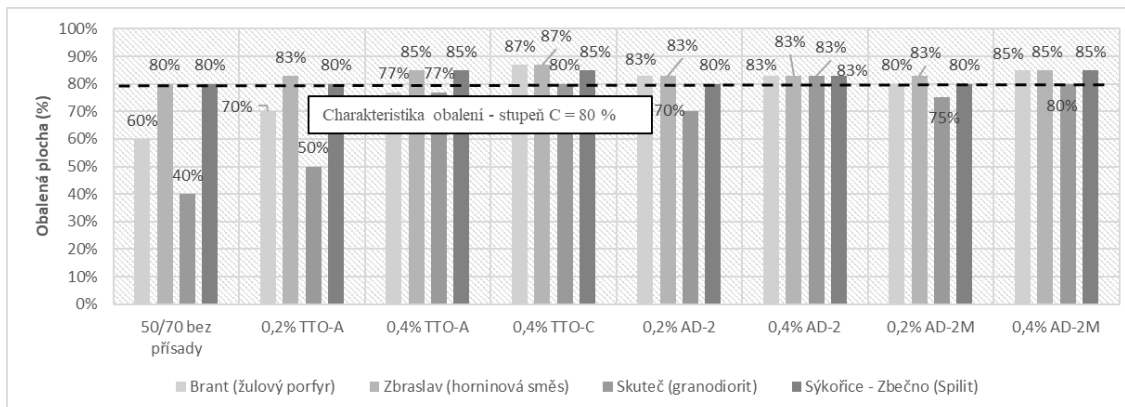
### 5.3.2 Výsledky experimentální studie vlivu přilnavostních přísad na vybrané charakteristiky asfaltových směsí

#### 5.3.2.1 Vyhodnocení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem

Zkouška ověření přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu byla provedena a vyhodnocena v souladu s požadavky ČSN 73 6161 na kamenivu z lomu Brant a lomu Sýkořice – Zbečno a porovnána s dalšími typy kameniva z lomu Zbraslav (viz kap. 1.1.9) a Skuteč (viz kap. 1.1.12). Na provedení zkoušky je použito předepsané množství kameniva frakce 8/16 mm nebo 8/11 mm a současně i asfaltového pojiva. Teplota před mísením těchto dvou složek závisí na penetraci použitého asfaltového pojiva. Obalená zrna kameniva asfaltovým pojivem jsou rozprostřena do skleněné nádoby a ponechána nezakrytá po dobu 24 hodin a následně vystavena účinkům obnažovací vody při teplotě 60±3 °C po dobu 60 minut. Ihned poté je vzorek vizuálně hodnocen stupněm výsledného obalení zrn kameniva asfaltovým pojivem.

Na Obr. 82 jsou porovnány varianty čtyř různých typů kameniva s nově vyvíjenými chemickými povrchově aktivními látkami na bázi alkylsilanů či produktů nenasycených mastných kyselin, u kterých je hlavním nosičem asfaltové pojivo penetrace 50/70. Z grafu je patrné, že v případě referenčního pojiva v kombinaci s žulovým porfyrem bylo obaleno pouze 60 % celkové plochy jednotlivých zrn kameniva a v případě granodioritu pouze 40 %. Oproti tomu horninová směs z lomu Zbraslav dosáhla pokrytí 80 % stejně jako kamenivo z lomu Sýkořice – Zbečno (spilit), dle ČSN 73 6161 hodnocení vyhovující.

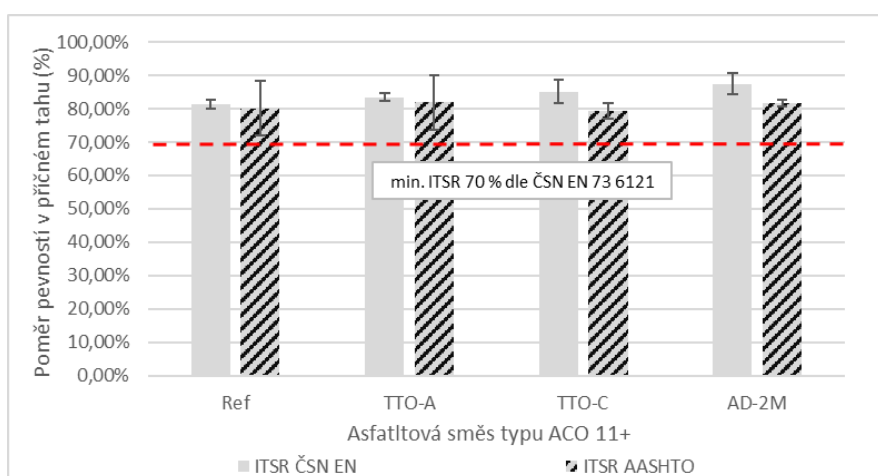
U toho těchto typů horniny vede dávkování přísad k dalšímu zlepšení obalení zrna kameniva asfaltovým pojivem, v případě dávkování 0,4 % přísady TTO-C dokonce na 87 % (pro kamenivo Brant a Zbraslav, případě kameniva Sýkořice – Zbečno 85 %. Nicméně je třeba podotknout, že v případě kameniva z lomu Zbraslav a Sýkořice, kdy bylo již v případě aplikované 50/70 bez použití aditiva dosaženo přilnavosti 80 %, nevede použití přilnavostní přísady k tak výraznému zlepšení přilnavosti, jako je patrné v případě kameniva z lomu Brant a Skuteč. Vyšší dávkování přísad AD-2 a AD-2M vedly v případě všech porovnávaných typů ke zlepšení přilnavosti nad 80 %.



Obr. 82. Výsledky zkoušky stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem podle ČSN 73 6161.

### 5.3.2.2 Vyhodnocení vodní citlivosti asfaltové směsi

Zkouška stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě byla provedena v souladu s technickou normou ČSN EN 12697-12. Na Obr. 83 jsou shrnuty výsledné hodnoty ITSR dle české normy ČSN 73 6121 i americké zkušební metody AASHTO T-283. Požadovaný poměr pevnosti v příčném tahu podle ČSN 73 6121 je pro směs ACO 11+ minimálně 70 %. Této hranice bylo dosaženo ve všech případech, přičemž varianty TTO-A, TTO-C a AD-2M dosáhly současně v průměru 85 % ITSR. S ohledem k naměřeným výsledkům ITSR zkušebních těles, jež byly vystaveny navíc jednomu cyklu zmrazování, bylo dosaženo u všech čtyřech variant téměř 80 % hodnoty.



Obr. 83. Výsledky zkoušky stanovení poměrů pevnosti v příčném tahu ITSR dle ČSN EN 12697-12 a dle AASHTO T-283.

### 5.3.2.3 Vyhodnocení výsledků modulu tuhosti

Moduly tuhosti asfaltových směsí (ACO 11+) byly stanoveny na válcových zkušebních tělesech postupem dle ČSN EN 12697-26 metodou opakovaného namáhání v příčném tahu nedestruktivní metodou. Modul tuhosti popisuje schopnost materiálu odolávat účinkům zatížení. Zkouška se prováděla při teplotách 0, 15, 27 a 40 °C. V Tab. 34 jsou shrnuty výsledky naměřených modulů tuhosti jednotlivých variant doplněné o charakteristiku teplotní citlivosti. Indikátor teplotní citlivosti asfaltové směsi lze vyjádřit jako poměr tuhostí  $S_0/S_{40}$ . Čím je tento poměr menší, tím je směs méně citlivá na změnu teplot. Současně s těmito hodnotami byly

výsledky doplněny o hodnoty naměřené na zestárých zkušebních tělesech. U poloviny zkušebních těles byla provedena laboratorní simulace dlouhodobého stárnutí dle postupu popsaného v normě prEN 12697-52, v níž jsou uvedeny podmínky stárnutí zkušebních těles v teplotní komoře s cirkulací vzduchu při teplotě 85 °C po dobu 120 hodin (5 dní). Zkušební tělesa během procesu stárnutí nebyla nijak chráněna proti případné deformaci vlivem vysoké teploty.

*Tab. 34. Stanovení modulu tuhosti variant směsí ACO 11+ před a po účinku stárnutí.*

Asfaltová směs	Modul tuhosti [MPa] @ teplotě T				Teplotní citlivost $S_0/S_{40}$ [-]
	0 °C	15 °C	27 °C	40 °C	
ACO 11+_Ref	16 831	6 515	3 016	1 033	16,3
ACO 11+ 0,4 % TTO-A	17 341	8 218	3 687	1 336	13,0
ACO 11+ 0,4 % TTO-C	17 636	7 657	3 455	1 224	14,4
ACO 11+ 0,4 % AD-2M	17 762	7 310	2 879	1 007	17,6
<b>Modul tuhosti po dlouhodobém procesu stárnutí 5d@85 °C [MPa] @ teplotě T</b>					
ACO 11+_Ref	17 461	7 309	3 400	1 189	14,7
ACO 11+ 0,4 % TTO-A	19 089	9 461	4 037	1 537	12,4
ACO 11+ 0,4 % TTTO-C	19 039	9 104	3 554	1 402	13,6
ACO 11+ 0,4 % AD-2M	17 539	8 117	3 119	1 111	15,8

Pro posouzení deformačního chování v oboru středních teplot jsou určující hodnoty změřené při teplotě 15 °C. Nejvyšších modulů tuhosti při této teplotě dosáhla varianta TTO-A (8.218 MPa), v případě variant TTO-C a AD-2M došlo k navýšení modulu tuhosti v porovnání s referenční směsí o v průměru 15 %. Nižší rozptyl hodnot je patrný při zkušební teplotě bodu mrazu, v porovnání s referenční směsí dosahují varianty přílnavostních přísad téměř shodných modulů tuhosti. Na opačné straně při vyšších teplotách je rozptyl modulů tuhosti patrnější, u varianty TTO-A došlo k navýšení modulu tuhosti o 30 %, naopak u varianty AD-2M jsou naměřeny nižší hodnoty než u směsi referenční, a to i při teplotě 27 °C. Z hlediska teplotní citlivosti lze konstatovat, že nejvyšší teplotní citlivost dosahuje varianta AD-2M, naopak nejnižší varianta TTO-A.

*Tab. 35. Index stárnutí (AI) posuzovaných asfaltových směsí ACO 11+.*

Asfaltová směs	Index stárnutí [AI]				Teplotní citlivost [-]
	0 °C	15 °C	27 °C	40 °C	
ACO 11+_Ref	1,04	1,12	1,13	1,15	0,90
ACO 11+ 0,4 % TTO-A	1,10	1,15	1,10	1,15	0,96
ACO 11+ 0,4 % TTO-C	1,08	1,19	1,03	1,15	0,94
ACO 11+ 0,4 % AD-2M	0,99	1,11	1,08	1,10	0,90

Během procesu stárnutí dochází k navýšení hodnot modulů tuhosti, což je patrné z Tab. 35. Vlivem stárnutí došlo k navýšení tuhosti při teplotě 0 °C do max. 10 %, v případě varianty AD-2M byl zaznamenán nepatrný pokles tuhosti. Pokles modulu tuhosti může být způsoben vlivem nízké zkušební teploty, při níž jsou testovací vzorky měřeny, asfaltové těleso je dostatečně tuhé a v menší míře dochází k projevu vlivem stárnutí. Je ovšem nezbytné současně uvažovat o přípustném rozptylu hodnot během testování, kdy uvažujeme rozptyl modulů tuhosti -20 % až +10 % od střední hodnoty. Naopak při vyšších teplotách se zkušební tělesa stávají měkčí a u degradovaného asfaltového pojiva je tendence nárůstu modulu tuhosti patrnější. Vlivem



procesu simulovaného stárnutí došlo ke snížení indikátoru teplotní citlivosti v průměru o 5 % až 10 %, což naznačuje vyšší odolnost zestárých směsí vůči změnám teplot.

### 5.3.3 Diskuze k dosaženým výsledkům

V rámci této dílčí experimentální studie byla snaha dozvědět se více o komplexnosti a citlivosti přílnavostních přísad v asfaltovém pojivu, zejména s ohledem k ostatním složkám asfaltové směsi, jímž jsou různé typy kameniva lišící se fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, které vyplývají z jejich geneze, mineralogicko-petrografického složení, struktury, textury, druhotných přeměn apod., a současně tedy i v kompozitním materiálu – v asfaltové směsi. Hlavní funkce adhezivních přísad spočívá v zachování dostatečně pevné vazby mezi kamenivem a pojivem, jenž je v případě asfaltového betonu v obrusné vrstvě vozovky vystavena riziku ztráty makrotextury, ztráty odolnosti proti působení klimatických jevů apod. Obrusná vrstva je vystavena přímo působení klimatických vlivů a dopravnímu zatížení, proto jsou na ni kladeny vyšší nároky z hlediska její trvanlivosti.

Postupem času je stále více pozornosti věnováno právě přílnavostními přísadám. Snaha vyvíjet nové účinnější přísady z řad odborníků neutichá, což dokládá stále širší škála nabízených produktů. V experimentální studii byl ověřen potenciál několika těchto nově vyvíjených přílnavostních přísad. Jednalo se o produkty na bázi alkylsilanů či produktů nenasycených mastných kyselin. Z hlediska jednoduchého zkušebního postupu stanovení stupně obalení zrn kameniva pojivem se, s vybranými přísadami, dle ČSN 73 6161, jeví pozitivně s ohledem ke zvoleným typům kameniva v případě vyššího dávkování těchto přísad. Nejvýraznější zlepšení přílnavosti mezi pojivem a kamenivem je patrné v případě kameniva z lomu Brant (žulový porfyr) a Skuteč (granodiorit). V případě kameniva typu žulového porfyru v průměru o 20 %, a v případě kameniva typu granodiorit dokonce až o 30 %. Kamenivo z lomu Sýkořice – Zbečno (spilit) se jeví z hlediska přílnavosti již za použití asfaltového pojiva 50/70 bez aditiv jako vyhovující. Účinky těchto přísad byly současně ověřeny na asfaltové směsi typu ACO 11+, v nichž bylo použito jedno z méně vhodných kameniv (žulový porfyr) z hlediska přílnavosti. U všech těchto přísad došlo k nepatrnému zlepšení vodní citlivosti oproti směsi referenční. Stejný trend můžeme vidět i v případě modulů tuhosti, kdy dochází téměř ve všech případech k navýšení modulu tuhosti v porovnání s referenční směsí. Nicméně zajímavějším ukazatelem jsou pro nás výsledky po procesu stárnutí, tedy index stárnutí a teplotní citlivost, které můžeme považovat za jeden z možných nástrojů pro hodnocení účinnosti a stability adhezivních přísad. Nejvyšší odolnost vůči změnám teplot, tedy nejnižší teplotní citlivost, dosahuje přísada TTO-A, naopak nejnižší přísada AD-2M. [177, 178]

## 5.4 Využití jemnozrnných složek drceného odpadního materiálu jako minerální přísady do asfaltových směsí [149, 150]

### 5.4.1 Návrh směsi a použité varianty

Pro porovnání vlivu vybraných alternativních náhrad tradičního jemnozrnného plniva (fileru) v asfaltové směsi byla zvolena směs typu asfaltový beton ACL16S, která je určena pro ložní vrstvy vozovek třídy dopravního zatížení S, případně I a II, s kamenivem z lomu Sýkořice a Brant a asfaltovým pojivem 50/70 (silniční asfalt). V referenční směsi byl dávkován vratný filer z

obalovny Kladno – Dříň. Současně byly navrženy varianty asfaltové směsi, v níž byl vratný filer nahrazen alternativním jemnozrnným plnivem v podobě drceného odpadního skla. Pro možnosti využití náhrady tradičního fileru v asfaltové směsi bylo použito drcené tříděné sklo (polykrystalické, amorfnní a pěnové sklo) se zrnitostním propadem pod sítím 0,25 mm, jak je standardně získáván při recyklaci fotovoltaických (FV) panelů. Do směsi byly tyto náhrady dávkovány hmotnostně jako stoprocentní náhrada vratného fileru v referenční směsi. U jedné z variant byla použita pro porovnání náhrada v podobě recyklovaného betonu z dálnice D2. Za účelem širšího uplatnění a změny technologických vlastností tohoto materiálu bylo provedeno jeho přemletí s použitím mechanochemické aktivace vysokorychlostním mletím v desintegrátoru, viz kap. 2.3.2.8 a kap. 0.

#### 5.4.2 Výsledky experimentální studie

V rámci možného posouzení vlivu vybraných náhrad tradičního fileru v asfaltové směsi byla provedena série zkušebních testů zaměřená na základní fyzikální a vybrané mechanické vlastnosti, jako stanovení modulu tuhosti, odolnosti asfaltové směsi vůči účinkům vody včetně varianty se zmrazováním.

##### 5.4.2.1 Základní charakteristiky

Mezerovitost jednotlivých asfaltových směsí byla stanovena na základě hodnot zhutněné objemové hmotnosti a maximální objemové hmotnosti nezshutněných asfaltových těles podle normy ČSN EN 12697-8. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v Tab. 36. Mezerovitost asfaltových směsí ACL 16S by měla být v souladu s požadavky příslušné výrobní normy a to v rozmezí 4,0-6,0 %. Tyto meze nesplnila žádná z uvedených variant. Nejblíže této hranici dosahuje varianta s mikromletým betonem. Použitím třech náhrad odpadního skla došlo ke snížení mezerovitosti. Nejvyšší hodnoty dosahuje referenční směs (8,44 %). Důvod takto vysoké mezerovitosti lze přisuzovat použitému návrhu asfaltové směsi, který vycházel z receptury dodané výrobcem (návrh tedy neprošel optimalizací asfaltové směsi) a vysokou mezerovitost zapříčinila odlišná zrnitost jednotlivých frakcí kameniva použitého při výrobě asfaltových směsí. Nicméně z hlediska posouzení vlivu vybraných alternativ jemnozrnného plniva v asfaltových směsích a ověření účinku z hlediska posouzení vodní citlivosti je brán zřetel na účinek negativního působení vody v případě vyšší mezerovitosti. A s ohledem k vyšším hodnotám mezerovitosti je na snadě patrnější efekt použitých náhrad tradičního fileru v asfaltových směsích. V případě pěnového skla byl použit komerční produkt Refaglass, kde byly použity jemnozrnné složky (odprašky).

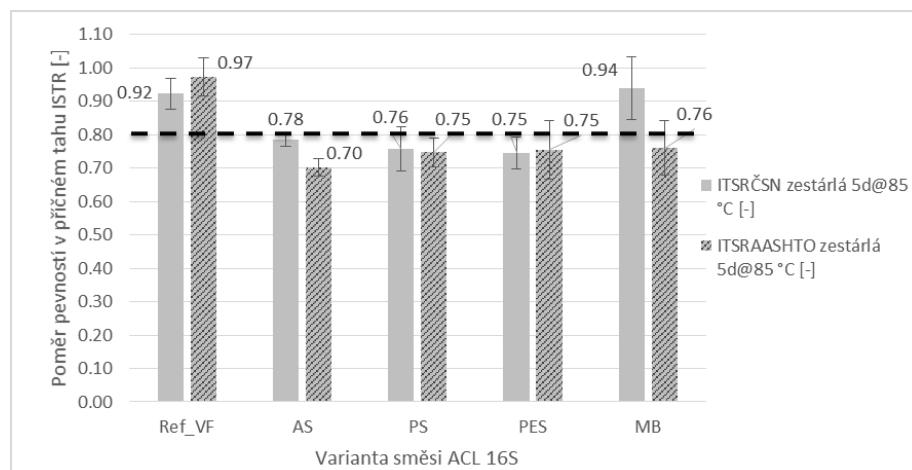
Tab. 36. Základní charakteristiky variant směsí ACL 16S.

Specifikace směsi ACL 16S	Označení směsi	Zhutněná objemová hmotnost [g.cm <sup>-3</sup> ]	Maximální objemová hmotnost [g.cm <sup>-3</sup> ]	Mezerovitost [g.cm <sup>-3</sup> ]	ITS <sub>dry</sub> [MPa]	ITSR čSN [-]	ITSR AASHTO [- ]
Vratný filer	Ref_VF	2,354	2,571	8,44	1,32	0,88	0,91
Amorfnní sklo	AS	2,332	2,536	8,02	1,36	0,75	0,69
Polykrystalické sklo	PS	2,346	2,533	7,38	1,36	0,74	0,67
Pěnové sklo	PES	2,336	2,528	7,62	1,87	0,80	0,73
Mikromletý beton	MB	2,373	2,532	6,31	1,35	1,03	0,85

### 5.4.3 Stanovení odolnosti vůči účinkům vody včetně varianty se zmrazováním

Zkouška stanovení odolnosti zkušební tělesa vůči účinkům vody byla provedena v souladu s technickou normou ČSN EN 12697-12. Tento postup byl doplněn o další řadu těles, která byla vystavena jednomu zmrazovacímu cyklu v souladu s podmínkami stanovenými v americkém předpise AASHTO T283-3. Díky tomu je možné zohlednit nejen účinek vody, ale i možnou kombinaci s účinkem mrazu. Výsledkem zkoušky je poměr pevností v příčném tahu skupiny těles vodou saturovaných ke skupině těles ponechaných na suchu (v grafech hodnota ITSR).

V Tab. 36 jsou shrnuty výsledné hodnoty ITSR dle české i americké zkušební metody. Podle postupu ČSN EN 12 697-12 dosáhla nejvyšší hodnoty ITSR referenční směs s vratným filerem, všechny ostatní varianty s recyklovaným sklem dosáhly nižších hodnot, což v zásadě bude odpovídat skutečnosti, že jemný skelný prach bude obsahovat vysoký podíl  $\text{SiO}_2$ . Požadovaný poměr pevnosti v příčném tahu podle ČSN 73 6121 je pro směs ACL 16S minimálně 80 %. Této hranice dosáhla směs referenční, varianta s mikromletým betonem, současně ale také varianta s pěnovým sklem. Vlivem působení vody a mrazu došlo u variant s recyklovaným sklem a mikromletým betonem k poklesu ITSR, je patrná tendence k poklesu pevnosti v příčném tahu.



Pozn.: Ref\_VF – vratný filer, AS – amorfní sklo, PS – polykrystalické sklo, PES – pěnové sklo, MB – mikromletý beton.

Obr. 84. Porovnání poměru pevností v příčném tahu – ITSR dle ČSN 12 697-12 a AASHTO T-283.

V grafu na Obr. 84 jsou shrnuty výsledné hodnoty ITSR dle české i americké zkušební metody s využitím simulace dlouhodobého stárnutí. V tomto případě byla zkušební tělesa stárnutá 5 dnů při teplotě 85 °C. Podle postupu ČSN EN 12 697-12 dosáhla nejvyšší hodnoty ITSR varianta s mikromletým betonem a referenční směs s vratným filerem (tyto varianty přesáhly i v případě stárnutí minimální požadavek ITSR). V ostatních případech došlo vlivem stárnutí k nepatrnému nárůstu hodnot ITSR. Což je zřejmé i v případě porovnání poměrů pevností dle americké zkušební metod AASHTO T-283, kde mimo varianty MB došlo ve všech případech oproti nezestárým zkušebním tělesům k nárůstu ITSR.



#### 5.4.4 Stanovení modulu tuhosti

Moduly tuhosti asfaltových směsí byly stanoveny na válcových zkušebních tělesech postupem dle ČSN EN 12697-26 metodou opakovaného namáhání v příčném tahu nedestruktivní metodou. Zkouška se prováděla i v případě této dílčí experimentální studie při teplotách 0, 15, 27 a 40 °C. V Tab. 37 jsou shrnuty výsledky naměřených modulů tuhosti jednotlivých variant doplněné o charakteristiku teplotní citlivosti. Současně s těmito hodnotami byly výsledky doplněny o hodnoty naměřené na zestárlých zkušebních tělesech. U poloviny zkušebních těles byla provedena laboratorní simulace dlouhodobého stárnutí dle postupu popsaného v normě prEN 12697-52, v níž jsou uvedeny podmínky stárnutí zkušebních těles v teplotní komoře s cirkulací vzduchu při teplotě 85 °C po dobu 120 hodin (5 dní). Zkušební tělesa během procesu stárnutí nebyla nijak chráněna proti případné deformaci vlivem vysoké teploty.

Tab. 37. Stanovení modulu tuhosti variant směsi ACL 16S před a po účinku stárnutí.

Asfaltová směs	Typ stárnutí	Modul tuhosti [MPa] při teplotě				Teplotní citlivost	Nárůst tuhosti po stárnutí			
		0 °C	15 °C	27 °C	40 °C		0 °C	15 °C	27 °C	40 °C
Ref_VF	Nezestárlá	20294	10302	3371	1022	19,9	-	-	-	-
	5d@85°C	21 737	11 196	4 407	1 385	15,7	7 %	9 %	31 %	35 %
AS	Nezestárlá	16 327	6 369	1 690	401	40,7	-	-	-	-
	5d@85°C	16 522	6 749	1 936	699	23,6	1 %	6 %	15 %	74 %
PS	Nezestárlá	16 593	7 310	1 842	546	30,4	-	-	-	-
	5d@85°C	17 414	8 321	3 095	876	19,9	5 %	14 %	68 %	60 %
PES	Nezestárlá	20 762	12 182	5 809	1 935	10,7	-	-	-	-
	5d@85°C	25 044	13 943	7 549	3 040	8,2	21 %	14 %	30 %	57 %
MB	Nezestárlá	19 001	9 465	3 622	1 211	15,7	-	-	-	-
	5d@85°C	18613	9936	4357	1620	11,5	-2 %	5 %	20 %	34 %

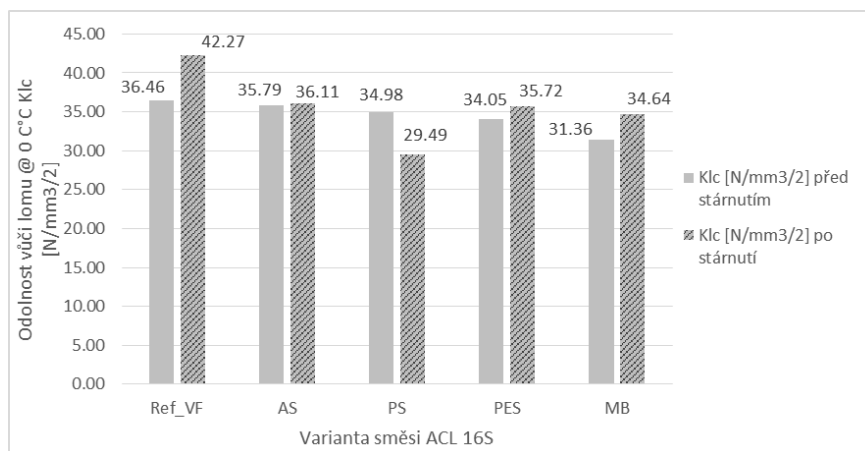
Pro posouzení deformačního chování v oboru středních teplot jsou určující hodnoty změřené při teplotě 15 °C, tato teplota je také uvažována jako nejdůležitější z hlediska navrhování konstrukce vozovek dle technických podmínek Ministerstva dopravy TP 170. Nejvyšších modulů tuhosti při této teplotě dosáhla varianta s pěnovým sklem 12 182 MPa. V případě variant s polykrystalickým a amorfním sklem došlo k poklesu modulu tuhosti přibližně o 30 % oproti směsi referenční s vratným filerem. Pokud bychom porovnali výsledky naměřených hodnot modulů tuhosti i při ostatních teplotách, tak v případě varianty s pěnovým sklem došlo oproti směsi referenční k nárůstu modulu tuhosti při teplotě 0 °C pouze o 2 %, při teplotě 27 °C o 72 % a při teplotě 40 °C dokonce až o 89 %. Opačný trend je v tomto případě zaznamenán u variant PS a AS.

Další charakteristikou posuzovanou v případě naměřených modulů tuhosti při rozdílných teplotách může být indikátor teplotní citlivosti asfaltové směsi. Čím je poměr tuhostí  $S_0/S_{40}$  menší, tím je směs méně citlivá na změnu teplot. Nejmenší citlivost vykazuje varianta PES, naopak nejvyšší citlivost varianty AS a PS. Vlivem procesu laboratorního stárnutí, kterému byla zkušební tělesa vystavena, došlo ke snížení indikátoru teplotní citlivosti v průměru o 30 %. Na změnu teploty jsou více náchylné asfaltové směsi obsahující amorfní a polykrystalické sklo, naopak nejvyšší ukazatel teplotní citlivosti vykazuje varianta s pěnovým sklem. Vlivem stárnutí došlo u všech asfaltových směsí k nárůstu modulů tuhosti (v tabulce je uveden procentuální nárůst této hodnoty). Pokud bychom se zaměřili na stěžejní teplotu 15 °C, u varianty PS a PES

došlo k nárůstu modulu tuhosti o 14 %, naopak nejnižší nárůst byl zaznamenán u varianty MB a AS. Výraznější nárůst modulu tuhosti, po stárnutí při teplotě 40 °C, se projevil u variant asfaltových směsí obsahující recyklované sklo. Pokud bychom se zaměřili na porovnání vlivu stárnutí u náhrady mikromletého betonu lze konstatovat velmi podobné chování jako v případě vratného fileru v referenční směsi.

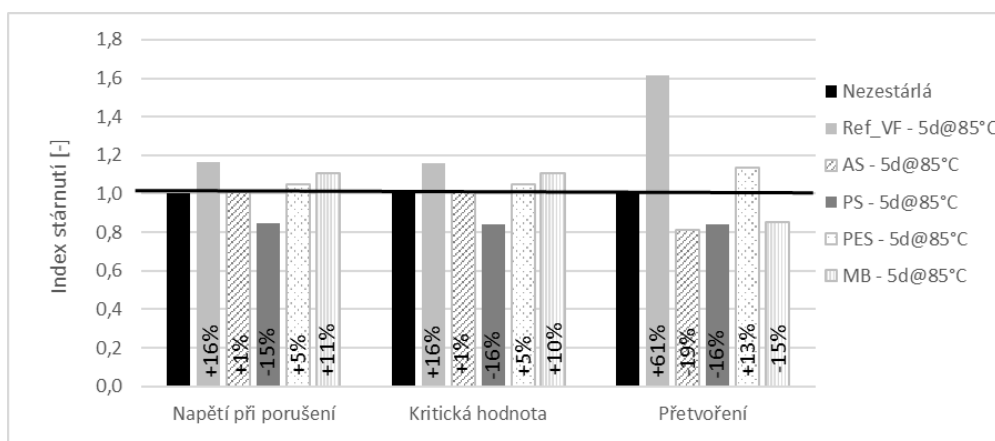
#### 5.4.5 Stanovení odolnosti asfaltové směsi proti šíření trhliny

S ohledem k posouzení chování asfaltových směsí v oboru nízkých teplot se jako jeden možný přístup využívá zkouška stanovení odolnosti směsi proti šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese v souladu s ČSN EN 12697-44 (výpočet proveden dle vzorců uvedených v normě z roku 2011). Pro tuto zkoušku jsou oproti základnímu vymezení normy použita půlválcová zkušební tělesa s průměrem 100 mm, u nichž je vytvořena drážka předepsané hloubky. Takto připravená zkušební tělesa se zatěžují konstantní rychlostí 5 mm/min. Výsledkem zkoušky jsou hodnoty maximálního napětí a lomové houževnatosti (odolnosti vůči lomu). Zkouška byla provedena při zkušební teplotě 0 °C. Výsledky získaných kritických hodnot lomové houževnatosti byly naměřeny též u zkušebních těles zestárých, u nichž byla využita simulace dlouhodobého stárnutí dle prEN 12697-52, jako v případě stanovení modulu tuhosti. Naměřené hodnoty lomové houževnatosti jsou uvedeny v grafu na Obr. 85. U všech variant lze konstatovat, že před stárnutím dosahují v průměru velmi podobného výsledku odolnosti vůči lomu při teplotě 0 °C.



Obr. 85. Porovnání kritických hodnot  $K_{Ic}$  pro varianty směsi ACL 16S podle normy ČSN EN 12697-44:2011.

Vlivem stárnutí došlo u směsí k navýšení modulu tuhosti u všech sledovaných směsí. S ohledem k vyšším pevnostním charakteristikám zestárých zkušebních těles je, za předpokladu účinku stárnutí na danou směs, očekávána nižší míra odolnosti vůči křehkému lomu při nízkých teplotách. Z výsledků je toto tvrzení patrné pouze u varianty PS, naopak u ostatních variant došlo k mírnému nárůstu kritické hodnoty lomové houževnatosti, v případě referenční směsi dokonce o 16 %, viz Obr. 86. U variant AS, PS došlo vlivem stárnutí ke snížení přetvoření o 16-19 %, oproti tomu u referenční směsi bylo zaznamenáno výrazné navýšení přetvoření o 61 %.



Obr. 86. Index stárnutí sledovaných charakteristik lomové houževnatosti, napětí při porušení a přetvoření.

#### 5.4.6 Potenciál využití odpadního materiálu jako náhrady tradičního jemnozrného plniva

Filer, jakožto jedna ze složek asfaltové směsi, hraje významnou roli nejen z hlediska plniva samotné směsi, ale společně s asfaltovým pojivem vytváří asfaltovou maltu, tužší než samotný asfalt a významně se podílí na fixaci hrubé kostry kameniva. Ovlivňuje výsledné vlastnosti vyrobené asfaltové směsi, dobře zvolený typ fileru může být vhodnou alternativou tekutých přísad dávkovaných do asfaltového pojiva pro zlepšení užitečných vlastností asfaltových směsí. Použití recyklovaného amorfního a polykrystalického skla vedlo ke snížení vodní citlivosti a nedosáhlo ani minimálních požadavků dle platné technické normy. Naopak náhrada v podobě drčeného pěnového skla splnila minimální požadovanou hranici 80 % ITSR splnila. V případě porovnání modulů tuhosti, vede aplikace amorfního a polykrystalického skla ke snížení této hodnoty oproti směsi referenční. Současně jsou tyto varianty i méně stabilní z hlediska teplotní citlivosti. Opačný trend lze sledovat u pěnového skla, kdy dochází naopak k nárůstu modulu tuhosti při všech uvažovaných teplotách, směs je více teplotně stabilní. Pěnové sklo má dobrý potenciál jako možná náhrada tradičního jemnozrného plniva v asfaltové směsi.

Pomocí výše jmenovaných metodik lze provést porovnání zvolených náhrad tradičního jemnozrného plniva v asfaltové směsi a v kombinaci s použitou metodou dlouhodobého stárnutí nám tyto metody dávají určitou představu o chování směsi z hlediska trvanlivosti. Rozšiřují výsledky stanovení vodní citlivosti, resp. přilnavosti mezi pojivem a kamenivem o další kategorii charakteristik asfaltových směsí a udávají nám další rozměr testování přísad z hlediska trvanlivosti stability asfaltové směsi. [149, 150]

### 5.5 Alternativy minerálních přísad v asfaltových směsích [179]

V rámci další dílčí experimentální studie této práce byla snaha o porovnání různých typů jemnozrných materiálů jako alternativ minerálních přísad v asfaltových směsích. Jako tradiční plnivo se nejčastěji využívá vápencový filer vznikající drčením a tříděním běžných vápenců případně dalších hornin. Velmi často je dnes kombinován právě s vratnými filery, které nejsou mnohdy vzhledem ke svému složení příliš vhodné jako například vápencové filery, u nichž se využívá právě jejich výhodného chování z hlediska zlepšení přilnavosti. Tab. 38 uvádí přehled



vybraných odlišných variant vratných filerů, které byly doplněny o vybrané varianty odpadních anorganických materiálů, které byly pro své uplatnění jako náhrady tradičního fileru v asfaltových směsích upraveny vysokorychlostním mletím: (i) drcený a mikromletý beton CB krytu vozovky, (ii) jemnozrnné podíly vysokopecní strusky v podobě odprašků nebo mletého aktivovaného mikrofileru (struska Kladno, struska Třinec) a (iii) jemně mleté odřezky sádrokartonových desek částečně zbavené kartonu. Při správném způsobu použití jsou recyklované materiály v mnoha případech stejně hodnotné jako materiály standardní.

Tab. 38. Alternativy minerálních přísad v asfaltových směsích.

Filer	Označení fileru
Vratný filer – Brant	Vratný filer Brant
Vratný filer PKB - Zbraslav + Lašovice (50:50)	Vratný filer PKB
Filer - Bystřec z výroby (Filer ANIVI)	Bystřec - V
Vratný filer - Bystřec ze skládky obalovny AHM Třebovice	Bytřec - O
Filer z lomu Chornice - z výroby	Chornice - V
Vratný filer z lomu Chornice - z obalovny	Chornice - O
Odprašky Plešovice	Plešovice
100 % betonový recyklát mletý (D2)	BET
Odprašky Struska 08/2018 (Kladno)	Struska KL
Mletá struska granulovaná 01/2019 (Třinec)	Struska TŘ
Mletý sádrokarton 07/2018	Sádrokarton
Odprašky Plešovice + CEM II 42.5 (poměr 10:1,5) 50 % výkon mletí	Plešovice + CEM
Odprašky Plešovice + Mastek (poměr 10:1) 50 % výkon mletí	Plešovice +Mastek

### 5.5.1 Stanovení základních geometrických, fyzikálních a mechanických vlastností filerů

Obecně existuje celá řada zkoušek pro posouzení vlastností filerů, které nám dnes normy definují. Ne všechny mají ovšem takovou vypovídající hodnotu, proto byly vybrány pouze některé z nich, viz Tab. 39.

Tab. 39. Souhrn vybraných zkoušek filerů pro posouzení jejich vlastností

Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 9; Posouzení jemných částic – Zkouška methylenovou modří	ČSN EN 933-9	9/2013
Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	8/1999
Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 4: Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru	ČSN EN 1097-4	10/2008
Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně	ČSN EN 1097-5	10/2008
Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru - Pyknometrická zkouška	ČSN EN 1097-7	10/2008

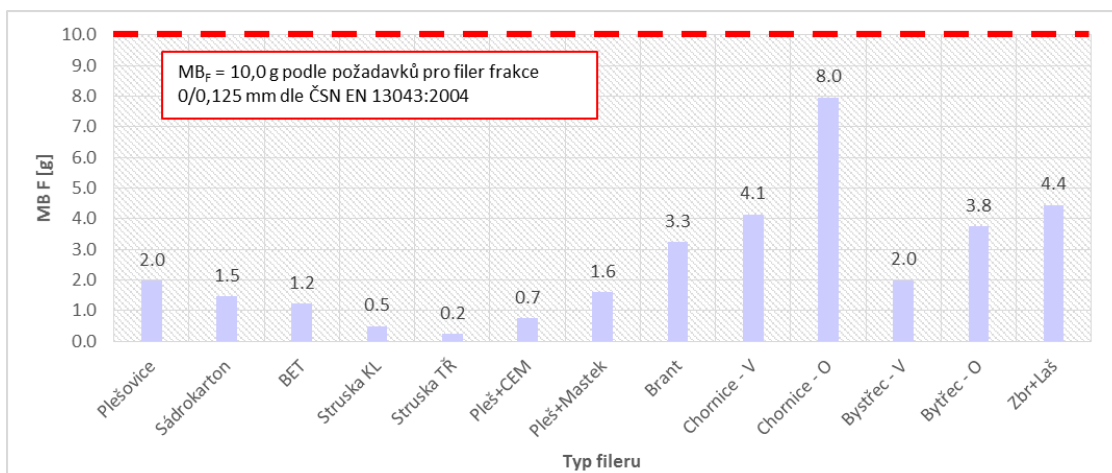
#### 5.5.1.1 Posouzení jemných částic – Zkouška methylenovou modří dle ČSN EN 933-9

Zkouška je založena na odlišné sorpční schopnosti částic jemnozrnných materiálů, tedy na petrografickém složení mateční horniny, z které daný filer pochází. Srovnává relativní množství barviva potřebného k adsorpci na povrchu jemných částic. Sorpční schopnost kalcitu je velmi malá a ve srovnání se sorpční schopností jílových minerálů zanedbatelná. Využívá

poznatku, že jílovité částice mají velký měrný povrch vzhledem k jejich hmotnosti, a proto se již malé podíly těchto částic projevují zvýšením absorpce methylenové modři (ČSN EN 933-9+A1). Podstata zkoušky spočívá v postupném přidávání roztoku methylenové modři do suspenze zkušební navážky vzorku fileru s vodou. Adsorpce barevného roztoku zkušební navážkou vzorku fileru je kontrolována po každém přidání roztoku provedením zkoušky zbarvení filtračního papíru k zjištění přítomnosti volného, neadsorbovaného barviva. Pokud je přítomnost volného barviva potvrzena, vypočte se množství adsorbované methylenové modři a vyjádří se v g barviva adsorbovaného 100 g zkoušeného vzorku fileru.



Obr. 87. Zkouška methylenovou modří – filer Plešovice, objem roztoku barviva s přesností na 1 ml, kterého bylo nutno dodat, aby barevný kruh vydržel po dobu 5 minut.



Obr. 88. Posouzení jemných částic zkouškou methylenovou modří dle ČSN EN 933-9.

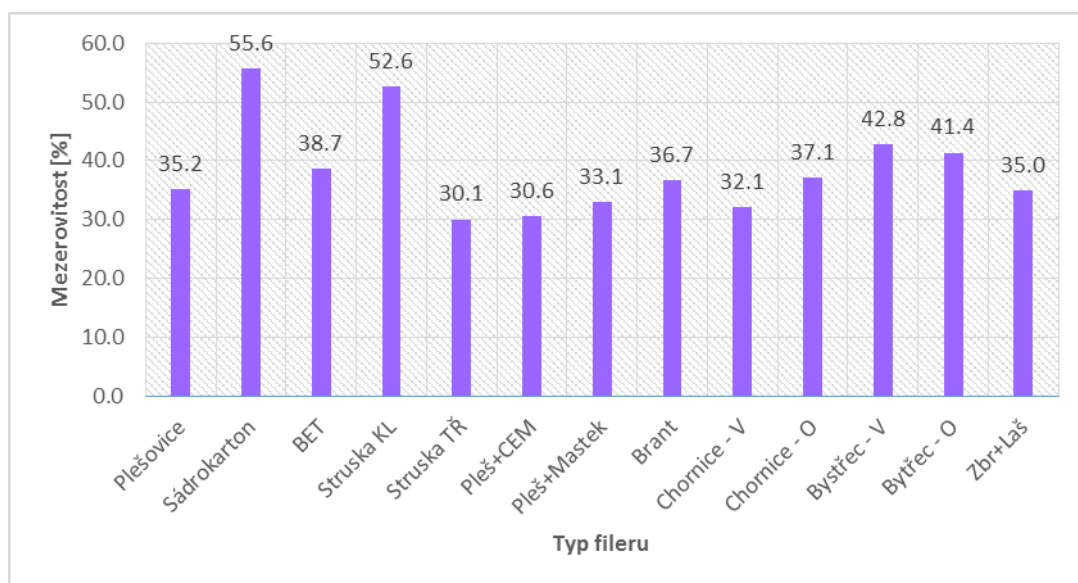
Jakost jemných částic stanovenou zkouškou methylenovou modří podle normy ČSN EN 933-9 bylo dosaženo ve všech případech hodnot nižších, než je maximální přípustná hodnota udávaná pro použití fileru v asphaltových směsích (viz Obr. 88). Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo v případě v případě vratného fileru Bystřec z výroby.

#### 5.5.1.2 Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru dle ČSN EN 1097-4

Postup stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru je popsán v normě ČSN EN 1097-4. Tato zkouška se provádí na fileru, který se přeseje přes síto 0,125 mm. Provede



se stanovení mezerovitosti použitím tří oddělených dílčích navážek. Do prázdného válce je vložen filtrační papír a píst a hloubkovým posuvným měřítkem nebo číselníkovým úchylkoměrem se nastaví nulová výška válce s filtračním papírem a pístem. Následně je zvážena beran bez pístu, ale s jedním filtračním papírem, s přesností na 0,01 g a zaznamenána hmotnost ( $m_0$ ). Do válce berana je vloženo ( $10 \pm 1$ ) g fileru a jemně se rozprostře otáčením berana na stole, na který se poté položí filtrační papír a zasune se do válce píst. Beran s filerem a pístem se umístí mezi vodící tyče na základovou desku. Zvedne se beran k horní zarážce a nechá se volně spadnout na základní desku. Tento postup se opakuje 100krát v intervalu jedné sekundy. Po 100 rázech je zjištěna výška (h) zhutněného suchého fileru na nejbližších 0,01 mm. Zváží se válec s filerem a filtračním papírem ( $m_1$ ) s přesností na 0,01 g a stanoví se hmotnost zhutněného fileru  $m_2$  v gramech. Souhrn dosažených mezerovitostí suchého zhutněného fileru dle ČSN EN 1097 graficky znázorňuje graf na Obr. 89.



Obr. 89. Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru dle ČSN EN 1097-4.

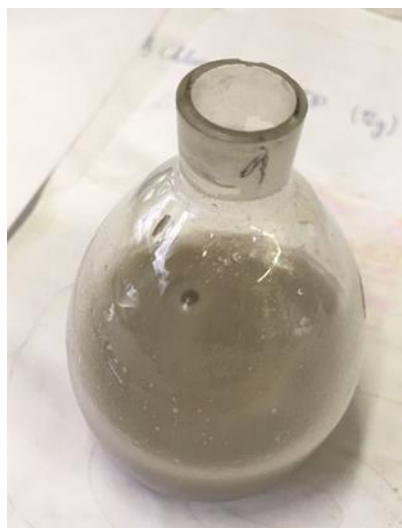
Vyšší hodnoty mezerovitosti suchého zhutněného fileru dle ČSN EN 1097-4 mají za následek vyšší ztužení mastixu filerem při stejném volumetrickém podílu filerické frakce. Výsledky zkoušky jsou pro přehlednost graficky znázorněny na Obr. 89. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo v případě mletých sádrokartonových odřezků a současně také odprašku vysokopecní vzduchem chlazené strusky z Kladna. Naopak nejnižších mezerovitostí dosahují varianty mleté granulové vysokopecní vodou chlazené strusky z Třince a varianty fileru Plešovice v kombinaci s cementem. Stanovením mezerovitosti suchého zhutněného fileru bylo zjištěno, že mezerovitost fileru Plešovice přidáním cementu a mastku vede ke snížení této hodnoty. U vratných filerů dosahují mezerovitosti obdobných hodnot pro Plešovice, PKB (kombinace Zbraslav a Lašovice) a Brant.

#### 5.5.1.3 Stanovení měrné hmotnosti fileru – pyknometrická zkouška dle ČSN EN 1097-7

Pyknometrická zkouška byla provedena v souladu s technickou normou ČSN EN 1097-7. Stanovení měrné hmotnosti se provádí odděleně na třech dílčích navážkách pomocí pyknometrů následujícím způsobem. Suchý pyknometr je zvážena se zátkou ( $m_0$ ) – Obr. 89. Do pyknometru je nasypáno ( $10 \pm 1$ ) g fileru, odebraného ze zkušební navážky a znovu je zvážena ( $m_1$ ). Poté je



přidáno tolik kapaliny, aby v ní byl celý vzorek ponořen. Pyknometr je vložen do vakuového exsikátoru, kde je vakuovou pumpou po dobu 30 minut dosahováno podtlaku menšího než 3,0 kPa. Po uvolnění podtlaku v exsikátoru je vyjmut pyknometr a naplněn destilovanou vodou. Pyknometr je vložen bez zátky do vodní lázně o teplotě  $(25 \pm 0,1)$  °C tak, aby vyčníval 2 až 3 mm nad vodní hladinu v lázni. Po 60 minutách je pyknometr zazátkován. Horní část kapilární trubice je osušena a pyknometr je vytáhnut z vodní lázně. Pyknometr je rychle ochlazen pod studenou vodou, aby bylo zabráněno vytékání kapaliny z kapiláry v důsledku teplé manipulace. Vnější pyknometru je opatrně osušen a zvážen spolu s kapalinou a dílčí navážkou ( $m_2$ ).



Obr. 90. Ukázka vzorku fileru pro pyknometrickou zkoušku dle ČSN EN 1097-7.

Výsledné charakteristiky měrné hmotnosti, zhutnění objemové hmotnosti a mezerovitosti fileru shrnuje Tab. 40, poslední sloupec je doplněn současně i o získané hodnoty methylenové modře stanovené zkouškou methylenovou modří.

Tab. 40. Výsledné charakteristiky vybraných jemnozrnných materiálů jako možné alternativy fileru v asfaltových směsích.

Označení fileru	Měrná hmotnost fileru dle ČSN EN 1097-7 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Zhutněná obj. hmotnost fileru [Mg/m <sup>3</sup> ]	Mezerovitost dle ČSN EN 1097-4 [%]	Jakost jemných částic MB <sub>F</sub> dle ČSN EN 933-9 [g]
Plešovice	2,732	1,760	35,2	2,0
Sádrokarton	2,604	1,157	55,6	1,5
BET	2,523	1,547	38,7	1,2
Struska KL	2,932	1,390	52,6	0,5
Struska TR	2,856	1,997	30,1	0,2
Plešovice + CEM	2,743	1,903	30,6	0,7
Plešovice + Mastek	2,666	1,784	33,1	1,6
Vratný filer Brant	2,768	1,753	36,7	3,3
Chornice - V	2,657	1,806	32,1	4,1
Chornice - O	2,642	1,662	37,1	8,0
Filer Bystřec - V	2,887	1,653	42,8	2,0
Filer Bytřec - O	2,772	1,625	41,4	3,8
Vratný filer PKB	2,723	1,769	35,0	4,4

### 5.5.2 Stanovení citlivosti na vodu filerů pro asfaltové směsi

V rámci posuzování vodní citlivosti fileru pro asfaltové směsi byla navržena asfaltové směs dle přílohy A normy ČSN EN 1744-4 z roku 2006 pro zkoušení chemických vlastností kameniva (Část 4: Stanovení citlivosti na vodu filerů pro asfaltové směsi). Příloha uvádí metodu pro stanovení zvětšení objemu a ztráty stability vzorku Marshallovou zkouškou, která je ukazatelem vlivu filerů na trvanlivost asfaltu v přítomnosti vody. Princip zkoušky spočívá ve zkoušení, horké asfaltové směsi s maximálním zrnem 8 mm, jejíž složení uvádí Tab. 41, pro stanovení zvětšení objemu a ztráty stability po uložení ve vodě o teplotě  $40\pm 1$  °C po dobu 48 hodin. Kamenivo pro asfaltovou směs bylo použito z lomu Sýkořice. Norma ČSN EN 1744-4 definuje použité frakce kameniva i použité asfaltové pojivo 160/220. Asfaltová směs byla vyrobena s vybranými typy filerů či filerů v kombinaci s portlandským cementem či mastkem, ze kterých byla následně vyrobena série zkušebních Marshallových těles dle normy ČSN EN 12697-30.

Tab. 41. Složení asfaltové směsi 0/8 mm dle ČSN EN 1744-4: 2006.

Návrh směsi	Množství [%]	Obsah v asfaltové směsi [%]
HDK 5/8 Sýkořice	25,00	23,50
HDK 2/5 Sýkořice	25,00	23,50
DDK 0,125/2 Sýkořice	40,00	37,60
Filer	10,00	9,40
<b>Asfaltové pojivo 160/220</b>		<b>6,00</b>

Pro posouzení jednotlivých typů filerů byly za pomoci Marshallovy zkoušky stanoveny následující parametry: přetvoření podle Marshalla F, Marshallova stabilita S a míra tuhosti S/F zkušebních těles (Tab. 42). Princip zkoušky spočívá ve stanovení maximální odolnosti zkušebního tělesa proti deformaci za pomoci přístroje pro zkoušku tlakem. Horká asfaltová směs, sestávající z vhodného kameniva a zkoušeného fileru, se vyzkouší na stanovení ztráty stability po uložení ve vodě o teplotě  $40\pm 1$  °C po dobu 48 hodin. Hodnoty stability se stanoví u zkušebních těles po uložení ve vodě podle Marshalla podle ČSN EN 12697-34:2012 a současně pro zbývající část zkušebních těles. Před samotnou zkouškou byla na zkušebních tělesech stanovena charakteristika modulu tuhosti v souladu s ČSN EN 12697-26 metodou opakované namáhání v příčném tahu IT-CY nedestruktivní zkouškou při teplotě 15 °C.

Z níže uvedených výsledků je patrné, že nejvyšších hodnot stability asfaltové směsi podle Marshalla dosahuje varianta s kombinací odprašků Plešovice a cementu (10,13 kN). V průměru podobných výsledků Marshallovy stability bylo dosaženo v případě fileru Velké Hydčice, vratné fileru u obalovny PKB (Kladno-Dříň) a kombinace odprašků Plešovice s mastkem. Při porovnání hodnot stability stanovených u zkušebních těles po uložení ve vodě podle Marshalla podle ČSN EN 12697-34:2012 a zbývajících zkušebních těles zkoušených shodně podle Marshalla, dochází vlivem uložení těles ke ztrátě stability nejvíce u vápencového fileru Velké Hydčice o 30,3 %, čemuž se blíží i ostatní varianty aplikovaných variant filerů. Jedinou výjimku v tomto případě tvoří varianta kombinace odprašků Plešovice a cementu, kde došlo ke ztrátě o 17,1 %. Při porovnání modulu tuhosti při teplotě 15 °C dosahuje varianta odprašků Plešovice v kombinaci

s mastkem nejvyšších hodnot, naopak nejnižších hodnot modulu tuhosti je v případě varianty asfaltové směsi s vratným filerem z obalovny Brant.

Tab. 42. Výsledky stanovení vodní citlivosti jednotlivých variant asfaltových směsí 0/8 mm s vybranými typy filerů.

Asfaltová směs s vybraným filerem	Marshallova stabilita S [kN]	Ztráta stability [%]	Přetvoření podle Marshalla F [mm]	Míra tuhosti S/F [kN/mm]	Modul tuhosti @ 15 °C [kN]	Mezerovitost [%]	ITSR dle ČSN EN 12697-12 [%]
filer Velké Hydčice	9,03	30,3	22,00	0,41	4793	6,8 %	62,9 %
	6,30		33,33	0,19	4339	6,2 %	
vratný filer PKB	9,17	29,1	26,00	0,35	4182	6,5 %	-
	6,50		33,67	0,19	4525	5,9 %	
vratný filer Brant	8,13	28,3	25,67	0,32	3890	5,0 %	-
	5,83		36,00	0,16	4252	4,9 %	
odprašky Plešovice	7,47	-	25,33	0,30	4554	6,8 %	58,8 %
	0,00		-	-	-	-	
odprašky Plešovice + cement	10,13	17,1	35,33	0,29	4261	3,6 %	80,7 %
	8,40		38,33	0,22	4466	3,5 %	
odprašky Plešovice + mastek	9,17	28,4	25,00	0,37	6225	7,4 %	98,9 %
	6,57		35,33	0,19	6391	6,8 %	

Pro doplnění stanovení vodní citlivosti jednotlivých variant bylo současně provedeno měření na další sérii zkušebních těles podle normy ČSN EN 12697-12. Podstatou zkoušky je rozdělení zkušebních těles na dvě skupiny, u kterých je následně stanoven poměr pevností v příčném tahu těles temperovaných ve vodní lázni při teplotě  $40 \pm 1$  °C po dobu  $70 \pm 2$  hodin v porovnání s pevností v příčném tahu skupiny zkušebních těles udržovaných na vzduchu, a který se následně vyjádří v procentech. V uvedené Tab. 42 jsou zaznamenány a porovnány veškeré získané hodnoty.

Pokud bychom chtěli posoudit poměry dosažených pevností v příčném tahu, české technické normy definují pro běžně využívané asfaltové směsi minimální hodnotu ITSR, kterým musí daná asfaltová směs vyhovět. V případě této směsi pro posouzení citlivosti filerů však není definována. Pokud bychom i tak chtěli hodnoty porovnat, pro asfaltový beton můžeme vzít v úvahu přísnější hodnotu 80 %. Při porovnání poměrů pevností v příčném tahu variant směsi s různými náhradami tradičního jemnozrnného plniva (viz. Obr. 3) lze konstatovat, že nejnižších hodnot dosáhla varianta s odprašky Plešovice a po té vápencovým filerem Velké Hydčice. Naopak nejvyšších hodnot poměru pevnosti dosáhla varianta odprašek Plešovice v kombinaci s mastkem. Kdybychom hodnoty dosažených poměrů pevností v příčném tahu vztáhli k hranici ITSR 80 %, v obou případech použití kombinace fileru Plešovice s cementem i mastkem vede k překonání této hranice. V případě druhé zmíněné varianty dokonce hodnotou ITSR téměř 98 %.

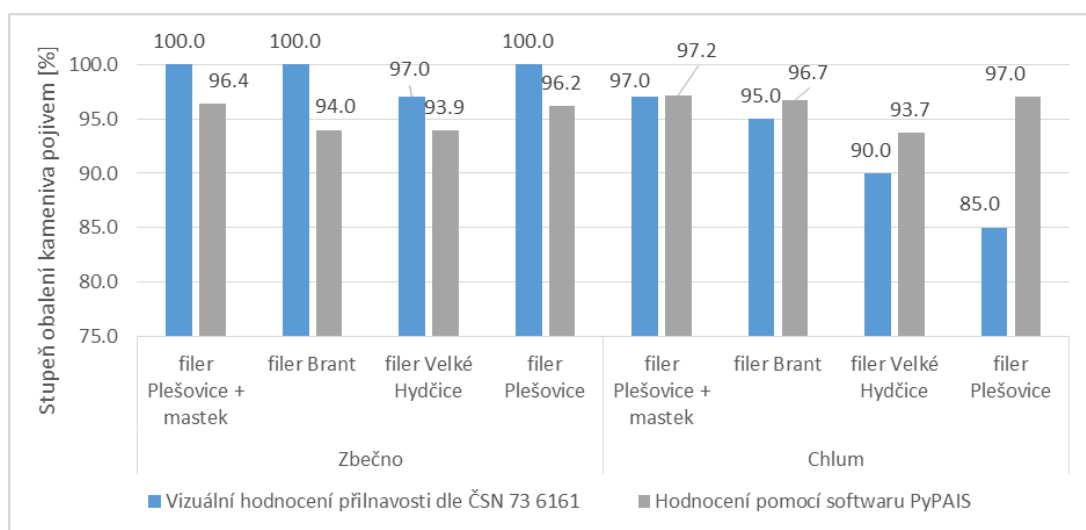
### 5.5.3 Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161

Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem bylo provedeno dle normy ČSN 73 6161. Současně s vizuálním hodnocením byla využita metoda hodnocení pomocí nově vyvinutého softwaru PyPAIS (detailněji popsáno v 5.6.2), na kterém se podíleli výzkumní pracovníci katedry mechaniky na ČVUT v Praze. Software PyPAIS je založen na principu

rozpoznávání textury povrchů fotografovaných materiálů, dokáže tedy odlišit povrch obnaženého zrna kameniva od povrchu smáčeného asfaltovým pojivem, stanoví tedy výslednou plochu kameniva obaleného pojivem. Výhodou tohoto softwaru je bezesporu eliminace subjektivního hodnocení, na jejímž principu je založena metoda stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem podle normy ČSN 73 6161.

#### 5.5.4 Diskuze k dosaženým výsledkům

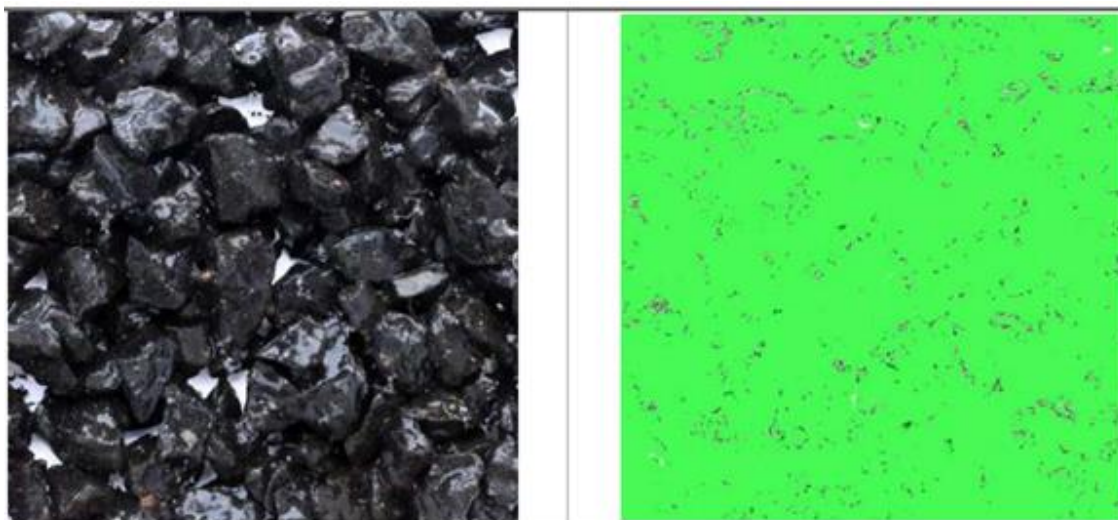
Výsledky hodnocení přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu s vybranými typy filerů jsou shrnuty na Obr. 91. Kamenivo z lomu Chlum a Zbečno bylo zvoleno jednak s ohledem k dostupnosti různých hornin v ČR, ale také s ohledem na jeho povrchové vlastnosti a petrografické složení mateční horniny. V případě kameniva z lomu Chlum se jedná o kyselou výlevnou horninu – znělec (fonolit). Makroskopicky se nedají zjistit živce, v malém množství může být přítomen biotit. Některé znělce se vyznačují přítomností zeolitů. Kamenivo z lomu Zbečno má charakteristiku bazické výlevné vyvřeliny, z petrografického hlediska se jedná o spilit, který obsahuje jako hlavní minerály lišty plagioklasů (andezin) a izometrická zrna pyroxenů. Hojné jsou sekundární žilky s křemenem, kalcitem, chloritem či prehnit – pupellyitem. Některé spility obsahují až 3 mm vyrostlice živce (spilitové porfyryty). [39] Oba tyto typy se řadí mezi kameniva s nižším povrchovým napětím, snadno tedy podléhají narušení vazby mezi pojivem a kamenivem při vniknutí vody na jejich rozhraní.



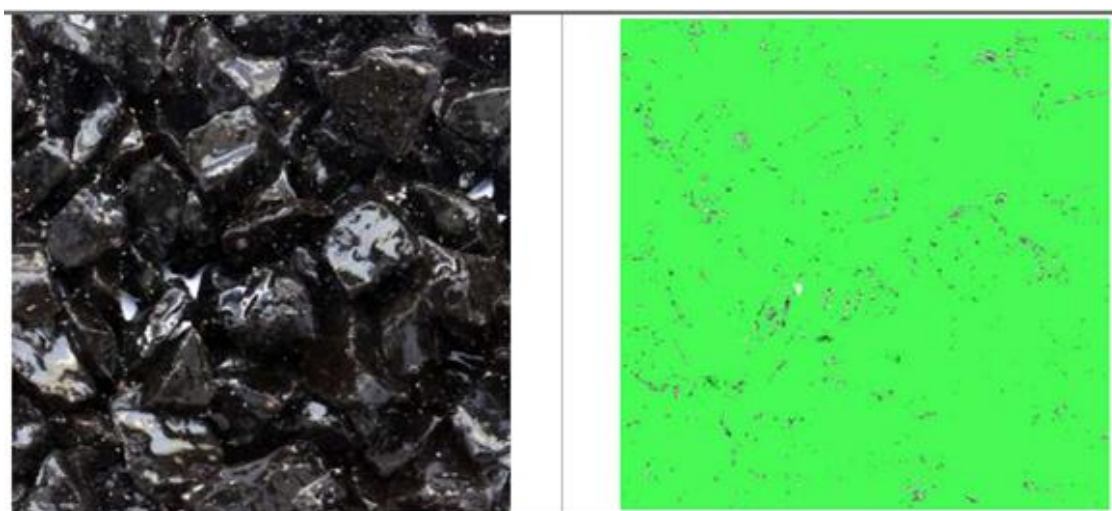
Obr. 91. Porovnání výsledků dosaženého stupně obalení kameniva asfaltovým pojivem s vybranými typy filerů vizuálním hodnocením a za pomoci softwaru PyPAIS

Z grafu na Obr. 91 je patrné, že při porovnání dosažených výsledků stupně obalení, nejprve vizuálním hodnocením, jednotlivých zrn kameniva asfaltovým pojivem s vybranými typy filerů pro kamenivo Zbečno dosahuje u všech variant téměř shodných hodnot. Přilnavost je ve všech případech hodnocena klasifikací výborná. V případě kameniva z lomu Chlum nejsou výsledky tak jednoznačné, nejnižšího stupně obalení je dosaženo v případě fileru Plešovice (85 %) s klasifikací vyhovující. Kombinace fileru Plešovice a mastku se jeví pozitivní a zvyšuje stupeň obalení kameniva pojivem na 97 %, tedy výbornou. Metoda hodnocení lokální entropie snímků softwarem PyPAIS pro kamenivo Zbečno uvádí nižší hodnoty stupně obalení zrn kameniva pojivem. Klasifikace stupně obalení je pro všechny varianty v průměru o 3-6 % nižší.

V případě hodnocení přilnavosti u kameniva Chlum je situace opačná, oproti vizuálnímu hodnocení jsou hodnoty stupně obalení stanovené softwarem naopak vyšší, v případě fileru Velké Hydčice o necelá 4 % a v případě fileru Plešovice dokonce o 12 %. Ukázka hodnocení stupně obalení vzorku kameniva asfaltovým pojivem je uveden na Obr. 92 pro variantu s kamenivem Zbečno, a na Obr. 93 pro variantu s kamenivem Chlum.



Obr. 92. *Hodnocení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem – kamenivo Zbečno + 3 % filer Plešovice + mastek (vlevo – vizuální hodnocení, vpravo – hodnocení pomocí softwaru).*



Obr. 93. *Hodnocení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem – kamenivo Chlum + 3 % filer Plešovice + mastek (vlevo – vizuální hodnocení, vpravo – hodnocení pomocí softwaru).*

Tato část práce se zabývala využitelností a možnostmi náhrad tradičního jemnozrnného plniva v asfaltových směsích v podobě různých alternativ jak minerálních filerů v podobě vratných filerů či odprašků, tak využitelnosti druhotných surovin odpadních materiálů v podobě recyklovaného mletého betonu, odřezků sádkkartonu a ocelářské strusky.

Na základě provedených analýz jsou vyvozeny následující závěry. Nejvyšší hodnoty Marshallovy stability bylo dosaženo v případě varianty částečné náhrady odprašky Plešovice kombinovaných s portlandským směsným cementem, která současně vykazovala nejnižší ztrátu stability podle Marshalla v porovnání s ostatními uvedenými variantami. Pozitivní vliv z hlediska



vodní citlivosti bylo možné pozorovat i u částečné náhrady těmito odprašky kombinovanými s mastkem, což potvrzuje i poměr dosaženého poměru pevnosti ITSR podle normy ČSN EN 12697-12 nebo zkouška stanovení stupně obalení kameniva asfaltovým pojivem, kdy se prokázala tato varianta v obou případech zvolených druhů kameniva Zbečno i Chlum jako nejvíce vhodná s kombinací s touto variantou odprašků s mastkem. [179]

## 5.6 Využití digitální analýzy obrazu jako možného nástroje pro stanovení přilnavosti – „semi-automatické metody“ [184, 188, 189, 190]

Jak již bylo uvedeno dříve, pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem je v České republice využívána norma ČSN 73 6161 platná od roku 2000. Tato norma může být současně i měřítkem účinnosti adhezních přísad použitých pro zlepšení přilnavosti. Nevýhodou této zkoušky je značná závislost na subjektivním hodnocení samotného posuzovatele. V rámci experimentální činnosti byla pozornost věnována využití softwarového nástroje pro stanovení adheze asfaltových pojiv ke kamenivu za pomoci digitální analýzy obrazu, pomocí které program vypočítá procento povrchu kameniva, které je obaleno asfaltovým pojivem. Kvalita obalení zrna kameniva asfaltovým pojivem se pak posuzuje shodně dle tabulky v normě ČSN 73 6161.

Metoda digitální snímkování, s využitím počítačového softwaru, byla v rámci několika výzkumů a studií využita pro hodnocení účinku vybraných přilnavostních přísad a k eliminaci subjektivního hodnocení v rámci vybraných zkušebních postupů. [111, 180, 181] Nazirizad [111] ve svém výzkumu využívá digitální snímkování pro vyhodnocení zkušební metody „Boiling water test“ (metoda vroucí vodou) s využitím programu MATLAB a AutoCAD. V článku [105] autoři navrhují použití analýzy 2D obrazu pro vyhodnocení výsledků zkušební metody „Rolling bottle test“ (metoda otáčení lahví), která hodnotí stupeň obalení jednotlivých zrn kameniva asfaltovým pojivem, k překonání nedostatků vizuální analýz předepsaných v příslušné normě. Autoři ve svém výzkumu prokázali použitelnost této analýzy vzhledem k široké škále zkoušených materiálů, postup byl aplikován se světlými a zároveň i tmavými typy hornin v kombinaci s asfaltovým pojivem (s dodatečnou aditivací pojiva přísadou na bázi vosku). Teplota míchání obou složek se měnila v závislosti na viskozitě pojiva. Z provedeného porovnání vizuálního a poloautomatického hodnocení vyplývá, že v případě hodnotitele stanovujícího procento obalené plochy kameniva asfaltovým pojivem, vychází lépe než v případě hodnocení za pomoci softwaru. Z výzkumu je také patrné, že výpočet pomocí software je daleko přesnější ve srovnání s vizuálním hodnocením. To potvrzuje i odchylka naměřených výsledků, která je v případě použití softwaru nižší, o čemž svědčí i nižší rozptyl naměřených dat. Rozdíly, mezi vizuálním hodnocením a výpočtem pomocí software, se pohybovaly mezi 6,4 % a 22,4 %.[181]

### 5.6.1 Program „Binder 1.0“ - ověření přilnavosti pomocí digitálního obrazového snímkování na základě stanovení stupně šedi

V rámci experimentální činnosti byla podstatná část výzkumu věnována možnostem využití softwarového nástroje pro hodnocení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem. Pomocí digitální analýzy obrazu program, využívající interaktivní programové prostředí a programovací jazyk MATLAB, vypočítá procento povrchu kameniva potaženého asfaltovým pojivem. Kvalita adheze se pak vyhodnocuje podle ČSN 73 6161 stejně jako v případě vizuálního hodnocení.



#### 5.6.1.1 Příprava vzorku – pořízení digitálního snímku

Fotografování je klíčová část celého procesu. Algoritmus použitého software je založen na identifikaci oblastí, které jsou jasnější než černé asphaltové pojivo – tyto plochy jsou považovány za obnažená místa jednotlivých zrn kameniva, které nejsou potažena asphaltovým pojivem. Snahou je eliminovat, již při přípravě zkušební vzorku, prázdné mezery mezi jednotlivými zrny kameniva, které mohly být později nesprávně interpretovány jako nepotažené oblasti zrna kameniva. Stěžejním bodem fotografování nadále zůstávají větší lesklé plochy obalených zrn kameniva asphaltovým pojivem, či odlesky způsobené fotografováním zkušebních vzorků ve vodě, viz Obr. 94. Lesklá místa na asphaltovém pojivu může program hodnotit milně jako obnažená plochy kameniva.

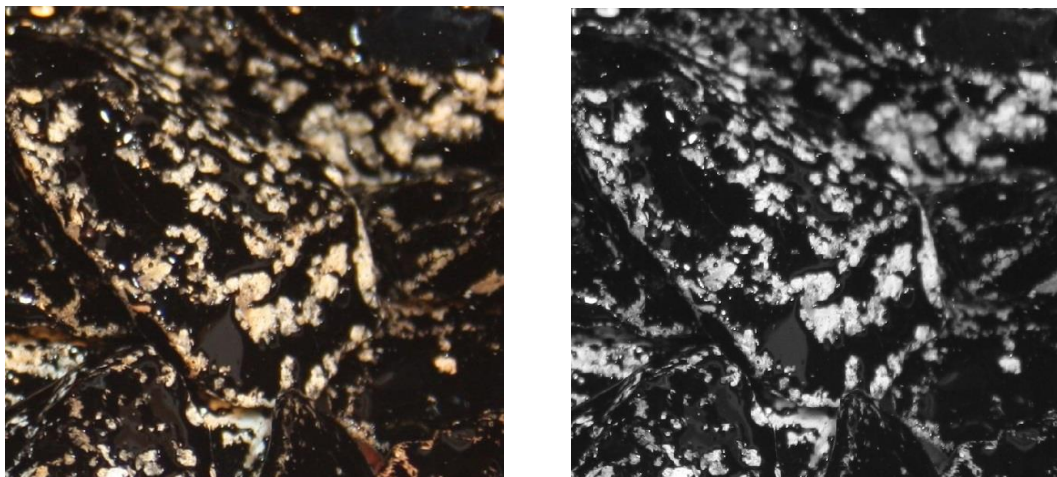


Obr. 94. Identifikace stěžejních bodů při pořizování digitálních snímků – odlesky a lesklá místa na asphaltovém pojivu (žlutě vyznačené), volné prostory, mezery mezi jednotlivými zrny kameniva (fialově vyznačené)

#### 5.6.1.2 Úprava digitálního snímku

Pro úpravu celkového obrazu (fotografie) lze použít praktický libovolný software pro zpracování obrazu (Adobe Photoshop, IrfanView, apod.) Jako prvotní úpravu lze použít jednoduché oříznutí, kdy eliminujeme případné prázdné prostory mezi jednotlivými zrny kameniva. Další zpracování obrazu je možné a někdy vhodné, například při nechtěném odlesku na asphaltovém pojivu, kdy by tato plocha byla brána jako obnažená plocha zrna kameniva (zejména v případě hodnocení přilnavosti dobré či výborné, kdy převládá větší množství potažených ploch zrna pojivem). V tomto případě jsou tyto korekce vhodné pro snazší rozeznání potažených a obnažených míst. V programu IrfanView jsou nejužitečnějšími nástroji "Převod do

stupňů šedi" a "Barevné korekce" (úprava kontrastu, parametru gama a sytosti). Příklad takovéto úpravy snímku je zřejmý z Obr. 95.



Obr. 95. Původní snímek (vlevo) a snímek převedený do stupňů šedi (vpravo).

Na Obr. 96 jsou uvedeny příklady upravených fotografií zkušebních vzorků s nevyhovující přilnavostí (obrázek vlevo) a fotografií dokumentující vzorek kameniva obalený asphaltovým pojivem s přilnavostí hodnocenou dle ČSN 73 6161 jako výbornou (obrázek vpravo).



Obr. 96. Příklady úpravy fotografií pro hodnocení přilnavosti s využitím digitální analýzy obrazu.

### 5.6.1.3 Digitální analýza obrazu pomocí programu Binder - algoritmus analýzy

Algoritmus analýzy lze v zásadě shrnout následovně. Známe barevný vektor RGB reprezentativní části kameniva, která není pokryta asphaltovým pojivem.

$$\vec{c}_{sel} = (r_{sel}, g_{sel}, b_{sel}) \quad (26)$$

- můžeme vypočítat jas této barvy C jako:

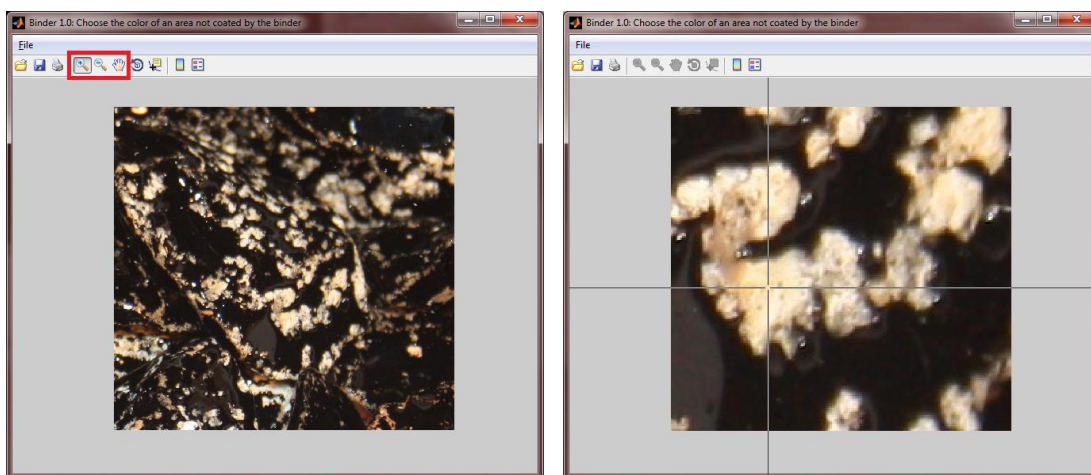
$$C = \sqrt{0.299r_{sel}^2 + 0.587g_{sel}^2 + 0.114b_{sel}^2} \quad (27)$$

- pak relativní jas je:  $c = \frac{C}{255}$  (28)

Všechny oblasti obrazu s relativním jasem nižším, než c se považují za pokryté pojivem, zbývající oblasti za nepokryté.

#### 5.6.1.4 Výsledné hodnocení programem Binder 1.0

Pracovní postup analýzy – v hlavním okně programu vyhledáme a poté vybereme obrázek, který chcete analyzovat. Zobrazí se nové okno. V tomto okně vyhledáme pomocí nástrojů pro zvětšení a posunutí reprezentativní část kameniva, která není pokryta asfaltovým pojivem. Označení potvrdíme klávesou enter pro zobrazení křížku, pomocí něhož vybereme pixel, který nejlépe reprezentuje barvu nepotažené části kameniva (Obr. 97).

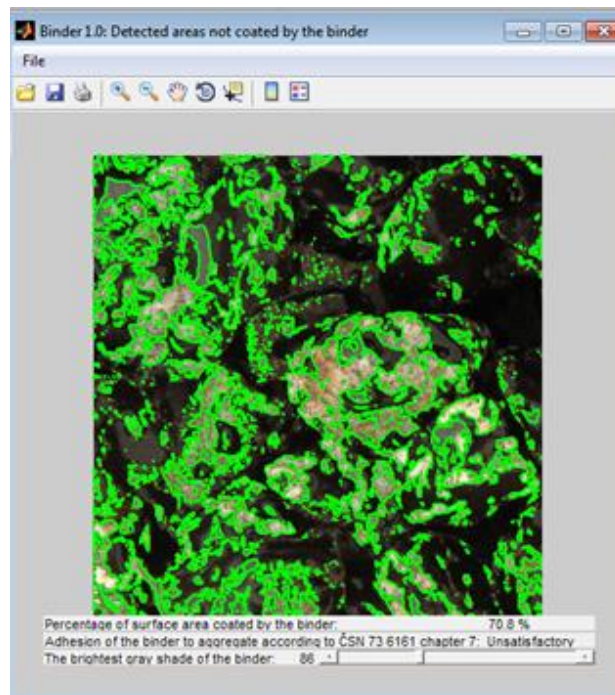


Obr. 97. Výběr barevného vektoru RGB reprezentujícího nepotažené kamenivo.

Detekční algoritmus použitého softwaru rozlišuje potažené a současně i obnažené oblasti. Obnažená místa jsou vyznačena zelenou barvou. Pod obrázkem je uveden procentuální podíl plochy kameniva pokrytý asfaltovým pojivem spolu s klasifikací dle ČSN 73 6161. Příklad výstupu je uveden na následujícím Obr. 98.

V případě, že uživatel není s výsledky analýzy spokojen (nebyly vybrány některé oblasti, které nejsou pokryty pojivem, nebo naopak), lze citlivost výběru upravit pomocí posuvníku pod analyzovaným snímkem. Změnou polohy posuvníku se upravuje jas šedého odstínu, který vymezuje hranici mezi potaženými a nepotaženými oblastmi agregátu. Po dokončení analýzy lze výsledek uložit jako soubor jpeg pomocí tlačítka Uložit v hlavním okně.





Obr. 98. Příklad výstupu softwarového nástroje pro hodnocení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem.

#### 5.6.1.5 Porovnání vizuálního a poloautomatického hodnocení (Binder 1.0) přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161

V rámci porovnání vizuálního a poloautomatického hodnocení přilnavosti byla vytvořena skupina několik rozdílných typů kameniva lišící se mineralogickým složením s rozdílnými typy asfaltových pojiv v kombinaci s adhezivní přísadou. Jednalo se o kamenivo z lomu Brant (dle petrografického zařazení se jedná o žulový porfyr), kamenivo z lomu Zbraslav (dle petrografického zařazení se jedná o horninovou směs skládající se především z proterozoických spilitů a metaprachovců) a kamenivo z lomu Skuteč (v tomto případě se jedná o horninu granodiorit). Pro porovnání byly vzorky kameniva připraveny shodně s vybranými typy asfaltových pojiv, jednalo se o silniční asfalt 50/70, dále o silniční asfalt stejné gradace upravený krakováním (tepelný rozklad uhlovodíků s delším řetězcem na uhlovodíky s kratším řetězcem, probíhá buď za vysoké teploty, nebo za zvýšené teploty a přítomnosti katalyzátoru), polymerem modifikované pojivo PMB 45/80-75 a po té různé varianty adhezivních přísad v rozdílném dávkování, jak je uvedeno v Tab. 43. Mimo adhezivních přísad v tekuté podobě dávkované přímo do asfaltového pojiva, které byly pro toto porovnání vybrány bylo porovnání doplněno také o přísadu pryžového granulátu (pojmem pryžový granulát se označuje odpadní pryž zbavená příměsí kordu a upravená mechanicky drcením a mletím při teplotě okolního prostředí, popř. kryogenním drcením při nízkých teplotách [182] získaná z ojetých pneumatik, která vytváří makroskopickou nehomogenní strukturu). Z tohoto důvodu byla k porovnání vizuálního a poloautomatického hodnocení navržena velmi rozmanitá série zkušebních vzorků s rozdílnými typy použitých asfaltových pojiv v kombinaci s vybranými typy adhezivních přísad.

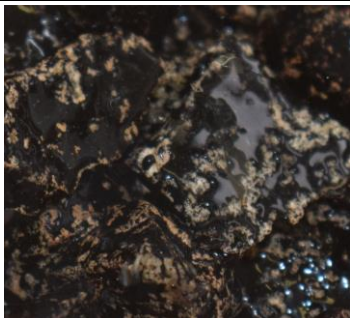

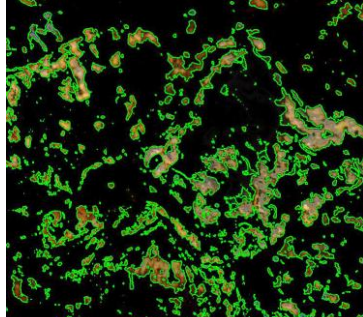
Příprava vzorku probíhala podle postupu normy ČSN 73 6161, jak je popsáno v kap. 4.1.1. Teploty kameniva a asfaltového pojiva byly voleny s ohledem k pracovním teplotám při přípravě vzorků, jak uvádí Tab. 15 podle penetrace použitého asfaltového pojiva. Po ukončení zkoušky, exponování jednotlivých vzorků obnažovací vodě o teplotě 60 °C po dobu 60±5 minut,

byly všechny vzorky vyfotografovány za kombinace denního a umělého osvětlení pomocí DSLR fotoaparátu Canon EOS 6D. Snímaný laboratorně připravený vzorek kameniva obaleného asfaltovým pojivem byl umístěn do fotostanu o rozměrech 750x750 mm. Vně fotostanu byl umístěn LRD reflektor. Vzdálenost předního členu objektivu od snímaného vzorku byla cca 650 mm. Osa objektivu byla kolmá ke snímanému vzorku, aby se docílilo kvalitního snímku s maximální eliminací světelných odlesků od lesklého černého povrchu asfaltového pojiva. Příklad fotografie zkušebního vzorku je na Obr. 99, u kterého se provedla jednoduchá úprava oříznutím pro výběr reprezentativního vzorku s eliminací prázdných prostor mezi jednotlivými zrny kameniva.



Obr. 99. *Digitální fotografie kameniva obaleného asfaltovým pojivem po exponování obnažovací vodou – celý snímek (vlevo), čtvercový výřez (vpravo).*

Následně byly jednotlivé fotografie upraveny pomocí softwarů pro zpracování obrazu pomocí programu IrfanView, v němž se provádí jednoduchý ořez a další úpravy jako jsou nechtěné odlesky na asfaltovém pojivu. Takto upravené fotografie byly následně vloženy do programu Binder 1.0 pro zhodnocení stupně obalení kameniva asfaltovým pojivem. Příklad výstupu zkušebního vzorku hodnoceném programem Binder 1.0 dokládá Obr. 100 pro vzorek kameniva Brant v kombinaci se silničním asfaltem 50/70 (obr. 5 obsahuje původní fotografii, následně upravenou a poté uvádí výstup z programu Binder 1.0). Výstupy všech laboratorně připravených vzorků dle Tab. 43 jsou uvedeny v příloze A této práce.

Název zkušební vzorku		
<b>1_Brant+50_70</b>		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy ČSN 73 6161	Nejjasnější odstín šedé
80,3	Vyhovující	22
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy ČSN 73 6161	
60,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		

Obr. 100. Porovnání vizuálního hodnocení dle ČSN 73 6161 a výstupu z programu Binder 1.0 – kamenivo Brant s asfaltovým pojivem 50/70.

Porovnání obou přístupů sebou přináší následující poznatky. Z výsledků uvedených v Tab. 43 je patrné, že přístup využití softwarového nástroje pro hodnocení obalené plochy kameniva asfaltovým pojivem hodnotí ve většině případů mnohem mírnějším způsobem, než je tomu v případě vizuálního hodnocení. Rozdíl v hodnocení přilnavosti obou těchto přístupů je v případě série zkušebních vzorků s kamenivem Brant v průměru 18,3 %, s kamenivem Zbraslav se jedná o rozdíl 13,1 %, a nejvyšších rozdílů mezi oběma hodnoceními je v případě použití kameniva Skuteč, kde se jedná o rozdíl v průměru 22,2 % obalené plochy kameniva. V případě vzorku s kamenivem Skuteč v kombinaci s pojivem 50/70 je rozdíl mezi vizuálním hodnocením a hodnocením pomocí softwaru dokonce 38,5 %. Rozdíl hodnocení mezi oběma použitými metody je patrný také z následujících grafů (Obr. 101, Obr. 102, Obr. 103).

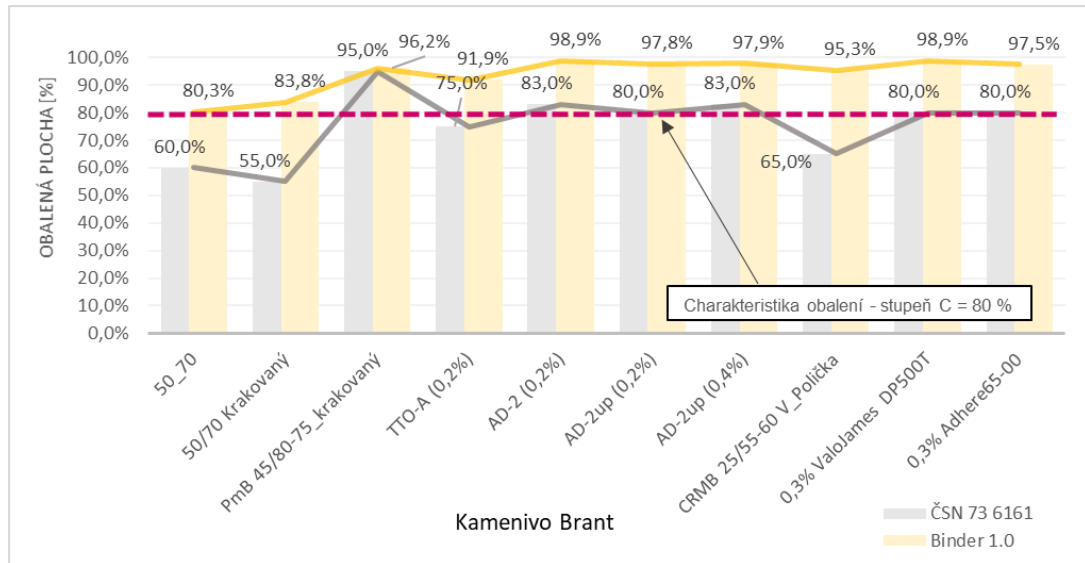
Výstupy získané při využití hodnocení stupňů šedi ztlačně vybočují. Takto změřená plocha obaleného kameniva byla vždy vyšší, tedy výsledek byl v tomto případě nadhodnocen oproti vizuálnímu hodnocení. Příčinu tohoto rozdílu lze přisuzovat problémům spojeným s pořízením kvalitní fotografie, které jsou detailněji popsány v úvodu této kapitoly. Připomeňme, že se jedná především o reflexi světla a světlých předmětů od lesklých povrchů obalených souvislým filmem asfaltového pojiva, které tato metoda hodnotí chybně jako obnažené kamenivo.



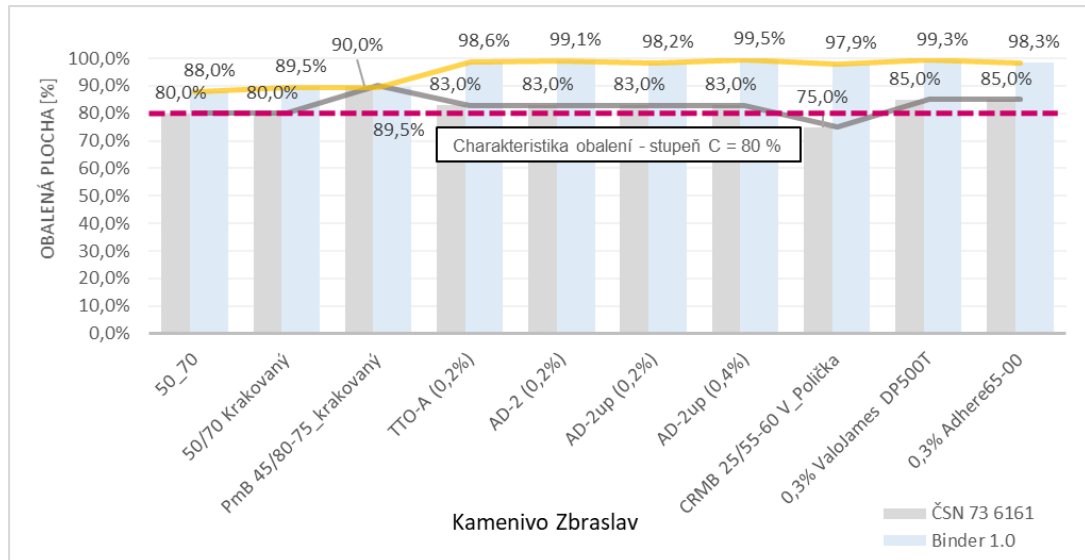


Tab. 43. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 s využitím digitální analýzy obrazu pomocí softwaru Binder 1.0.

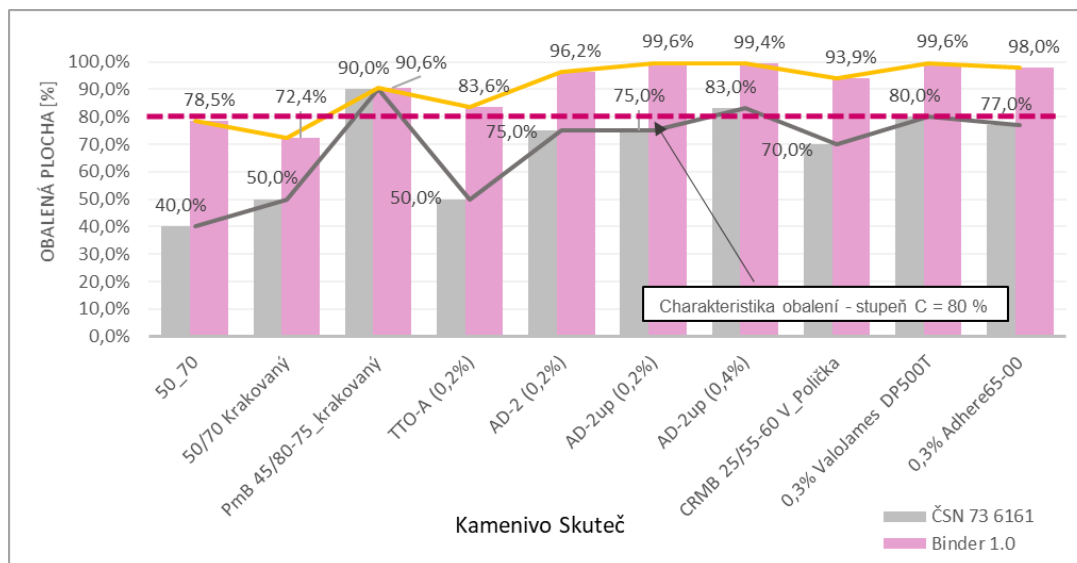
Kamenivo	Varianta	ČSN 73 6161		Binder 1.0			Porovnání vizuálního hodnocení vs. Binder 1.0
		Obalená plocha [%]	Klasifikace dle normy (ČSN 73 6161)	Obalená plocha [%]	Klasifikace dle normy (ČSN 73 6161)	Nejjasnější šedý odstín pojiva	
Brant (žulový porfyr)	50_70	60,0 %	Nevhovující	80,3 %	Vyhovující	22	20,3 %
	50/70 Krakovaný	55,0 %	Nevhovující	83,8 %	Vyhovující	17	28,8 %
	PMB 45/80-75_krakovaný	95,0 %	Dobrá	96,2 %	Dobrá	26	1,2 %
	TTO-A (0,2 %)	75,0 %	Nevhovující	91,9 %	Dobrá	33	16,9 %
	AD-2 (0,2 %)	83,0 %	Vyhovující	98,9 %	Výborná	30	15,9 %
	AD-2up (0,2 %)	80,0 %	Vyhovující	97,8 %	Výborná	34	17,8 %
	AD-2up (0,4 %)	83,0 %	Vyhovující	97,9 %	Výborná	35	14,9 %
	CRMB 25/55-60 V_Polička	65,0 %	Nevhovující	95,3 %	Dobrá	7	30,3 %
	0,3 % ValoJames DP500T	80,0 %	Vyhovující	98,9 %	Výborná	21	18,9 %
0,3 % Adhere65-00	80,0 %	Vyhovující	97,5 %	Výborná	22	17,5 %	
Zbraslav (horninová směs – tufit, metatuf, spilit)	50_70	80,0 %	Vyhovující	88,0 %	Vyhovující	17	8,0 %
	50/70 Krakovaný	80,0 %	Vyhovující	89,5 %	Vyhovující	22	9,5 %
	PMB 45/80-75_krakovaný	90,0 %	Dobrá	89,5 %	Vyhovující	12	-0,5 %
	TTO-A (0,2 %)	83,0 %	Vyhovující	98,6 %	Výborná	35	15,6 %
	AD-2 (0,2 %)	83,0 %	Vyhovující	99,1 %	Výborná	20	16,1 %
	AD-2up (0,2 %)	83,0 %	Vyhovující	98,2 %	Výborná	24	15,2 %
	AD-2up (0,4 %)	83,0 %	Vyhovující	99,5 %	Výborná	16	16,5 %
	CRMB 25/55-60 V_Polička	75,0 %	Nevhovující	97,9 %	Výborná	29	22,9 %
	0,3 % ValoJames DP500T	85,0 %	Vyhovující	99,3 %	Výborná	19	14,3 %
0,3 % Adhere65-00	85,0 %	Vyhovující	98,3 %	Výborná	51	13,3 %	
Skuteč (amfibolicko-biotitický granodiorit)	50_70	40,0 %	Nevhovující	78,5 %	Nevhovující	22	38,5 %
	50/70 Krakovaný	50,0 %	Nevhovující	72,4 %	Nevhovující	24	22,4 %
	PMB 45/80-75_krakovaný	90,0 %	Dobrá	90,6 %	Dobrá	16	0,6 %
	TTO-A (0,2 %)	50,0 %	Nevhovující	83,6 %	Vyhovující	11	33,6 %
	AD-2 (0,2 %)	75,0 %	Nevhovující	96,2 %	Dobrá	35	21,2 %
	AD-2up (0,2 %)	75,0 %	Nevhovující	99,6 %	Výborná	35	24,6 %
	AD-2up (0,4 %)	83,0 %	Vyhovující	99,4 %	Výborná	25	16,4 %
	CRMB 25/55-60 V_Polička	70,0 %	Nevhovující	93,9 %	Dobrá	47	23,9 %
	0,3 % ValoJames DP500T	80,0 %	Vyhovující	99,6 %	Výborná	35	19,6 %
0,3 % Adhere65-00	77,0 %	Vyhovující	98,0 %	Výborná	18	21,0 %	



Obr. 101. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru Binder 1.0 – varianty s kamenivem Brant.



Obr. 102. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru Binder 1.0 – varianty s kamenivem Zbraslav.



Obr. 103. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru Binder 1.0 – varianty s kamenivem Skuteč.

### 5.6.1.6 Diskuze k dosaženým výsledkům

Z výsledků stanovených pomocí hodnocení programem Binder 1.0 nelze jednoznačně detekovat všechna obnažená místa jednotlivých zrna kameniva. Tento program vychází z předpokladu, že černá barva náleží asfaltovému pojivu, zatímco světlejší odstíny obnaženému kamenivu. Sebelepší algoritmus je přitom nedokáže vždy rozpoznat a patřičně zatřídit. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k vývoji dalšího programu založeném na odlišném principu (viz kap. 5.6.2). Zmíněné nedostatky mohou být zcela eliminovány použitím algoritmu hodnocení lokální entropie snímku. Principem je rozlišování textury povrchu a vychází z předpokladu, že hladký povrch náleží pojivu, zatímco hrubý kamenivu.

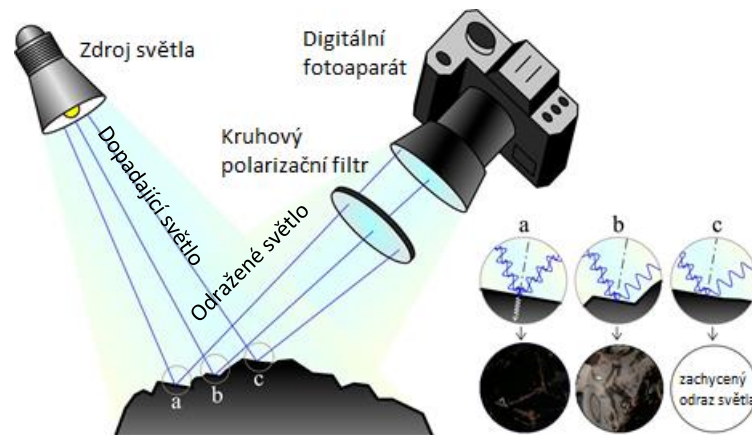
## 5.6.2 Program PyPAIS - ověření přilnavosti pomocí digitálního obrazového snímkování použitím algoritmu hodnocení lokální entropie snímku

### 5.6.2.1 Pořizování snímků

Povrch asfaltu vykazuje vysokou světelnou reflektanci, jeho lesklý černohnědý až černý povrch má velmi dobrou schopnost odrážet světelné paprsky, což z něj činí materiál nevhodný pro fotografování. Získat správně exponovaný snímek s vyváženým histogramem intenzity je prakticky nemožné. Nedostatek světla způsobuje podexponovaný snímek, na kterém není detailně zachycena textura, a hladký asfaltový povrch tak splývá s hrubým povrchem kameniva. I minimální osvětlení vede k lokálnímu přexponování, protože dopadající světlo reflektuje z lesklého povrchu s nezměněnou frekvencí a nadměrnou intenzitou (Obr. 104, případy b a c). Protože je odražené světlo částečně polarizované reflexí, lze ho v některých místech s paralelním povrchem eliminovat pomocí polarizačního filtru. [183] Na druhou stranu difúzní reflexe z nezakrytého povrchu kameniva umožňuje zachytit jeho detailní texturu (Obr. 104, případ a).

Pro snížení počtu přexponovaných oblastí je třeba použít difúzní zdroj světla. Použití digitálního fotoaparátu s jedním objektivem (DLSR) vybaveného velkým snímačem umožňuje zachytit texturu ve vysoké kvalitě, což je následně předpokladem přesnější analýzy. Pro eliminaci

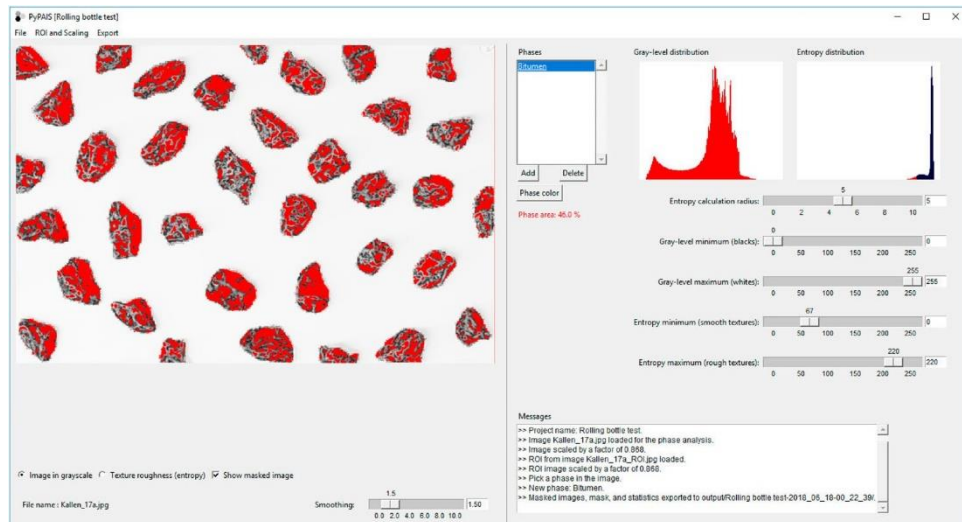
zkreslení je vhodné použít objektiv s ohniskovou vzdáleností vyšší než 50 mm. Číslo ISO (citlivost čipu fotoaparátu na světlo) by mělo být nastaveno co nejnižší, aby se snížil šum, zatímco clona by měla být dostatečně vysoká, aby poskytovala dostatečnou hloubku ostrosti. [184]



Obr. 104. Znárodnění rozdílů mezi odraženým světlem z kameniva s drsným povrchem: (a) a lesklým asfaltem; odražené polarizované světlo je buď zachyceno (b), nebo je odraz světla pohlcen polarizačním filtrem (c). [184]

#### 5.6.2.2 Algoritmus analýzy

Software PyPAIS je vyvinut v jazyce Python. Založen je na relativně jednoduchých algoritmech implementovaných v open-source softwaru PyPAIS (Python Phase Analyzer based on Image Segmentation), které určují hrubost povrchu snímku. Program nabízí grafické uživatelské rozhraní (GUI), které je znázorněno na Obr. 105. Zdrojový kód programu a uživatelský manuál se seznamem potřebných balíčků a důkladným popisem ovládní GUI jsou k dispozici na webových stránkách autora (<http://mech.fsv.cvut.cz/~nezerka/software.html>). Výkonnost programu je zvýšena použitím externích balíčků napsaných většinou v jazyce C namísto čistě pythonovských skriptů. Patří mezi ně „scikit-image“ (vanderWalt et al., 2014) pro výpočet entropie a Gaussova filtrace, OpenCV (Bradski, 2000) pro extrakci a klasifikaci blobů a Matplotlib (Hunter, 2007) pro vykreslování a jednoduché manipulace s obrázky. [185, 186, 187] Segmentaci lze provádět na celém obrázku nebo jen v oblasti zájmu (ROI), která je vytvořena ve formě černobílého obrázku stejné velikosti jako analyzovaný obrázek. Neexistují žádné požadavky na velikost, konvexitu nebo spojitost ROI. [184]

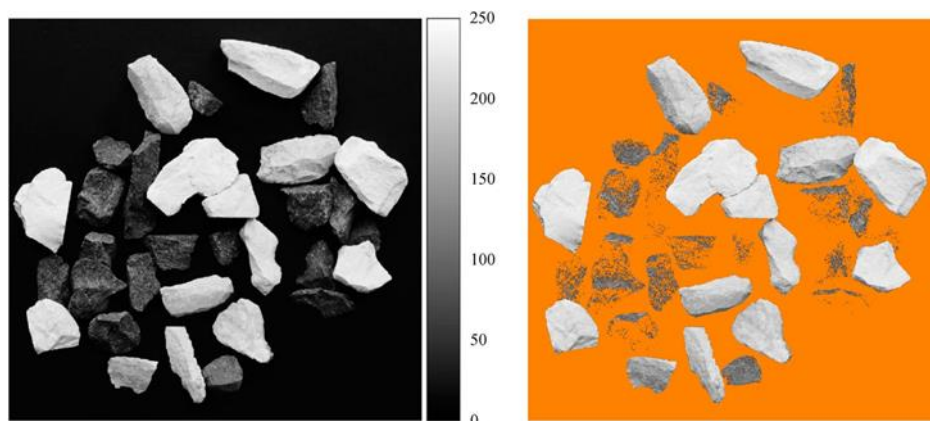


Obr. 105. Grafické uživatelské rozhraní programu PyPAIS. [184]

V analyzované fotografii určí systém souřadných bodů, kolem kterých sleduje intenzitu textury a normuje ji do intervalu 0-255 (0 náleží nejhladší textuře v dané oblasti, zatímco 255 nejdrsnější). Princip semi-automatického hodnocení spočívá v manuálním výběru povrchu pojiva na snímku (bodové označení příslušné lokace). Algoritmy pak hledají v celé ploše hodnocení fotografie takové textury (entropie), které jsou shodné nebo velmi podobné vybrané oblasti. Ty náleží pojivu, zatímco zbývající (drsnější) jsou přičítány kamenivu. Celý proces je natolik přesný, že nehrozí záměna povrchů hrubého pojiva (nastane-li) a hladkého kameniva. [184]

#### 5.6.2.2.1 Prahování intenzity

Po nahrání věrného barevného obrazu k analýze se kanály RGB převedou na 8bitový obraz ve stupních šedi, který představuje 2D jasové/intenzitní pole I pomocí algoritmu luminance. Intenzita na úrovni šedi se tedy získá pro každý pixel umístěný v bodě  $[i, j]$  součtem jeho červeného, zeleného a modrého kanálu, vynásobeným skalární hodnotou 0,30, 0,59 a 0,11. Použitím tohoto postupu získá každý pixel v I hodnotu od 0 do 255. Prahování intenzity lze použít pro výběr pixelů s odlišnou intenzitou. Takové prahování je efektivní například pro měření kontaktních úhlů na hranici kapalina-pevná látka (Nežerka, Somr a Trejbal, 2018), ale selhává při rozlišování hladkého pozadí od tmavého drsného agregátu, jak ukazuje Obr. 106. [184]



Obr. 106. Filtrování tmavého pozadí čistě pomocí prahování intenzity,  $t_{i,min}=0$  a  $t_{i,max}=70$ ; původní snímek ve stupních šedi (vlevo) a maskované pozadí pokrývající 72,5 % (vpravo). [184]



#### 5.6.2.2.2 Prahování drsnosti

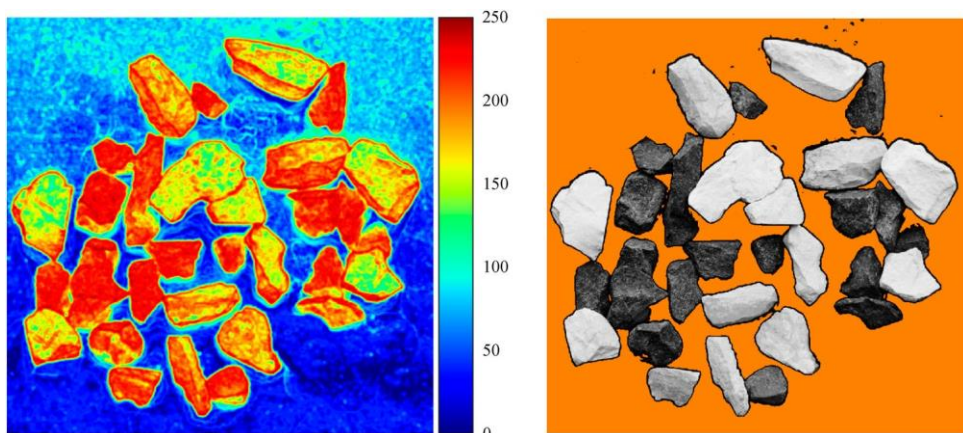
Pokud jsou odlišné oblasti v obrazu, které mají být segmentovány, charakterizovány spíše svou texturou než intenzitou, je vhodné využít filtry texturní analýzy založené na lokálních statistických měřeních (Victor, Thengone, Rizvi a Conte, 2015). Entropii jako míru neurčitosti spojenou s náhodnou veličinou zavedl Shannon (1948). Od té doby se dobře etablovala v informatice a při zpracování obrazu pro hodnocení náhodnosti textur. Po vyhodnocení entropie pro každý pixel v rámci intenzitního pole  $I$  je entropie pole  $H$  normalizována tak, aby dosahovala hodnot v intervalu  $[0, 255]$  a odpovídala tak 8bitové stupnici šedi:

$$\hat{H}_{ij} = \frac{H_{ij}}{\max(\mathbf{H})} \times 255. \quad (29)$$

Prahování entropie se provádí nastavením dolní a horní meze analogicky k rovnici:

$$t_{H,\min} \leq \hat{H}_{ij} \leq t_{H,\max}. \quad (30)$$

Přestože zavedení výpočtu entropie podstatně zlepšilo segmentaci obrazu, stále zůstávají nemaskovaná místa na pozadí a falešně maskované nezakryté oblasti, viz Obr. 107. Tyto lokální chyby lze efektivně eliminovat použitím vyhlazovacích algoritmů představených dále. [184]

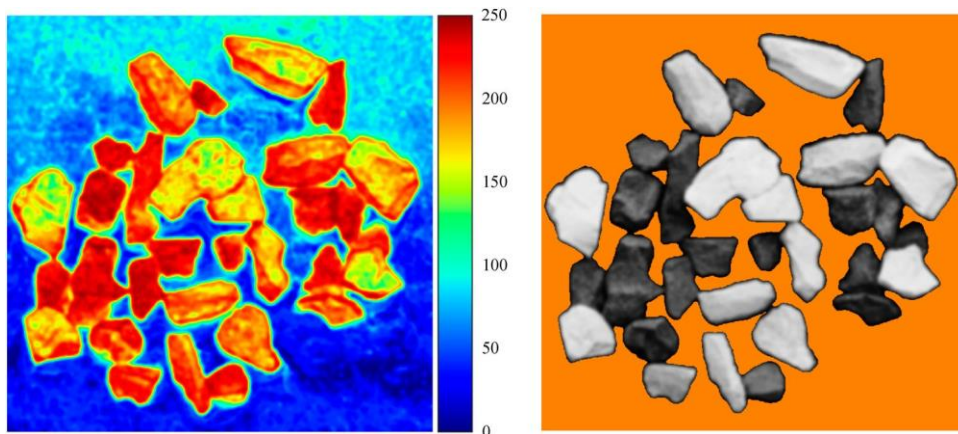


Obr. 107. Mapa entropie (vlevo) a maskované pozadí pokrývající 60,7 % po použití prahování drsnosti (vpravo),  $t_{I,\min} = 0$  a  $t_{I,\max} = 70$ ,  $t_{H,\min} = 0$  a  $t_{H,\max} = 120$ . [184]

#### 5.6.2.2.3 Vyhlazování

Vyhlazení map intenzity i entropie se provádí pomocí Gaussovské filtrace a upravuje se nastavením směrodatné odchylky Gaussova jádra  $\sigma_G$ . S rozostřením obrazu se populace binů v histogramech intenzity a entropie obrazu stávají zřetelnějšími a v důsledku toho mizí lokální chyby, viz Obr. 108. [184]





Obr. 108. Gaussovo vyhlazení mapy entropie (vlevo) a maskované pozadí pokrývající 57,6 % po použití prahování drsnosti (vpravo),  $t_{l,min} = 0$  a  $t_{l,max} = 70$ ,  $t_{H,min} = 0$  a  $t_{H,max} = 120$ ,  $\sigma_G = 3,7$ . [184]

### 5.6.2.3 Experimentální testování softwaru

Podle postupu uvedeného v ČSN 73 6161 byly vyrobeny vzorky kameniva obaleného asfaltovým pojivem, na nichž byla sledována přilnavost asfaltu ke kamenivu. Vzorky tvořilo asfaltové pojivo pro běžná použití v asfaltových betonech konstrukčních vrstev vozovek (specifikace dle ČSN EN 12591 a ČSN 65 7204) a tři rozdílné typy kameniva. Kamenivo bylo vybráno jednak s ohledem na jeho dostupnost pro účely výzkumu na ČVUT v Praze, ale také s ohledem k povrchovým vlastnostem vybraného kameniva, zejména k výsledné přilnavosti asfaltového pojiva a kameniva, aby nám poskytovala rozdílné úrovně pokrytí kameniva asfaltovým pojivem: slabé (A), střední (B), vysoké (C) krytí. Přičemž každá směs byla zastoupena osmi vzorky, které byly připraveny podle odst. 4.1.1.

Pro zlepšení adheze mezi asfaltovým pojivem a kamenivem byla přidána přilnavostní přísada, jednalo se o kapalné syntetické aditivum na bázi nenasycených mastných kyselin v kombinaci s diethanolaminem, které bylo dávkováno do asfaltového pojiva v množství 0,2 %-hm. Po 24 hodinách byly vzorky po dobu  $60 \pm 5$  minut exponovány obnažovací vodě o teplotě  $60^\circ\text{C}$ . Drcené kamenivo frakce 8/16 pocházelo z místních lomů a bylo vybráno tak, aby poskytovalo proměnlivou přilnavost k asfaltovému pojivu. Přehled použitého kameniva pro experimentální testování softwaru je uveden v Tab. 44.

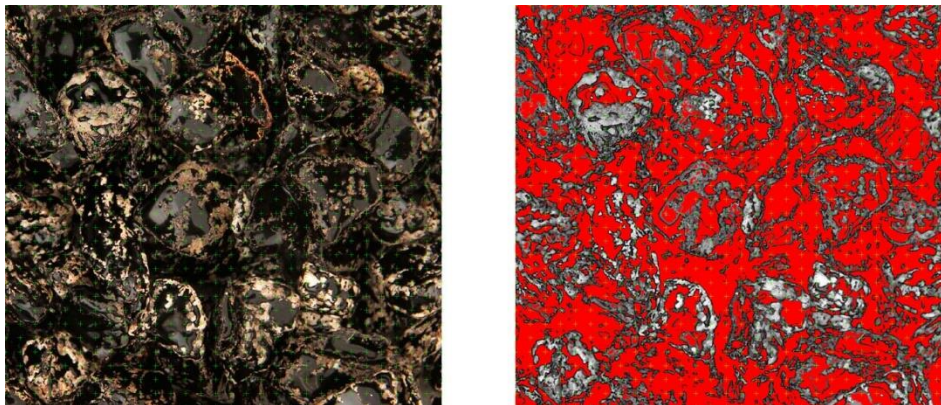
Kamenivo z lomu Skuteč (viz kap. 1.1.12) lze klasifikovat jako amfibolicko-biotitický granodiorit s hrubou strukturou. Hornina se neláme podél hladkých rovin a lomové plochy jsou hydrofobní, což má za následek špatnou přilnavost k asfaltu. Kamenivo z lomu Brant (viz kap. 1.1.2) obsahuje jako klíčový minerál žulový porfyr. Navzdory poréznímu povrchu způsobenému zvětráváním je také hydrofilní, a proto náchylný k procesu obnažování. Kamenivo z lomu Zbraslav (viz kap. 1.1.9) se skládá především z proterozoických spilitů a metaprachovců, jehož lomové plochy jsou zdrsňelé a mikroporézní (neuplatňuje se štěpnost jednotlivých minerálů). Predisponují tedy velice malé povrchové napětí, které umožňuje vedení vody na rozhraní kameniva a pojiva a následné narušení jejich vzájemné vazby principy popsány v odst. 3.1.5 a 3.1.6. Jeho jemná struktura a porézní povrch umožňují dobrou přilnavost k asfaltu. Hodnocení stupně obalení asfaltem je u takového typu kameniva náročné kvůli jeho velmi jemné struktuře a tmavé barvě.

Tab. 44. Přehled kameniva a jeho specifikace.

Směs	Lom	Frakce (mm)	Petrografické zatřídění horniny	Struktura	Povrch	Tvar	Barva
A	Skuteč	8/16	Amfibolicko-biotitický granodiorit	Hrubá	Slinutý	Ostrohranný	Světlá
B	Brant	8/16	Žulový porfyr	Jemná	Porézni, hydrofilní	Ostrohranný	Světlá
C	Zbraslav	8/16	Horninová směs (tufit, metatuf, spilit)	Velmi jemná	Porézni	Ostrohranný	Tmavá

#### 5.6.2.4 Výsledky experimentálního testování použitého softwaru PyPAIS

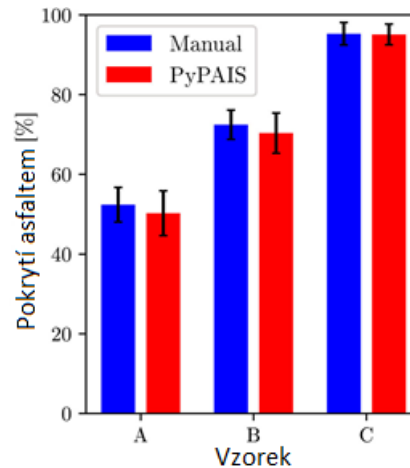
Připravené vzorky byly vystaveny účinkům obnažovací vody po stanovenou dobu, jak předepisuje norma. Ihned poté byl každý vzorek nafocen a po té zhodnocen pomocí programu PyPAIS. Snímky byly pořízeny pomocí fotoaparátu DLSR Canon EOS 70D (20,2 Mpx). Procento obalené plochy kameniva asphaltovým pojivem bylo vypočteno poloautomatickou metodou pomocí softwaru PyPAIS a ručně spočítáním míst s obnaženými oblastmi na překryté pravidelné 30x30 mřížce, viz Obr. 109. Byl vyvinut pomocný softwarový skript v jazyce Python, který zvětšuje každou pozici se souřadnicemi [k, l] a umožňuje pozorovateli rozhodnout: (i) zda asfalt pokrývá danou oblast a (ii) zda je identifikace oblastí (ne)pokrytých asfaltem provedená systémem PyPAIS správná. [184]



Obr. 109. Mřížka nanesená na původní snímek pro počítání segmentačních chyb na diskrétních místech; asphaltová směs A.

Výsledky bodu (i) ukazují na dobrou shodu mezi manuálním a poloautomatickým měřením, jak ukazuje Obr. 110. Počítání nesprávně identifikovaných ploch (ii) umožnilo vyhodnotit chyby v poloautomatických výpočtech stanovením matice chyb E a nastavením  $E_{kl}=1$ , pokud byla identifikace PyPAIS chybná, a  $E_{kl}=0$  v opačném případě. Chyba měření  $\epsilon$ , byla vypočtena jako:

$$\epsilon = \frac{\sum_{k=0}^{30} \sum_{l=0}^{30} E_{kl}}{30 \cdot 30} * 100[\%] \quad (31)$$



Obr. 110. Výsledky hodnocení procenta obalení kameniva asfaltovým pojivem pomocí manuálního a poloautomatického měření pomocí PyPAIS.


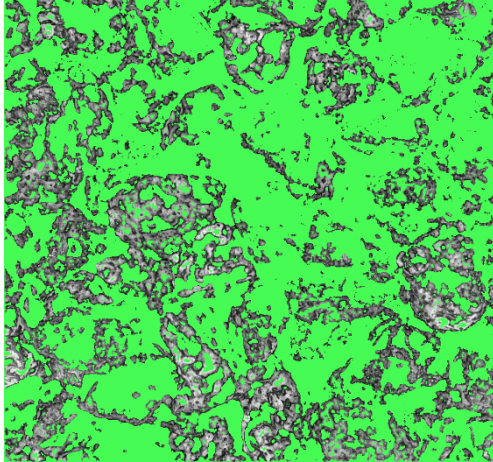
Hodnoty pro každou směs byly zprůměrovány z osmi měření. Průměrná chyba byla nejvyšší v případě směsi A, v tomto případě dosáhla 8,5 %. To lze přičíst použití hladkého kameniva, které neumožňovalo optimální nastavení horní hranice pro prahování entropie,  $t_{H,max}$ . Naproti tomu chyby u směsí B a C, které obsahovaly hrubé kamenivo, se rovnaly 2,9 %, resp. 3,5 %. [184]

Porovnání všech dosažených výsledků přináší zjištění, že metoda hodnocení lokální entropie snímků (s využitím nově vyvinutého software PyPAIS) svými výstupy velmi těsně kopíruje exaktně provedené vizuální hodnocení dle ČSN 736161. Navržený postup umožňuje rychlé a přesné posouzení pokrytí kameniva asfaltem. Vzhledem k tomu, že vyvinutý software PyPAIS je počítačový nástroj (aplikace) s otevřeným zdrojovým kódem (open-source software) a není k němu zapotřebí žádné špičkové vybavení, představuje nízkonákladové, avšak přesné a spolehlivé řešení měření. Experimentální studie ukázala, že přesnost není ohrožena ani v případě, že se posuzuje procento obalené plochy v případě tmavého kameniva s jemnou strukturou, což je pro tradiční metody založené na vizuální analýze velmi náročné. Proces segmentace obrazu se skládá ze tří základních kroků: prahování intenzity a drsnosti textury a vyhlazování, tj. software je schopen rozlišovat mezi texturami. Oblasti s vysokou entropií jsou považovány za oblasti patřící kamenivu, zatímco oblasti s nízkou entropií představují asfaltovou matici. Hlavní výhodou takového přístupu je, že není třeba mít dokonale exponované snímky (bez odrazu světla), což je často nemožné. Výpočet lokální entropie pro hodnocení drsnosti textury překonává nepříjemnosti v souvislosti s podobností mezi kamenivem a asfaltovým pojivem, pokud jde o barvu nebo reflexi na lesklém povrchu asfaltu. Horní a dolní hranici prahování, stejně jako směrodatnou odchylku Gaussova jádra, lze snadno nastavit pomocí kontroly grafického uživatelského rozhraní. [184]

#### 5.6.2.5 Porovnání vizuálního a poloautomatického hodnocení (PyPAIS) přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161

Laboratorně připravené vzorky kameniva obaleného asfaltovým pojivem, které byly vyhodnoceny pomocí programu Binder 1.0 (viz odst. 5.6.1.5), byly použity pro hodnocení také s využitím softwaru PyPAIS, viz Tab. 45 pro kamenivo z lokality Brant, Zbraslav a Skuteč

v kombinaci se sérií vybraných asfaltových pojiv včetně variant adhezivních přísad. Všechny vzorky byly vyfotografovány za kombinace denního a umělého osvětlení pomocí DSLR fotoaparátu Canon EOS 6D. Snímaný laboratorně připravený vzorek kameniva obaleného asfaltovým pojivem byl umístěn do fotostanu o rozměrech 750x750 mm. Vně fotostanu byl umístěn LRD reflektor. Vzdálenost předního členu objektivu od snímaného vzorku byla cca 650 mm. Osa objektivu byla kolmá ke snímanému vzorku, aby se docílilo kvalitního snímku s maximální eliminací světelných odlesků od lesklého černého povrchu asfaltového pojiva.

Název vzorku: <b>Kamenivo Skuteč - 50/70 Krakovaný</b>		
		
Vložený snímek.	Hodnocení stupně obalení.	
Obalená plocha [%]: 64,0	Klasifikace dle ČSN 73 6161: Nevyhovující	Datum: 27. 9. 2017

Obr. 111. Vyhodnocení vzorku pomocí softwaru PyPAIS - Kamenivo Skuteč - 50/70 Krakovaný (vložený snímek – vlevo, rozložení entropie vpravo).

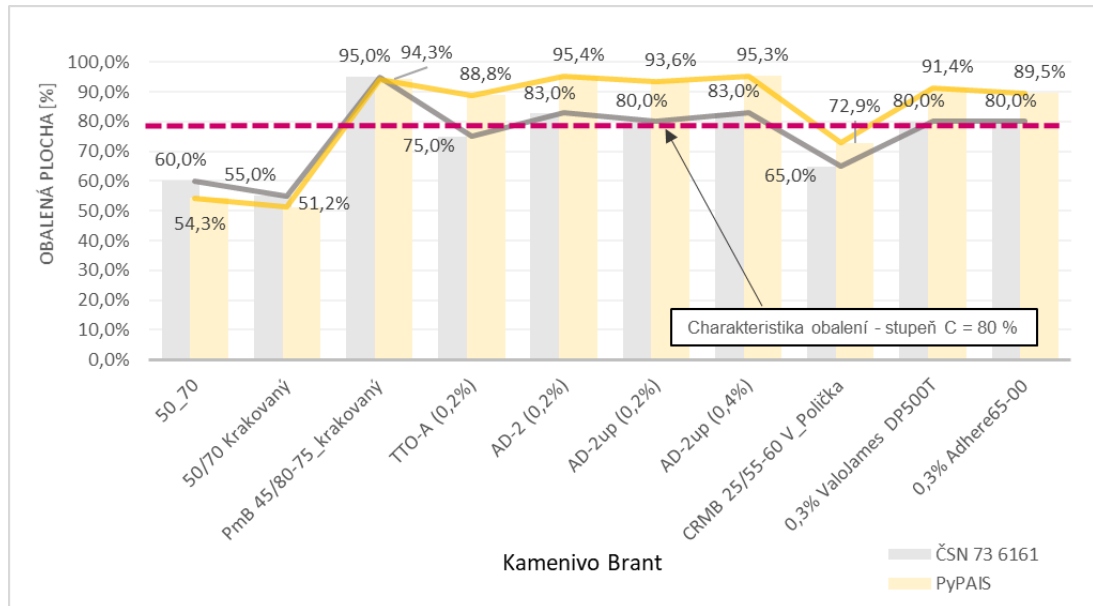
Příklad vyhodnocení vzorku pomocí softwaru PyPAIS je patrný z Obr. 111 (vložený snímek – vlevo, rozložení entropie vpravo), ostatní vzorky jsou uvedeny v příloze B této práce. Zelená oblast představuje povrchy pokryté asfaltem definované hladkým povrchem. Množství pokrytých zrn kameniva je kvantifikováno a vyjádřeno v procentech. Kvalitativní hodnocení bylo provedeno podle klasifikace dle normy ČSN 73 6161.



Tab. 45. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 s využitím digitální analýzy obrazu pomocí softwaru PyPAIS.

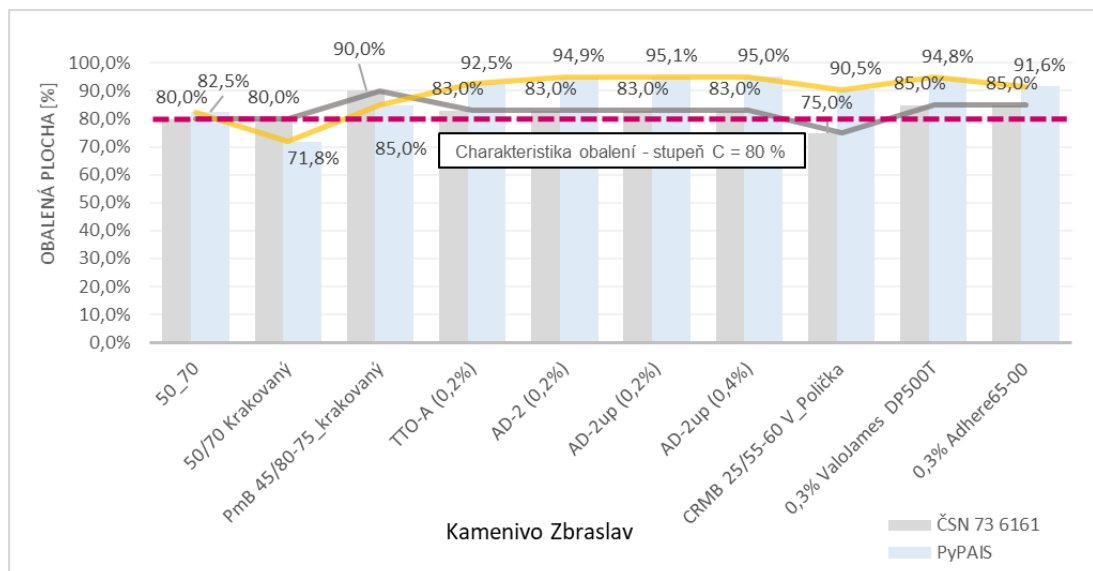
Kamenivo	Varianta	ČSN 73 6161		PyPAIS		Porovnání vizuálního hodnocení vs. PyPAIS
		Obalená plocha [%]	Klasifikace dle normy (ČSN 73 6161)	Obalená plocha [%]	Klasifikace dle normy (ČSN 73 6161)	
Brant (žulový porfyr)	50_70	60,0 %	Nevyhovující	54,3 %	Nevyhovující	-5,7 %
	50/70 Krakovaný	55,0 %	Nevyhovující	51,2 %	Nevyhovující	-3,8 %
	PMB 45/80-75_krakovaný	95,0 %	Dobrá	94,3 %	Dobrá	-0,7 %
	TTO-A (0,2 %)	75,0 %	Nevyhovující	88,8 %	Dobrá	13,8 %
	AD-2 (0,2 %)	83,0 %	Vyhovující	95,4 %	Dobrá	12,4 %
	AD-2up (0,2 %)	80,0 %	Vyhovující	93,6 %	Dobrá	13,6 %
	AD-2up (0,4 %)	83,0 %	Vyhovující	95,3 %	Dobrá	12,3 %
	CRMB 25/55-60 V_Polička	65,0 %	Nevyhovující	72,9 %	Dobrá	7,9 %
	0,3 % ValoJames DP500T	80,0 %	Vyhovující	91,4 %	Dobrá	11,4 %
	0,3 % Adhere65-00	80,0 %	Vyhovující	89,5 %	Dobrá	9,5 %
Zbraslav (Horninová směs – tufit, metatuf, spilit)	50_70	80,0 %	Vyhovující	82,5 %	Vyhovující	2,5 %
	50/70 Krakovaný	80,0 %	Vyhovující	71,8 %	Nevyhovující	-8,2 %
	PMB 45/80-75_krakovaný	90,0 %	Dobrá	85,0 %	Vyhovující	-5,0 %
	TTO-A (0,2 %)	83,0 %	Vyhovující	92,5 %	Dobrá	9,5 %
	AD-2 (0,2 %)	83,0 %	Vyhovující	94,9 %	Dobrá	11,9 %
	AD-2up (0,2 %)	83,0 %	Vyhovující	95,1 %	Dobrá	12,1 %
	AD-2up (0,4 %)	83,0 %	Vyhovující	95,0 %	Dobrá	12,0 %
	CRMB 25/55-60 V_Polička	75,0 %	Nevyhovující	90,5 %	Dobrá	15,5 %
	0,3 % ValoJames DP500T	85,0 %	Vyhovující	94,8 %	Dobrá	9,8 %
	0,3 % Adhere65-00	85,0 %	Vyhovující	91,6 %	Dobrá	6,6 %
Skuteč (amfibolicko-biotitický granodiorit)	50_70	40,0 %	Nevyhovující	38,7 %	Nevyhovující	-1,3 %
	50/70 Krakovaný	50,0 %	Nevyhovující	64,0 %	Nevyhovující	14,0 %
	PMB 45/80-75_krakovaný	90,0 %	Dobrá	94,5 %	Dobrá	4,5 %
	TTO-A (0,2 %)	50,0 %	Nevyhovující	67,9 %	Nevyhovující	17,9 %
	AD-2 (0,2 %)	75,0 %	Nevyhovující	91,1 %	Dobrá	16,1 %
	AD-2up (0,2 %)	75,0 %	Nevyhovující	87,6 %	Dobrá	12,6 %
	AD-2up (0,4 %)	83,0 %	Vyhovující	89,6 %	Dobrá	6,6 %
	CRMB 25/55-60 V_Polička	70,0 %	Nevyhovující	84,8 %	Vyhovující	14,8 %
	0,3 % ValoJames DP500T	80,0 %	Vyhovující	92,5 %	Dobrá	12,5 %
	0,3 % Adhere65-00	77,0 %	Vyhovující	93,2 %	Dobrá	16,2 %

Metoda semi-automatického hodnocení PyPAIS poskytla přesnější výsledky obalené plochy kameniva než v případě metody stanovení stupně šedi s využitím Binderu 1.0. V případě variant s kamenivem Brant (žulový porfyr) se liší vizuální hodnocení dle ČSN 73 6161 v průměru o 7,1 % oproti hodnocení softwarem (viz graf na Obr. 112). Ukazuje se, že ve většině případů je vizuální hodnocení přísnější než stanovená obalená plocha vypočtená na základě textury (entropie) povrchu. Z výsledků je patrné, že vizuální hodnocení je ve většině případů přísnější než hodnocení samotným programem. Až na varianty se silničním asfaltem 50/70 (rozdíl 5,7 % obalené plochy), 50/70 upravený krakováním (rozdíl 3,8 % obalené plochy), a polymerem modifikovaným asfaltem PMB 45/80-75 (rozdíl 0,7 % obalené plochy), kde tomu je naopak, výsledek je tak v tomto případě podhodnocen.



Obr. 112. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru PyPAIS – varianty s kamenivem Brant.

V případě variant s kamenivem Zbraslav (horninová směs tufitů, metatufitů a spilitu) je rozdíl mezi vizuálním hodnocením a hodnocením pomocí softwaru v průměru o 6,7 % obalené plochy. Stejně jako u kameniva Brant se zde opakuje stejný trend, ve většině případu je vizuální hodnocení přísnější, mimo varianty se silničním asfaltem s penetrací 50/70 upraveného krakováním (rozdíl 8,2 % obalené plochy), a varianty s polymerem modifikovaným pojivem PMB 45/80-75 (rozdíl 5,0 % obalené plochy). Porovnání obou těchto přístupů je patrný z grafu na Obr. 113.

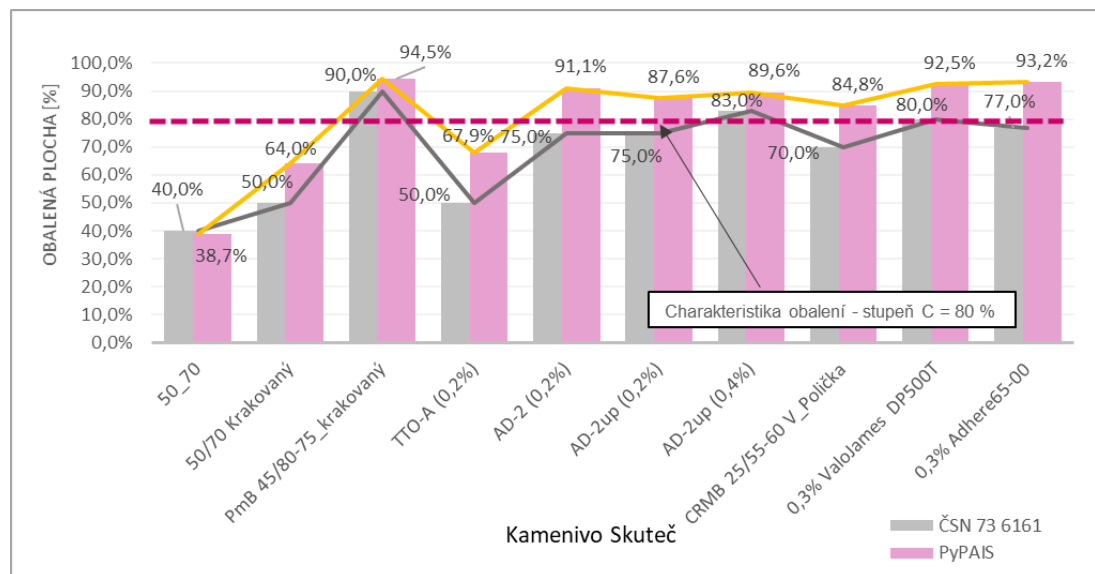


Obr. 113. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru PyPAIS – varianty s kamenivem Zbraslav.

Nejznamenatelnější výkyvy získaných hodnot jsou patrné v případě kameniva z lomu Skuteč (graf na Obr. 114), tedy amfibolicko-biotitický granodiorit, který obsahuje podstatné množství křemene – množství nad 20 % dále plagioklasu, draselného živce a tmavého minerálu biotitu.



Plocha obaleného kameniva dle vizuálního hodnocení opakuje tentýž trend jako v předchozích dvou případech, výsledky jsou mimo varianty se silničním asfaltem 50/70 (téměř zanedbatelný rozdíl 1,3 % obalené plochy) znatelně přísnější, než je tomu v případě vyhodnocení pomocí softwaru. Rozdíl mezi vyhodnoceními je v průměru 11,4 %, to znamená, že výsledná přilnavost mezi pojivem a kamenivem dosáhla znatelně lepších výsledků klasifikace dle normy ČSN 73 6161. Například u varianty s adhezivní přísadou AD-2 (0,2 %-hm.) byla přilnavost klasifikována dle vizuálního hodnocení jako „nevyhovující“ a v případě použití softwaru odpovídá zjištěná hodnota obalené plochy klasifikaci „dobrá“. To samé lze konstatovat v případě varianty s přísadou AD-2up (0,2 %-hm.).



Obr. 114. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru PyPAIS – varianty s kamenivem Skuteč.

#### 5.6.2.6 Diskuze k dosaženým výsledkům

Cílem této zde prezentované části experimentálních činností bylo představení nové varianty semi-automatické metody, která hodnotí přilnavost asfaltového pojiva ke kamenivu z digitálních fotografií. Její algoritmus je založen na určování lokální entropie — obrazové struktury snímaných materiálů. Vychází z předpokladu, že hladký povrch náleží pojivu, zatímco hrubý kamenivu. Odpadají tak problémy s reflexí světla či nízkým fázovým kontrastem u asfaltových směsí. Naopak postačí méně kvalitní fotografie, která může být dokonce značně podexponovaná. Jediným nutným požadavkem je její ostrost zaručující detailní strukturní kresbu snímaných materiálů. Představovaná metoda je sice náročnější na výpočetní kapacitu, ale poskytuje přesnější výsledky a v porovnání s vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 odpadá subjektivní hodnocení posuzovatele.

Pokrytí asfaltem bylo vyhodnoceno ručně na sérii vzorků asfaltových směsí, aby se metoda ověřila a prokázala její spolehlivost a přesnost. Je však důležité mít na paměti, že analýza se opírá o 2D projekci. Protože analytické korekce jsou omezeny na dokonalé elipsoidy, mělo by se pro další zlepšení zvážít použití stereovizí a 3D rekonstrukce povrchu. [184, 188, 189, 190]

## 5.7 Vliv účinku vybraných přínavostních přísad v asfaltových směsí ověřený souborem experimentálních metod vlastních a standardizovaných přístupů [188, 189]

### 5.7.1 Návrh směsi a použité varianty

#### 5.7.1.1 Varianty použitých adhezivních aditiv a minerálních přísad

Jako referenční pojivo byl použit silniční asfalt gradace 50/70. Za účelem zlepšení adheze bylo referenční pojivo smícháno s vybranými typy adhezivních přísad pro zvýšení vazby mezi asfaltovým pojivem a kamenivem (koncentrace adhezivní přísady dle doporučení výrobců), viz Tab. 46.

Tab. 46. Přehled variant adhezivních přísad a jejich dávkování.

Označení	Přínavostní přísada	Účinná látka aditiva	Dávkování přísady [% hm. asfaltového pojiva]
50/70 (ref.)	–	–	–
50/70 + A1	Rhodoval DP500 T	Fosfát	0,3
50/70 + A2	AD2	Nenasycené mastné kyseliny + diethanolamin	0,2
50/70 + A3	Interlene SL100	Silan	0,1
50/70 + A4	Anova 1420	Rostlinné oleje	0,3
50/70 + A5	AdHere 65-00 LOF	Etylenpolyamin	0,3

Příísada Rhodoval DP500 T (A1) vyráběný firmou Valochem (Francie) je kapalný fosforečnan (kyselina fosforečná, isotridecylester) s číslem kyselosti mezi 200 a 220 mg KOH/g (viz odst. 2.3.1.1). AD2 (A2) vyráběný společností Environ (Česká republika) je viskózní kapalina na bázi nenasyčených mastných kyselin v kombinaci s diethanolaminem (viz odst. 2.3.1.8). Interlene SL100 (A3) vyráběný společností Interchimica (Itálie) je kapalina na bázi silanu (viz odst. 2.3.1.7). Anova 1420 (A4) vyráběná společností CIUR (USA) je kapalné adhezivní aditivum na biologické bázi vyráběné z rostlinných olejů, schopné reagovat s asfaltovými pojivy modifikovanými pomocí kyseliny polyfosforečné (viz odst. 2.3.1.2). AdHere 65-00 LOF (A5) vyráběný společností ArrMazz Custom Chemicals (USA) je kapalná nízkoviskózní adhezivní přísada na bázi mírně toxického ethylenpolyaminu (viz odst. 2.3.1.3).

#### 5.7.1.2 Kamenivo

Byly vybrány dva typy kameniva, které představují typický vzorek používaný pro stavbu asfaltových vozovek ve střední Evropě (viz Tab. 47). První, drcené kamenivo frakce 8/16 mm pochází z lomu Brant, jedná se o žulový porfyr (většinou složený z hydrofilních kyselých minerálů, jako je žula a křemen, se silnou afinitou k vodě, vyšší než k asfaltu); navzdory svému poréznímu povrchu v důsledku zvětrávání je hydrofilní, a proto náchylný k obnažování. Druhým typem kameniva je hornina z lomu Chlum, kterou lze klasifikovat jako fonolit (složený převážně z alkalického živce) s přítomností melanitu, který má mírně porfyrickou až trachytovou jemnozrnnou strukturu. Drcené kamenivo bylo použito ve dvou frakcích 8/11 mm a 8/16 mm.

Tab. 47. Přehled kameniva použité pro přípravu vzorků.

Označení	Lom	Frakce kameniva	Mineralogický původ horniny	Textura povrchu kameniva
<b>B</b>	Brant	8/16	Žulový porfyr	Hrubozrnný
<b>C</b>	Chlum	8/11, 8/16	Fonolit	Jemnozrnný

### 5.7.1.3 Asfaltové směsi

Komplexní soubor provedených zkoušek asfaltových směsí v této dílčí experimentální studii zahrnoval měření kontaktních úhlů mezi kamenivem a asfaltovými pojivy v kombinaci s adhezivními přísadami, hodnocení adheze mezi pojivem a kamenivem a zkoušky pevnosti spojení zkouškou v tahu (odtrhová zkouška). Příprava zkušebních vzorků byla pro každý typ zkoušky odlišná, z tohoto důvodu je uvedena v příslušných podkapitolách jednotlivých zkoušek. Pro přehlednost bylo přijato jednotné pojmenování vzorků, jak je uvedeno na Tab. 48.

Tab. 48. Pomůcka pro pojmenování asfaltových směsí.

<b>X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub> (X<sub>3</sub>)</b>
X <sub>1</sub> – typ kameniva: B – Brant, C – Chlum (viz Tab. 47)
X <sub>2</sub> – typ přílnavostní přísady: A1-A5, referenční pojivo bez aditiva (0) (viz Tab. 46)
X <sub>3</sub> – číslo vzorku

Pro posouzení účinku adhezivních přísad na makroskopické úrovni byla vybrána asfaltová směs typu asfaltový beton pro obrusné vrstvy (ACO 11+). Pro tento účel byl převzat původní návrh směsi z obalovny umístěné v blízkosti kamenolomu Brant, pouze původně použitá přílnavostní přísada Wetfix (0,3 % hm.) nebyla v rámci této studie uvažována. Varianty připravených asfaltových směsí je uveden v Tab. 49.

Tab. 49. Souhrn asfaltových směsí ACO 11+.

Asfaltová směs	Kamenivo frakce [%]				RA 0/11 [%]	Filer [%]	Asfaltové pojivo [%]	Adhezivní přísada [% hm.]
	8/11	5/8	2/5	0/2				
ACO 11+ původ.						1,9 (vápenec)		0,3 (Wetfix)
ACO 11+ ref.								-
ACO 11+ A1								0,3 (A1)
ACO 11+ A2	20,8	17,0	17,9	22,7	14,1	1,9 (vratný filer)	5,6	0,2 (A2)
ACO 11+ A3								0,1 (A3)
ACO 11+ A4								0,3 (A4)
ACO 11+ A5								0,3 (A5)
ACO 11+ vápenec						1,9 (vápenec)		-
Obsah kameniva [%]	22,0	18,0	19,0	24,0	15,0	2,0	-	-

Asfaltové směsi obsahovaly 15 % hm. recyklovaného materiálu RA 0/11 Brant. Použitý asfalt byl vyroben v rakouské rafinérii Schwechat a splňoval normový požadavek ČSN EN 12591 pro asfaltovou třídu 50/70; bod měknutí 47,2 °C a penetrace 57 mm. Původní návrh směsi splňoval požadavky uvedené v normách ČSN 73 6121.

Na rozdíl od původního návrhu směsi použitého na obalovně bylo u referenční směsi a směsí obsahujících adhezivní přísady běžné vápencové plnivo nahrazeno vratným filerem stejného původu jako použité kamenivo. Tento přístup eliminoval pozitivní účinky fileru z

vápence, jako je vyšší tuhost a nižší citlivost vůči účinkům vody, na vlastnosti směsi. V rámci porovnání byla však vyrobena i asfaltová směs s využitím vápencového fileru, která neobsahovala žádnou další přilnavostní přísadu (směs ACO 11+ vápenc).

## 5.7.2 Experimentální metody

### 5.7.2.1 FTIR spektroskopie

Infračervená spektroskopie patří do skupiny nedestruktivních analytických metod, kdy zkoumaný vzorek není analýzou nikterak poškozen, a přesto poskytuje informaci o svém složení. Získané hodnoty vibračních energií souvisí s pevností chemických vazeb a také s molekulovou geometrií a hmotnostmi jader, tedy s molekulovou strukturou. Tyto skutečnosti předurčují infračervenou spektroskopii jako vynikající experimentální techniku, která vedle kvantitativní a kvalitativní analýzy hraje důležitou roli při výzkumu molekulové dynamiky, chemických vlastností molekul, vlivu prostředí na studované molekuly a mnoho jiných oblastí. Přestože infračervená spektroskopie je využívána při analýze makroskopických vzorků, její podstatou je interakce mikročástic (molekul) tvořících tento makroskopický vzorek s infračerveným zářením. [191]

Spektroskopie FTIR byla měřena pomocí spektrometru Nicolet iS50 vybaveného diamantovým krystalem ATR s jedním odskokem, rozdělovačem paprsku KBr a detektorem DLSTGS. Optická absorbance byla vypočtena ve standardních jednotkách absorbance jako  $A = -\log(R/R_0)$ , kde  $R$  je spektrum a  $R_0$  je referenční spektrum (pozadí) okolního vzduchu.

Pro všechny směsi představují spektra průměr 64 skenů zaznamenaných s rozlišením  $4 \text{ cm}^{-1}$ . Před každým měřením byl diamantový krystal očištěn tetrachlorethylenem, isopropanolem a vodou a otřen do sucha. Před každým měřením byla změřena spektra pozadí, aby se prověřilo odstranění zbytků vzorku. Každý vzorek byl nanesen na diamantový krystal pomocí špachtle bez dalšího zahřívání nebo jiné úpravy.

### 5.7.2.2 Měření kontaktního úhlu

Smáčivost povrchu kameniva asfaltovým pojivem je fyzikálně-chemický jev, který zahrnuje všechny tři fáze: pevnou (kamenivo), kapalnou (pojivo) a plynnou (atmosférický vzduch). (viz 3.1) Před měřením byla horninová jádra přesně rozřezána pomocí diamantové pily, aby vznikl rovinný povrch, a vyleštěna pomocí brusného papíru zrnitosti 1200, aby byl zajištěn dokonale hladký povrch. Pomocí pájecího drátu byly na takto připravené vzorky kameniva nanесeny kapičky o objemu  $10 \pm 1 \mu\text{l}$  (Obr. 115). Objem byl vypočítán přístrojem a kapky, které nebyly v předepsaném objemovém rozmezí, byly z měření vyřazeny. Výbrusy kamenivo včetně asfaltového pojiva byly předeřhřáty v klimatické komoře na teplotu  $80 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ , jak doporučují Yao et al. [192], stejně jako pájecí drátek. Vyšší teploty vedly k nadměrné smáčivosti kameniva asfaltovým pojivem, což bylo na úkor přesnosti měření. Měření kontaktního úhlu  $\theta$  bylo prováděno pomocí povrchového tenzometru Attension Theta (Biolin Scientific, Finsko), který zachycoval siluetu obrysu kapky. Pro vyhodnocení  $\theta$  ze snímků byl použit software Attension využívající metodu Young Laplace-fit [193]. Každá kombinace kameniva a asfaltového pojiva byla reprezentována 10 opakujícími se měřeními.



Obr. 115. Kapky zahřátého asfaltového pojiva na výbrusu kameniva (vlevo) a vyhodnocení kontaktních úhlů pomocí povrchového tenzometru a Young-Laplaceovy rovnice (vpravo); dvě nejmenší kapky byly z měření vyřazeny pro nesplnění kritéria minimálního objemu.

### 5.7.2.3 Měření volné povrchové energie

Smáčivost pevného povrchu kapalinou závisí na jejich volných povrchových energiích, které nelze měřit přímo a obvykle se určují na základě kontaktního úhlu mezi kapalinou a dokonale rovným homogenním povrchem pevné látky [36]. V této studii byly energie volného povrchu pro posuzovaná asfaltová pojiva stanovena pomocí metody Owens-Wendt-Rabel a Kaelble (OWRK) [194, 195] na základě měření kontaktního úhlu pro nejméně dvě kapaliny. Metoda využívá rovnici OWRK ve tvaru:

$$\sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d} + \sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p} = 0,5 \gamma_L (1 + \cos \theta) \quad (32)$$

kde  $\theta$  je kontaktní úhel,  $\gamma_S^d$  a  $\gamma_S^p$  jsou disperzní a polární složky pevné látky, a  $\gamma_L^d$  a  $\gamma_L^p$  jsou disperzní a polární složky kapaliny. Disperzní složka  $\gamma_L^d$  je rovna Lifshitzova-van der Waalsova složka  $\gamma^{LW}$  a polární složka  $\gamma_L^p$  je ekvivalentní kyselé složce  $\gamma^{AB}$ , kterou lze vyjádřit pomocí kyselé  $\gamma^+$  a zásadité složky  $\gamma^-$  jako  $\gamma^{AB} = 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-}$ . Měření kontaktních úhlů na základě snímků kapek pro vybrané polární kapaliny (destilovaná voda a formamid, který představuje amid odvozený od kyseliny mravenčí a lze jej také považovat za aldehyd kyseliny karbamové) a disperzní kapaliny (di-jodomethan) s dobře známými povrchovými energiemi, umožnilo vyřešit rovnici OWRK (32) a určit volné povrchové energie pro asfaltové pojivo dispergované na mikroskopických sklíčkách. Všechny tyto kapaliny splňovaly požadavky na čistotu a homogenitu, inertnost vůči testovaným asfaltovým pojivům a vyšší povrchovou energii ve srovnání s asfaltovými pojivy. [196]

Měření kontaktních úhlů se provádělo při teplotě  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  na automaticky nanesených kapkách (měření pěti kapek) na každou kombinaci připravené kapaliny a podkladu za použití stejného zařízení a metodiky, jak je popsáno v odstavci 5.7.2.2. Směrodatné odchylky těchto měření pro každou kombinaci kapaliny a podkladu byly nižší než  $2,5^\circ$ . Aby bylo možné dosáhnout tak vysoké přesnosti, musely být vrstvy asfaltu rovnoměrně rozloženy, aby byl zajištěn hladký povrch. Odpařování kapalin muselo být omezeno rychlým měřením (méně než 10 s na vzorek). Dále bylo třeba hlídat, aby objem kapek byl konstantní ( $2 \mu\text{l}$ ), aby se zabránilo nechtěným vibracím kapek.



#### 5.7.2.4 **Zkouška přilnavosti**

Adheze mezi kamenivem a asphaltovým pojivem je termodynamický jev související s povrchovou energií obou materiálů a závisí na povrchových vlastnostech a chemickém složení obou složek. Gronniger et al. [180] and Paliukaite et al. [197] ve svých rozsáhlých studiích dospěli k závěru, že zkouška metodou otáčení lahví je ze všech zkušebních metod pro stanovení afinity kameniva a asfaltu definovaných v evropské normě ČSN EN 12697-11 z hlediska spolehlivosti nejvhodnější pro zkoušení asphaltových směsí.

Zjednodušený postup popsáný v normě ČSN 73 6161 je již zavedenou metodou používanou v České republice, a proto byl v této poslední studii dodržen. Příprava vzorku byla provedena dle kap 4.1.1. U všech takto připravených vzorků byla následně provedena fotodokumentace pro hodnocení entropie snímku s využitím softwaru PyPAIS (viz 5.6.2). Snímky vzorků ponořených do destilované vody (20 °C) byly pořízeny pomocí digitálního fotoaparátu Canon EOS 6D vybaveného objektivem Canon EF 100 mm f/2,8L Macro IS USM s kruhovým polarizačním filtrem Hoya.

#### 5.7.2.5 **Zkouška přímým tahem „Direct pull test“**

Metoda využití v této dílčí experimentální studii vychází z modifikace „Pull-off testu“ a je založena na principu odtrhávání dvou zkušebních těles tvaru válce – jedná se o jádrové vývrty kameniva o průměru  $42 \pm 2$  mm a výšce  $25 \pm 5$  mm. Tyto vzorky byly řezány vodou chlazenou diamantovou pilou Struers Secotom 15 rychlostí 0,14 mm/s a 3100 ot/min. Čelní plochy byly následně vyleštěny pomocí brusného papíru zrnitosti 1200. Po řádném vyčištění byly dvojice vyleštěných jádrových vývrtů kameniva předehřáty v klimatické komoře na teplotu  $160 \pm 5$  °C. Takto připravené jádrové vývrty kameniv jsou spojeny tenkou vrstvou asphaltového pojiva – pro porovnání různých typů pojiva byla u všech zkoušených vzorků provedena vrstva o tloušťce: (i) 1 mm (odpovídá 1 g asphaltového pojiva) a (ii) 0,035 mm (odpovídá 0,05g asphaltového pojiva). V prvním případě (i) se předpokládalo, že vrstva o tloušťce 1 mm vykáže vždy kohezní porušení, zatímco v druhém případě (ii) měla vrstva o tloušťce 0,035 mm zajistit adhezní typ porušení [198]. V případě asphaltového pojiva o tloušťce 1 mm byla kolem jádrových vývrtů horniny připevněna plastová objímka vytištěná na 3D tiskárně, aby se zabránilo úniku pojiva (Obr. 116). Vzorky byly temperovány na teplotu 15 °C a při této teplotě skladovány 24 h před provedenou zkouškou, která poté probíhala při teplotě 20 °C.



Obr. 116. Příklad upnutí jádrových vývrtů kameniva do plastové objímky z 3D tiskárny pro případné zamezení úniku asphaltového pojiva.

Pro samotnou zkoušku byl vyvinut vlastní prototyp upínacího zařízení (viz Obr. 117), které umožňovalo otáčení kolem všech svých os k zajištění čistého jednoosého tahu. Před samotným zkoušením je zkušební vzorek po obou stranách upnut do zkušební objímky, přičemž pro eliminaci možného drcení kameniva vyvozeného v důsledku koncentrace napětí, je mezi objímkou a zkoušeným vzorkem umístěna pryžová podložka. Takto připravený vzorek je přichycen z každé strany napínacím čepem. Zkušební vzorek je dále upnut do zkušebního stroje. Zatěžování vzorků během testování je prováděno řízeným posunem pomocí zatěžovacího rámu lisu LabTest 4.100 SP1 rychlostí 0,5 mm/min až do úplného odtržení vzorku (v rámci této studie se zatěžovalo do maximálního posunu mezi dvě jádrovémi vývrty 4 mm), tedy do nulové síly. Každá kombinace kameniva a pojiva byla zastoupena 5 měřeními. Pevnost vzorků odpovídala maximálnímu napětí dosaženému během zatěžování, které se vypočítalo jako podíl maximální síly a plochy vzorků na rozhraní (1385,5 mm<sup>2</sup>).



Obr. 117. Příklad upnutí vzorku při zkoušce „Direct pull test“ – selhání soudržnosti.

#### 5.7.2.6 Zkouška vodní citlivosti asphaltových směsí a odolnosti vůči vzniku trhlin

##### 5.7.2.6.1 Příprava zkušebních vzorků

Všechny varianty navržených asphaltových směsí byly vyrobeny při teplotách asphaltového pojiva 150 °C, kameniva 160 °C a asphaltového R-materiálu 130 °C dle ČSN EN 12697-35. [199] Poté bylo z každé asphaltové směsi vyrobeno devět Marshallových zkušebních těles zhutněných při 150 °C 2×25 úderů, dalších šest Marshallových zkušebních těles bylo zhutněno při 150 °C 2×50 úderů. Současně byla u každé směsi stanovena maximální objemová hmotnost dle ČSN EN 12697-5 (viz odst. 4.2.2).

##### 5.7.2.6.2 Stanovení vodní citlivosti včetně odolnosti vůči vodě s jedním zmrazovacím cyklem

Zkouška stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči účinkům vody byla provedena v souladu s technickou normou ČSN EN 12697-12 dle odst. 4.2.4. Tento postup byl doplněn o další

řadu těles, která byla vystavena jednomu zmrazovacímu cyklu v souladu s podmínkami stanovenými v americkém předpise AASHTO T283-3 dle odst. 4.2.6. Díky tomu je možné zohlednit nejen účinek vody, ale i možnou kombinaci s účinkem mrazu. Výsledkem zkoušky je poměr pevností v příčném tahu skupiny těles vodou saturovaných ke skupině těles ponechaných na suchu.

#### 5.7.2.6.3 Stanovení modulu tuhosti (zkouškou opakovaného namáhání v příčném tahu IT-CY)

Modul tuhosti připravených variant asfaltových směsí byla stanovena podle ČSN EN 12697-26 metodu zkoušky opakovaného namáhání v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY) nedestruktivní zkouškou, jak je popsáno v kap. 4.2.7, při zkušební teplotě 15 °C.

V rámci posouzení trvanlivosti asfaltových směsí byla polovina zkušebních těles podrobena simulovanému laboratornímu stárnutí podle prEN 12697-52, a to zkušebním postupem, při kterém jsou zhutněné vzorky kondicionovány při teplotě 85 °C v termoregulační komoře s nucenou cirkulací vzduchu po dobu 5 dnů. Na takto zestárlých zkušebních tělesech byl poté opět stanoven modul tuhosti při zkušební teplotě 15 °C.

#### 5.7.2.6.4 Stanovení odolnosti proti šíření trhliny (SCB)

V rámci dalšího posouzení chování asfaltových směsí při nízkých teplotách, byla provedena zkouška stanovení odolnosti proti šíření trhliny při teplotě 0 °C v souladu s ČSN EN 12697-44. V rámci této studie byl použit modifikovaný zkušební postup, odvozený ze standardních postupů uvedených v normě ČSN EN 12697-44. Modifikovaný zkušební postup předpokládá vzorky zhutněné podle normy ČSN EN 12697-30 pomocí rázového zhutňovače o průměru 100 mm namísto zkušebních vzorků o průměru 150 mm a zhutněných podle normy ČSN EN 12697-31 pomocí gyrátoru. Důvody této úpravy jsou popsány v [206]. Modifikovaná metoda předepisuje rychlost zatěžování 2,5 mm/min a teplotu při zkoušce 0 °C, evropská norma požaduje rychlost zatěžování 5,0 mm/min. [200]

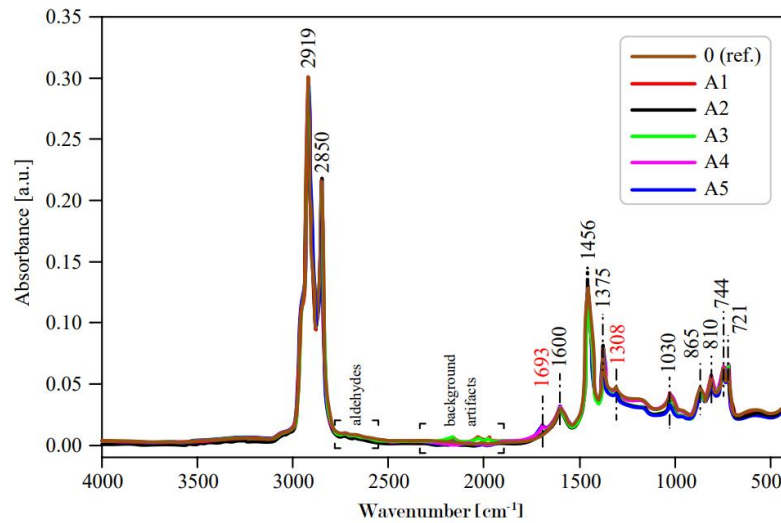
### 5.7.3 Výsledky experimentálního testování

#### 5.7.3.1 Výsledky FTIR spektroskopie

Jak již bylo uvedeno, asfalty jsou organické materiály, které se skládají převážně z molekul uhlovodíků s malým množstvím atomů síry, dusíku a kyslíku. Pružné chování při malých deformacích se přisuzuje slabým van der Waalovým, dipólovým a vodíkovým vazbám, které jsou namáhány; větší deformace vedou k plastické deformaci a nepružné chování je ovlivněno poměrem nasycených látek, aromátů a pryskyřic. Chemická struktura (geometrie molekul a meziatomové/interatomové vazby) tedy určuje viskoelastické a viskoplastické vlastnosti. [201]

Naměřená FTIR spektra (Obr. 118) vykazují výrazné vrcholy, které jsou konzistentní pro všechny posuzované asfaltové směsi. V porovnání se zjištěními Liu et al. [202], jejichž výzkum byl rovněž zaměřen na adhezi mezi asfaltovým pojivem a kamenivem a obnažováním asfaltových směsí, je v grafu FTIR spektra patrná shoda v hlavních vrcholcích (v grafu jsou maxima vyznačena čerchovanou černou čarou). Tyto vrcholy odpovídají C-H matici posuzovaných asfaltů. U směsí

A4 a A5 byl naměřen vrchol odpovídající přítomnosti karbonylu při  $1693\text{ cm}^{-1}$ . Nižší vrcholy naměřené mezi  $2750$  a  $2800\text{ cm}^{-1}$  naznačují přítomnost aldehydů.



Obr. 118. Infračervená spektroskopie FTIR všech posuzovaných asfaltových směsí.

### 5.7.3.2 Výsledky měření kontaktního úhlu

V případě této zkoušky se předpokládalo, že jak zvolený typ kameniva, tak přílnavostní přísady výrazně ovlivňují afinitu kameniva k asfaltovým pojivům. Bylo zjištěno, že vliv přísad je vyšší než vliv typu kameniva (Tab. 50). Oba referenční vzorky B-0 a C-0 vykazovaly velmi podobné kontaktní úhly,  $146 \pm 4,5^\circ$  a  $150 \pm 6,6^\circ$ . Při použití přísad A3 nebo A4 nebyla zjištěna téměř žádná změna kontaktních úhlů bez ohledu na typ kameniva. Pozitivní dopad se prokázal v případě dávkování přísady A2, změna naměřených kontaktních úhlů byla přibližně 6 %. Markantnějších rozdílů bylo naměřeno v případě asfaltových pojiv obsahujících přísady A3 a A4 (přibližně 14 %). Je třeba mít na paměti, že měření probíhalo při snížené teplotě ( $80 \pm 1^\circ\text{C}$ ), než jaké se používají při výrobě asfaltových směsí na obalovně.

Tab. 50. Kontaktní úhly mezi kapkami zahřátých asfaltových pojiv a kamenivem [°].

B-0	B-A1	B-A2	B-A3	B-A4	B-A5
$146 \pm 4,5$	$127 \pm 9,2$	$137 \pm 3,4$	$154 \pm 3,0$	$149 \pm 3,2$	$127 \pm 6,0$
C-0	C-A1	C-A2	C-A3	C-A4	C-A5
$150 \pm 7,6$	$129 \pm 8,4$	$140 \pm 1,6$	$148 \pm 6,1$	$152 \pm 3,5$	$130 \pm 2,2$

### 5.7.3.3 Výsledky měření volné povrchové energie

Lineární regrese na základě měření s použitím různých kapalin umožnila stanovit lineární vztah  $y = \sqrt{\gamma_S^p} x + \sqrt{\gamma_S^d}$ , kde  $x = \sqrt{\gamma_L^p / \gamma_L^d}$  a  $y = 0,5 \gamma_L (1 + \cos \theta) \sqrt{\gamma_L^d}$ .

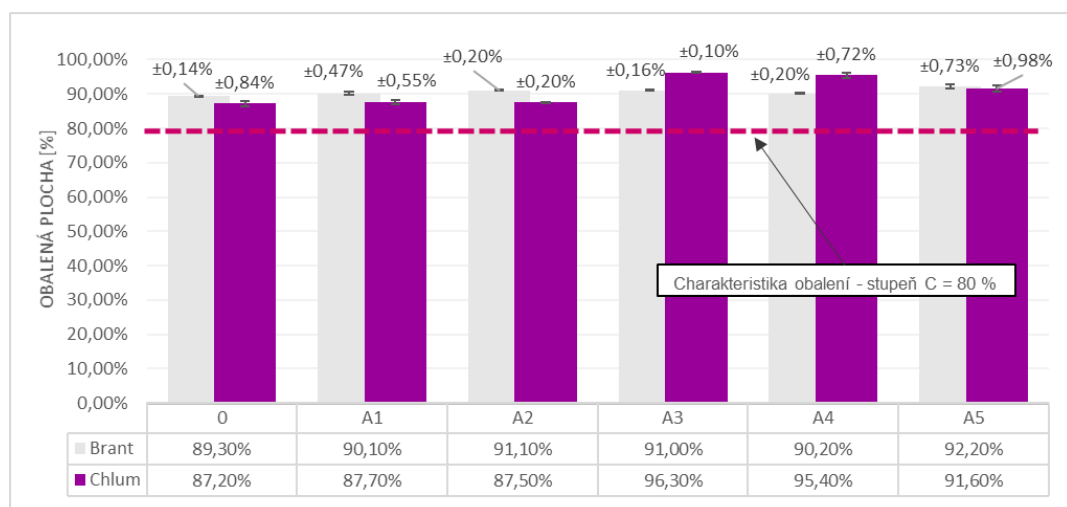
Tab. 51. Volná povrchová energie testovaných asfaltových pojiv [mJ/m<sup>2</sup>]

Asfaltové pojivo	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$
50/70 (ref.)	26,67	26,42	0,25
50/70 + A1	30,78	30,69	0,09
50/70 + A2	28,12	27,98	0,14
50/70 + A3	27,40	27,32	0,08
50/70 + A4	26,66	26,64	0,02
50/70 + A5	26,90	26,88	0,02

Celkové povrchové energie zkoušených asfaltových pojiv lze jednoduše vypočítat jako  $\gamma_s = \gamma_s^p + \gamma_s^d$ . Výsledky lineární regrese pro testovaná asfaltová pojiva jsou uvedeny v Tab. 51. Disperzní složky ( $\gamma_s^d$ ) byly identifikovány jako dominantní pro všechny posuzované asfalty, což je v souladu se skutečností, že většina asfaltových pojiv vykazuje slabou polaritu. Příspěvek  $\gamma_s^d$  byl nejvýznamnější u referenčních asfaltových pojiv a zdá se, že aditiva téměř zcela snižují příspěvek  $\gamma_s^p$  k  $\gamma_s$ . S výjimkou aditiva na bázi rostlinných olejů A4 (-0,04 %) všechna studovaná aditiva rovněž zvyšovala  $\gamma_s$ , přičemž neúčinnější byla přísada A1 na bázi fosfátů (+15,4 %), následovaná A2 (+5,44 %), A3 (+2,74 %) a A5 (+0,86 %).

#### 5.7.3.4 Výsledky stanovení přilnavosti mez pojivem a kamenivem

Zkušební metoda definovaná v normě ČSN 73 6161 se běžně používá ke stanovení přilnavosti asfaltových pojiv k určitému typu kameniva, protože se předpokládá, že tato zkouška je zásadní a simuluje reálné podmínky. V této studii vykazují oba referenční vzorky B-0 a C-0 podobnou afinitu navzdory rozdílnému mineralogickému složení kameniva (Tab. 47). Účinky aditiv podporující adhezi byly výraznější v případě jemnozrnného kameniva na bázi fonolitu z lomu Chlum. Nicméně zlepšení přilnavosti bylo pozorováno u všech aditivem upravených variant asfaltových pojiv. Největší zvýšení přilnavosti bylo patrné u vzorků C-A3 a C-A4, a to o 9,1 %, resp. 8,2 % vzhledem k referenčnímu C-0. Naopak v případě kameniva z lomu Brant, který disponuje vhodnějším typem kameniva (žulový porfyr), bylo zlepšení přilnavosti zanedbatelné (do 1,9 % u B-A5). Souhrn výsledků stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 uvádí graf na Obr. 119.



Obr. 119. Obalená plocha kameniva při stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem podle normy ČSN 73 6161 [%].



### 5.7.3.5 Pevnost spojení

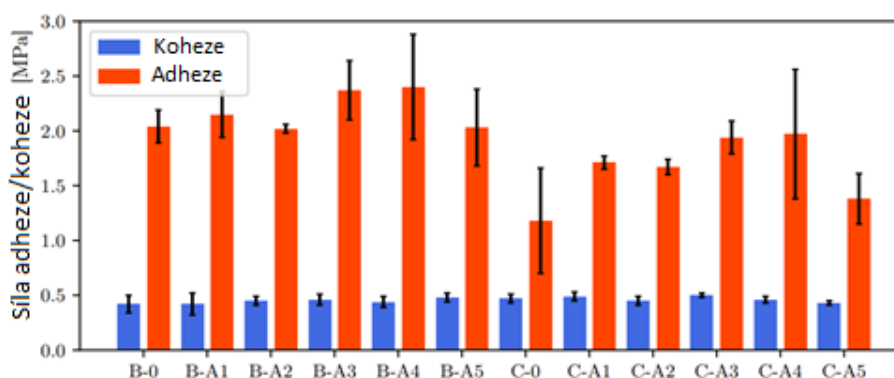
Norma AASHTO T 361-16 [203], která specifikuje metodu stanovení pevnosti spojení asfaltového pojiva a kameniva, definuje tři možné způsoby selhání systémů asfalt-kamenivo: (i) porucha koheze uvnitř asfaltového pojiva, (ii) porucha adheze na rozhraní asfaltového pojiva-kameniva a (iii) smíšený případ porušení [204, 205]. V této studii se předpokládalo kohezní selhání v případě 1 mm silné vrstvy asfaltového pojiva mezi jádrovými vývrty horniny, zatímco selhání adheze se očekávalo pro tenké vrstvy asfaltové pojiva v případě vrstvy o tloušťce 0,035 mm.

Uvedené předpoklady potvrdily výsledky provedené zkoušky přímým tahem (Tab. 52, Obr. 120); hodnoty adhezní pevnosti v průměru převyšovaly kohezní pevnost přibližně 4,1krát. Vliv typu kameniva na pevnost soudržnosti nebyl zjištěn, i když vhodnější kamenivo na bázi žulového porfyru z lomu Brant vykazovalo asi o 20 % vyšší adhezi než kamenivo na bázi žnělce z lomu Chlum. Úloha přínavnostních přísad je rovněž zanedbatelná, pokud jde o kohezní porušení, ale jejich vliv na adhezi je významný, zejména v případě kameniva z lomu Chlum, kde s výjimkou A5 přísady zvýšily adhezi přibližně o 50 %. Toto zjištění je v souladu s výsledky stanovení přílnavosti mezi pojivem a kamenivem.

Tab. 52. Pevnost spojení vzorků během zkoušky „Direct pull test“ [MPa].

	B-0	B-A1	B-A2	B-A3	B-A4	B-A5
Koheze	0,42±0,08	0,42±0,10	0,45±0,04	0,46±0,05	0,44±0,05	0,48±0,04
Adheze	2,04±0,15	2,15±0,21	2,02±0,04	2,37±0,27	2,40±0,48	2,03±0,35
	C-0	C-A1	C-A2	C-A3	C-A4	C-A5
Koheze	0,47±0,04	0,49±0,04	0,45±0,04	0,50±0,02	0,46±0,03	0,43±0,02
Adheze	1,18±0,48	1,71±0,06	1,67±0,07	1,94±0,15	1,97±0,59	1,38±0,23

U vzorků s vrstvou asfaltového pojiva tloušťky 1 mm byly zaznamenány diagramy závislosti síly na přetvoření přímou tahovou zkouškou, viz příloha C. V případě vzorků s tenkou vrstvou asfaltového pojiva tloušťky 0,035 mm došlo během zkoušky k porušení křehkým lomem, z tohoto důvodu nejsou uvedeny diagramy závislosti zatížení na přetvoření, jako v předchozím případě.



Obr. 120. Maximální normálová napětí pro kohezní a adhezní poruchy dosažené při zkoušce přímým tahem („Direct pull test“).

Na následujícím obrázku jsou uvedeny příklady porušení zkušebních vzorků způsobené ztrátou koheze (Obr. 121 vlevo) a ztrátou adheze (Obr. 121 vpravo).



Obr. 121. Vzorky pro tahovou zkoušku po kohezním (vlevo) a adhezním (vpravo) porušení.

### 5.7.3.6 Výsledky stanovení vodní citlivosti a odolnosti proti stárnutí asfaltových směsí

Bylo prokázáno, že kohezní i adhezní pevnost se v čase mění, což má za následek zcela odlišné chování zestárlých asfaltových směsí. Kromě toho vznik trhlin kameniva zejména v důsledku zmrazování významně ovlivňuje pevnost asfaltových vozovek, a proto by se laboratorní zkoušky pevnosti neměly omezovat pouze na nezestárlé zkušební vzorky. Z tohoto důvodu byla do experimentální výzkumu zahrnuta řada zkoušek stanovení odolnosti vůči negativnímu působení vody včetně odolnosti vůči účinkům mrazu, které jsou popsány v kapitole 5.7.2.6.2; výsledky těchto zkoušek jsou shrnuty v Tab. 53.

Tab. 53. Vlastnosti navržených asfaltových směsí.

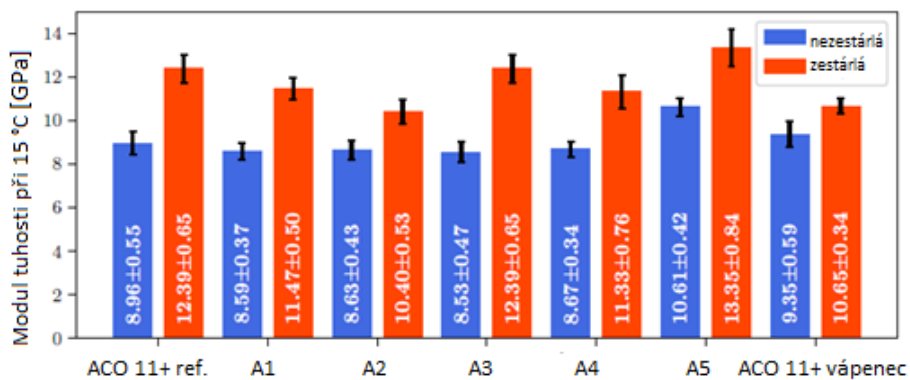
Asfaltová směs	Zhutněná objemová hmotnost [g/cm <sup>3</sup> ]	Mezerovitost [%]	ITS <sub>sucho</sub> [MPa]	ITSR <sub>ČSN EN</sub> [%]	ITSR <sub>AASHTO</sub> [%]	ITMR [-]
ACO 11+ původní	2350	3,4	1,81	91	N/A	N/A
ACO 11+ referenční	2331	4,5	1,87	91	86	0,99
ACO 11+ A1	2326	4,2	1,87	86	77	0,55
ACO 11+ A2	2353	3,0	1,69	81	78	0,78
ACO 11+ A3	2354	3,0	2,11	93	88	0,85
ACO 11+ A4	2336	3,1	1,98	81	77	0,77
ACO 11+ A5	2343	3,2	2,33	91	85	0,75
ACO 11 + vápenec	2328	3,6	2,05	83	74	0,74

Objemová hmotnost všech variant asfaltových směsí vykazuje malou směrodatnou odchylku 0,0108, a proto se zdá, že přílnavostní přísady nemají na naměřené hodnoty žádný vliv, podobně jako v případě stanovení mezerovitosti asfaltových směsí, kde pouze referenční asfaltová směs a asfaltová směs obsahující přísadu A1 vykazují mírně vyšší hodnotu, což lze přičíst nehomogenitě recyklovaného asfaltového materiálu, který se použil při návrhu asfaltové směsi, a to navzdory skutečnosti, že byl odebrán z jednoho zdroje z obalovny.

V případě hodnot naměřených pevností v příčném tahu (ITS<sub>dry</sub>) jsou rozdíly výraznější. Při sledování souboru asfaltových směsí obsahujících vratný filer dosáhl nejvyšší hodnoty dávkování adhezní přísady A5, zatímco aplikace přísady A2 měla opačný efekt, zde je patrná výrazný rozdíl naměřené pevnosti v příčném tahu, přibližně 0,6 MPa. Při porovnání poměrů pevností v příčném tahu dle normy ČSN EN 12697-12 (ITS<sub>ČSN EN</sub>) lze konstatovat následující závěry, adhezní přísady v kombinaci s vratným filerem nemají na tuto vlastnost podstatný vliv. Již

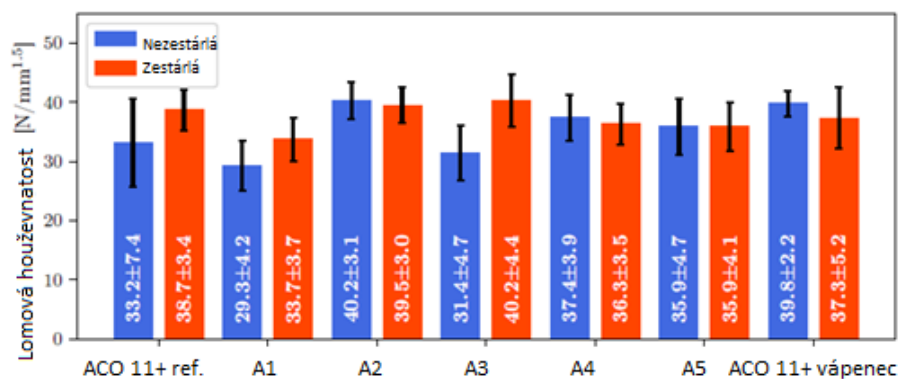
samotná referenční směs vykazuje velmi dobrou odolnost vůči účinkům vody, což je patrné i v případě asfaltové směsi navržené obalovnou, kde byl použit vápencový filer. Překvapivých výsledků bylo dosaženo v případě varianty asfaltové směsi ACO 11+ s vápencovým filerem, kdy byla naměřena hodnota  $ITSR_{\text{ČSN EN}} 83 \%$ , což je o 8 % nižší hodnota než v případě původně navržené asfaltové směsi. Překvapivě nízké poměry pevností v příčném tahu byly zaznamenány také v případě směsí s přilnavostními přísadami A2 a A4, jak potvrzují i výsledky poměrů pevností dle použitého modifikovaného postupu uvedeného v AASHTO T-283.

Z výsledků naměřených modulů tuhostí asfaltových směsí (Obr. 122) je patrné, že ke zvýšení hodnot přispěla pouze směs obsahující přísadu A5. Ostatní adhezní přísady neměly na výslednou tuhost vliv. Srovnání referenční směsi s ACO 11+ s vápencem rovněž ukázalo zanedbatelný rozdíl, což vylučuje pozitivní vliv vápencového fileru ve srovnání s použitím nákladově efektivnějšího vratného fileru. Vzhledem k množství asfaltových směsí, které se ročně vyrobí na celém světě, by nahrazení vápencových filerů odpadními vratnými filery přineslo obrovské environmentální a ekonomické benefity. Jen v evropském silničním sektoru se ročně vyprodukuje přibližně  $263\text{--}326 \times 10^9$  kg horkých asfaltových směsí [69]. Vzhledem k tomu, že každá tuna asfaltové směsi obsahuje v průměru 3 % hm. vápencového fileru, což odpovídá  $7,9\text{--}9,8 \times 10^9$  kg, které by mohlo být nahrazeno vhodným vratným filerem či jinou adekvátní náhradou v podobě recyklovaného materiálu získaného z odpadních produktů, jak se v průběhu zpracování této práce prokázalo. Ovšem vše za podmínky, že nebudou ohroženy mechanické vlastnosti navržené asfaltové směsi. Vezmeme-li v úvahu průměrnou cenu vápencového fileru přibližně 600–700 CZK/t a skutečnost, že vratné filery jsou často klasifikovány jako odpad, jsou ekonomické a ekologické výhody využití odpadních materiálů bezesporu výhodné.



Obr. 122. Výsledky modulů tuhosti při teplotě 15 °C navržených asfaltových směsí včetně stanovení u zestárilých zkušebních vzorků 5d@85 °C.

V případě porovnání modulů tuhosti asfaltových směsí vystavených simulovanému dlouhodobému stárnutí, prokázalo se, že adhezní přísady tuhost zhoršují. Varianta směsi s přísadou A3 vykazovala nejvyšší index stárnutí 1,45, zatímco směs obsahující vápencový filer, bez adhezních přísad vykazovala náchylnost vůči stárnutí o 20 % nižší než referenční směs. Při porovnání směsí obsahujících pouze adhezní přísady se prokázala jako nejvýhodnější přísada s označením A2.



Obr. 123. Výsledky lomové houževnatosti navržených asfaltových směsí včetně stanovení u zestárých zkušebních vzorků 5d@85 °C.

Výsledky odolnosti proti šíření trhlin provedených na půlválcových tělesech jsou patrné z grafu na Obr. 123. Naměřené hodnoty lomové houževnatosti,  $K_{IC}$ , se pohybovaly v rozmezí 29 až 40 N/mm<sup>3/2</sup>; nejnižší hodnoty lomové houževnatosti bylo dosaženo u vzorků ACO 11+ A1 a ACO 11+ A3, následováno referenční směsí ACO 11+ ref. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo u vzorků ACO 11+ A2 a ACO 11+ s vápencem.

### 5.7.3.7 Shrnutí výsledků

Pro shrnutí výsledků, posouzení přínosu jednotlivých adhezivních přísad a stanovení vztahu mezi vybranými experimentálními metodami je uvedeno kvalitativní hodnocení v tabulce (tabulka 11). Kromě přehledu účinnosti přílnavostních přísad poukazuje na vhodnost jednotlivých zkoušek pro hodnocení adheze mezi kamenivem a asfaltovým pojivem.

Tab. 54. Kvalitativní hodnocení účinnosti jednotlivých přílnavostních aditiv v rámci provedené série zkoušek; ++ = vysoký pozitivní vliv přílnavostní přísady, + = pozitivní vliv, 0 = žádný vliv, - = negativní vliv a -- = velmi negativní vliv.

Zkušební metoda	Výstup	A1	A2	A3	A4	A5
FTIR spektroskopie	Chemické složení	0	0	0	0	0
Měření kontaktních úhlů	Přílnavost mezi pojivem a kamenivem	+	+	0	0	+
Měření volné povrchové energie	Smáčivost asfaltových pojiv	+	+	0	0	0
Zkouška přílnavosti	Přílnavost mezi pojivem a kamenivem	0	0	++	+	+
Přímá tahová zkouška (Direct-pull test)	Kohezní porušení	0	0	0	0	0
	Adhezní porušení	+	+	++	++	0
Stanovení vodní citlivosti	Citlivost asfaltové směsi vůči poškození vlivem účinku vody a mrazu	-	-	+	-	0
Stanovení modulu tuhosti (IT-CY)	Stárnutí vlivem teplotního zatěžování	0	0	++	0	+
Stanovení odolnosti proti šíření trhliny (SCB)	Lomová houževnatost a lomová energie	0	+	0	++	0
	Stárnutí vlivem zatěžování při nízkých teplotách	+	0	0	-	-

Z definice funkce přílnavostních přísad, by použití těchto látek nemělo ovlivnit tuhost asfaltových směsí ani jejich chování v oboru nízkých teplot, protože tyto přísady nemají žádný

vliv na soudržnost (kohezi) - viz vliv přísad na pevnost koheze hodnocený v Tab. 54 a Obr. 122. Tento předpoklad se potvrdil, až na malé odchylky. Výsledky makroskopických zkoušek po simulovaném dlouhodobé stárnutí naznačují, že přítomnost přílnavostních přísad může ovlivnit jak dlouhodobou tuhost asfaltových směsí, tak odolnost směsí vůči lomu. Na druhou stranu jsou přílnavostní přísady určené ke zvýšení trvanlivosti, která se projevuje zejména v hodnotách ITR. Takové zvýšení však nebylo zjištěno vzhledem k optimálnímu složení referenčního materiálu ACO 11+ ref. obsahujícího vápencový filer (který jak již bylo uvedeno dříve, může mít pozitivní efekt na zlepšení přílnavosti mezi pojivem a kamenivem). Současně s tím zde hraje významnou roli i relativně vysoké množství asfaltového pojiva v navržené asfaltové směsi ACO 11+, které je zodpovědné za porušení koheze. Z tohoto důvodu by, asfaltové směsi obsahující přibližně o 1 % méně asfaltového pojiva a vyšším množstvím hrubého kameniva, mohly poskytnout přesvědčivější důkazy o účinku adhezivních přísad. Nicméně bylo možné vyzorovat důležitá zjištění: adhezivní přísady nemají negativní vliv na soudržnost asfaltových pojiv (kohezi), použití přísady na bázi silanů (A3) bylo pro asfaltovou směs ACO 11+ přínosné, zatímco použití přísady na bázi nenasyčených mastných kyselin s diethanolaminem (A2) nebo na bázi rostlinných olejů (A4) může negativně ovlivnit hodnoty poměrů pevností v příčném tahu ITR (což není v souladu s výsledky přílnavostní zkoušky a zkoušky „Direct pull test“). Z těchto důvodů je třeba v budoucnu provést další sérii zkoušek za použití například jiného typu asfaltové směsi, s vhodnějším složením.

#### 5.7.4 Diskuze k dosaženým výsledkům

Je všeobecně platné, že použití adhezivních přísady pro zlepšení přílnavosti mezi pojivem a kamenivem, zvyšuje pevnost a trvanlivost asfaltových směsí. Předpokládá se, že zlepšená vazba mezi asfaltovými pojivy a kamenivem, kterou zajišťují přílnavostní přísady, může zmírnit proces obnažování. V této studii byly experimentálně testovány a následně porovnány asfaltové směsi s použitým vybraných typů přílnavostních přísad. Zkoušky navržených variant asfaltových směsí byly testovány dle vlastních a standardizovaných experimentálních metod. Hlavní zjištění z provedeného experimentálního testování lze shrnout následovně:

- Přísady podstatně nezměnily chemické složení asfaltových pojiv.
- Přísady na bázi fosfátů a ethylen polyaminů zvyšovaly přílnavost minerálního kameniva k aditivovaným asfaltovým pojivům při zahřátí na teplotu  $80 \pm 1$  °C, vyšší teplota způsobovala úplné smáčení kameniva při měření kontaktního úhlu, bez ohledu na přítomnost adhezivních přísad.
- Přílnavostní přísady měly velmi omezený vliv na výslednou volnou povrchovou energii asfaltových pojiv, přesto bylo zjištěno její mírné zvýšení až o 15 %, což činí pojivo potenciálně méně náchylným k procesu obnažování.
- Přísady na bázi silanu nebo rostlinných olejů přispěly ke zvýšení adheze asfaltových pojiv v případě méně vhodných hladkých kameniv na bázi želce; příspěvek ostatních přísad byl zanedbatelný.
- Pevnost soudržnosti (koheze) nebyla ovlivněna přítomností aditiv podporující adhezi.
- Všechna přílnavostní přísady zvýšily přílnavost v případě tenké asfaltové vrstvy selhávajících v důsledku poruchy adheze během zkoušky přímého tahu; toto zvýšení

bylo nejvýznamnější u přísad na bázi silanu nebo rostlinných olejů, což dobře koresponduje výsledky přilnavostní zkoušky.

- Zkušební vzorky zhutněné asfaltové směsi ACO 11+ vykazovaly nejvyšší lomové energie, pokud byly do směsi aplikovány přilnavostní přísadami na bázi nenasycených mastných kyselin s diethanolaminem nebo rostlinnými oleji; to naznačuje souvislost lomově-mechanických vlastností s adhezí pevností.
- Z hlediska zhoršení tuhosti a lomové houževnatosti asfaltových směsí v důsledku zatěžování vlivem zvýšené teploty, se ukázala být účinnější než vápencový filer použitý v referenční směsi, pouze přísada na bázi silanu.
- Zkoumaná aditiva podporující adhezi nepřispěla významně k prevenci před účinky stárnutí z hlediska namáhání zkušebních těles v oboru nízkých teplot.

Výsledky naznačují, že účinnost přilnavostních přísad nelze hodnotit na základě výsledků jediné zkoušky. Výjimkou může být dlouhodobého sledování účinnosti těchto přísad v asfaltové směsi v reálné konstrukci vozovky, vystavené dopravnímu zatížení v kombinaci s povětrnostními vlivy. Ukázalo se, že laboratorní měření mohou být často neprůkazná nebo dokonce ve vzájemném rozporu. Navzdory tomu lze při analýze výsledků této studie dospět k závěru, že vybrané přilnavostní přísady prokázaly potenciál zvýšit odolnost proti obnažování, a tím i trvanlivost asfaltových vozovek. Jako nejvhodnější z hlediska všech provedených laboratorních zkoušek se prokázala přísada na bázi silanu. Za zmínku stojí pozitivní přínos méně nákladného vratného fileru, který byl z hlediska dosažených parametrů asfaltové směsi srovnatelný s použitým vápencovým filerem. [188, 189]

## 6 ZÁVĚR

Pochopení problematiky trvanlivosti asfaltové směsi a stanovení citlivosti asfaltové směsi vůči poškození vodou a zvýšenou vlhkostí, které přímo souvisí s přilnavostí mezi pojivem a kamenivem, je v silničním stavitelství a obecně ve vědních oborech věnujících se problematice asfaltových směsí a jejich studiu jeden z dlouhodobě studovaných fenoménů. Mezi tyto aspekty lze zařadit i vliv stárnutí pojiva, resp. asfaltové směsi jako celku, které je pro správný návrh trvanlivé vozovky bezesporu nezbytné zahrnout. Z tohoto důvodu se část této disertační práce věnovala použití laboratorní simulace dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi. Vhodně zvolený přístup ověřování stability trvanlivosti asfaltové směsi lze uplatnit při výběru vhodné adhezí přísady za účelem zlepšení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem a současně jej lze uplatnit i při volbě vhodné kombinace typu kameniva a asfaltového pojiva s vybranou přilnavostní přísadou či náhradou tradičního jemnozrnného plniva v asfaltové směsi, což může být ve výsledku uplatněno i jako funkční nástroj pro vznik trvanlivějších vozovek. Z tohoto důvodu bylo v rámci této disertační práce uplatněno několik možných přístupů, jak posuzovat trvanlivost asfaltových směsí, a to nejen s využitím standardizovaných a v laboratorní praxi dlouhodobě používaných zkušebních metod.

V rámci této disertační práce byla také snaha dozvědět se více o komplexnosti a citlivosti přilnavostních přísad v asfaltovém pojivu, zejména s ohledem k ostatním složkám asfaltové směsi, jímž jsou různé typy kameniva lišící se fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, které





vyplývají z jejich geneze vzniku a formování, mineralogicko-petrografického složení, struktury, textury, druhotných přeměn apod., a současně tedy i v kompozitním materiálu – v asfaltové směsi. Hlavní funkce adhezních přísad spočívá v zachování dostatečně pevné vazby mezi kamenivem a pojivem, jenž je v případě asfaltového betonu v ohrubné vrstvě vozovky vystavena riziku ztráty makrotextury, ztráty odolnosti proti působení klimatických vlivů a účinků apod. Ohrubná vrstva je vystavena přímo působení klimatických vlivů a dopravnímu zatížení, proto jsou na ni kladeny vyšší nároky z hlediska její trvanlivosti. Ne jinak je to u ložní vrstvy vozovky, do níž klimatické vlivy nepřímo zasahují. Dopady způsobené tímto namáháním mohou být výrazně menší, nicméně musíme brát v potaz celkovou dobu působení těchto vlivů, která je u ložní vrstvy výrazně delší než u ohrubné. I z tohoto důvodu byly v rámci experimentální činnosti zvoleny oba typy těchto konstrukčních vrstev.

Z provedené studie a dosažených výsledků je patrné, že vlastní zkouška přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu nám poskytuje rychlé informace o kvalitě obalení zrn kameniva asfaltem, pomůžou nám vyloučit kameniva, která s daným pojivem nevytváří dostatečně pevnou a kvalitní vazbu. Pomocí této zkoušky můžeme také potvrdit funkčnost přilnavostních přísad, její nevýhodou je však značná závislost na subjektivním vjemu hodnotitele a skutečnost, že lze jen velmi těžko zvolený postup vztáhnout k nějakým reálným vlivům v konstrukci vozovky. Toto lze eliminovat hodnocením s využitím semi-automatických metod (Binder 1.0 je založen na hodnocení stupňů šedi, PyPAIS je založen na lokální entropii snímků), které hodnotí přilnavost asfaltového pojiva ke kamenivu z digitálních fotografií. Z výsledků hodnocení, s využitím těchto dvou typů nových softwarových nástrojů, které je možné v zásadě okamžitě začít v silniční praxi využívat, plynou následující závěry:

- Z výsledků stanovených pomocí hodnocení programem Binder 1.0 nelze jednoznačně detekovat všechna obnažená místa jednotlivých zrn kameniva. Tento program vychází z předpokladu, že černá barva náleží asfaltovému pojivu, zatímco světlejší odstíny obnaženému kamenivu. Sebelepší algoritmus je přitom nedokáže vždy rozpoznat a patřičně zatřídit.
- Výstupy získané při využití hodnocení stupňů šedi ztelně vybočují. Rozdíl v hodnocení přilnavosti dle ČSN 73 6161 a hodnocením pomocí softwarového nástroje Binder 1.0 je v případě série zkušebních vzorků s kamenivem z lomu Brant (žulový porfyr) v průměru 18,3 %, s kamenivem z lomu Zbraslav (horninová směs) se jedná o rozdíl 13,1 %, a nejvyšších rozdílů bylo dosaženo v případě použití kameniva z lomu Skuteč (amfibolicko-biotitický granodiorit) v průměru 22,2 % obalené plochy kameniva.
- Takto změřená plocha obaleného kameniva byla vždy vyšší, tedy výsledek byl v tomto případě nadhodnocen oproti vizuálnímu hodnocení. Příčinu tohoto rozdílu lze přisuzovat problémům spojeným s pořízením kvalitní fotografie (reflexe světla a světlých předmětů od lesklých povrchů obalených souvislým filmem asfaltového pojiva, které tato metoda hodnotí chybně jako obnažené kamenivo).
- Zmíněné nedostatky mohou být zcela eliminovány použitím algoritmu hodnocení lokální entropie snímku (softwarový nástroj PyPAIS). Principem je rozlišování textury povrchu a vychází z předpokladu, že hladký povrch náleží pojivu, zatímco hrubý kamenivu. Odpadají



tak problémy s reflexí světla či nízkým fázovým kontrastem u asfaltových směsí. Naopak postačí méně kvalitní fotografie, která může být dokonce značně podexponovaná. Jediným nutným požadavkem je její ostrost zaručující detailní strukturní kresbu snímaných materiálů. Představovaná metoda je sice náročnější na výpočetní kapacitu, ale poskytuje přesnější výsledky a v porovnání s vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 odpadá subjektivní hodnocení posuzovatele.

- V případě variant s kamenivem Brant (žulový porfyr) se liší vizuální hodnocení dle ČSN 73 6161 v průměru o 7,1 % oproti hodnocení softwarem, v případě variant s kamenivem Zbraslav (horninová směs tufitů, metatufitů a spilitu) je rozdíl v průměru o 6,7 % obalené plochy. Nejznamenatelnější výkyvy byly při vlastních experimentech patrné v případě kameniva z lomu Skuteč (amfibolicko-biotitický granodiorit), rozdíl mezi vyhodnoceními je v průměru 11,4 %. Tedy nejznamenatelnější rozdíly mezi vizuálním hodnocením a hodnocením s využitím softwarového nástroje v případě kameniva jsou patrné u kameniva s nejhorší přilnavostí mezi pojivem a kamenivem.
- Při porovnání hodnocení v případě variant, kde byly použity alternativy minerálních přísad se ukazuje, že metoda hodnocení lokální entropie snímků softwarem PyPAIS pro kamenivo Zbečno uvádí nižší hodnoty stupně obalení zrn kameniva pojivem, v průměru o 3-6 %. V případě hodnocení přilnavosti u kameniva Chlum je situace opačná, oproti vizuálnímu hodnocení jsou hodnoty stupně obalení stanovené softwarem naopak vyšší, v případě fileru Velké Hydčice o necelá 4 % a v případě fileru Plešovice dokonce o 12 %.
- Ukazuje se, že ve většině případů je vizuální hodnocení přísnější než stanovená obalená plocha vypočtená na základě textury (entropie) povrchu.
- Vzájemné porovnání všech provedených snímků potvrzuje, že metoda založená na hodnocení stupňů šedi považuje inkriminovaná místa reflektující světlo a okolní světlé předměty za obnažený povrch kameniva, zatímco metoda vycházející z lokální entropie snímků se této chyby nedopouští a předmětné plochy správně přičítá k obalenému kamenivu.

V rámci této disertační práce byla také snaha poukázat na využití exaktnějších metod pro ověření přilnavosti mezi asfaltovým pojivem a kamenivem, zaměřenými na fyzikálně chemické povrchové charakteristiky pojiva a kameniva metodou stanovení kontaktního úhlu, pomocí něhož se klasifikuje míra smáčivosti mezi dvěma rozdílnými fázemi a metodou stanovení pevnosti spojení asfaltového pojiva a kameniva s využitím přímé tahové zkoušky („direct pull test“). Hlavní zjištění z provedeného experimentálního testování lze shrnout následovně:

- Adhezní přísady nemají negativní vliv na soudržnost asfaltových pojiv (kohezi), použití přísady na bázi silanů bylo pro použitý příklad (asfaltovou směs ACO 11+) přínosné, zatímco použití přísady na bázi nenasycených mastných kyselin s diethanolaminem (AD-2) nebo použití přísady na bázi rostlinných olejů (Anova 1420) může negativně ovlivnit hodnoty poměrů pevností v příčném tahu ITSR (což není v souladu s výsledky přilnavostní zkoušky a zkoušky „Direct pull test“).



- Hodnoty adhezní pevnosti v průměru převyšovaly kohezní pevnost přibližně 4,1krát. Vliv typu kameniva na pevnost soudržnosti nebyl zjištěn, i když vhodnější kamenivo na bázi žulového porfyru z lomu Brant vykazovalo asi o 20 % vyšší adhezi než kamenivo na bázi žnělce z lomu Chlum. Úloha přilnavostních přísad je rovněž zanedbatelná, pokud jde o kohezní porušení, ale jejich vliv na adhezi je významný, zejména v případě kameniva z lomu Chlum, kde s výjimkou přilnavostní přísady na bázi mírně toxického ethylenpolyaminu (AdHere LOF 65-00 EU), zvýšily adhezi přibližně o 50 %. Toto zjištění je v souladu s výsledky stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem.
- Všechny přilnavostní přísady zvýšily přilnavost v případě tenké vrstvy asfaltového pojiva o tloušťce 0,035 mm, selhávajících v důsledku poruchy adheze během zkoušky přímého tahu; toto zvýšení bylo nejvýznamnější u přísad na bázi silanu nebo rostlinných olejů, což dobře koresponduje výsledky přilnavostní zkoušky.
- Dle provedené FTIR spektroskopie bylo zjištěno, že přilnavostní přísady podstatně nezměnily chemické složení asfaltových pojiv.
- Přísada na bázi silanu (Iterlene SL1000) nebo přísada na bázi rostlinných olejů (Anova 1420) přispěly ke zvýšení adheze asfaltových pojiv v případě méně vhodných kameniv (s hladkou texturou) na bázi žnělce; příspěvek ostatních přísad byl zanedbatelný.
- Bylo prokázáno, že kohezní i adhezní pevnost se v čase mění, což má za následek zcela odlišné chování zestárlých asfaltových směsí, z tohoto důvodu by se laboratorní zkoušky pro stanovení pevnosti neměly omezovat pouze na nezestárlé zkušební vzorky.
- Zkušební vzorky na příklady zhutněné asfaltové směsi ACO 11+ vykazovaly nejvyšší lomové energie, pokud byly do směsí aplikovány přilnavostní přísadami na bázi nenasycených mastných kyselin s diethanolaminem nebo rostlinnými oleji; to naznačuje souvislost lomově-mechanických vlastností s adhezní pevností.
- Výsledky makroskopických zkoušek po simulovaném dlouhodobé stárnutí naznačují, že přítomnost přilnavostních přísad může ovlivnit jak dlouhodobou tuhost asfaltových směsí, tak odolnost směsí vůči lomu. Na druhou stranu jsou přilnavostní přísady určeny ke zvýšení trvanlivosti, která se projevuje zejména v hodnotách ITSR. Takové zvýšení však nebylo zjištěno vzhledem k optimálnímu složení referenčního materiálu ACO 11+ ref. obsahujícího vápencový filer (který může mít pozitivní efekt na zlepšení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem). Současně s tím zde hrálo významnou roli i relativně vysoké množství asfaltového pojiva u příkladu navržené asfaltové směsi ACO 11+, které je zodpovědné za porušení koheze.
- Z těchto důvodů je třeba v budoucnosti provést další sérii zkoušek za použití například jiného typu asfaltové směsi, s vhodnějším složením (např. nižší množství asfaltového pojiva a vyšší množství hrubého kameniva).

Na asfaltové směsi jsou a budou kladeny stále větší nároky z hlediska trvanlivosti, z tohoto důvodu mají na trhu své zastoupení i nově vyvíjené adhezní přísady pro zlepšení



přilnavosti mezi pojivem a kamenivem, resp. jako řešení pro snížení vodní citlivosti asfaltových směsí, jak je patrné z dosažených výsledků. Nicméně tyto přísady jsou velmi často cenově nákladnější. Z tohoto důvodu bylo dílčím cílem této práce snaha poukázat na využití jiného typu přilnavostních přísad jako možné náhrady tradičního jemnozrného vápencového nebo dolomitického přídatného fileru v asfaltové směsi alternativními příměsemi jiného mineralogického složení, a to v odpovídající potřebné kvalitě. Snaha omezit čerpání neobnovitelných zdrojů a minimalizovat množství materiálu umístěného na skládkách je jedním z cílů trvale udržitelného rozvoje a současné strategie Evropy směřující k oběhovému hospodářství. Stavebnictví obecně je v tomto ohledu jedno z klíčových odvětví, kde bude tato změna v přístupu významně patrná. Z výsledků lze odvodit následující závěry:

- Pěnové sklo má díky své struktuře a členitému povrchu dobrý potenciál jako možná náhrada tradičního jemnozrného plniva v asfaltové směsi. V případě asfaltové směsi typ ACL 16S s kamenivem z lomu Brant a Sýkořice dosáhla minimální požadované hranice ITSR dle ČSN 73 6121. Aplikace pěnového skla jako náhrady tradičního jemnozrného plniva vede k nárůstu hodnot modulu tuhosti při všech uvažovaných teplotách, směs je více teplotně stabilní.
- Ukázal se zde i dobrý potenciál využití mechano-chemické aktivace vysokorychlostním mletím v desintegrátoru, který byl využit za účelem širšího uplatnění a změny technologických vlastností mletého betonového recyklátu.
- Použité typy vybraných filerů byly dávkovány hmotnostně ve stejném množství do navržené směsi, přičemž čáry zrnitosti těchto variant se od sebe významně liší, což je patrné ze získaných dat z laserové granulometrie – odlišným měrným povrchem. Je tedy nasnadě pokračovat v probíhajícím výzkumu a zaměřit se na úpravu dávkování těchto složek s ohledem na přístup využívající tzv. objemové dávkování. Zvládnutí této problematiky by vedlo k zefektivnění použitých přísad a současně i k vyšší míře využití aplikovaných náhrad tradičního plniva. To je úzce spjato s dopady přítomnosti fileru ve směsi, která vede ke zlepšení zpracovatelnosti, tuhosti, vodní citlivosti a odolnosti vůči trvalým deformacím a celkové trvanlivosti asfaltové směsi.
- Nejvyšší hodnoty Marshallovy stability bylo dosaženo v případě varianty částečné náhrady odprašky Plešovice kombinovaných s portlandských směsným cementem, která současně vykazovala nejnižší ztrátu stability podle Marshalla v porovnání s ostatními uvedenými variantami. K tomuto doplňme, že vlastní doprašky spadají do kategorie kyselých hornin, díky kombinaci s vhodnou příměsí a mechanickým mletím je lze hydrofobizovat. Pozitivní vliv z hlediska vodní citlivosti bylo možné pozorovat i u částečné náhrady tradičního fileru těmito odpraškami kombinovanými s mastkem, což potvrzuje i poměr dosaženého poměru pevnosti ITSR podle normy ČSN EN 12697-12 nebo zkouška stanovení stupně obalení kameniva asfaltovým pojivem, kdy se prokázala tato varianta v obou případech zvolených druhů kameniva Zbečno i Chlum jako nejvíce vhodná s kombinací s touto variantou odprašků s mastkem.

Působení vody hraje významnou roli při zhoršování kvality asfaltových směsí v konstrukci vozovky a představuje stále přítomnou hrozbu pro dlouhodobou trvanlivost a s tím související



životnost asfaltových vozovek. Pomocí uvedených metodik a postupů lze provést porovnání jak zvolených přínavostních přísad, tak i náhrad tradičního jemnozrného plniva v asfaltové směsi a v kombinaci s vhodně zvolenou metodou simulovaného dlouhodobého stárnutí nám tyto metody dávají určitou představu o chování směsi z hlediska trvanlivosti. Rozšiřují výsledky stanovení vodní citlivosti, resp. přínavosti mezi pojivem a kamenivem o další kategorii charakteristik asfaltových směsí a udávají nám další rozměr testování přísad z hlediska trvanlivosti stability asfaltové směsi.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Lytton, R. L., Masad, E. A., Zollinger, C., Bulut, R. *Measurements of Surface Energy and Its*. no. 2, 2005.
- [2] Das, S. K. *Evaluation of asphalt-aggregate bond and stripping potential*, 2004.
- [3] Kakar, M. R., Hamzah, M. O., Akhtar, M. N., Woodward, D. *Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive*. J. Clean. Prod., vol. 112, pp. 2342–2353, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.101>
- [4] Cui, S., Blackman, B. R.K., Kinloch, A. J., Taylor, A. C. *Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2014, 54, 100-111. ISSN 01437496. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijadhadh.2014.05.009
- [5] Kinggdu, B. M., Roberts, F. L., 1988. Stripping in HMA Mixtures: State of the art and Critical Review of Test Methods. National Center for Asphalt Technology.
- [6] Haghshenas, H. F., Khodaii, A., Khedmati, M., Tapkin, S., 2015. A mathematical model for predict stripping potential of Hot Mix Asphalt. *Constr. Build. Mater.* 75, 488-495.
- [7] Lamperti, R., Lantieri, C., Sangiorgii, C., Bitelli, G., Simone, A. Semiautomatic evaluation of the degree of bitumen coverage on bitumencoated aggregates, 8th International RILEM Symposium, October 7– 9, Ancona, Italy, 2015.
- [8] Hmrawey, S. E., Maaty, A. E. A. E., Elmohr, A. I. *Durability of Hot Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavements*. *OALib*. Czech Technical University in Prague, 2015, 2016-06-30, 02(05), 1-18. ISBN 9788001059623. ISSN 2333-9721. Dostupné z: doi:10.4236/oalib.1101508
- [9] Ročenka dopravy, Praha 2020 [online]. Praha: Technická správa komunikací hlavního města Praha, Úsek dopravního inženýrství, 2020. Dostupné z: <http://www.tsk-praha.cz/static/udi-rocenka-2020-cz.pdf>
- [10] Karim, F., Hussain, J., Hafeez, I. *Estimating the Asphalt Binder Film Thickness Using Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*. *Sustainability*, 1-24. 2021.
- [11] Roberts, F. L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D., and Kennedy, T.W., 1996. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*, 2nd ed. NAPA Education Foundation, Lanham, Md.
- [12] McLeod, N. W., 1959. *Voids Requirements for Dense-Graded Bituminous Paving Mixtures*. Special Technical Publication 252. ASTM, West Conshohocken, Pa.
- [13] AlKofahi, N., and Khedaywi, T., 2019. *Evaluation the Effect of Asphalt Film Thickness on Stripping Resistance*, *International Journal of Applied Engineering Research*. ISSN 0973-4562, Volume 14, Number 2, pp. 560-570 © Research Publications. <http://www.ripublication.com>



- [14] Grunner, K., C.S. BITUNOVA, spol. s.r.o. *Asfaltové emulzie při výstavbě a údržbě cest*. 2007. vyd. Harmanec: Karol Grunner v spolupráci s C.S. BITUNOVA, spol. s.r.o., 2007. ISBN 978-80-969771-5-4.
- [15] Jachym, J., Serva, R. *Skúška stanovenia priľnavosti asfaltu ku kamenivu: Praktické skúsenosti*. In: Výstavba a rehabilitácia asfaltových vozoviek. březen 2011. Štrbské Pleso: Slovenská asociácia pro asfaltové vozovky, 2011, s. 30-36.
- [16] Zajíček, J. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. Technická knižnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-59-6.
- [17] Miláčková, K. *Porovnání metod využitelných pro stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv*. Praha, 2012. SVOČ. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jan Valentin, PhD
- [18] Molenaar A. A. A.: *Road Paving Materials Incl. Lab. Experiment*. TU Delft, 2010
- [19] Beneš, J. *Vliv asfaltového pojiva modifikovaného přírodním asfaltem a kyselinou polyfosforečnou na vybrané funkční charakteristiky asfaltové směsi typu AC*. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jan Valentin, PhD.
- [20] Bureš, P. *Vybrané reologické vlastnosti asfaltových pojiv a směsí za středních a vysokých teplot*. In: Konference asfaltové vozovky 2011 [CD]. Praha: 2011.
- [21] Benešová, L. *Analýza vybraných reologických charakteristik asfaltových pojiv*. Praha, 2019. Disertační práce. ČVUT. Vedoucí práce doc. Ing. František Luxemburk, CSc.
- [22] Redelius, P. *Bitumen Solubility Model Using Hansen Solubility Parameter*. Energy & Fuels [online]. 2004, 18(4), 1087-1092. DOI: 10.1021/ef0400058. ISSN 0887-0624. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef0400058>
- [23] PETROLEUM.CZ. *Petroleum.cz: Výroba asfaltů* [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-42.aspx>
- [24] Benešová, L. *Posouzení CRmB pojiv s novým typem pryže vybranými funkčními charakteristikami*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jan Valentin, PhD.
- [25] Procházka, M., Stahl, J., Luxemburk, F. *Silniční laboratoř: Vybrané zkušební metody*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 1978.
- [26] ČSN EN 12597. *Asfalty a asfaltová pojiva – Terminologie*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [27] PARAMO. *Katalog silničních pojiv*. [online] 2009. Dostupné z: [www.stavebnivyrobekroku.cz/db\\_binary\\_file/other/365](http://www.stavebnivyrobekroku.cz/db_binary_file/other/365)
- [28] ČSN 73 6121 (736121) *Stavba vozovek.: Hutněné asfaltové vrstvy*. Praha: Český normalizační institut, 2019.
- [29] Masad, E., and Button, J. W. *Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture*. Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng., 15(4), 273–280, 2000.
- [30] Varva, V. *Multimediální atlas hornin – Horniny a jejich vlastnosti*. Dostupné z: [atlas.hornin.sci.muni.cz/horniny\\_obecne.html](http://atlas.hornin.sci.muni.cz/horniny_obecne.html)
- [31] Bessa, L. S., Castelo Branco, V. T. F., Soares, J. B., Neto, J. A. N. *Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt*. Journal of Materials in Civil Engineering 27(7), 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001181





- [32] Kim, Y. R., Daniel, J. S., and Wen, H. *Fatigue performance evaluation of WesTrack asphalt mixtures using viscoelastic continuum damage approach*. Rep. No. FHWA/NC/2002-004, Federal Highway Administration/North Carolina Dept. of Transportation, Raleigh, NC, 2002.
- [33] ČSN 73 6161 (73 6161). *Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [34] Eurovia kamenolomy: Provozovna Chlum. [online]. Dostupné z: <http://www.euroviakamenolomy.cz/Provozovna/CHL>
- [35] Froněk dopravní stavky: Kamenolom Brant. [online]. Dostupné z: <https://www.fronek.cz/sluzby/kamenolom-brant/>
- [36] Žulový porfyr. [online]. Dostupné z: <https://departments.fsv.cvut.cz/k135/wwwold/webkurzy/mikro/zulporfyr.html>
- [37] Metamorfované horniny - granulit - IS MUNI. [online]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/ps08/horniny/web/metamorfovane/granulit.html?ukaznahled=76>
- [38] Produkty: Kobyli hora | Kámen a písek, spol. s.r.o. [online]. Dostupné z: <http://www.kamenck.cz/web/cs/produkty-kobyli-hora/>
- [39] Pasportizace lomů přírodního kameniva. Pasportizace lomů přírodního kameniva. [Online] 2014. [http://www.rsd.cz/rsd/rsd.nsf/0/4234D54F16382C5EC1257D50002A1A9B/\\$file/Katalog%20prirodniho%20kameniva\\_zari\\_2014.pdf](http://www.rsd.cz/rsd/rsd.nsf/0/4234D54F16382C5EC1257D50002A1A9B/$file/Katalog%20prirodniho%20kameniva_zari_2014.pdf)
- [40] Kamenolom Libodřice | HeidelbergCement Česká republika [online]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/kontakty/cms/provozovny/libodrice>
- [41] Eurovia kamenolomy: Provozovna Litice – Bezpečnostní list [online]. Dostupné z: <http://www.euroviakamenolomy.cz/Vyrobky/Dokumentace/BL42.pdf>
- [42] Eurovia kamenolomy: Provozovna Litice. [online]. Dostupné z: <http://www.euroviakamenolomy.cz/Provozovna/LIT>
- [43] Beton Server: SILNICE ČÁSLAV - HOLDING, a.s. - lom Markovice. [online]. Dostupné z: <http://www.betonsserver.cz/silnice-caslav-markovice>
- [44] Beton Server: BASALT S.R.O. – kamenolom lom Měřunice. [online]. Dostupné z: <https://www.betonsserver.cz/basalt>
- [45] Eutit – Materiály: Čedič – slévárna čediče. [online]. Dostupné z: <https://www.eutit.cz/cedic.html>
- [46] Kámen Zbraslav: Těžba kamene, kamenolom - Sýkořice. [Online] Dostupné online z: <https://kamenzbraslav.cz/provozovny/kamenolomy/kamenolom-sykorice/>
- [47] Kámen Zbraslav: Těžba kamene, kamenolom - Zbraslav. [Online] Dostupné z: <https://kamenzbraslav.cz/provozovny/kamenolomy/kamenolom-zbraslav/>
- [48] Eurovia kamenolomy: Provozovna Svrčovec. [online]. [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: [http://www.euroviakamenolomy.cz/provozovny\\_detail.aspx?strediska\\_id=4440](http://www.euroviakamenolomy.cz/provozovny_detail.aspx?strediska_id=4440)
- [49] Beton Server. *BES s.r.o. - kamenolom Mladovice* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.betonsserver.cz/bes-mladovice>
- [50] BES s.r.o.: BENEŠOVSKÉ SILNICE. *Profil společnosti* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.besbn.cz/profil.htm>



- [51] INSTITUT GEOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ: Hornicko-geologická fakulta. *Moldanubická oblast* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/reg\\_geol\\_cr/2\\_kapitola.htm](http://geologie.vsb.cz/reg_geol_cr/2_kapitola.htm)
- [52] Wikipedie: Otevřená encyklopedie. *Migmatit* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Migmatit>
- [53] Provozovna Skuteč - Litická - GRANITA sro [online]. Dostupné z: <http://www.granita.cz/index.php?page=workshop&section=liticka>
- [54] Hochleitner, Rupert. *Minerály: nový průvodce přírodou*. Praha: Universum, 2015. ISBN 978-80-242-4709-0.
- [55] Hejtman, B. *Petrografie*. Druhé, přepracované a doplněné vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977.
- [56] Atlas hornin: Granodiorit - Skuteč [online]. Dostupné z: <http://atlas.horniny.sci.muni.cz/magmaticke/granodiorit/granodiorit7.html>
- [57] Mehrara, A., Khodaii, A. *A review of state of art the art on stripping phenomenon in asphalt concrete*. Construction Building Materials 38. 423-442, 2013.
- [58] Modified bitumen — Valochem: [online] Dostupné z: <https://valochem.com/applications/modified-bitumen/>
- [59] Přísada Anova™ 1420 Anti-Strip - CIUR a.s.: [online] Dostupné z: <https://www.ciur.cz/produkty/obsah/prisada-anova-1420-anti-strip>
- [60] *AD-HERE® LOF 65-00 EU: Asphalt Performance Improving Additive* [online]. Dostupné z: [https://arrmaz.com/wp-content/uploads/2017/02/Road\\_Science\\_AD-here\\_LOF\\_65-00\\_EU\\_TDS.pdf](https://arrmaz.com/wp-content/uploads/2017/02/Road_Science_AD-here_LOF_65-00_EU_TDS.pdf)
- [61] Osvědčení o vhodnosti výrobku č.6/201. Wetfix BE. ASPK, s.r.o.
- [62] Adhesion promoters for bitumen, Technical Bulletin – AkzoNobel, 2015: [online] Dostupné z: <https://docplayer.net/57855885-Akzonobel-surface-chemistry-adhesion-promoters-technical-bulletin.html>
- [63] Moghadas Nejad, F., *Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt*. Construction and Building Materials, vol. 31, 384-388.
- [64] ZycTherm - Zydex Industries : [online] Dostupné z: <https://zydexindustries.com/wp-content/uploads/2019/07/Zycotherm.pdf>
- [65] Product data bulletin: Impact 8000. MeadWestVaco Corporation.
- [66] Environ: *Technický list adhezivní přísady AD-2, ADHESIL Z, BITUSIL*. ENVIRON,s.r.o. Francouzská 12/231 Praha 2, [environ@email.cz](mailto:environ@email.cz).
- [67] *ČSN EN 13043 (721501): Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [68] Produkce odpadů. Veřejná databáze: Český statistický úřad [online]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jsf?page=vystupobjekt&pvo=ZPR05&z=T&f=TABULKA&katalog=30842&str=v86#w=>
- [69] Waste Management Plan of the Czech Republic for the period 2015 - 2024. Ministerstvo životního prostředí [online]. Praha, 2014. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/plan\\_odpadoveho\\_hospodarstvi\\_aj/\\$FILE/OODPW\\_MP\\_CZ\\_translation-20151008.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/plan_odpadoveho_hospodarstvi_aj/$FILE/OODPW_MP_CZ_translation-20151008.pdf)



- [70] Valentová, T., Valentin, J. Alternativy minerálních přísad jako filerů v asfaltových směsích. *Silniční obzor*. 2020, 81(Září), 223-230.
- [71] Valentová, T., Altman, J., Valentin, J., *Náhrada tradičního jemnozrnného aktivního plniva v asfaltové směsi*, Nanotechnologie a Nanomateriály ve stavebnictví, Praha, Česká republika, 2016.
- [72] Alberici, S., De Beer, J., Van der Hoor, I., and Staats, M., *Fly ash and blast furnace slag for cement manufacturing*, BEIS research paper no. 19, 1-35, 2017.
- [73] Pospíšil, K., Rákosníková, R., *Podmínky použití recyklovaných materiálů*, Centrum dopravního výzkumu, sekce dopravní infrastruktury, Brno, ČR.
- [74] Hanzálek, M., *Mechanické vlastnosti cementových malt s příměsí mikromleté strusky*. Diplomová práce, ČVUT v Praze, 2017.
- [75] Vacková, P., *Využití kameniva z vysokopecní strusky při výrobě asfaltových směsí*. Výzkumná zpráva: SGS17/060/OHK1/1T/11, TAČR ZÉTA TJ01000435.
- [76] Poulek, V., Poulek, S., Libra, M. *Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů*. ČZU Praha, 2010. [online] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/konstrukce-a-vyroba-fotovoltaickych-clanku-a-panelu--10310>
- [77] Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny. Úvod do FV systémů - CNE Czech Nature Energy, a. s., Plzeň. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [78] Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. tzbinfo. [online]. 2001-2017. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>
- [79] Fotovoltaika – jaká je nejlepší dostupná technologie?. tzbinfo. [online]. © 2001-2017. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6327-fotovoltaika-jaka-je-nejlepsi-dostupna-technologie>
- [80] Aquatest a.s – zkušební laboratoře. Protokol o zkouškách: Analýza skla FV panelu, Praha, 2016.
- [81] ČSN EN ISO 11885 (757387) *Jakost vod: Stanovení vybraných prvků optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES)*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [82] *Vyhláška č. 294/2005 Sb.: Vyhláška o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady*. 2005.
- [83] *Vyhláška č. 273/2021 Sb.: Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady*. 2021.
- [84] Gematex spol. s.r.o. Laboratoř analytické chemie Černošice. Protokol o zkoušce: Analýza skla FV panelu, Černošice, 2014.
- [85] Volker, H. Friemel-Gottlich, B. *Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode* [online] Dostupné z: <http://bast.opus.hbznrw.de/volltexte/2011/128/pdf/S59.pdf>
- [86] Kakar, M. R., Hamzah, M. O., Valentin, J. *A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations*. *Journal of Cleaner Production*. 2015,99: 39-58 DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.028. ISSN 09596526.
- [87] Hefer, A. W., Little D. N., Lytton, R. L. *A synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water*. AAPT, 2005.
- [88] Hirsch, Volker, Friemel-Gottlich, Brigitte. *Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode* [online]. Bergisch Gladbach: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009. ISBN 978-3-86509-954-9.



- [89] Luxemburk, F., *Zlepšování přilnavosti asfaltu ke kamenivu*, Výroční zpráva S 301/120/704/97. Ministerstvo dopravy a spojů ČR, 1998.
- [90] Hicks, R. G. *Moisture Damage in Asphalt Concrete*. No. 175. Transportation Research Board, 1991.
- [91] Johnson, D. R., Freeman, Reed B., *Pavement Engineer*, 2002. Rehabilitation Techniques for Stripped Asphalt Pavement (Final Report).
- [92] Bahia, H., Hanz, A., Kanitpong, K., Wen, H. *Test Method to Determine Aggregate/Asphalt Adhesion Properties and Potential Moisture Damage*. Madison : Winsconsin Highway Research Program, University of Wisconsin - Madison, 2007. SPR # 0092-05-12.
- [93] Petersen, C. J.: *Quantitative functional group analysis of asphalts using differential infrared spectrometry and selective chemical reactions - Theory and application*. Transportation Research Record, 1096, 1, 1986.
- [94] Ložiska, suroviny, kamenivo: Institut geologického inženýrství, Hornicko-geologická fakulta. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html>
- [95] Harders, O., Nosler, I.: *Einfluss der Oberflächenaktivität von Mineralstoffen auf das Gebrauchsverhalten von Walzasphalt*. Bitumen, 65, 1, 2003.
- [96] Jamieson, I. L., Moulthrop, J. S., Jones, D. R.: *SHRP results on binder-aggregate adhesion and resistance to stripping*. Asphalt Yearbook 1995, 17-21, 1995.
- [97] Karboxylové kyseliny. *Multimediální učebnice chemie pro gymnázia* [online]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/karboxylove-kyseliny>
- [98] Moraes, R., Velasquez, R., Bahia, H. *Using bond strength and surface energy to estimate moisture resistance of asphalt-aggregate systems*. Construction and Building Materials. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.043>
- [99] Wasiuddin, N. M. 2007. *Effect of additives on surface free energy characteristics of aggregates and binders in hot mix asphalt*. Norman, OK: Univ. of Oklahoma.
- [100] Bhasin, A., and D. N. Little. 2007. *Characterization of aggregate surface energy using the universal sorption device*. J. Mater. Civ. Eng. 19 (8): 634–641. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:8\(634\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(634)).
- [101] Bojkovský, M. *Termodynamika – van der Waalovy síly*. 2009.
- [102] Ameri, M., Ziari, H., Yousefi, A., Behnood, A. *Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: Thermodynamic Evaluation of the Effects of Antistripping Additives*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003561.
- [103] Bracco, G., Holst, B. *Surface science techniques*, vol. 51, no. 1. 2013.
- [104] Adhesive additive DBP-1. Selena company [online]. Moscow, Russia. Dostupné z: <http://selenatek.ru/en/production/road-construction/adhesive-additive-dbp-1/>
- [105] Rossi, C., O., Teltayev, B., Angelico, R., *Adhesion Promoters in Bituminous Road Materials: A Review*. Applied Sciences 2017, 7(5), 524; doi:10.3390/app7050524
- [106] Tarefder, R.; Zaman, A. *Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts*. J. Mater. Civ. Eng. 2010, 22, 714–725.
- [107] Grenfell, J.; Ahmad, N.; Liu, Y.; Apegyei, A.; Large, D.; Aireyet, G. *Assessing asphalt mixture moisture susceptibility through intrinsic adhesion, bitumen stripping and mechanical damage*. Road Mater. Pavement Des. 2014, 15, 131–152.



- [108] Hamzah, M.O.; Kakar, M.R.; Quadri, S.A.; Valentin, J. *Quantification of moisture sensitivity of warm mix asphalt using image analysis technique*. J. Clean Prod. 2014, 68, 200–208.
- [109] Kanitpong, K., *Evaluation of the Roles of Adhesion and Cohesion Properties of Asphalt Binders in Moisture Damage of HMA*. Dissertation, University of Wisconsin – Madison Department of Civil and Environmental Engineering, 2004.  
<http://madcat.library.wisc.edu/cgi-bin/Pwebrecon.cgi?v1=3&ti=1,3&BOOL1=all%20of%20these&CNT=50&SAB1=kanitpong&FLD1>
- [110] Wisconsin Department of Transportation Standard Specifications. Section 460.2. Wisconsin Department of Transportation, Madison, WI. 2005.  
<http://roadwaystandards.dot.wi.gov/standards/stndspec/index.htm>
- [111] Nazirizad, M., Kavussi, A., Abdi, A., *Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures*, Construction and Building Materials, Volume 84, 2015, 348-353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.024>
- [112] D'Angelo, J., Anderson, R.M. *Material Production, Mix Design, and Pavement Design Effects on Moisture Damage*. Proceedings of Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-A National Seminar, February 4-6, 2003. Transportation Research Board 2003.  
[http://trb.org/publications/conf/reports/moisture\\_seminar.pdf](http://trb.org/publications/conf/reports/moisture_seminar.pdf)
- [113] Horgnies, M., Darque-Ceretti, E., Fezai, H., Felder, E. *Influence of the interfacial composition on the adhesion between aggregates and bitumen: investigations by EDX, XPS and peel tests*. Int J Adhes Adhes, 31 (2011), pp. 238-247
- [114] Abo-Qudais, S., Al-Shweily, H. *Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behavior*. Construction Building Material, 21 (2007), pp. 1886-1898
- [115] ČSN 73 6120 (736120) *Stavba vozovek - Ostatní asfaltové vrstvy: Provádění a kontrola shody*. Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [116] Zhang, J., Apeageyi, A.K., Airey, G.D., Grenfell, J.R.A. *Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion*. [Online]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749615000913>.
- [117] Apeageyi, A.K., Grenfell, J.R.A., Airey, G.D. *Moisture-induced strength degradation of aggregate-asphalt mastic bonds*. Road Mater Pavement Des, 15 (1), pp. 239-262, 2014.
- [118] Pasandin, A.R., Perez, I. *The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen*. Int J Adhes Adhes, 58 (2015), pp. 53-58
- [119] Thelen, E. *Surface energy and adhesion properties in asphalt-aggregate Systems*. HRB Bulletin 192 (pp. 63-74). Washington D.C.: Highway Research Board, 1958
- [120] Dašek, O., a kol.: *Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí*, TAČR TA03030381: Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek, 2015.
- [121] Hofko, B., Ban, H., Rolanf, B. *Aktuální poznatky k aspektům stárnutí asfaltových pojiv a směsí*. Praha, 2014. Pozemní komunikace.
- [122] Thesis, M. Sc.: *Development of a laboratory ageing method for bitumen in porous asphalt*, 2010. [Online] Dostupné z: [http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:d998faa5-105d-46be83c02442f78516c3/DEVELOPMENT\\_OF\\_A\\_LABORATORY\\_AGEING\\_METHOD\\_FOR\\_BITUMEN\\_IN\\_POROUS ASPHALT.pdf](http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:d998faa5-105d-46be83c02442f78516c3/DEVELOPMENT_OF_A_LABORATORY_AGEING_METHOD_FOR_BITUMEN_IN_POROUS ASPHALT.pdf)



- [123] Altman, J. *Vymezení a posouzení vlivu stárnutí asfaltové směsi na charakteristiky trvanlivosti*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce: Jan Valentin.
- [124] Čistší vzduch v roce 2020: na celém světě začíná platit 0,5% strop obsahu síry pro lodě. *Evropská komise EU* [online]. 2020 Dostupné z: [https://ec.europa.eu/czech-republic/news/200103\\_air\\_quality\\_cs](https://ec.europa.eu/czech-republic/news/200103_air_quality_cs)
- [125] Zpráva představenstva společnosti UNIPETROL, a.s. za rok 2017. *Unipetrol Orlen Group* [online]. 2018 Dostupné z: [https://www.unipetrol.cz/cs/VztahySInvestory/RegulatorniOznameni/Documents/2018/14\\_Valn%C3%A1%20Hromada%202017/8\\_Zpr%C3%A1va%20p%C5%99edstavenstva.pdf](https://www.unipetrol.cz/cs/VztahySInvestory/RegulatorniOznameni/Documents/2018/14_Valn%C3%A1%20Hromada%202017/8_Zpr%C3%A1va%20p%C5%99edstavenstva.pdf)
- [126] HAGOS, E. T.: *The Effect of Aging on Binder Properties of Porous Asphalt Concrete*, 2008. [Online] Dostupné z: <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:3bd5be8f-4850-4986-b9fa2751db9cd642/datastream/OBJ/download>
- [127] Morian, N. *Influence of Mixture Characteristics on the Oxidative Aging of Asphalt Binders*. University of Nevada, Reno. Dissertation thesis, 2014.
- [128] ČSN EN 12607-1. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 1: Metoda RTFOT*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [129] ČSN EN 12607-2. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 2: Metoda TFOT*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [130] ČSN EN 12607-3. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 3: Metoda RFT*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [131] ČSN EN 14769. *Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [132] ČSN EN 15323. *Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT)*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [133] ČSN EN 13302. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [134] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [135] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [136] ČSN EN 14770. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [137] ČSN EN 12591. *Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [138] Coufalík, P. *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Brno, 2017. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Petr Hýzl.
- [139] *PrEN 12697-52:2013: Bituminous mixtures – test methods – Part 52: Conditioning address oxidative ageing*, 2014.
- [140] Plitz, J.: *Stárnutí silničních pojiv*. Paramo a.s., Pardubice, 1997.





- [141] AASHTO R 30-02. *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State and Highway Transportation Officials, 2002.
- [142] Dašek, O., Coufalík, P., Hýzl, P., Špaček, P., Hegr, Z., Matoušek, D. *Změny vlastností silničních asfaltů způsobené stárnutím*. In: *Asfaltové vozovky*. 2015.
- [143] Valentová, T., Altman, J., Valentin, J. *Development and verification of a suitable methodology for stability assessment of bitumen adhesion promoters*. Czech Technical University in Prague, 2016, the Eurasphalt and Eurobitume Congress, -. ISBN 9788001059623. Dostupné z: doi:10.14311/EE.2016.346
- [144] Islam, Md R., Hossain, M. I., Tarefder, R. A. *A study of asphalt aging using Indirect Tensile Strength test*. Construction and Building Materials. 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.159. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815301720>
- [145] Mansour, S., Harvey, J., Tahmoressi, M., Tandon, V. *Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements*. In: TANDON, VIVEK. Transportation Research Board. TOPIC 3, 2003.
- [146] 1.0 antistripping agents Iterlene. In: ITERCHIMICA S.r.l. [Online]. Dostupné z: [http://bavcompany.ru/upload/iblock/ff0/iterlene\\_sl100plus\\_2018.pdf](http://bavcompany.ru/upload/iblock/ff0/iterlene_sl100plus_2018.pdf).
- [147] Safety Data Sheet 00.00.000.21 - ITERLENE SL/100 PLUS. Suisio, Italia: Iterchimica S.r.l., 2018.
- [148] EUROVIA Kamenolomy, a.s., Plán otvírky, přípravy a dobývání výhradního ložiska Bystřec.
- [149] Valentova, T., Valentin, J., Javůrek, R., *Využití jemnozrnných složek drčeného odpadního skla jako minerální přísady do asfaltových směsí*, Konference Recycling, Brno, 2017.
- [150] Valentova, T., Valentin, J., Javůrek, R., *Application of fine-grained recycled glass in asphalt pavements*, Conference Young Scientist, 2017. ISBN (978-80-553-3136-2)
- [151] Pagáčová, L. *Studium síly nutné k odtržení hrotu AFM od povrchu grafitové/graphenové vrstvy s ohledem na aplikace v oblasti nanosenzorů*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [152] Analysis of Available Data for Validation of Bitumen tests. In: *The Bitumen Test Validation project BitVal* [online]. [cit. 2012-04-28]. Dostupné z: [http://bitval.fehrl.org/fileadmin/bitval/BitVal\\_final\\_report.pdf](http://bitval.fehrl.org/fileadmin/bitval/BitVal_final_report.pdf)
- [153] ČSN EN 12697-11 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 11: Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem*. Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [154] Santagata FA, Cardone F, Canestrari F, Bahia HU. *Modified PATTI test for the characterization of adhesion and cohesion properties of asphalt binders*. In: International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Sixth Proceedings. Turin; 2009.
- [155] Kaniitpong, K. and Bahia, H. U. *Role of Adhesion and Thin Film Tackiness of Asphalt Binders in Moisture Damage of HMA*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 72, pp. 502-528, 2003.
- [156] Kim, Y. R., Pinto, I., Ban, H. *Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Mixtures in Nebraska -- Phase II. Nebraska*. Nebraska Department of Roads Research Reports. University of Nebraska – Lincoln, 2009.



- [157] Copeland, A. R. *Influence of Moisture on Bond Strength of Asphalt-Aggregate System*. PhD diss., Vanderbilt University, 2007.
- [158] Kanitpong, K. and H.U. Bahia. *Relating Adhesion and Cohesion of Asphalts to the Effect of Moisture on Laboratory Performance of Asphalt Mixtures*. Transportation Research Record, 1901: 33-43, 2005.
- [159] ČSN EN 12697-6 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [160] ČSN EN 12697-29 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody: Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [161] ČSN EN 12697-5 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody: Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [162] ČSN EN 12697-8 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody: Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [163] ČSN EN 12697-12 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody: Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [164] ČSN EN 12697-23 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody: Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. Praha: Český normalizační institut, 2019.
- [165] AASHTO DESIGNATION: T 283-03. *Standard Method of Test for: Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. Washington: American Association of State and Highway Transportation Officials, 2007.
- [166] ČSN EN 12697-26 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody: Část 26: Tuhost*. Praha: Český normalizační institut, 2019.
- [167] ČSN EN 12697-44 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody: Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese*. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [168] Kotoušová, A. *Laboratorní simulace stárnutí asfaltové směsi a vliv na vybrané funkční charakteristiky*. Diplomová práce, Vedoucí práce: Jan Valentin, 2016.
- [169] ČSN EN 12697-30 (736160): *Asfaltové směsi - Zkušební metody: Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [170] Valentová, T., Altman, J., Valentin, J. *Impact of Asphalt Ageing on the Activity of Adhesion Promoters and the Moisture Susceptibility*. Transportation Research Procedia. 2016, 14, 768-777. ISSN 23521465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2016.05.066
- [171] Valentová, T., Altman, J. *Stabilita adhezního účinku vybraných minerálních a chemických přísad u zestárlé asfaltové směsí*, Juniorstav – Pozemní komunikace, Brno, 2016.
- [172] Valentová, T., Valentin, J. *Analyzing the durability of adhesion stability of asphalt mixtures*, CETRA International Conference on Road and Rail Infrastructure, 2018.
- [173] Valentova, T., Valentin, J., *Examination of water susceptibility of ACbin type of asphalt mixtures with selected adhesion promoters and microfillers*, RESEARCH REPORT CTU in Prague, 2017.
- [174] Valentova, T., Valentin, J., *Effect of selected adhesion promoters and microfillers on water susceptibility of asphalt concrete for binder courses*, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017.



- [175] Valentova, T., Valentin, J., *Ověření základních charakteristik asfaltových směsí typu ACL s vybranými přílnavostními přísadami a mikrofilery*. Pozemní komunikace, 2016.
- [176] Valentova, T., Valentin, J., Altman, J., *Vyhodnocení vodní citlivosti asfaltové směsi typu ACL s vybranými přílnavostními přísadami a mikrofilery*, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE TRINFRA CTU in Prague, pp. 110–120, 2016.
- [177] Valentova, T., Valentin, J., *Impact of new developed products of adhesion promoters for bituminous binder modification purposes on performance-based behavior of asphalt mixes*, RILEM 252-CMB Symposium on Chemo-mechanical characterization of Bituminous Materials, 2018.
- [178] Valentova, T., Valentin, J., *Vliv nových typů přílnavostních přísad pro zlepšení adheze asfaltového pojiva*, Pozemní komunikace, 2018.
- [179] Valentová, T., Valentin, J., Trejbal, J., Nežerka, V., *Alternativy minerálních přísad jako filerů v asfaltových směsích*, Silniční obzor – roč. 81, 2020.
- [180] Grönniger, J., Wistuba, M.P., Renken, P. Adhesion in bitumen-aggregate-system: new technique for automated interpretation of rolling bottle test, Road Mater. Pavement Des., 11 (4) (2010), pp. 881-898.
- [181] Lantieri, C., Lamperti, R., Simone, A., Vignali, V., Sangiorgi, C., Dondi, G., Magnani, M., Use of image analysis for the evaluation of rolling bottle tests results, International Journal of Pavement Research and Technology 10, Issue 1, 2017. 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.11.003>
- [182] *TP 148. Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik*. Brno: Ministerstvo dopravy, 2009.
- [183] Rosenfeld, L. (1960). *Principles of optics. Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Nuclear Physics, 15, 531. doi:10.1016/0029-5582(60)90353-9
- [184] Nežerka, V., Trejbal, J. Assessment of aggregate-bitumen coverage using entropy-based image segmentation. Road Materials and Pavement Design, 2018. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1605304>
- [185] Van der Walt, S., Schönberger, J. L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., J. D. Warner, Yager, N., Gouillart, E., & Yu, T. (2014). scikit-image: image processing in python. PeerJ, 2, e453. doi:10.7717/peerj.453
- [186] Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools. Retrieved from <https://opencv.org/>
- [187] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2d graphics environment. Computing in Science & Engineering, 9, 90–95. doi:10.1109/mcse.2007.55
- [188] Trejbal, J., Valentová, T., Nežerka, V., Semerák, P. Mechanical and image analysis of adhesion between mineral aggregate and bituminous binder. *Acta Polytechnica*. 2019, 1-5.
- [189] Nežerka, V., Valentin, J., Semerák, P., Valentová, T., Vacková, P., Tichá, P. A comprehensive study on adhesion between modified bituminous binders and mineral aggregates. *Construction and Building Materials*. 2021, 1-36.
- [190] Trejbal, J., Valentin, J., Valentová, T., Nežerka, V. Stanovení přílnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu pomocí semi-automatických metod. *Silniční obzor*. 2019, **80**(2), 35-38.
- [191] Kania, P. *Infračervená spektroskopie*. VŠCHT Praha. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infra%C4%8Derven%C3%A1+spektrometrie.pdf?redirected>



- [192] Yao, H., Dai, Q., You, Z., Zhang, J., LV, S., Xiao, X. *Evaluation of contact angle between asphalt binders and aggregates using molecular dynamics (MD) method*, Construction and Building Materials 212 (2019) 727–736. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.283.
- [193] Liu, H., Cao, G. *Effectiveness of the young-laplace equation at nanoscale*, Scientific Reports 6. doi:10.1038/srep23936.
- [194] Owens, D. K., Wendt, R. C. *Estimation of the surface free energy of polymers*, Journal of Applied Polymer Science 13 (1969) 1741–1747. doi:10.1002/app.1969.070130815.
- [195] Kaelble, D. H. *Dispersion-polar surface tension properties of organic solids*, The Journal of Adhesion 2 (1970) 66–81. doi:10.1080/0021846708544582.
- [196] Shiomura, N., Sekine, T., Yang, D. *Contact Angle Hysteresis of Pressure-Sensitive Adhesives due to Adhesion Tension Relaxation. Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion*. 2019. Dostupné z: doi:10.1002/9781119593294.ch11
- [197] Paliukaite, M., Vorobjovas, V., Bulevicius, M. Andrejevas, *Evaluation of different test methods for bitumen adhesion properties*, Transportation Research Procedia 14 (2016) 724–731.
- [198] Ahmed, T. A., Lee, H. Williams, D. R. C. *Using a modified asphalt bond strength test to investigate the properties of asphalt binders with poly ethylene wax-based warm mix asphalt additive*, International Journal of Pavement Research and Technology 11 (2018) 28–37. doi:10.1016/j.ijprt.2017.08.004.
- [199] ČSN EN 12697-35 (736160): *Asfaltové směsi – Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsí*, Český normalizační institut, Praha. 2018.
- [200] Vacková, P., Valentin, J., Belhaj, M. *What information can be provided by the asphalt crack propagation test done on semicylindric specimens?*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 960 (2020) 042032. doi:10.1088/1757-899x/960/4/042032.
- [201] Poulikakos, L. D., Partl, M. N. *Micro scale tensile behaviour of thin bitumen films*, Experimental Mechanics 51 (2010) 1171–1183. doi:10.1007/s11340-010-9434-3.
- [202] Liu, X., Sha, A., C. Li, Z. Zhang, H. Li, *Influence of water on warm-modified asphalt: Views from adhesion, morphology and chemical characteristics*, Construction and Building Materials 264 (2020) 120159. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120159.
- [203] *AASHTO T 361-16: Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Asphalt Bond Strength (ABS) Test*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2020.
- [204] *TP, AASHTO, Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Binder Bond Strength (BBS) Test*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [205] Canestrari, F., Cardone, F., Graziani, A., Santagata, F. A., Bahia, H. U. *Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage*, Road Materials and Pavement Design 11 (2010) 11–32. doi:10.1080/14680629.2010.9690325.
- [206] Vacková, P. *Výzkum a zhodnocení vybraných vlastností ovlivňujících životnost asfaltových vozovek*. Praha, 2020. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce František Luxemburk.
- [207] Vlk, P. *Přílnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Michal Varaus.

## Seznam obrázků

Obr. 1.	Výtluk v krytu vozovky jako důsledek ztráty přilnavosti mezi asfaltovým pojivem a kamenivem.	8
Obr. 2.	Visko-elastické chování asfaltu. [16]	14
Obr. 3.	Schéma modelů popisující visko-elastické chování asfaltu.	15
Obr. 4.	Dělení asfaltových pojiv. [26]	18
Obr. 5.	Znělec - kamenolom Chlum. [34]	21
Obr. 6.	Žulový porfyr – kamenolom Brant. [36]	21
Obr. 7.	Granulit – kamenolom Kobylí Hora. [37]	22
Obr. 8.	Amfibolit – kamenolom Libodřice. [50]	23
Obr. 9.	Spilit – kamenolom Litice. [42]	24
Obr. 10.	Amfibolit – kamenolom Markovice. [43]	24
Obr. 11.	Čedič. [45]	25
Obr. 12.	Spilit – kamenolom Sýkořice (Zbečno). [46]	25
Obr. 13.	Horninová směs tufitů, metatufitů a spilitu - kamenolom Zbraslav. [47]	26
Obr. 14.	Metadroba - kamenolom Svrčovec. [48]	27
Obr. 15.	Migmatit – kamenolom Mladovice. [52]	27
Obr. 16.	Amfibolicko-biotitický granodiorit – kamenolom Skuteč. [56]	28
Obr. 17.	Přilnavostní přísada Anova 1420 Anti-Strip. [59]	30
Obr. 18.	Chemická složení přísady Wetfix BE. [62]	32
Obr. 19.	Aplikace přísady Zycotherm. [63]	32
Obr. 20.	Struktura povrchu kameniva: (a) před použitím přísady, (b) s přísadou. [63]	32
Obr. 21.	Difraktogram vzorku „prach z odsávání – lom Plešovice“.	37
Obr. 22.	Grafické vyjádření distribuce velikosti částic a odpovídající čára zrnitosti recyklovaného betonu (levý obrázek – 1. cyklus mletí, pravý obrázek – 2. cyklus mletí.)	39
Obr. 23.	Grafické vyjádření distribuce velikosti částic a odpovídající čára zrnitosti vápence.	40
Obr. 24.	Schéma ztráty adheze a koheze v asfaltové směsi.	45
Obr. 25.	Princip teorie mechanické spojení v asfaltové směsi.	48
Obr. 26.	Snímek asfaltu pořízený metodou mikroskopie atomárních sil znázorňující tzv. „včelí strukturu“ na povrchu asfaltu. [85]	49
Obr. 27.	Princip teorie chemických reakcí (příklad aktivní adheze).	50
Obr. 28.	Znázornění chemických struktur funkčních skupin asfaltu a intenzity adsorpční interakce organických funkčních skupin a povrchu horniny. [85]	50
Obr. 29.	Schematické znázornění orientace aminů k povrchu kameniva. [85]	53
Obr. 30.	Adhezni práce potřebná k oddělení povrchů dvou odlišných materiálů (pevné látky „s“ a kapalné látky „l“). [98]	54
Obr. 31.	Kohezni práce potřebná k oddělení povrchů stejného materiálu. [98]	55



Obr. 32.	Princip silové interakce mezi molekulami kapaliny. [103] .....	56
Obr. 33.	Měření kontaktního úhlu pro stanovení smáčivosti povrchu (vpravo – hydrofobní povrch, uprostřed – hydrofilní povrch). [103] .....	56
Obr. 34.	Znázornění působení aktivní a pasivní přilnavosti. ....	61
Obr. 35.	Minerální struktura hornin L1, L2 (vápence) a G1 a G2 (žuly). [116] .....	63
Obr. 36.	Chemické reakce křemene a vápence v různém pH prostředí vody. [85].....	64
Obr. 37.	Příprava zkušebního tělesa umístěním do ochranného límce z PVC (vlevo) a ocelové sítky (vpravo). ....	76
Obr. 38.	Umístění zkušebních těles do nástavce přístroje PAV. ....	76
Obr. 39.	Zkušební vzorek umístěný na podpurné mřížce zavěšené na skleněnou nádobu. ....	82
Obr. 40.	Podpurná mřížka s háčky. ....	83
Obr. 41.	Testovací lahev. ....	84
Obr. 42.	Zařízení určené k otáčení lahvi. ....	84
Obr. 43.	Vybavení pro zkoušení metody Peel testu. [116] .....	85
Obr. 44.	PATTI test: a) zkušební sestava, b) příčný řez zkušebního zařízení se vzorkem. [154] .....	86
Obr. 45.	Schéma tažného čepu. [116].....	87
Obr. 46.	Zajištění a kontrola tloušťky asfaltové vrstvy pomocí distanční podložky. [155].....	88
Obr. 47.	Příprava vzorku. [156].....	89
Obr. 48.	Typ poruchy na rozhraní asfaltového pojiva a kameniva. [156] .....	90
Obr. 49.	„Asphalt bond strength test“ - Příprava vzorku. [98].....	91
Obr. 50.	Pull-off test – příprava vzorku a průběh zkoušky. [116].....	92
Obr. 51.	Oddělená zrna kameniva (asfaltová směs s přilnavostní přísadou Ad-Here LOF 65-00 EU). ....	94
Obr. 52.	Schéma pyknometru. ....	95
Obr. 53.	Vakuová komora sloužící k odstranění zbylého zachyceného vzduchu v asfaltové směsi uložené v pyknometru. ....	96
Obr. 54.	Pyknometr naplněný odvzdušněnou destilovanou vodou po referenční značku. ....	96
Obr. 55.	Lis s dvěma tlačnými pásy pro stanovení pevnosti v příčném tahu. ....	97
Obr. 56.	Skleněná vakuová nádoba na sycení zkušebních těles. ....	99
Obr. 57.	Schéma zkušebního zařízení univerzálního testeru s osazením pomůcek a tělesa pro provedení zkoušky IT-CY. [166].....	102
Obr. 58.	Schéma sestavy pro měření vodorovné deformace. [166].....	103
Obr. 59.	Schéma nastavovací podpěry rámečku. [166].....	103
Obr. 60.	Příklad zkušebního a zkušebního tělesa pro zkoušku šíření trhliny. [167].....	104
Obr. 61.	Schéma pro vyhodnocení výsledku zkoušky stanovení odolnosti proti šíření trhliny (1 - neplatná zkouška, 2 - oblast pro platný výsledek zkoušky, 3 - platná zkouška). [167].....	105
Obr. 62.	Porovnání pevností v příčném tahu s ohledem k použité metodě stárnutí. ....	112
Obr. 63.	Vyhodnocení zkoušky vodní citlivosti dle ČSN EN 12697-12. ....	114





Obr. 64.	Vyhodnocení zkoušky vodní citlivosti s jedním zmrazovacím cyklem dle AASHTO T-283. ....	116
Obr. 65.	Zkušební těleso s ochrannou ocelovou sítkou.....	117
Obr. 66.	Zkušební těleso s obalem z PVC. ....	117
Obr. 67.	Porovnání pevností v příčném tahu odlišně uložených zkušebních těles – stárnutí 5d@85 °C. ....	118
Obr. 68.	Porovnání poměrů pevností v příčném tahu. ....	118
Obr. 69.	Porovnání mezerovitosti navržených variant směsi ACL 16S s požadavky dle ČSN 73 6121... ..	123
Obr. 70.	Porovnání mezerovitosti navržených variant směsi ACL 16+ s požadavky dle ČSN 73 6121... ..	123
Obr. 71.	Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 pro žulový porfyr. ....	124
Obr. 72.	Stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 pro spilit. ....	125
Obr. 73.	Porovnání přilnavosti mezi pojivem a kamenivem různého původu dle ČSN 73 6161. ....	125
Obr. 74.	Porovnání pevností v příčném tahu těles na suchu – ITS směsí ACL 16 S (Brant). ....	126
Obr. 75.	Porovnání poměru pevností v příčném tahu dle ČSN EN 12 697-12 a AASHTO T-283 pro varianty směsi ACL 16S. ....	127
Obr. 76.	Opakované měření pro stanovení ITS dle ČSN EN 12 697-12 a AASHTO T-283. ....	128
Obr. 77.	Porovnání pevností v příčném tahu těles na suchu - ITS směsí ACL 16+ (Chlum). ....	128
Obr. 78.	Porovnání poměru pevností v příčném tahu dle ČSN EN 12 697-12 a AASHTO T-283 pro varianty směsi ACL 16+. ....	129
Obr. 79.	Porovnání pevností v příčném tahu nezestárých a zestárých zkušebních těles.....	130
Obr. 80.	Porovnání poměru pevností v příčném tahu dle ČSN EN 12 697-12 a AASHTO T-283 – zestárlá zkušební tělesa 5d@85°C. ....	130
Obr. 81.	Stanovení odolnosti proti šíření trhliny při zkušební teplotě 0 °C.....	132
Obr. 82.	Výsledky zkoušky stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem podle ČSN 73 6161. ....	135
Obr. 83.	Výsledky zkoušky stanovení poměrů pevnosti v příčném tahu ITS dle ČSN EN 12697-12 a dle AASHTO T-283. ....	135
Obr. 84.	Porovnání poměru pevností v příčném tahu – ITS dle ČSN 12 697-12 a AASHTO T-283.....	139
Obr. 85.	Porovnání kritických hodnot $K_{ic}$ pro varianty směsi ACL 16S podle normy ČSN EN 12697-44:2011. ....	141
Obr. 86.	Index stárnutí sledovaných charakteristik lomové houževnatosti, napětí při porušení a přetvoření.....	142
Obr. 87.	Zkouška methylenovou modří – filer Plešovice, objem roztoku barviva s přesností na 1 ml, kterého bylo nutno dodat, aby barevný kruh vydržel po dobu 5 minut.....	144
Obr. 88.	Posouzení jemných částic zkouškou methylenovou modří dle ČSN EN 933-9.....	144
Obr. 89.	Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru dle ČSN EN 1097-4.....	145
Obr. 90.	Ukázka vzorku fileru pro pyknometrickou zkoušku dle ČSN EN 1097-7. ....	146
Obr. 91.	Porovnání výsledků dosaženého stupně obalení kameniva asfaltovým pojivem s vybranými typy filerů vizuálním hodnocením a za pomoci softwaru PyPAIS.....	149



Obr. 92. Hodnocení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem – kamenivo Zbečno + 3 % filer Plešovice + mastek (vlevo – vizuální hodnocení, vpravo – hodnocení pomocí softwaru). .....	150
Obr. 93. Hodnocení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem – kamenivo Chlum + 3 % filer Plešovice + mastek (vlevo – vizuální hodnocení, vpravo – hodnocení pomocí softwaru). .....	150
Obr. 94. Identifikace stěžejních bodů při pořizování digitálních snímků – odlesky a lesklá místa na asfaltovém pojivu (žlutě vyznačené), volné prostory, mezery mezi jednotlivými zrny kameniva (fialově vyznačené).....	152
Obr. 95. Původní snímek (vlevo) a snímek převedený do stupňů šedi (vpravo). .....	153
Obr. 96. Příklady úpravy fotografií pro hodnocení přilnavosti s využitím digitální analýzy obrazu.....	153
Obr. 97. Výběr barevného vektoru RGB reprezentujícího nepotažené kamenivo.....	154
Obr. 98. Příklad výstupu softwarového nástroje pro hodnocení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem. . .....	155
Obr. 99. Digitální fotografie kameniva obaleného asfaltovým pojivem po exponování obnažovací vodou – celý snímek (vlevo), čtvercový výřez (vpravo). .....	156
Obr. 100. Porovnání vizuálního hodnocení dle ČSN 73 6161 a výstupu z programu Binder 1.0 – kamenivo Brant s asfaltovým pojivem 50/70.....	157
Obr. 101. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru Binder 1.0 – varianty s kamenivem Brant.....	159
Obr. 102. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru Binder 1.0 – varianty s kamenivem Zbraslav. ....	159
Obr. 103. Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru Binder 1.0 – varianty s kamenivem Skuteč. ....	160
Obr. 104. Znázornění rozdílů mezi odraženým světlem z kameniva s drsným povrchem: (a) a lesklým asfaltem; odražené polarizované světlo je buď zachyceno (b), nebo je odraz světla pohlcen polarizačním filtrem (c). [184] .....	161
Obr. 105. Grafické uživatelské rozhraní programu PyPAIS. [184] .....	162
Obr. 106. Filtrování tmavého pozadí čistě pomocí prahování intenzity, $t_{l,min}=0$ a $t_{l,max}=70$ ; původní snímek ve stupních šedi (vlevo) a maskované pozadí pokrývající 72,5 % (vpravo). [184] .....	162
Obr. 107. Mapa entropie (vlevo) a maskované pozadí pokrývající 60,7 % po použití prahování drsnosti (vpravo), $t_{l,min}=0$ a $t_{l,max}=70$ , $t_{H,min}=0$ a $t_{H,max}=120$ . [184] .....	163
Obr. 108. Gaussovo vyhlazení mapy entropie (vlevo) a maskované pozadí pokrývající 57,6 % po použití prahování drsnosti (vpravo), $t_{l,min}=0$ a $t_{l,max}=70$ , $t_{H,min}=0$ a $t_{H,max}=120$ , $\sigma_G=3,7$ . [184].....	164
Obr. 109. Mřížka nanesená na původní snímek pro počítání segmentačních chyb na diskrétních místech; asfaltová směs A.....	165
Obr. 110. Výsledky hodnocení procenta obalení kameniva asfaltovým pojivem pomocí manuálního a poloautomatického měření pomocí PyPAIS. ....	166



Obr. 111.	Vyhodnocení vzorku pomocí softwaru PyPAIS - Kamenivo Skuteč - 50/70 Krakovaný (vložený snímek – vlevo, rozložení entropie vpravo). .....	167
Obr. 112.	Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru PyPAIS – varianty s kamenivem Brant. ....	169
Obr. 113.	Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru PyPAIS – varianty s kamenivem Zbraslav. ....	169
Obr. 114.	Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem vizuálním hodnocením dle ČSN 73 6161 a pomocí softwaru PyPAIS – varianty s kamenivem Skuteč.....	170
Obr. 115.	Kapky zahřátého asfaltového pojiva na výbrusu kameniva (vlevo) a vyhodnocení kontaktních úhlů pomocí povrchového tenzometru a Young-Laplaceovy rovnice (vpravo); dvě nejmenší kapky byly z měření vyřazeny pro nesplnění kritéria minimálního objemu. ....	174
Obr. 116.	Příklad upnutí jádrových vývrtů kameniva do plastové objímky z 3D tiskárny pro případné zamezení úniku asfaltového pojiva. ....	175
Obr. 117.	Příklad upnutí vzorku při zkoušce „Direct pull test“ – selhání soudržnosti. ....	176
Obr. 118.	Infračervená spektroskopie FTIR všech posuzovaných asfaltových směsí. ....	178
Obr. 119.	Obalená plocha kameniva při stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem podle normy ČSN 73 6161 [%]. ....	179
Obr. 120.	Maximální normálová napětí pro kohezní a adhezní poruchy dosažené při zkoušce přímým tahem („Direct pull test“). ....	180
Obr. 121.	Vzorky pro tahovou zkoušku po kohezním (vlevo) a adhezním (vpravo) porušení. ....	181
Obr. 122.	Výsledky modulů tuhosti při teplotě 15 °C navržených asfaltových směsí včetně stanovení u zestárých zkušebních vzorků 5d@85 °C.....	182
Obr. 123.	Výsledky lomové houževnatosti navržených asfaltových směsí včetně stanovení u zestárých zkušebních vzorků 5d@85 °C.....	183



## Seznam tabulek

Tab. 1.	Přehled hornin dle jednotlivých kamenolomů v České republice.....	20
Tab. 2.	Technické parametry přísady Anova 1420 Anti-strip. ....	30
Tab. 3.	Technické parametry přísady Ad-Here LOF 65-00 EU.....	31
Tab. 4.	Technické parametry přísady Wetfix BE.....	31
Tab. 5.	Dávkování přísady Zycotherm s ohledem na typ kameniva. [64].....	33
Tab. 6.	Technické parametry adhezni přísady AD-2. [66].....	34
Tab. 7.	Technické parametry adhezni přísady ADHESIL Z. [66] .....	34
Tab. 8.	Výsledky kvantitativní fázové analýzy vzorku „prach z odsávání – lom Plešovice“ v hmotnostních procentech, zaokrouhleno na jedno desetinné číslo.....	37
Tab. 9.	Výsledky analýzy drceného skla z FV polykrystalického panelu. [80] .....	42
Tab. 10.	Mechanismy vniknutí vody mezi pojivo a kamenivo, [86]. ....	57
Tab. 11.	Přehled metod laboratorního stárnutí. [120].....	72
Tab. 12.	Tab. Metody stárnutí volně ložené směsi dle prEN 12697-52.....	75
Tab. 13.	Zkušební metody na nezhuťných směsích. ....	78
Tab. 14.	Zkušební postupy na zhuťných zkušebních vzorcích.....	79
Tab. 15.	Pracovní teploty. [33].....	80
Tab. 16.	Hodnocení přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu dle ČSN 73 6161. [33] .....	81
Tab. 17.	Základní charakteristika použitých typů kameniva.....	108
Tab. 18.	Návrh směsi ACL 16+ dle požadavků ČSN 73 6121. ....	109
Tab. 19.	Porovnání stanovení adheze mezi pojivem a kamenivem podle ČSN 73 6161 pro nezestárlé pojivo .....	110
Tab. 20.	Porovnání stanovení adheze mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 pro zestárlé asfaltové pojivo .....	110
Tab. 21.	Posuzované varianty asfaltových směsí ACL 16+ (nezestárlé ITS, zestárlé ITS 5d@85°C) .....	111
Tab. 22.	Posuzované varianty asfaltových směsí ACL 16+ (zestárlé ITS 9d@85°C, zestárlé ITS 20h@85°C při 2,1 MPa).....	112
Tab. 23.	Výsledky vodní citlivosti - nezestárlé – varianty ACL 16 +.....	115
Tab. 24.	Výsledky vodní citlivosti - zestárlá MT 5d@85°C – varianty ACL 16 +.....	115
Tab. 25.	Výsledky vodní citlivosti - zestárlá volně ložená směs 9d@85°C – varianty ACL 16 +.....	115
Tab. 26.	Výsledky vodní citlivosti - zestárlá MT 5h@85°C v PAV při 2,1 MPa – varianty ACL 16 +.....	115
Tab. 27.	Porovnání odlišně uložených zkušebních těles do temperační komory 5d@85 °C.....	117
Tab. 28.	Složení asfaltové směsi ACL16S v souladu s požadavky ČSN 73 6121.....	121
Tab. 29.	Složení asfaltové směsi ACL16+ v souladu s požadavky ČSN 73 6121.....	121
Tab. 30.	Charakteristiky posuzované směsi ACL 16 + (Chlum).....	129
Tab. 31.	Charakteristiky modulu tuhosti pro nezestárlá a zestárlá zkušební tělesa. ....	131
Tab. 32.	Index stárnutí asfaltové směsi (ageing index = AI). ....	131

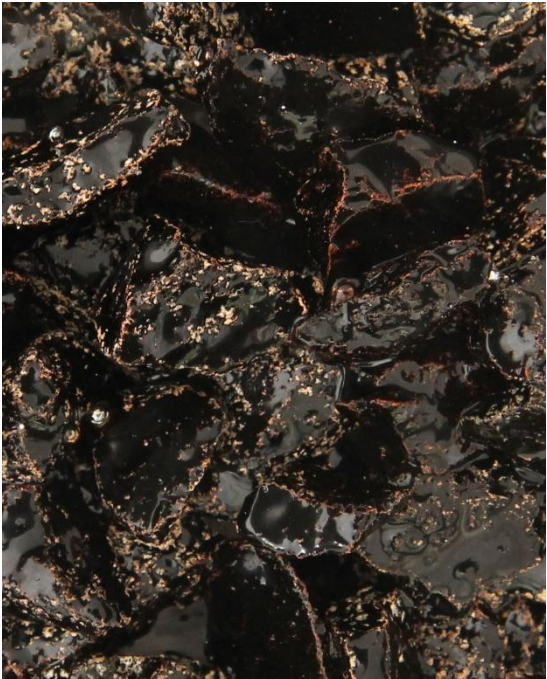
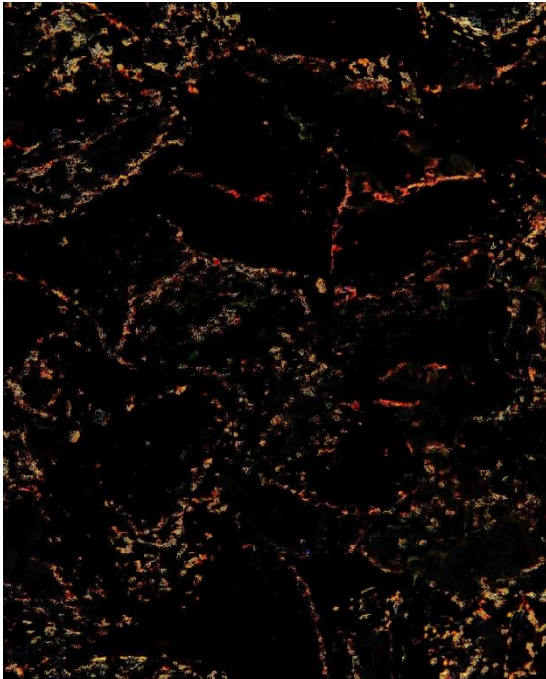
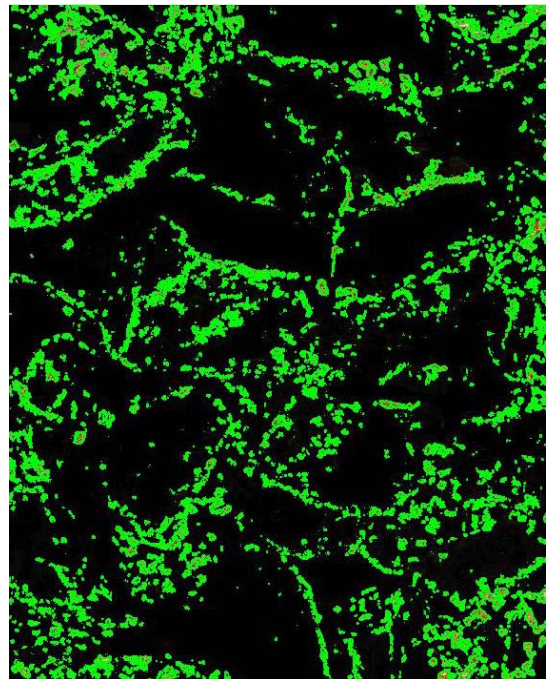


Tab. 33.	Složení asfaltové směsi ACO 11+ v souladu s požadavky ČSN 73 6121.....	133
Tab. 34.	Stanovení modulu tuhosti variant směsi ACO 11+ před a po účinku stárnutí. ....	136
Tab. 35.	Index stárnutí (AI) posuzovaných asfaltových směsí ACO 11+. ....	136
Tab. 36.	Základní charakteristiky variant směsí ACL 16S. ....	138
Tab. 37.	Stanovení modulu tuhosti variant směsi ACL 16S před a po účinku stárnutí. ....	140
Tab. 38.	Alternativy minerálních přísad v asfaltových směsích. ....	143
Tab. 39.	Souhrn vybraných zkoušek filerů pro posouzení jejich vlastností.....	143
Tab. 40.	Výsledné charakteristiky vybraných jemnozrnných materiálů jako možné alternativy fileru v asfaltových směsích.....	146
Tab. 41.	Složení asfaltové směsi 0/8 mm dle ČSN EN 1744-4: 2006. ....	147
Tab. 42.	Výsledky stanovení vodní citlivosti jednotlivých variant asfaltových směsí 0/8 mm s vybranými typy filerů. ....	148
Tab. 43.	Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 s využitím digitální analýzy obrazu pomocí softwaru Binder 1.0. ....	158
Tab. 44.	Přehled kameniva a jeho specifikace. ....	165
Tab. 45.	Porovnání výsledků zkoušky pro stanovení přilnavosti mezi pojivem a kamenivem dle ČSN 73 6161 s využitím digitální analýzy obrazu pomocí softwaru PyPAIS.....	168
Tab. 46.	Přehled variant adhezivních přísad a jejich dávkování. ....	171
Tab. 47.	Přehled kameniva použité pro přípravu vzorků. ....	172
Tab. 48.	Pomůcka pro pojmenování asfaltových směsí. ....	172
Tab. 49.	Souhrn asfaltových směsí ACO 11+. ....	172
Tab. 50.	Kontaktní úhly mezi kapkami zahřátých asfaltových pojiv a kamenivem [°]. ....	178
Tab. 51.	Volná povrchová energie testovaných asfaltových pojiv [mJ/m <sup>2</sup> ] .....	179
Tab. 52.	Pevnost spojení vzorků během zkoušky „Direct pull test“ [MPa]. ....	180
Tab. 53.	Vlastnosti navržených asfaltových směsí.....	181
Tab. 54.	Kvalitativní hodnocení účinnosti jednotlivých přilnavostních aditiv v rámci provedené série zkoušek; ++ = vysoký pozitivní vliv přilnavostní přísady, + = pozitivní vliv, 0 = žádný vliv, - = negativní vliv a -- = velmi negativní vliv. ....	183




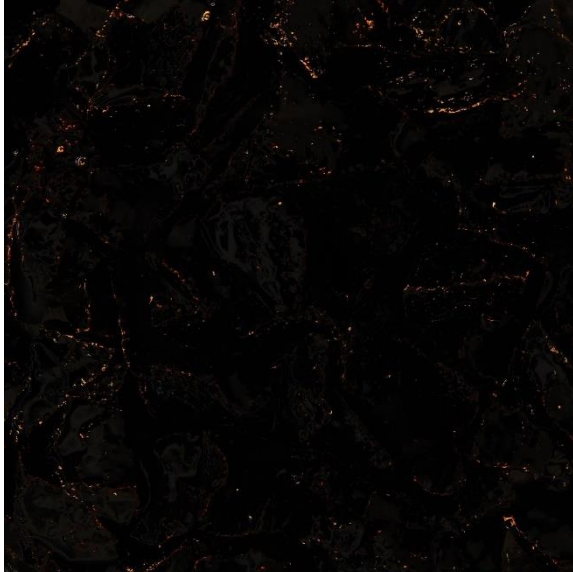
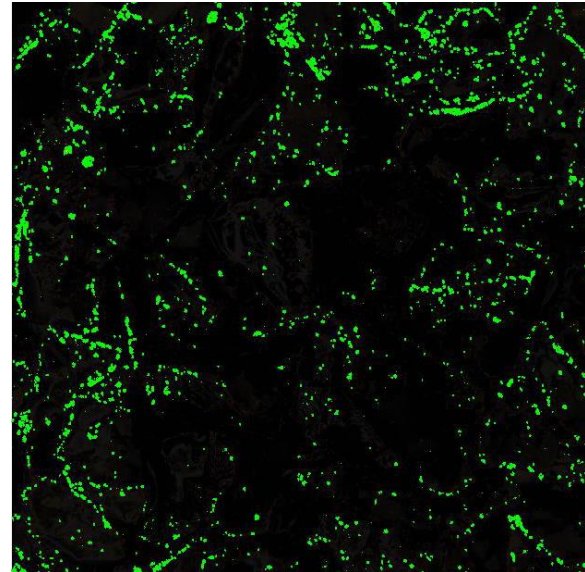


## Příloha A – Výstupy zkušebních vzorků hodnocené s využitím softwaru Binder 1.0


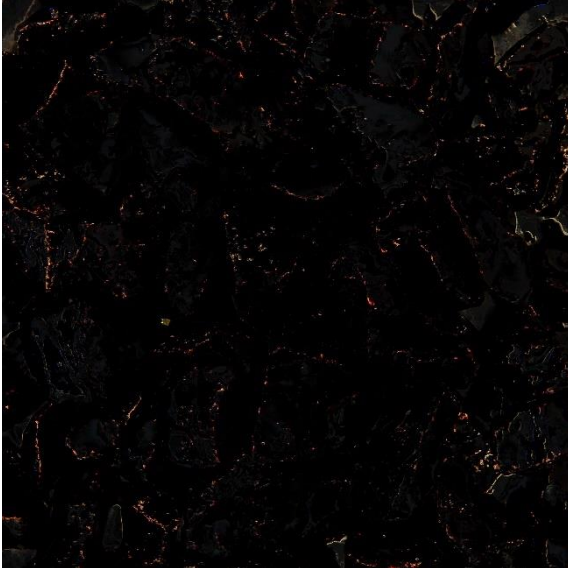
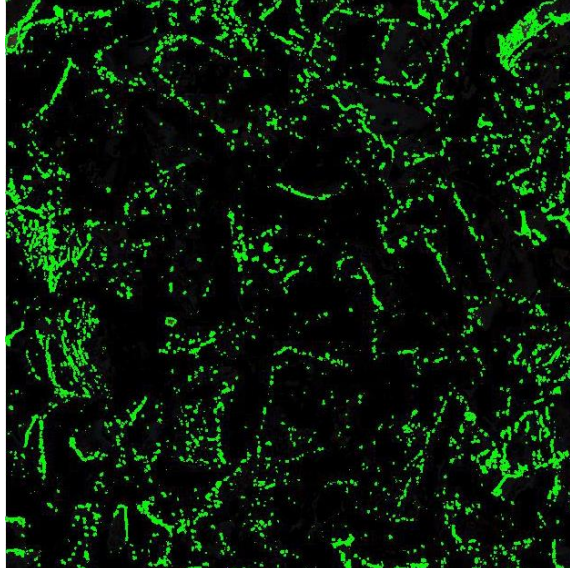
Název		
1_Brant+TTO-A(0,2)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
91,9	Good	33
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
70,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		






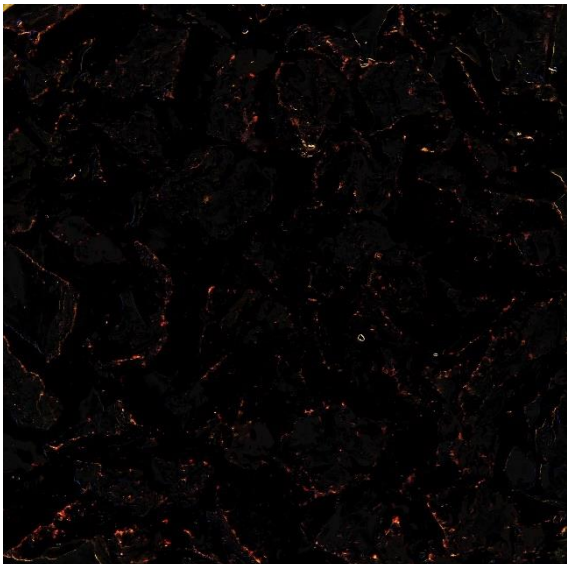
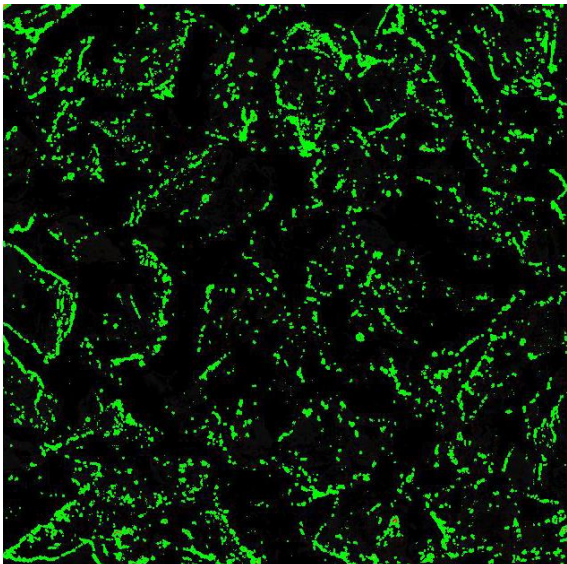
Název		
2_Brant+AD-2(0,2)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
98,9	Excellent	30
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
83,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		




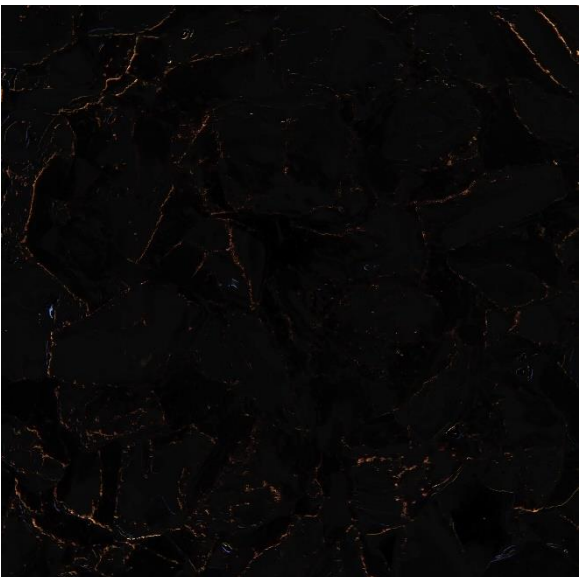
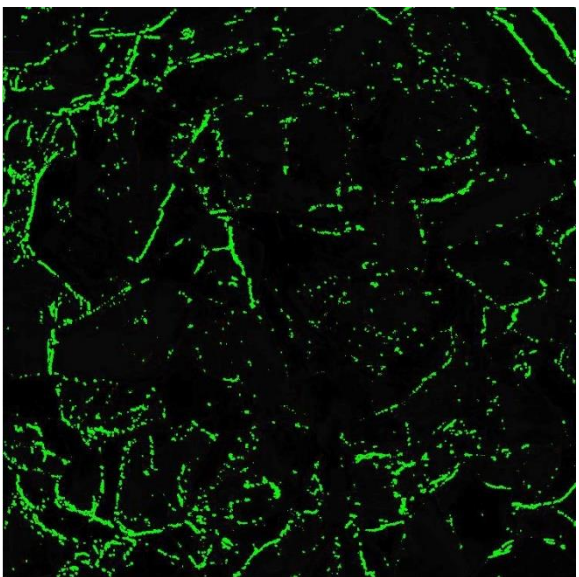
Název		
3_Brant+AD-2up(0,2)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
97,8	Excellent	34
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
80,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		




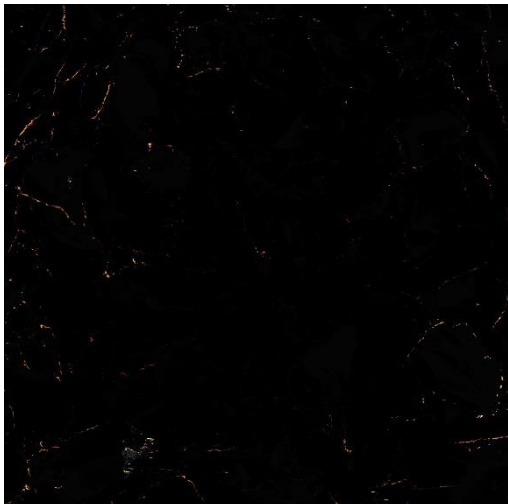
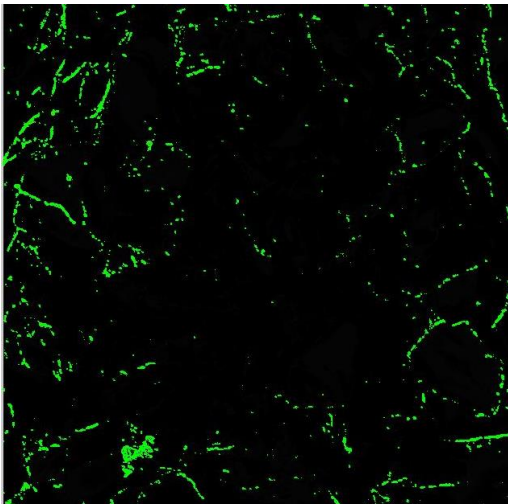


Název		
4_Brant+AD-2up (0,4)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
97,9	Excellent	35
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
83,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		





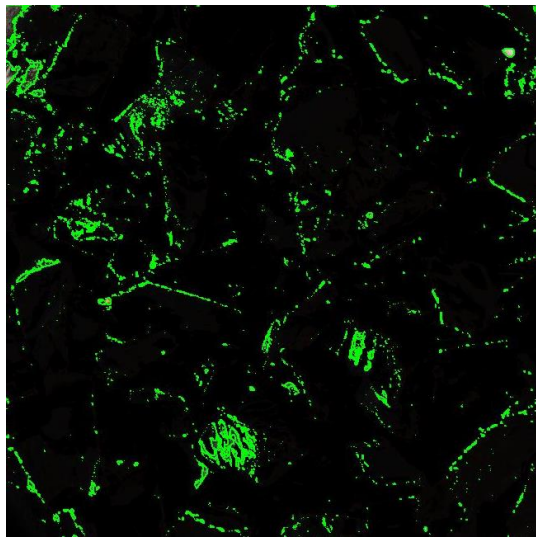
Název		
5_Zbraslav+TTO-A(0,2)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
98,6	Excellent	35
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
83,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		



Název		
6_Zbraslav+AD-2(0,2)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
99,1	Excellent	20
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
83,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		

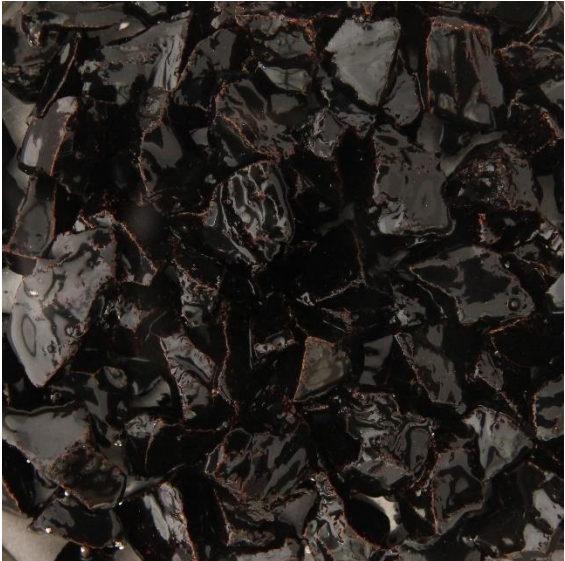
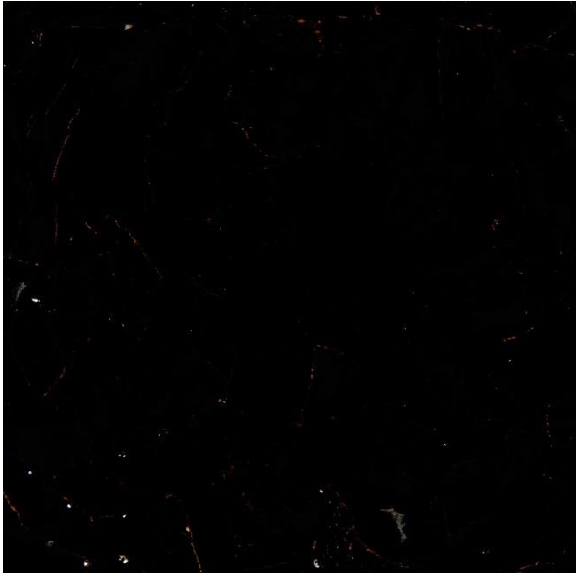
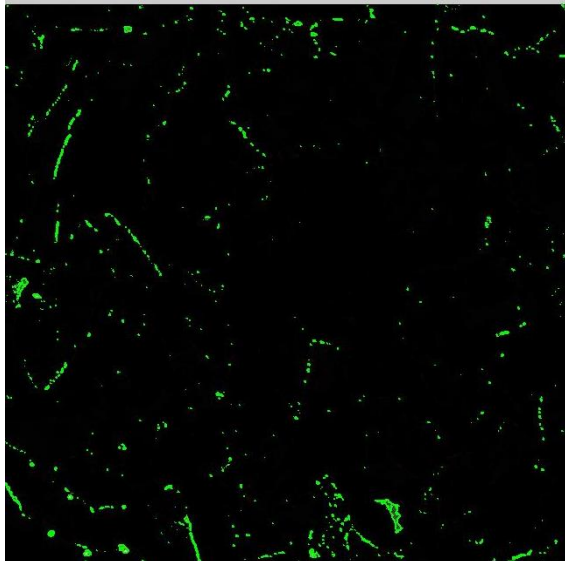






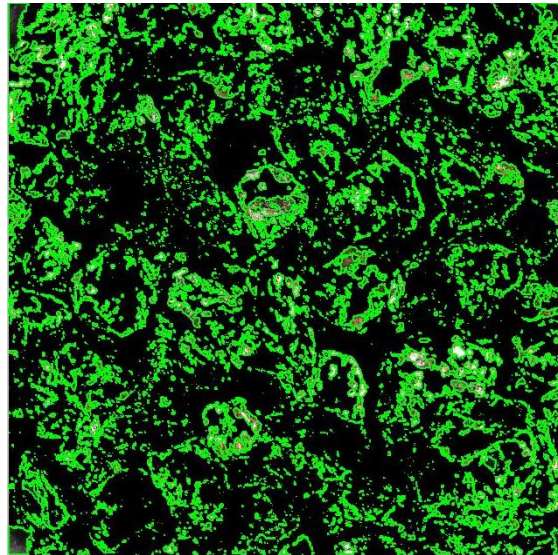
Název		
7_Zbraslav++AD-2up(0,2)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
98,2	Excellent	24
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
83,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		






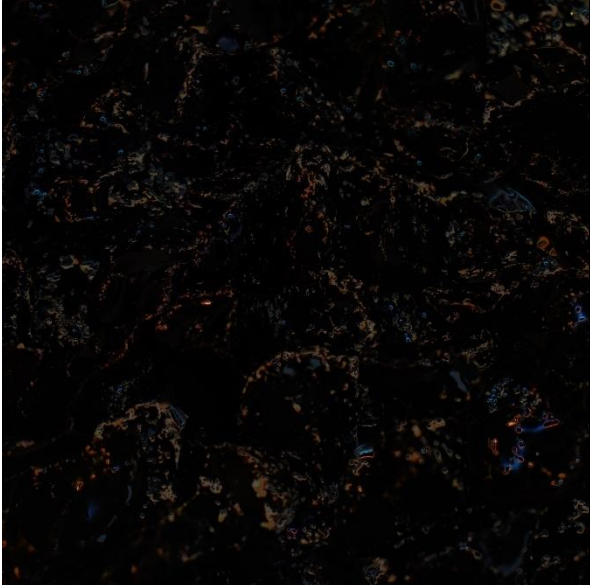
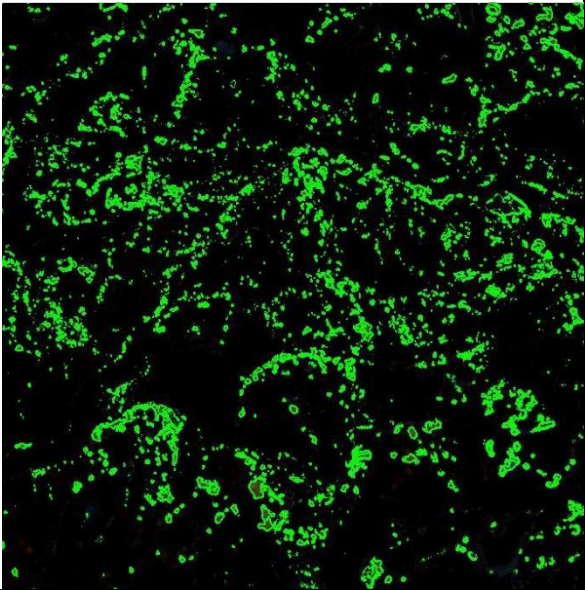
Název		
8_Zbraslav++AD-2up(0,4)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
99,5	Excellent	16
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
83,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		





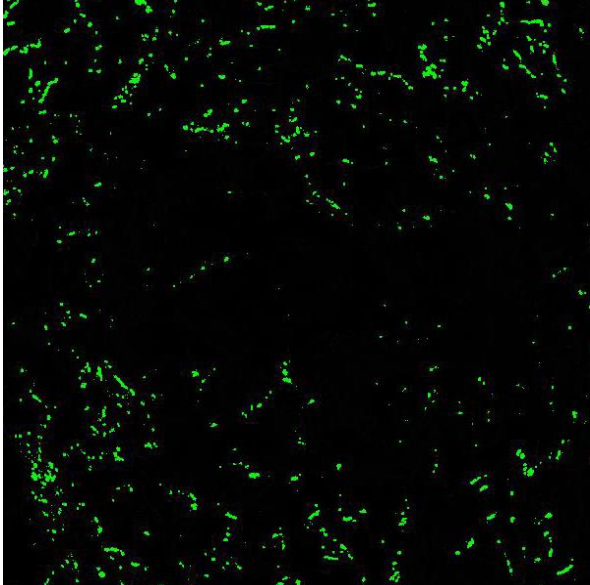
Název		
9_Skuteč+TTO-A(0,2)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
83,6	Satisfactory	11
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
50,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		




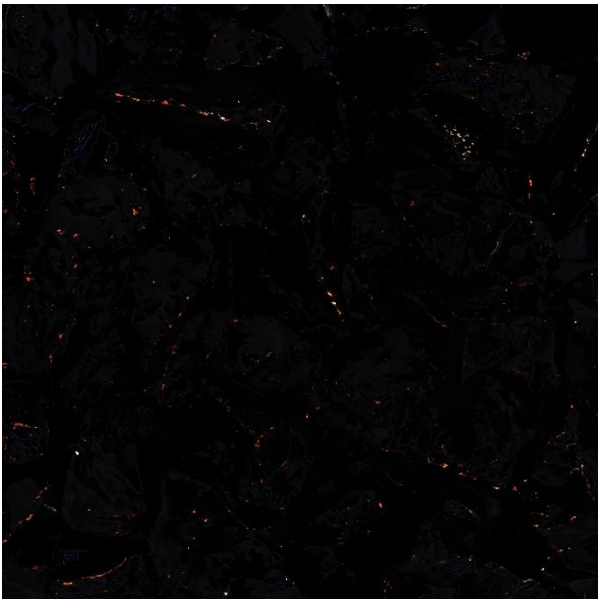
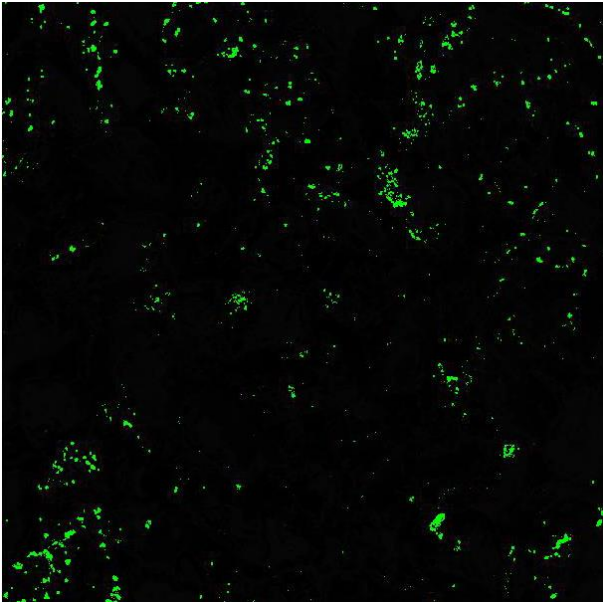


Název		
10_Skuteč+AD-2(0,2)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
96,2	Good	35
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
70,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		




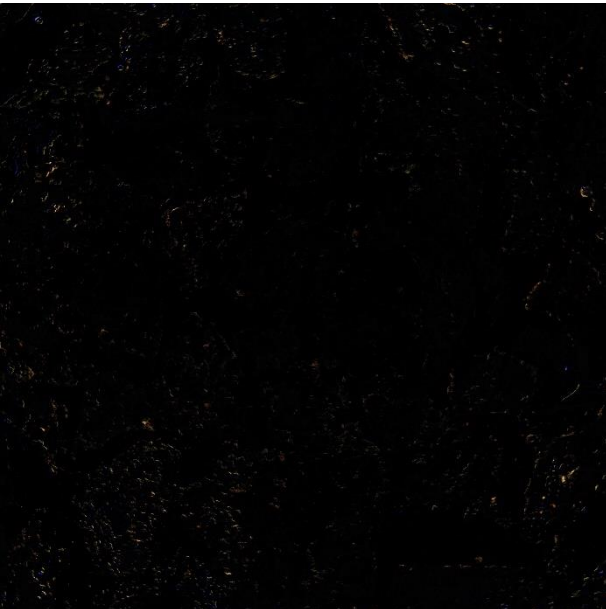
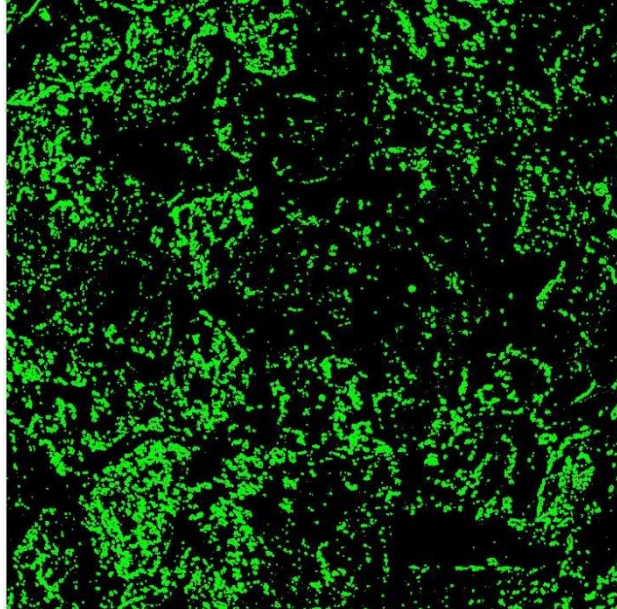
Název		
11_Skuteč+AD-2up(0,2)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
99,6	Excellent	35
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
75,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		





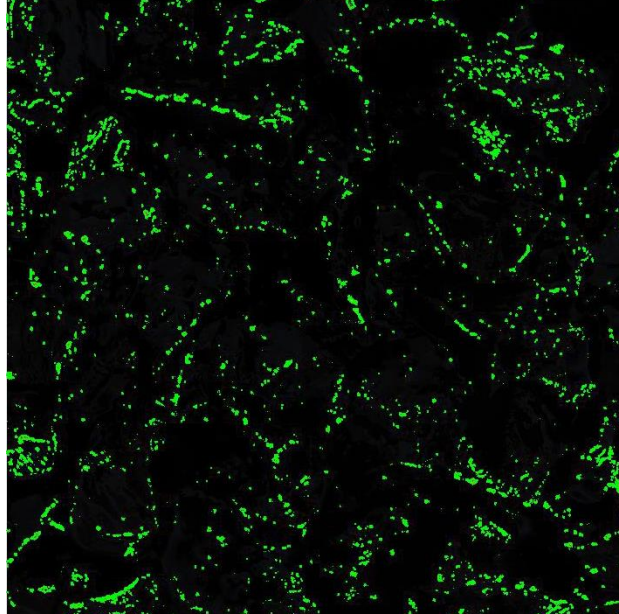
Název		
12_Skuteč+AD-2up(0,4)		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
99,4	Excellent	25
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
83,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		





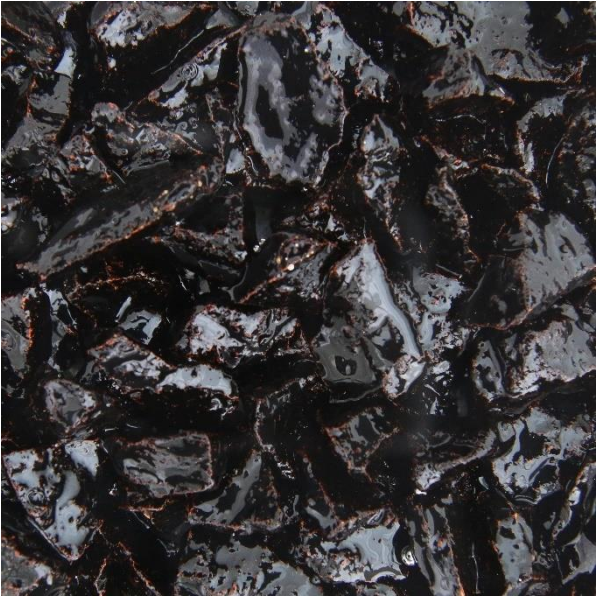
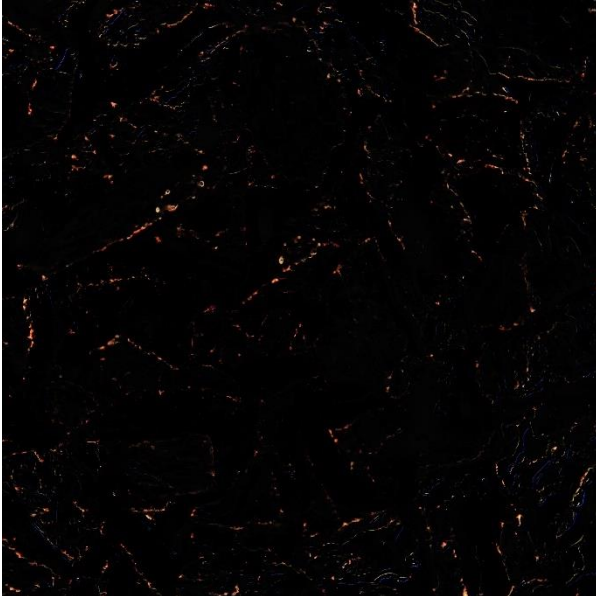
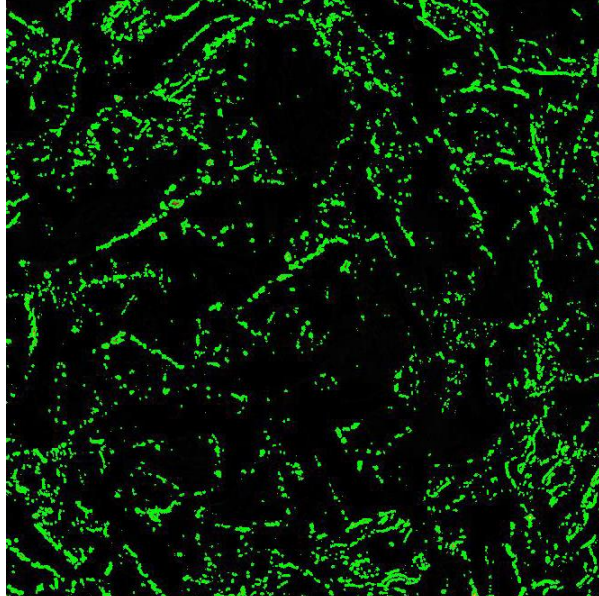
Název		
1_Brant+guma_Polička		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
95,3	Good	7
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
65,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		





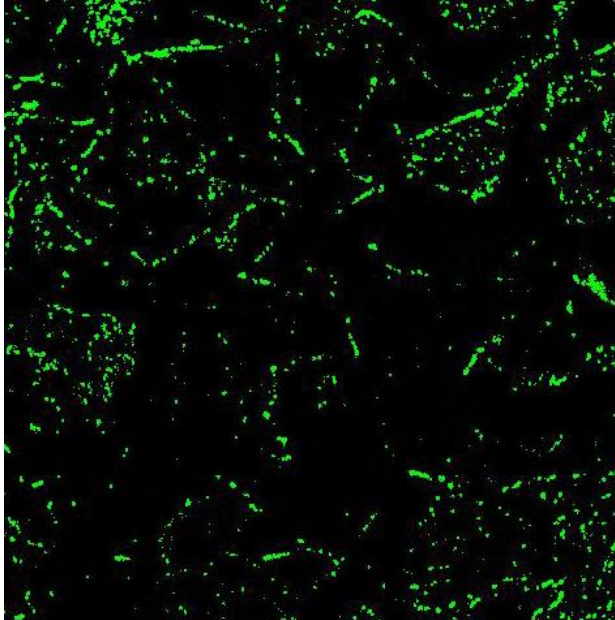
Název		
2_Brant+0,3%ValoJamesDP500T		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
98,9	Excellent	21
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
80,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		







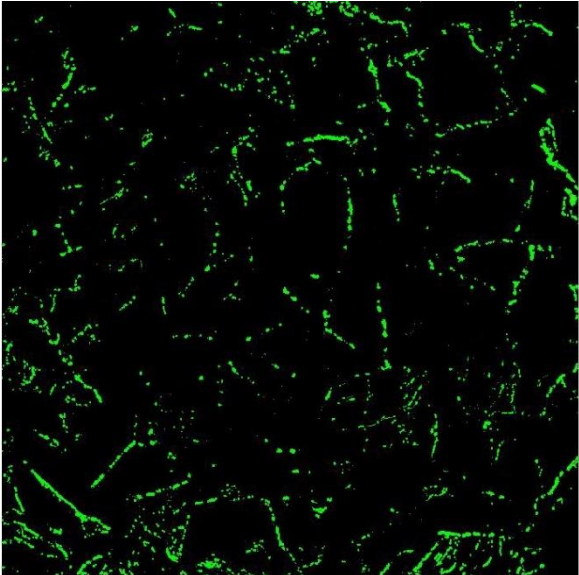
Název		
<b>3_Brant+0,3%Adhere65-00</b>		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
97,5	Excellent	22
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
80,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		



Název		
<b>4_Zbraslav+guma_Polička</b>		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
97,9	Excellent	29
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
75,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		

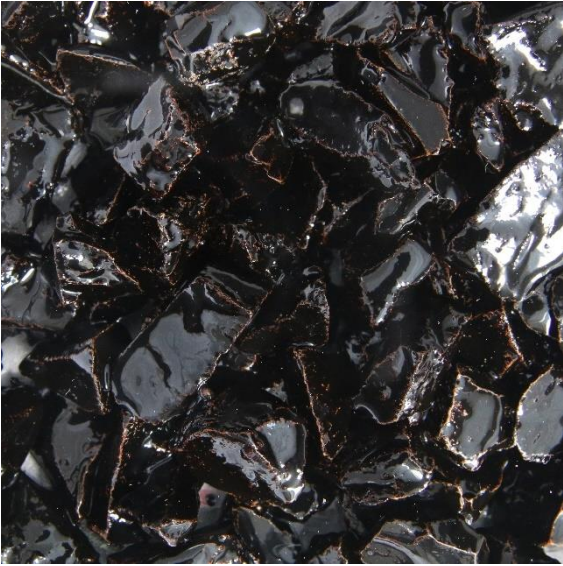
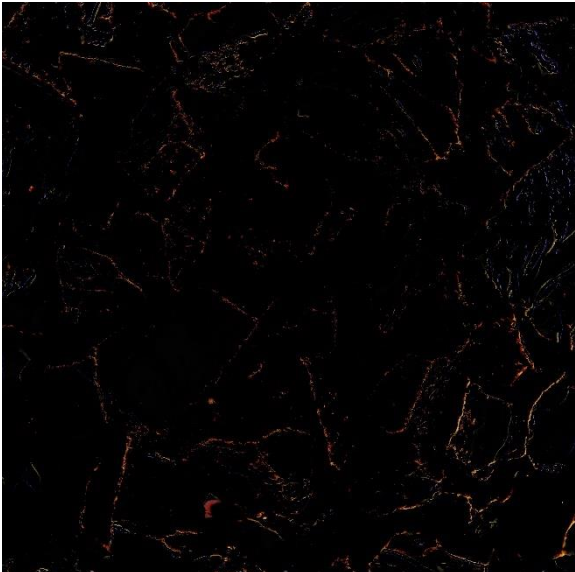
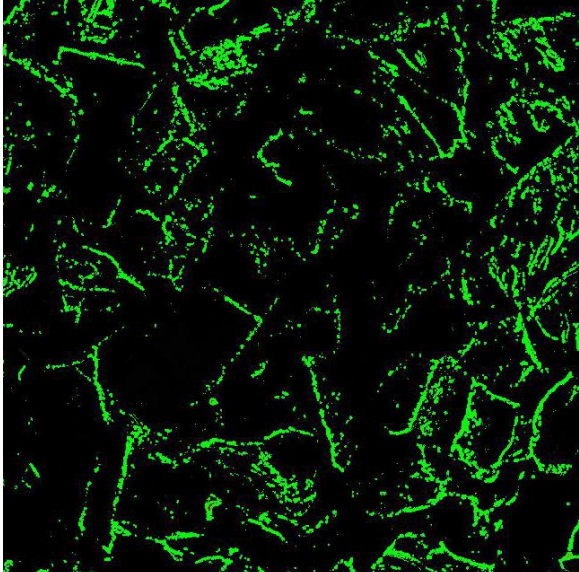






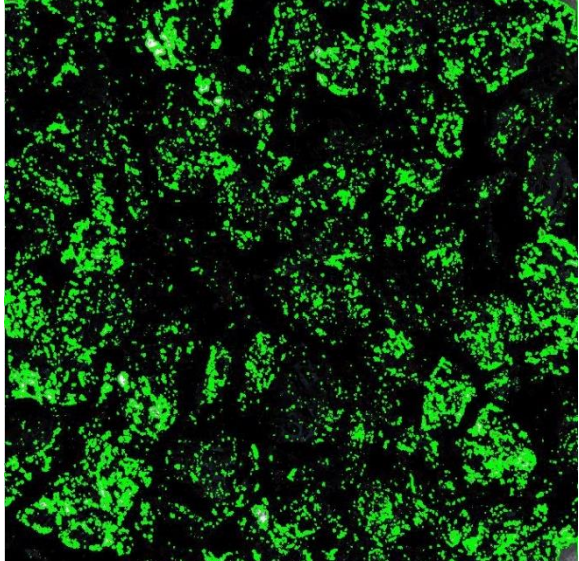
Název		
5_Zbraslav+0,3%ValoJamesDP500T		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
99,3	Excellent	19
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
85,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		







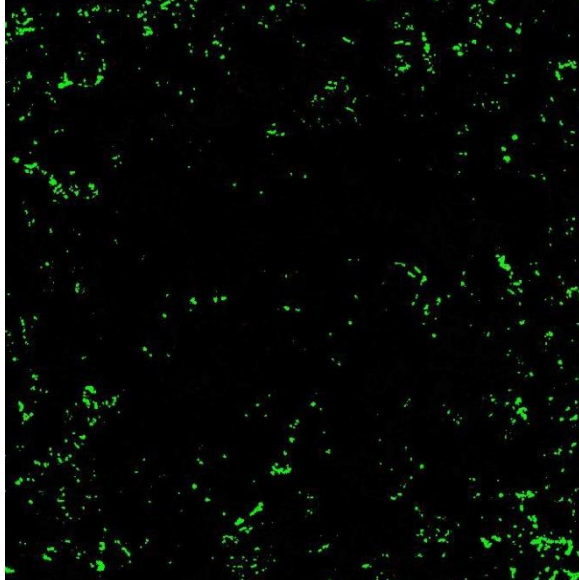
Název		
6_Zbraslav+0,3%Adhere 65-00		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
98,3	Excellent	51
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
85,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		



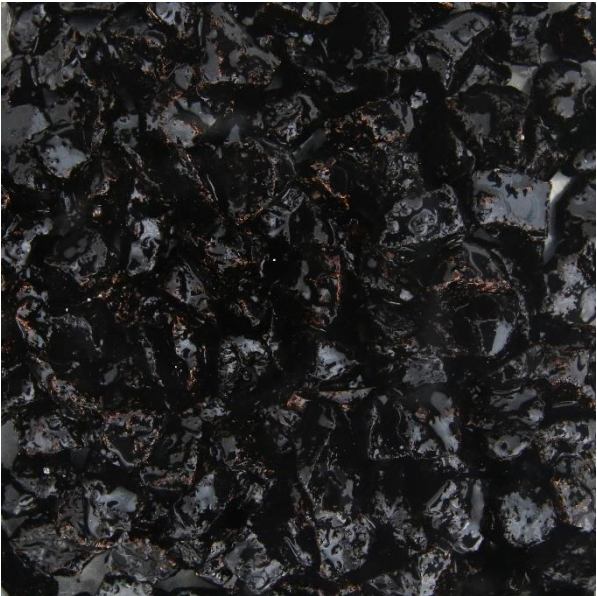

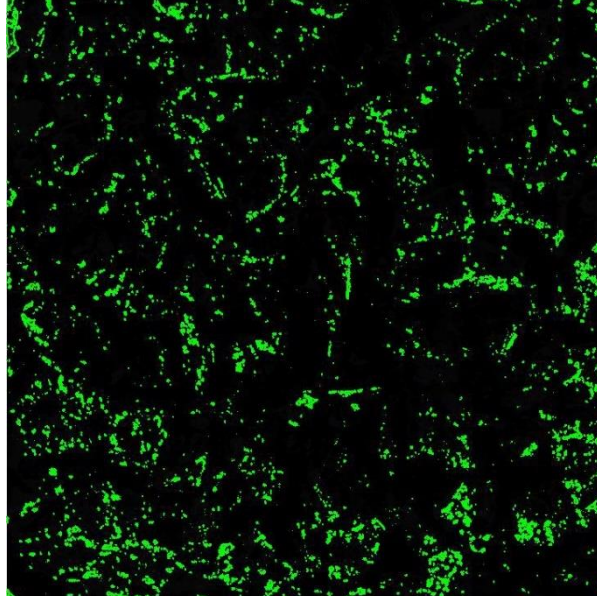
Název		
7_Skuteč+guma_Polička		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
93,9	Good	47
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
60,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		



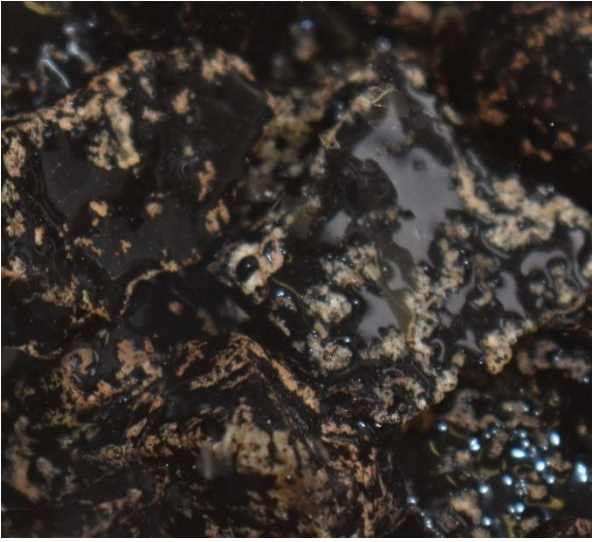

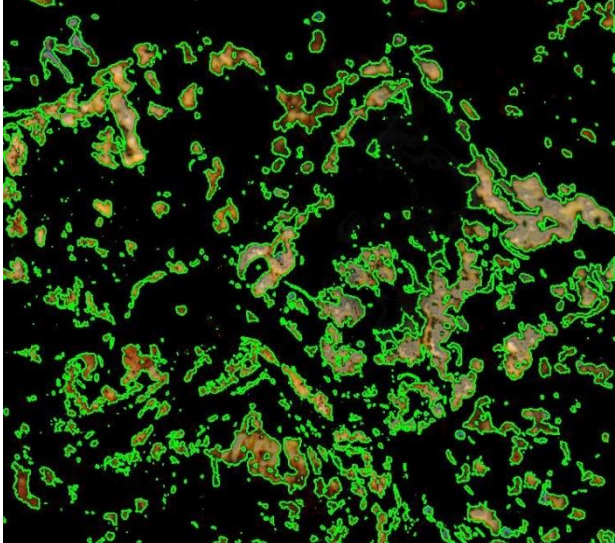


Název		
8_Skuteč+0,3%ValoJamesDP500T		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
99,6	Excellent	35
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
80,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		



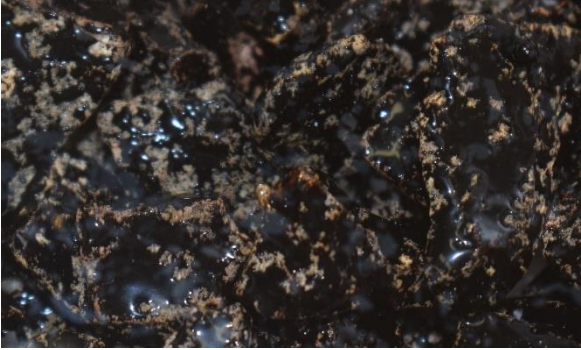

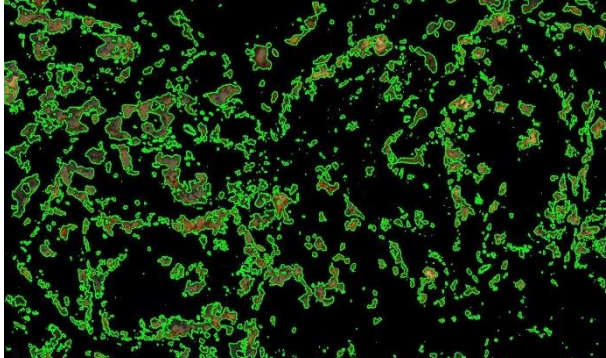
Název		
9_Skuteč+0,3%Adhere65-00		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
98	Excellent	18
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
77,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		




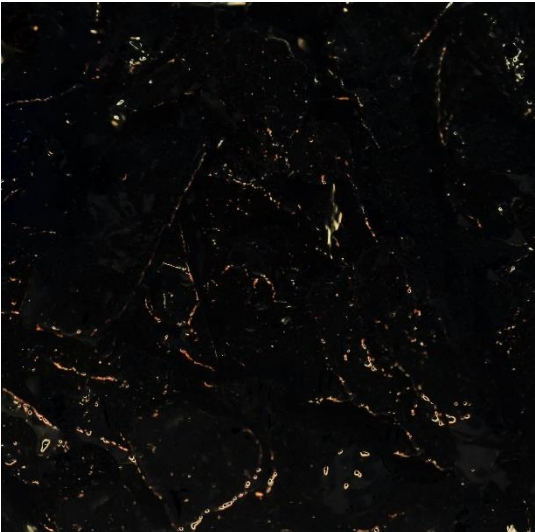
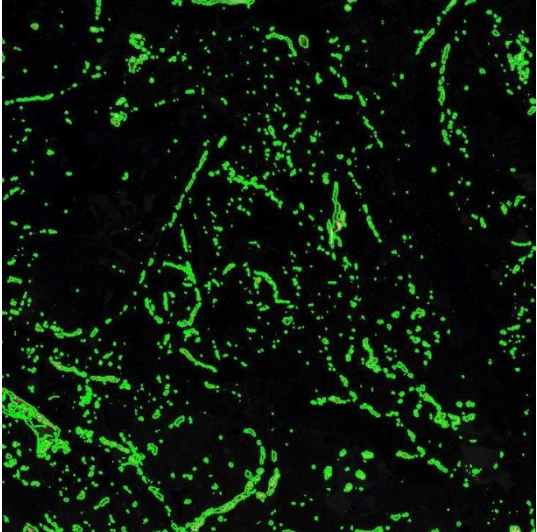
Název		
1_Brant+50_70		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
80,3	Satisfactory	22
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
60,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		



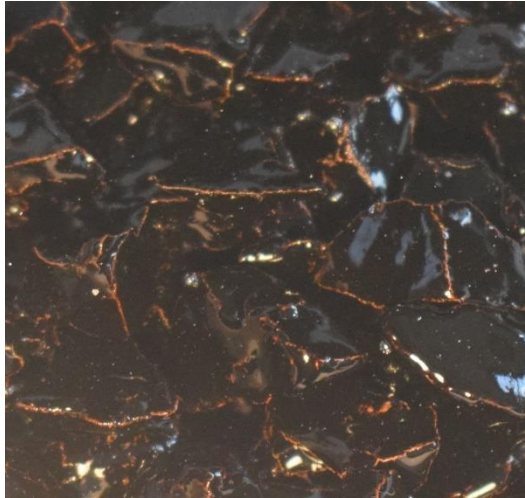
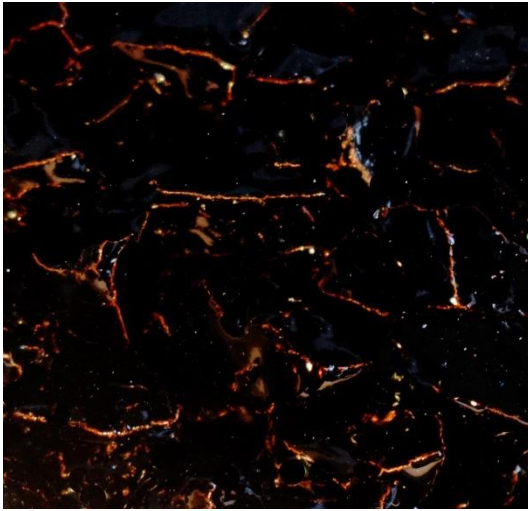
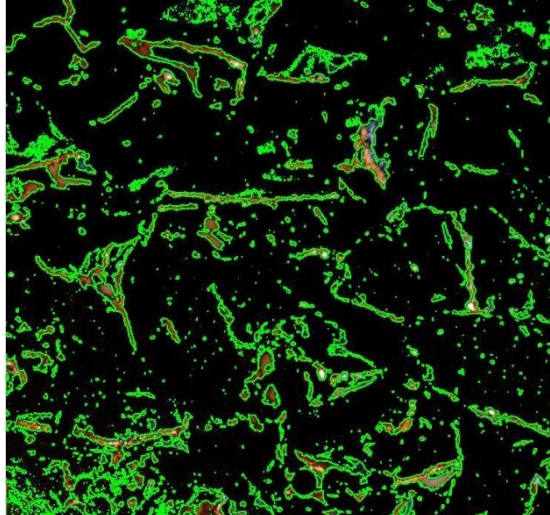


Název		
2_Brant+50_70Krakovaný		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
83,8	Satisfactory	17
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
55,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		



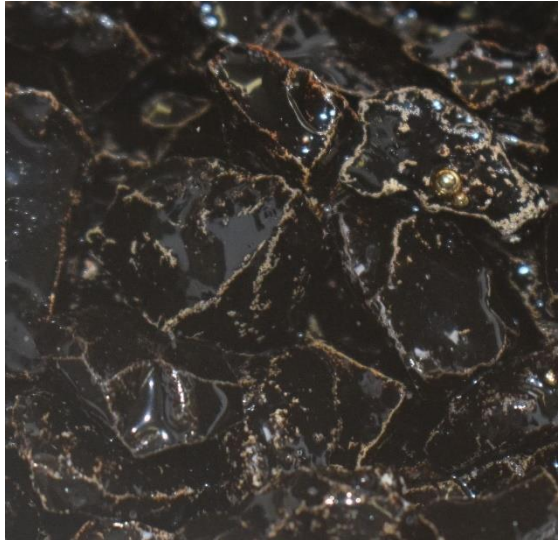
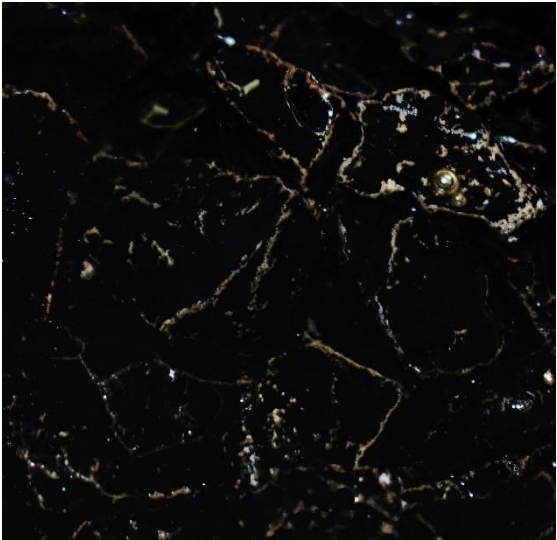
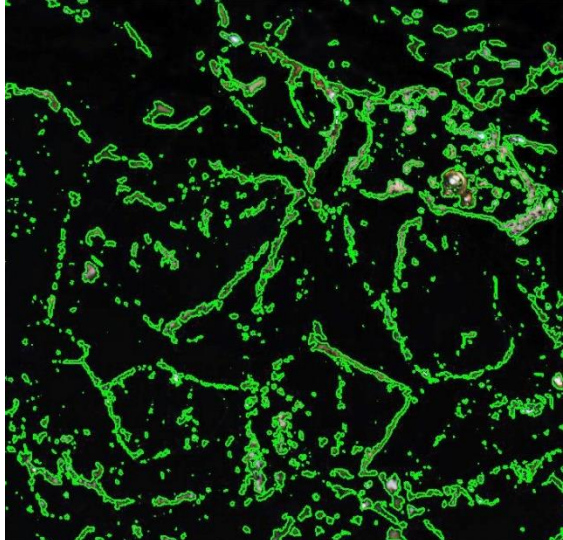
Název		
3_Brant+PmB45-80_75_krakovaný		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
96,2	Good	26
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
95,0	Dobrá	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		



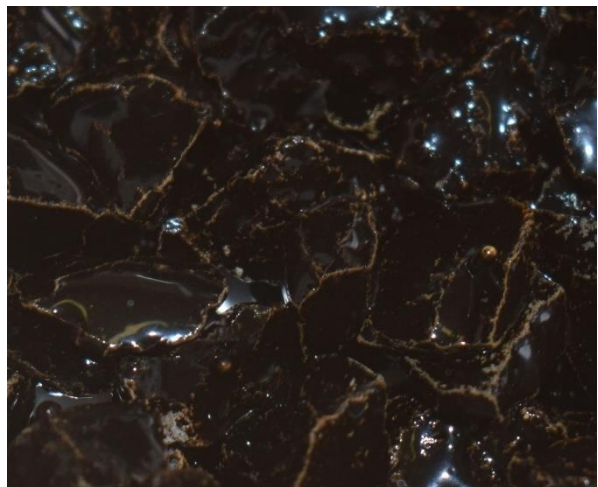

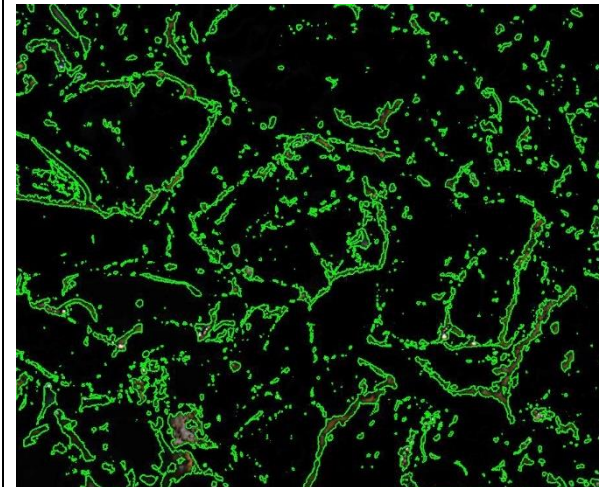
Název		
4_Zbraslav+50_70		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
88	Satisfactory	17
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
80,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		







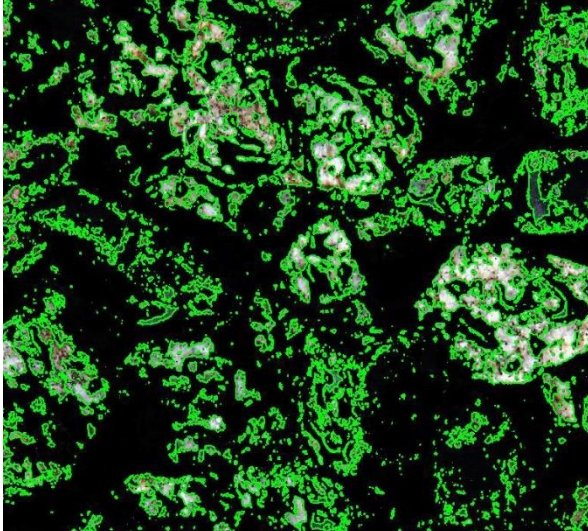
Název		
5_Zbraslav+50_70Krakovany		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
89,5	Satisfactory	22
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
80,0	Vyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		





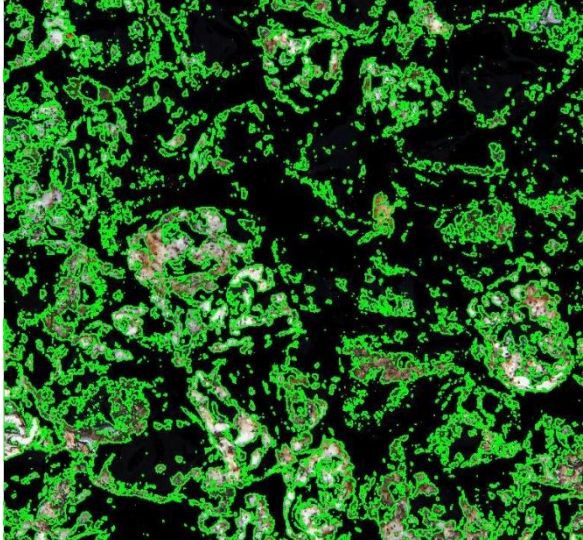
Název		
6_Zbraslav+PmB445-80_75_krakovaný		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
89,5	Satisfactory	12
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
90,0	Dobrá	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		






Název		
7_Skuteč+50_70		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
78,5	Unsatisfactory	22
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
40,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		



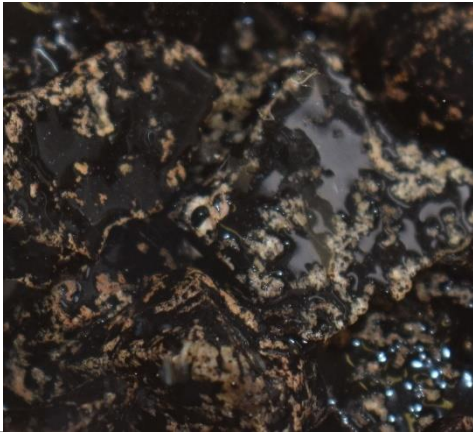
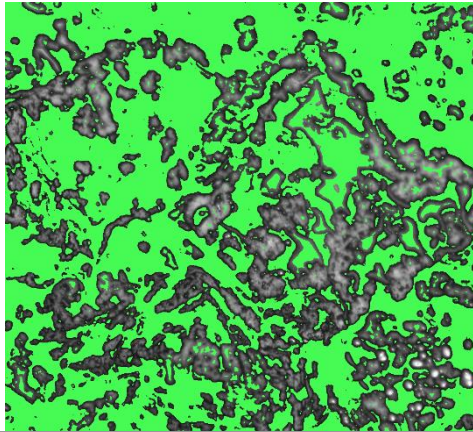
Název		
8_Skuteč+50_70Krakovany		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
72,4	Unsatisfactory	24
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
40,0	Nevyhovující	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		

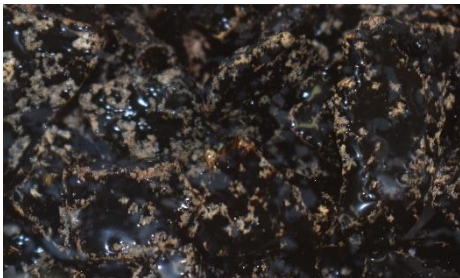
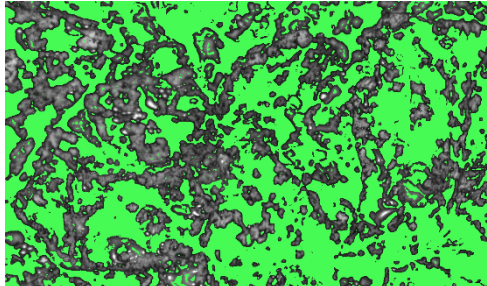




Název		
9_Skuteč+PmB45-80_75krakovaný		
Procento pokrytí dle Binderu [%]	Hodnocení dle normy	Nejjasnější odstín šedé
90,6	Good	16
Procento pokrytí dle vizuálního hodnocení [%]	Hodnocení dle normy	
90,0	Dobrá	
Původní obrázek	Upravený obrázek	Výstup Binder
		

## Příloha B – Výstupy zkušebních vzorků hodnocené s využitím softwaru PyPAIS

Name: aggregate - Brant 11/16; bitumen - paving grade 50/70		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 54.3	Assessment: Unsatisfactory	Date: 27. 9. 2017
Note:		

Name: aggregate - Brant 11/16; bitumen - paving grade 50/70 (cracked)		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 51.2	Assessment: Unsatisfactory	Date: 27. 9. 2017
Note:		


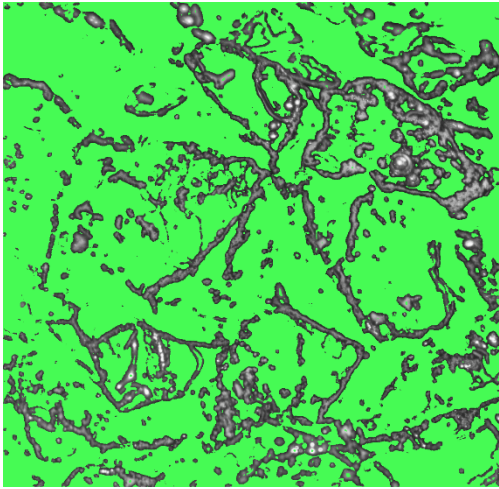


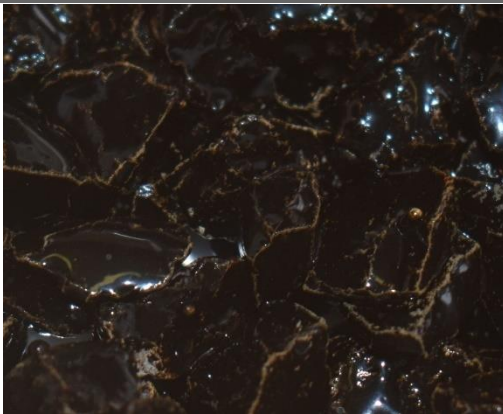
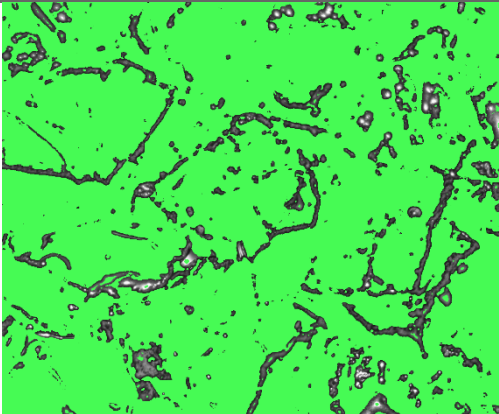
Name: aggregate - Brant 11/16; PMB 45/80-75 (cracked)		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 94.3	Assessment: Good	Date: 27. 9. 2017
Note:		

Name: aggregate - Zbraslav 8/11; bitumen - paving grade 50/70		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 82.5	Assessment: Satisfactory	Date: 27. 9. 2017
Note:		


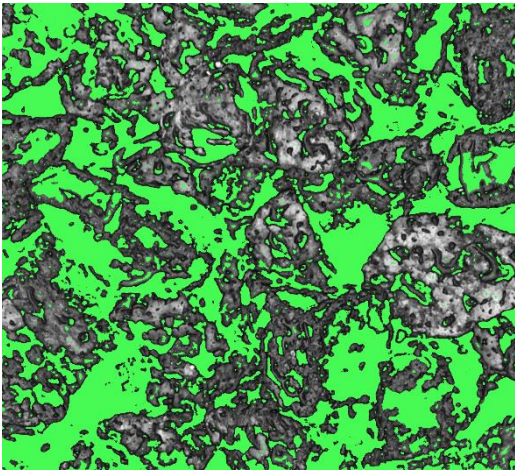



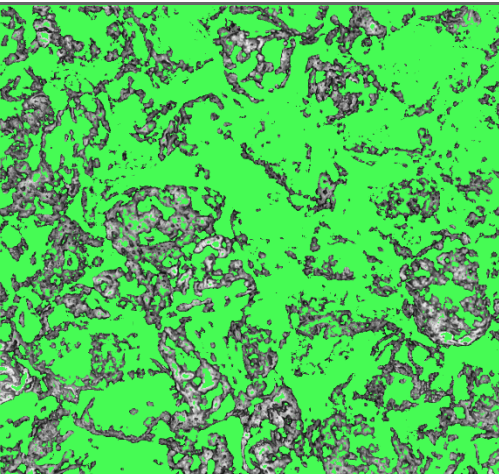


Name: aggregate - Zbraslav 8/11; bitumen - paving grade 50/70 (cracked)		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 71.8	Assessment: Unsatisfactory	Date: 27. 9. 2017
Note:		

Name: aggregate - Zbraslav 8/11; PMB 45/80-65 (cracked)		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 85.0	Assessment: Satisfactory	Date: 27. 9. 2017
Note:		

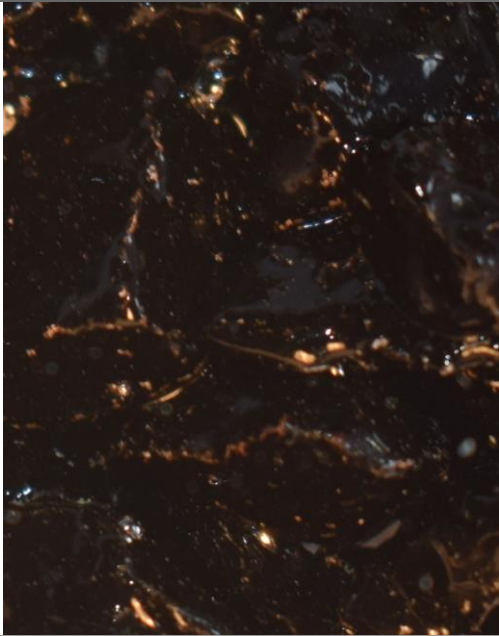
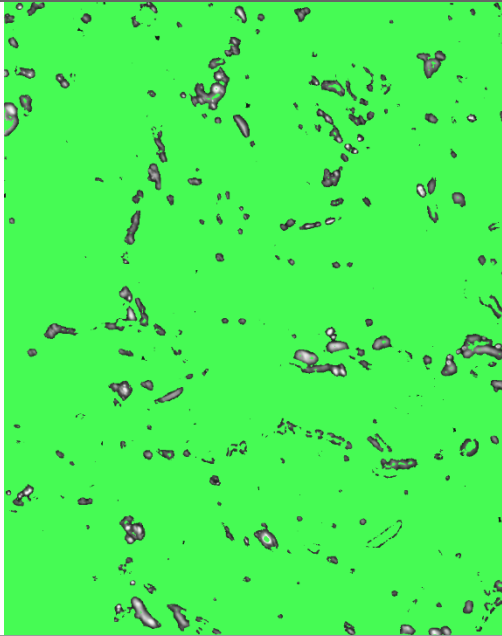


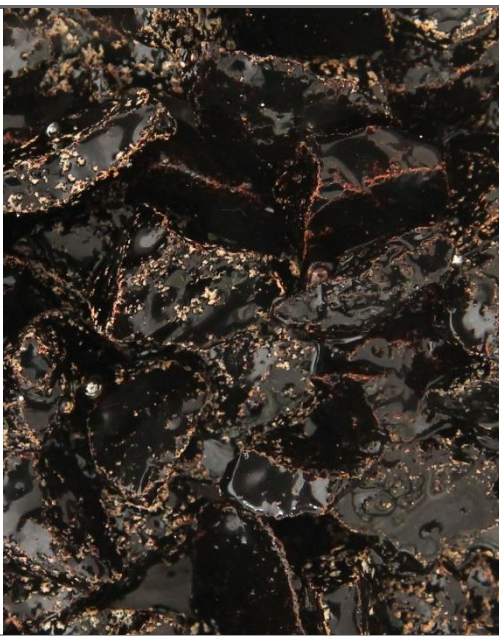
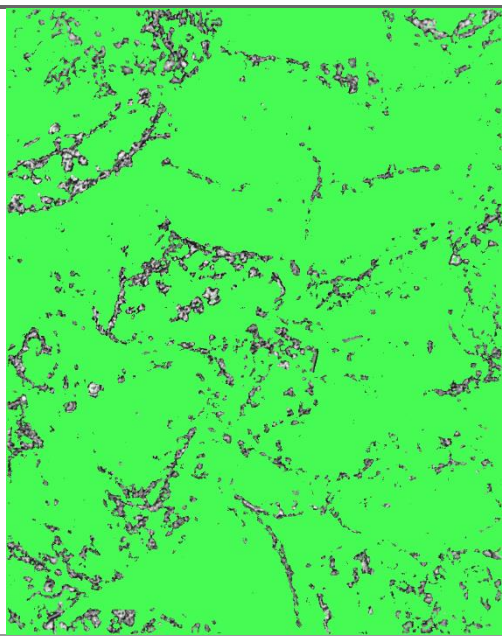
Name: aggregate - Skuteč 8/11; bitumen - paving grade 50/70		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 38.7	Assessment: Unsatisfactory	Date: 27. 9. 2017
Note:		

Name: aggregate - Skuteč 8/11; bitumen - paving grade 50/70 (cracked)		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 64.0	Assessment: Unsatisfactory	Date: 27. 9. 2017
Note:		



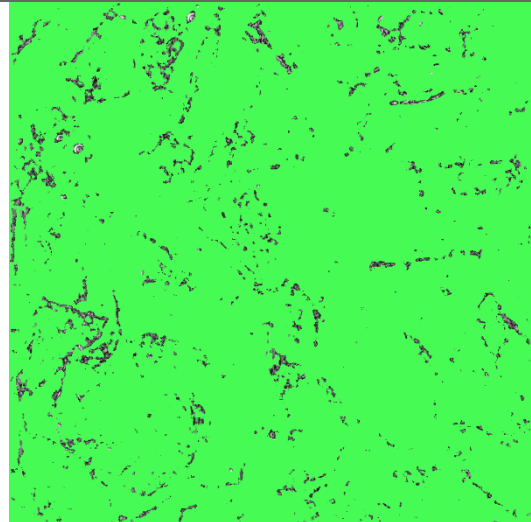


Name: aggregate - Skuteč 8/11; PMB 45/80-75 (cracked)		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 94.5	Assessment: Good	Date: 27. 9. 2017
Note:		

Name: aggregate - Brant 8/16; bitumen - paving grade 50/70 + TTO A (0,2% of the bitumen)		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 88.8	Assessment: Satisfactory	Date: 3. 10. 2017
Note:		



Name: aggregate - Brant 8/16; bitumen - paving grade 50/70 + AD 2 (0,2% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

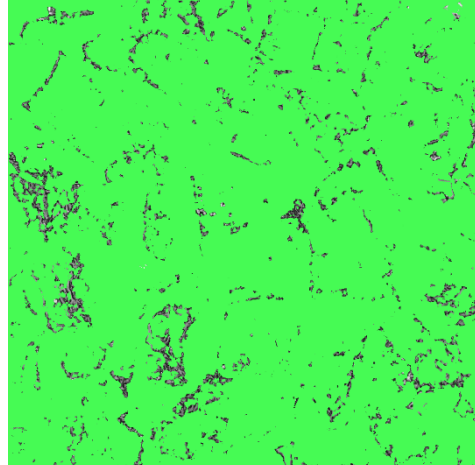
Assessment [%]: 95.4

Assessment: Good

Date: 3. 10. 2017

Note:

Name: aggregate - Brant 8/16; bitumen - paving grade 50/70 + AD 2 up (0,2% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

Assessment [%]: 93.6

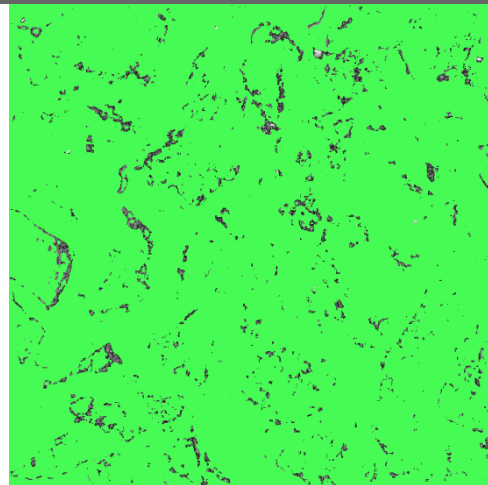
Assessment: Good

Date: 3. 10. 2017

Note:



Name: aggregate - Brant 8/16; bitumen - paving grade 50/70 + AD 2 up (0,4% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

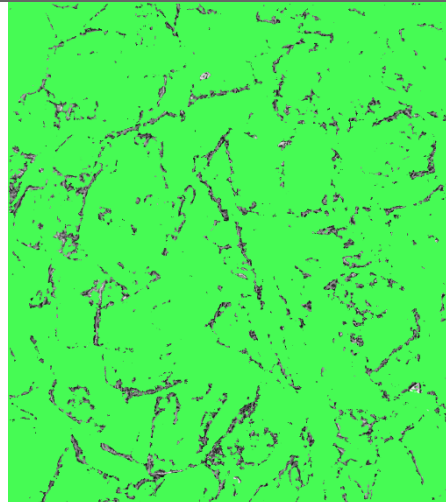
Assessment [%]: 95.3

Assessment: Good

Date: 3. 10. 2017

Note:

Name: aggregate - Zbraslav 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + TTO A (0,2% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

Assessment [%]: 92.5

Assessment: Good

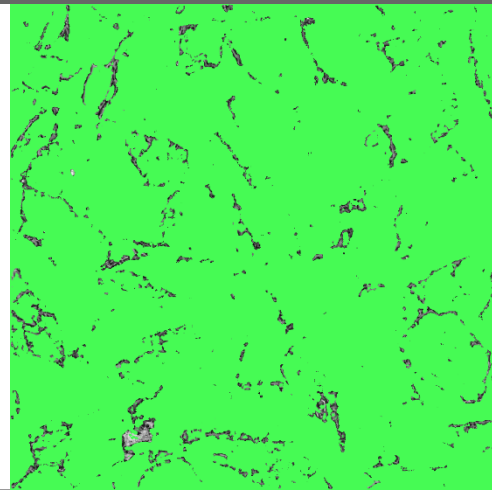
Date: 3. 10. 2017

Note:





Name: aggregate - Zbraslav 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + AD 2 (0,2% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

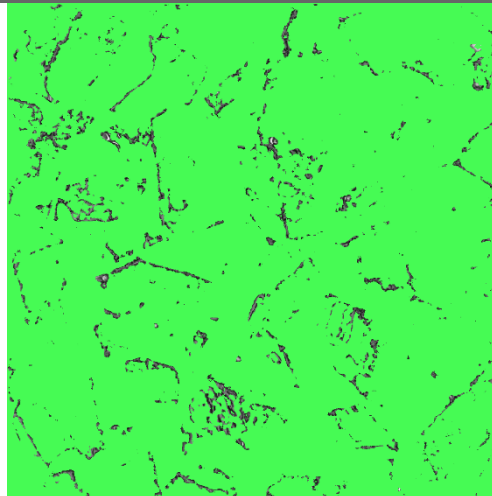
Assessment [%]: 94.9

Assessment: Good

Date: 3. 10. 2017

Note:

Name: aggregate - Zbraslav 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + AD 2 up (0,2% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

Assessment [%]: 95.1

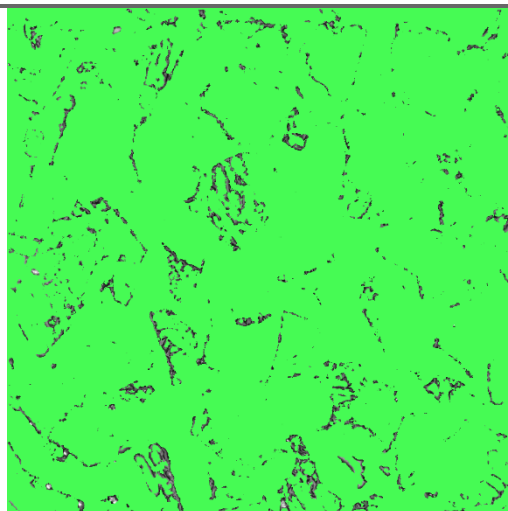
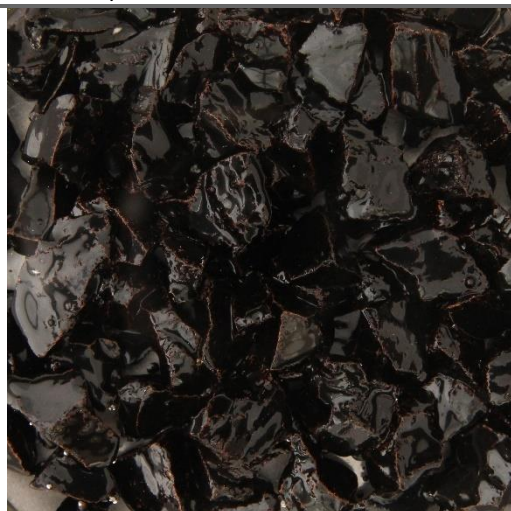
Assessment: Good

Date: 3. 10. 2017

Note:



Name: aggregate - Zbraslav 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + AD 2 up (0,4% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

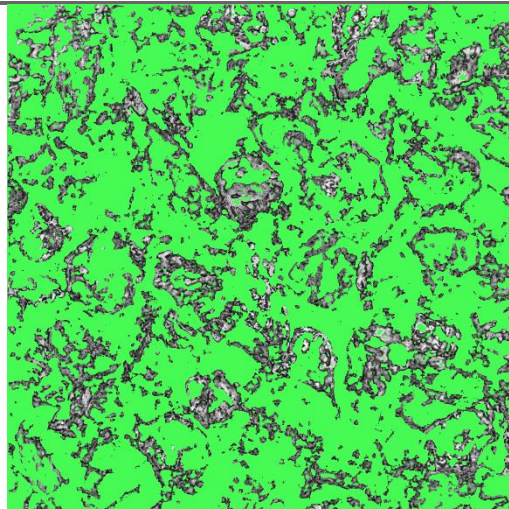
Assessment [%]: 95.0

Assessment: Good

Date: 3. 10. 2017

Note:

Name: aggregate - Skuteč 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + TTO A (0,2% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

Assessment [%]: 67.9

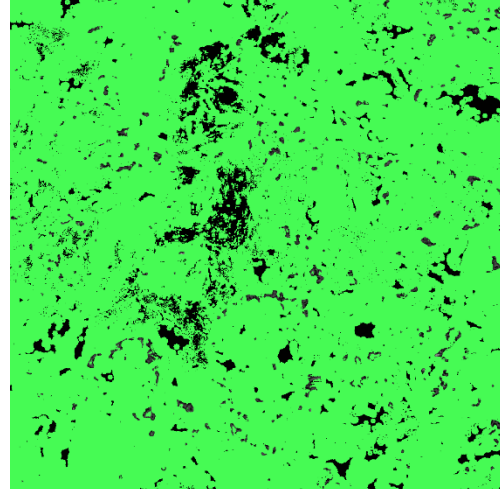
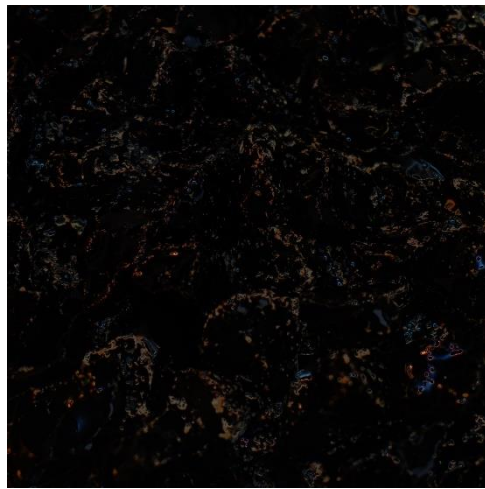
Assessment:  
Unsatisfactory

Date: 3. 10. 2017

Note:



Name: aggregate - Skuteč 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + AD 2 (0,2% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

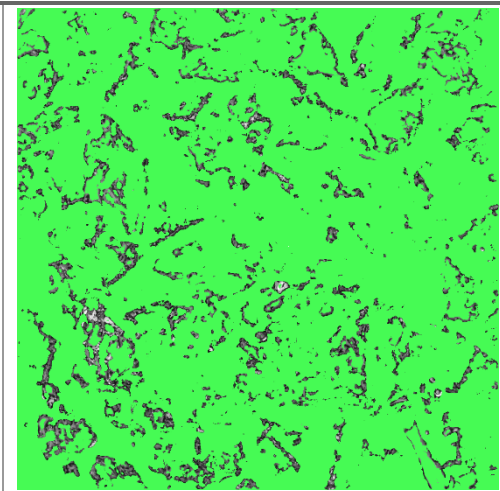
Assessment [%]: 91.1

Assessment: Good

Date: 3. 10. 2017

Note:

Name: aggregate - Skuteč 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + AD 2 up (0,2% of the bitumen)



Input photo.

Marked bitumen-coated areas.

Assessment [%]: 87.6

Assessment: Satisfactory

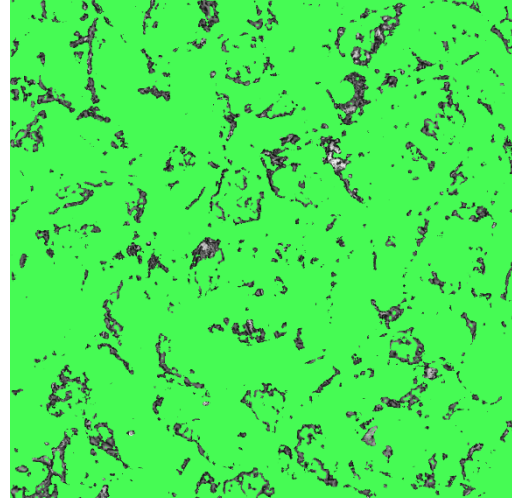
Date: 3. 10. 2017

Note:



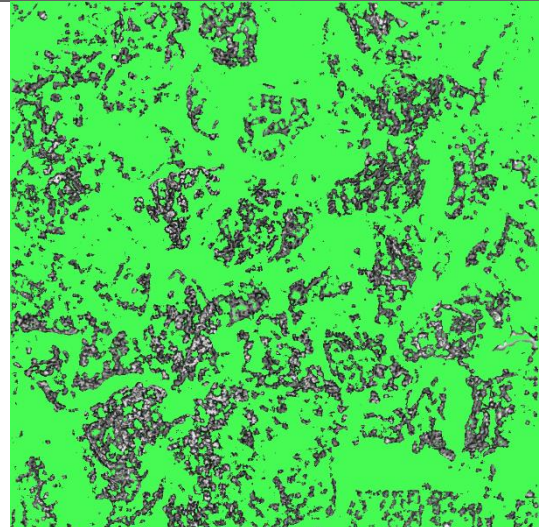


Name: aggregate - Skuteč 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + AD 2 up (0,4% of the bitumen)




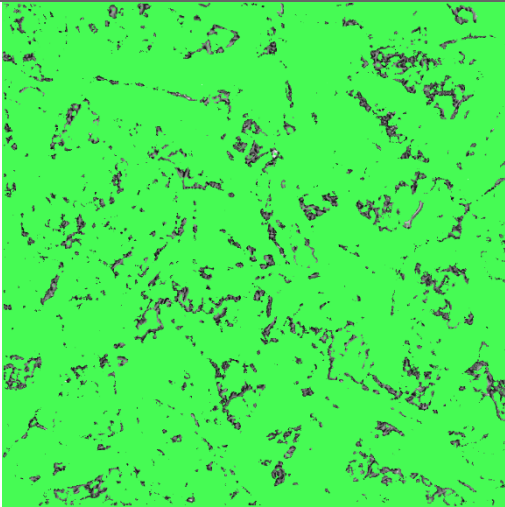
Input photo.		Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 89.6	Assessment: Satisfactory	Date: 3. 10. 2017	
Note:			

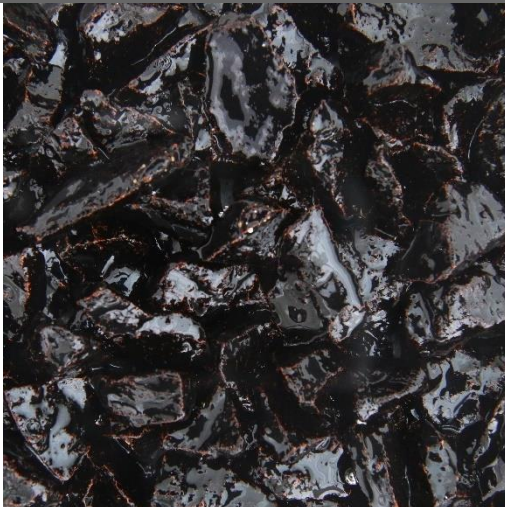
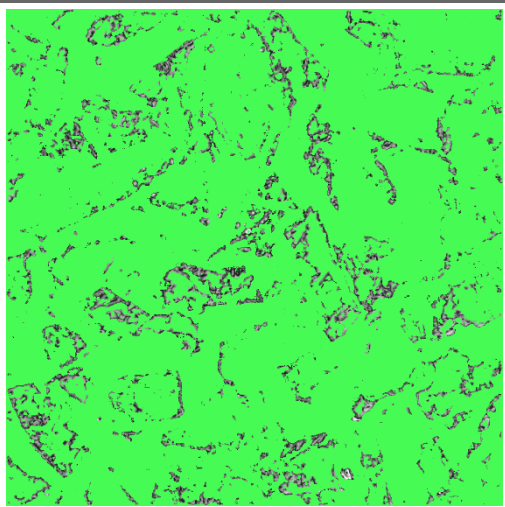
Name: aggregate - Brant 8/16; CRMB 25/55-60 V (Polička)



Input photo.		Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 72.9	Assessment: Unsatisfactory	Date: 11. 10. 2017	
Note:			


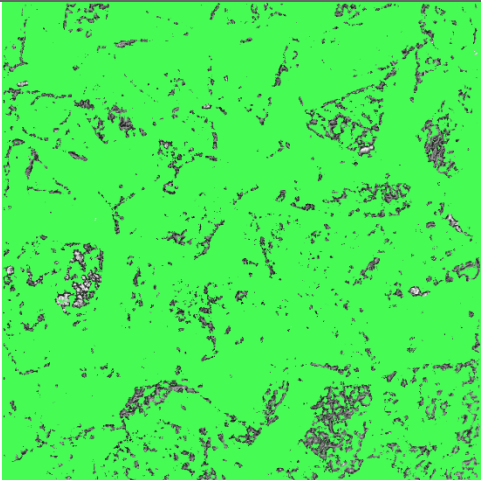



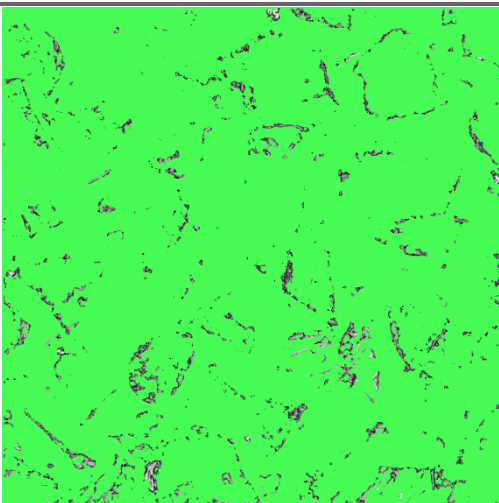
Name: aggregate - Brant 8/16; bitumen - paving grade 50/70 + 0,3% ValoJames		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 91.4	Assessment: Good	Date: 11. 10. 2017
Note:		

Name: aggregate - Brant 8/16; bitumen - paving grade 50/70 + 0,3% Adhere 65-00		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 89.5	Assessment: Satisfactory	Date: 11. 10. 2017
Note:		

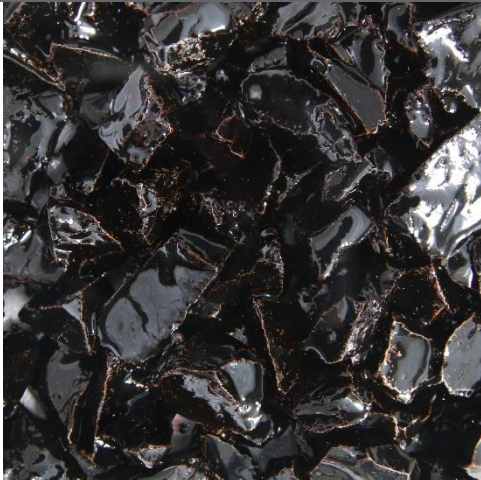
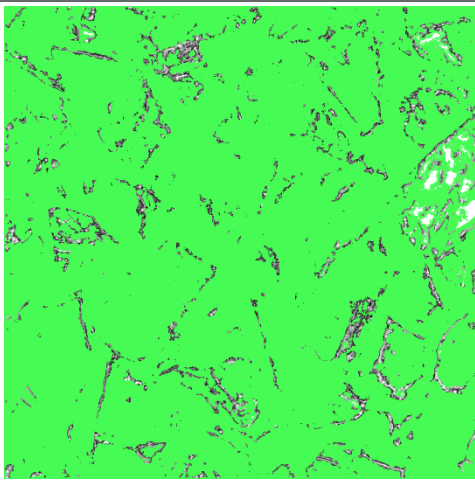



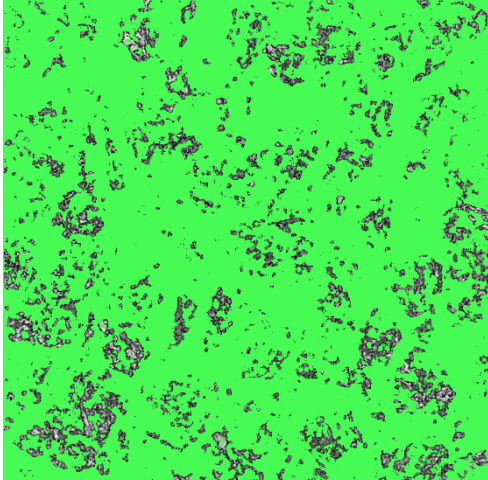


Name: aggregate - Zbraslav 8/11; CRMB 25/55-60 V (Polička)		
		
Input photo.		Marked bitumen-coated areas.
Assessment [%]: 90.5	Assessment: Good	Date: 11. 10. 2017
Note:		


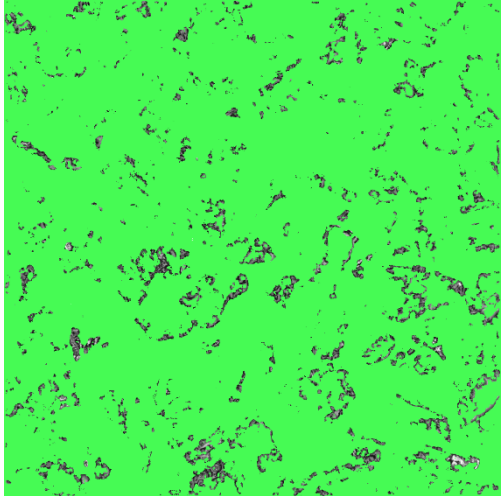
Name: aggregate - Zbraslav 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + 0,3% ValoJames		
		
Input photo.		Marked bitumen-coated areas.
Assessment [%]: 94.8	Assessment: Good	Date: 11. 10. 2017
Note:		


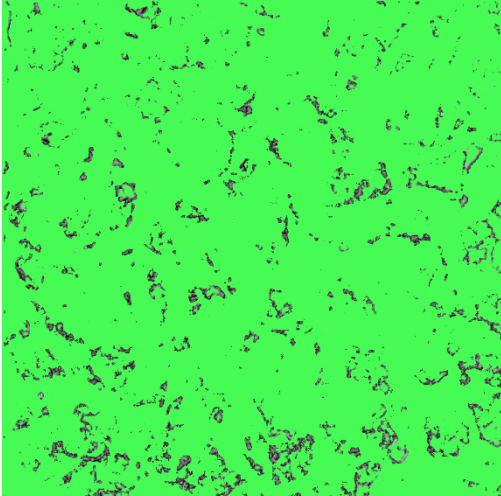


Name: aggregate - Zbraslav 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + 0,3% Adhere 65-00		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 91.6	Assessment: Good	Date: 11. 10. 2017
Note:		

Name: aggregate - Skuteč 8/11; CRMB 25/55-60 V (Polička)		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 84.8	Assessment: Satisfactory	Date: 11. 10. 2017
Note:		



Name: aggregate - Skuteč 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + 0,3% ValoJames		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 92.5	Assessment: Good	Date: 11. 10. 2017
Note:		

Name: aggregate - Skuteč 8/11; bitumen - paving grade 50/70 + 0,3% Adhere 65-00		
		
Input photo.	Marked bitumen-coated areas.	
Assessment [%]: 93.2	Assessment: Good	Date: 11. 10. 2017
Note:		



## Příloha C - Diagramy závislosti síly na přetvoření přímou tahovou zkouškou

