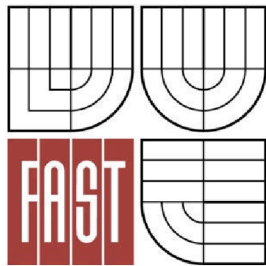




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

# **PŘILNAVOSTI ASFALTOVÝCH POJIV KE KAMENIVU** **ADHESION OF BITUMINOUS BINDERS TO AGGREGATE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Petr Vlk

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. MICHAL VARAUS

BRNO 2013



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student** Petr Vlk

**Název** Přílnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu

**Vedoucí bakalářské práce** doc. Dr. Ing. Michal Varaus

**Datum zadání bakalářské práce** 25. 3. 2013

**Datum odevzdání bakalářské práce** 24. 5. 2013

V Brně dne 25. 3. 2013

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

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





## **Podklady a literatura**

ČSN EN 12697-11 Asfaltové směsi - zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - část 11:  
Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem  
Odborné články z konferencí Asfaltové vozovky  
Informace z internetu

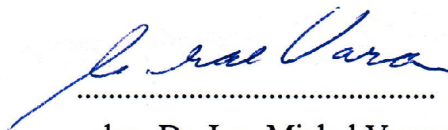
## **Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)**

Analyzovat problematiku přílnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu. Sestavit přehled zkušebních metod pro zkoušení přílnavosti. Shrnout zkušenosti a doporučení s používáním jednotlivých metod.

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



doc. Dr. Ing. Michal Varaus  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

V roce 2005 [1] byla představena revidovaná evropská norma 12697-11, která nabízí výběr ze tří odlišných metod zkoušení přilnavosti asfaltového pojiva na kamenivu. Statická metoda popsaná v části B má několik podobností s neplatnou švýcarskou normou pro stanovení afinity mezi asfaltem a kamenivem [2] a českou normou pro přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu ČSN 73 6161 [3]. Výsledkem této práce je porovnání statické metody uvedené v [3] a návrhu Švýcarského výzkumného projektu [4] o afinitě, který byl představen v říjnu 2010 na zasedání evropského výboru pro normalizaci (CEN) technické komise TC 227 pracovní skupiny WG1 v Oslu, se současnou revizí evropské normy 12697-11: 2005.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Stripping, adheze, asfalt, metoda Evropské normy, asfaltová směs, kamenivo, obalení

## **ABSTRACT**

In 2005 the revised European standard 12697-11:2005 [1] was introduced offering a choice of three different methods. The static method described in part B has some similarities with the replaced Swiss standard for the determination of the affinity between bitumen and aggregates [2] and Czech standard for adhesions of asphalt binder to aggregates ČSN 73 6161 [3]. The result of this study is to compare the static method described in the [3] and a draft changes by Swiss research project [4] with the current revision of the European Standard 12697-11: 2005.

## **KEYWORDS**

Stripping, adhesion, bitumen, European standard method, bitumen mixture, aggregate, coating

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

VLK, Petr. *Přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu*. Brno, 2013. 75 s., 4 s. příl.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Dále prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 23.5.2013



.....

podpis autora

Petr Vlk

## PODĚKOVÁNÍ

Autor vyjadřuje poděkování všem pracovníkům fakulty, zejména vedoucímu této bakalářské práce Doc. Dr. Ing. Michalu Varausovi za odborné konzultace, trpělivost a neustálou podporu v podobě dostatku informací pro tuto práci, zaměstnancům laboratoře ústavu PKO FAST VUT Brno za rady a pomoc při vyhodnocování výsledků. V neposlední řadě by chtěl autor poděkovat své rodině, přítelkyni a přátelům za jejich vytrvalou podporu.

V Brně dne 23.5.2013



.....  
podpis autora

Petr Vlk

# OBSAH

1. Úvod.....	10
2. Základní informace .....	11
2.1 Definice adheze.....	11
2.2 Základní vzájemná působení.....	12
2.2.1 Vzájemné elektrostatické působení mezi ionty.....	12
2.2.2 Elektrodynamická interakce pomocí van der Waalsovy síly .....	13
2.2.2.1 Interakce dipól – dipól .....	13
2.2.2.2 Dipól – indukovaný dipól.....	13
2.2.2.3 Indukovaný dipól – indukovaný dipól .....	14
2.2.3 Chemická vazba .....	14
2.2.3.1 Kovalentní vazba.....	14
2.2.3.2 Interakce donor – akceptor.....	14
2.2.3.3 Acidobazická interakce .....	14
2.3 Modely přilnavosti .....	15
2.3.1 Teorie tvorby obalení filmem.....	15
2.3.2 Teorie mechanická .....	17
2.3.3 Teorie elektrostatická .....	19
2.3.4 Chemická teorie .....	20
2.3.4.1 Funkční skupiny asfaltu .....	21
2.3.4.2 Funkční skupiny povrchu kameniva .....	22
2.3.4.3 Interakce asfalt – kamenivo .....	24
2.3.5 Termodynamická teorie .....	26
2.4 Poruchové modely adheze .....	29
2.4.1 Model pórového tlaku .....	29
2.4.2 Model výtlaku .....	30
2.4.3 Model infiltrace.....	30
2.4.4 Model porušení asfaltového filmu .....	30
2.5 Metody měření k určení adhezních vlastností .....	30
2.5.1 Testy přilnavosti kameniva obaleného asfaltem a zkušebních vzorků .....	30
3. Zkoušky přilnavosti a odolnosti asfaltových směsí vůči účinkům vody.....	34



3.1	Základní principy zkušebních metod .....	35
4.	Charakteristiky použitých materiálů .....	38
4.1	Kamenivo .....	38
4.2	Asfalt .....	39
5.	Popisy jednotlivých metod .....	40
5.1	ČSN 73 6161: Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu .....	40
5.1.1	Předmět .....	40
5.1.2	Zkušební zařízení a pomůcky .....	40
5.1.3	Příprava zkoušky .....	42
5.1.4	Postup zkoušky se suchým kamenivem .....	43
5.1.5	Postup zkoušky s vlhkým kamenivem .....	44
5.1.6	Vyhodnocení přilnavosti .....	45
5.2	EN 12697-11: 2005 Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem .....	46
5.2.1	Předmět normy .....	46
5.2.2	Podstata zkoušky .....	47
5.2.3	Statická metoda .....	49
5.2.3.1	Zkušební zařízení a pomůcky .....	49
5.2.3.2	Postup .....	49
5.2.3.3	Příprava zkoušky .....	49
5.2.3.4	Postup zkoušky .....	50
5.2.3.5	Vyhodnocení přilnavosti .....	51
5.3	Švýcarská metoda .....	51
5.3.1	Předmět .....	51
5.3.2	Metoda rotující lahve .....	51
5.3.2.1	Navrhované změny .....	51
5.3.3	Statická metoda .....	53
5.3.3.1	Navrhované změny .....	53
5.3.3.2	Vyhodnocení statické zkoušky podle EN 12697-11 část B .....	53
5.3.3.3	Změny v hodnocení u metody v části B .....	55
5.3.3.4	Ověření platnosti metody B s různými typy pojiva a kameniva .....	58
5.3.3.5	Závěry .....	60
6.	Popis prováděných zkoušek s uvedením výsledků .....	61

6.1	ČSN 73 6161: Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu .....	61
6.1.1	Popis provedené zkoušky .....	61
6.1.2	Vyhodnocení zkoušky se suchým kamenivem .....	61
6.1.3	Výsledky prováděné zkoušky .....	62
6.2	EN 12697-11: 2005: Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem .....	63
6.2.1	Popis provedené zkoušky .....	63
6.2.2	Vyhodnocení zkoušky .....	63
6.2.3	Výsledky prováděné zkoušky .....	64
6.3	Návrh změny podle švýcarského návrhu .....	64
6.3.1	Popis provedené zkoušky .....	64
6.3.2	Vyhodnocení zkoušky .....	65
6.3.3	Výsledky prováděné zkoušky .....	67
7.	Závěr .....	68
8.	Seznam použité literatury .....	69
9.	Seznam obrázků .....	73
10.	Seznam tabulek .....	73
11.	Seznam zkratk .....	75
	Příloha A .....	76
	Příloha B: .....	77
	Příloha C: .....	78

# 1. ÚVOD

Stripping je hlavním problémem v silniční výstavbě a zejména v zemích s vlhkým klimatem. K jevu strippingu přispívají různé mechanismy [5-7], ale jedním z jejich nejdůležitějších parametrů je přilnavost mezi kamenivem a pojivem. Je proto potřeba rozvíjet specifické zkušební metody pro její posuzování. Ve studii citlivosti na vodu Aireyho a Choie [8] jsou popsány a diskutovány nejpoužívanější zkušební metody. Zkoušky se provádí buď na kamenivu obaleném asfaltovým pojivem, nebo na zpevněných asfaltových tělesech. Tato tělesa jsou vystavena účinkům vody a následnému porovnání temperovaných a netemperovaných vzorků pomocí standardních mechanických zkoušek jako jsou například Duriez, Marshall nebo nepřímá tahová zkouška. Naproti tomu u asfaltové směsi míru citlivosti na vodu nelze oddělit od jiných vlivů. Těmito vlivy může být například obsah dutin nebo rozdílné frakce kameniva, které mají významný vliv na výsledek zkoušky.

V mnoha zemích jsou upřednostňovány zkoušky ztráty obalení kameniva asfaltem, obecně označované jako zkoušky ponořením do ohřáté vody. Normalizací asfaltových produktů byla pověřena technická komise TC 336 Evropského výboru pro normalizaci (CEN) s působností od roku 2002. Společně s ní je za vývoj norem asfaltových směsí odpovědná technická komise TC 227 „Silniční materiály“, která posuzuje zkušební postupy, které jsou v současné době používány v různých členských státech. Pracovní skupina WG 1 technické komise TC 227 má za úkol harmonizovat různé stávající národní normy, které se zabývají přilnavostí. V roce 2003 byla připravena první verze evropské normy EN 12697-11: Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem. Revidovaná verze z roku 2005 obsahuje tři různé metody, část A, B a C [1]. Každá země si musí vybrat jednu z těchto metod a aplikovat ji do svých národních norem a požadavků, považují-li přilnavost za problém.

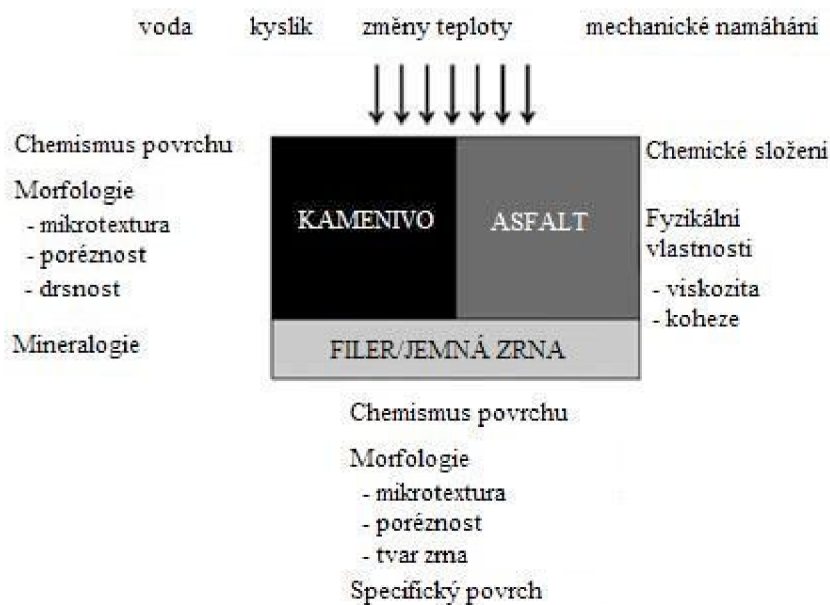
Švýcarsko zahájilo výzkumný projekt, který hodnotí různé metody a porovnává je s původními švýcarskými normami [2]. Po vyhodnocení těchto tří různých metod nebyla pro Švýcarsko žádná z nich považována za vhodnou [4]. Tato práce se zabývá především zlepšením zkušební metody popsané v části B evropské normy [1], která je svým postupem nejbliže k platné české normě ČSN 73 6161 [3].

## 2. ZÁKLADNÍ INFORMACE

### 2.1 Definice adheze

Funkce asfaltového povrchu vozovky vychází ze vzájemného působení koheze (soudržnosti) a adheze (přilnavosti) uvnitř systému asfalt – kamenivo. V minulosti pracovníci na silnicích testovali kvalitu asfaltu žvýkáním, a jeho lepivost byla posuzována podle toho, kolik se ho zachytilo v zubech [10]. Tato levná zkušební metoda je již zastaralá. V termodynamice platí definice, že adheze je energie, která se uvolňuje, pokud jsou ve styku dva různé materiály, např. pevný a kapalný, a dochází k interakci mezi jejich povrchy. Další definice odkazuje na to, že adhezni energie je síla, která musí být vynaložena k oddělení sousedních ploch dvou různých fází [9].

Na obrázku 2-1 [9] jsou souhrnně znázorněny ovlivňující parametry a vzájemná působení vyskytující se při povlečení kameniva asfaltem. Asfaltová směs se skládá hlavně z hrubého a jemného kameniva, jemných částic (fileru) a asfaltu. Vzájemné působení jednotlivých komponent v tomto systému je závislé na mnoha faktorech. Jedním z nich je chemické složení asfaltu, na němž závisí jeho lepivost. Fyzikální vlastnosti, jako je viskozita a koheze ovlivňují smáčivost a stabilitu výsledného asfaltového filmu. Vedle povrchových chemických vlastností hrubého kameniva a jemných částic jsou důležitými faktory jejich tvar, mikrotextura a pórovitost, které určují přilnavost asfaltového filmu na povrchu kameniva. Jedná se zejména o popis systému, kdy jemné částice kameniva mohou za určitých podmínek ovlivnit složení asfaltu. Přestože je hmotnost malých frakcí kameniva nízká v poměru k velkým, 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 [9].



**Obr. 2-1:** Schéma adheze v asfaltu [9]

Silná interakce mezi asfaltem a kamenivem je nezbytným předpokladem pro dobrou přilnavost. Trvanlivost povlaku však závisí na vnějších faktorech, jako je vystavení vlivům vody, teplotě a mechanickému namáhání.

Z chemicko-fyzikálního hlediska je jev adheze důsledkem vzájemného elektrostatického působení mezi ionty (tzv. Van der Waalsovy interakce) a kovalentními chemickými vazbami [9]. Jednotlivé interakce a modely založené na adhezi jsou stručně popsány v následujícím oddílu.

## 2.2 Základní vzájemná působení

### 2.2.1 Vzájemné elektrostatické působení mezi ionty

Základem pro pochopení mezimolekulárních sil jsou Coulombovy síly. Je to elektrostatická síla, která se vyskytuje mezi dvěma odlišně nabitými částicemi. Elektrostatické síly hrají zásadní roli při tvorbě iontových vazeb. Ideální iontová vazba vzniká, když pozitivní ionty a záporné ionty, v souladu s Coulombovým zákonem, vstoupí do interakce. V tomto procesu získá každá dvojice iontů elektrostatickou stabilizační energii. Elektrostatické síly iontové vazby jsou velmi silně vzájemně

přitahovány. Energie potřebná k narušení těchto vazeb je obvykle mezi 600 až 1000 kJ/Mol [9].

### 2.2.2 *Elektrodynamická interakce pomocí van der Waalsovy síly*

Van der Waalsovy<sup>1</sup> síly jsou součtem tří různých sil, které jsou založeny na odlišné dipolární interakci [11]:

- a) Dipól (permanentní) – Dipól (permanentní)  
(Keesom-Kraft),
- b) Dipól (permanentní) – Dipól (indukovaný)  
(Debye-Kraft),
- c) Dipól (indukovaný) – Dipól (indukovaný)  
(London-Kraft).

Obvykle dominují London-Kraftovy síly nad Keesom- a Debyeovými silami. Vazby, které jsou tvořeny elektrodynamickými silami, jsou ve srovnání s iontovými nebo kovalentními silami slabé a obvykle mají sílu menší než 40 kJ/Mol [9].

#### 2.2.2.1 *Interakce dipól – dipól*

Podstatou je elektrostatické přitahování opačně nabitých pólů polárních molekul. Elektronegativita vyjadřuje schopnost atomu přitahovat elektrony a tvořit s nimi vazbu. Molekulární dipól existuje tehdy, když atom s vysokou elektronegativitou ovlivňuje rozdělení elektronů, které mají vliv na částečné oddělení nábojů. Velikost virtuálních nábojů a jejich vzájemná vzdálenost charakterizují dipólový moment. Pokud jsou dva dipóly schopny interakce, pak jejich nabitě póly jsou vzájemně opačně orientovány [9].

#### 2.2.2.2 *Dipól – indukovaný dipól*

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 případně indukovanými dipóly [9].

---

<sup>1</sup> Johannes Diderik van der Waals - holandský fyzik, držitel Nobelovy ceny za fyziku za práci na stavové rovnici plynů a tekutin. Zdroj: wikipedia.cz



### 2.2.2.3 *Indukovaný dipól – indukovaný dipól*

Dělení elektronů na nepolární molekuly není jednotná po celou dobu. Současná nerovnováha v rozložení elektronů vede k tvorbě dočasného dipólového momentu. Tento proces může u dalších nepolárních molekul vyvolat indukci dipólových momentů. Tento typ interakce je velmi důležitý pro pochopení adheze. Může se též nazývat disperzní interakcí [9].

## 2.2.3 *Chemická vazba*

### 2.2.3.1 *Kovalentní vazba*

U tohoto typu interakce je u každého spojení atomu a elektronu umožněno vytvořit novou molekulu. Kovalentní vazby a iontové vazby jsou v silné interakci vazební energií řádově 700 kJ/Mol [9].

### 2.2.3.2 *Interakce donor – akceptor*

Charakter těchto sloučenin je určen vzájemnými kovalentními a iontovými vazbami. Vzniklá vazba se nazývá vazbou koordinační. Na rozdíl od iontových a kovalentních vazeb, které jsou tvořeny dvěma atomy, jsou koordinační vazby tvořeny mezi dvěma molekulami nebo dvěma ionty. Přitom musí tzv. dárcovská molekula (donor) mít osamocený pár elektronů. Molekula přijmová (akceptor) musí mít nedostatek elektronů a dárcovské molekuly (donory) musí vstoupit do interakce s osamoceným párem elektronů [9].

### 2.2.3.3 *Acidobazická interakce*

Brönstedova<sup>2</sup> kyselina je definována jako látka, která může uvolnit protony a zároveň zásaditá látka, která má tendenci elektrony přijmout. Tato teorie platí pro složky obsahující vodík. Podle Lewisovy<sup>3</sup> teorie je kyselina příjemcem (akceptorem) páru elektronů a zásada je dárce (donorem) páru elektronů [9].

---

<sup>2</sup> Johannes Nicolaus Brønsted - dánský fyzik, zakladatel teorie, kdy se látky chovají jako kyseliny jen v přítomnosti zásady a naopak. Zdroj: wikipedia.cz

<sup>3</sup> Gilbert Newton Lewis – americký fyzikální chemik, spoluvýtvůrce teorie kovalentní vazby a teorie kyselin a zásad. Zdroj: fyzici.wz.cz

Zvláštním případem je vodíková vazba. Jedná se o molekulu s osamělým párem aktivních elektronů ve vzájemné interakci s atomem vodíku, který je již kovalentně vázán na další molekuly. Atom vodíku působí jako spojovací článek mezi dvěma elektronegativními atomy [9].

## 2.3 Modely přilnavosti

Existuje různá vysvětlení účinnosti adheze. Vhodnost modelu závisí na konkrétním systému, který má být popsán. V praxi se obvykle skládá z různých typů interakcí. Z tohoto důvodu není použití jednoho modelu dostatečné pro popis reálných systémů. Tabulka 2-1 [9] uvádí přehled aktuálně používaných modelů a jejich základních interakcí.

model	interakce
Tvorba obalového filmu	vrstvení
Mechanický model	zablokování
Elektrostatický model	potenciál
Chemický model	kovalentní a iontové vazby
Termodynamický model	povrchová energie

**Tab. 2-1:** Adhezní modely [9]

### 2.3.1 Teorie tvorby obalení filmem

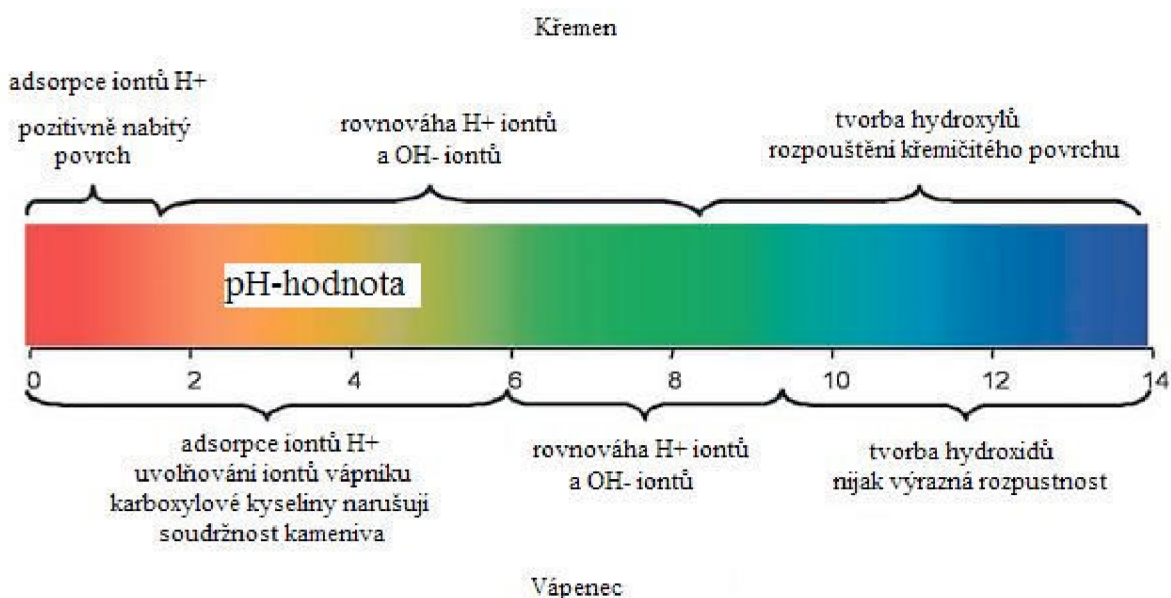
Tato teorie je známa pod názvem "teorie slabě spojených vrstev". Je obecně známo, že poruchy vazby mezi adhezivem (lepidlem) a podkladem, jsou způsobeny mezivrstvou s nízkou soudržností. Tyto mezivrstvy byly zjištěny prostřednictvím řady prací [10]. Znečištění podkladu (kameniva) sloučeninami, které mají nízkou molekulovou hmotnost, jako jsou například organické sloučeniny nebo voda, jsou častou příčinou pro vznik slabě spojených vrstev [12]. Prašný povrch může bránit efektivnímu smáčení a obalení kameniva asfaltem, protože prach, přítomný na povrchu kameniva, je schopen vázat vzduch. Ten je přítomen i během mísení a oslabuje přilnavost asfaltu na kamenivu [9].

Jsou případy, kdy systém asfalt – kamenivo selže na straně kameniva. Kamenivo může za přítomnosti vody reagovat, což má za následek rovněž tvorbu slabé lepicí vrstvy.

Tvorba vrstev je závislá na hodnotě pH obsažené vody. Při hodnotě  $\text{pH} < 6$  může dojít k rozpuštění povrchové vrstvy vápence. Naproti tomu, při  $\text{pH} > 8$  dojde k rozpuštění silikátových minerálů (obr. 2-2) [9]. V obou případech se jedná o porušení soudržnosti během fáze kameniva [12] [9].

Nepříjemnou vlastností asfaltů jsou také jejich změny v čase. Asfalt stárne, obsažené vysokomolekulární uhlovodíky se účinkem teploty, kyslíku, ultrafialového záření a také odpařováním poměrně nízkomolekulárních uhlovodíků (olejů) mění ve prospěch hustších složek. Asfalt se již při výrobě asfaltové směsi, pokládce a následně užíváním mění v hustší a tvrdší. Ztvrdnutí asfaltu se dá zjistit zkouškou penetrace asfaltu získaného extrakcí pojiva a vakuovou destilací. Tak se stává, že na asfaltových vozovkách se po čase objevují mrazové trhliny podobné smršťovacím trhlinám vrstev s obsahem cementu jako pojiva. Trhliny se objeví dříve ve vrstvách, do nichž má přístup vzduch, tedy ve vrstvách s vyšší mezerovitostí a tedy i pórovitostí [13].

Teoreticky je možné, že slabě vázané vrstvy mohou být tvořeny, pokud kamenivo funguje jako katalyzátor oxidačního stárnutí. Pomocí inverzní plynové chromatografie [14], byl tento účinek potvrzen.



**Obr. 2-2:** Typické povrchové chemické reakce křemene a vápence v různém pH prostředí [9]

### 2.3.2 *Teorie mechanická*

Mechanická teorie vysvětluje přílnavost pomocí modelových vztahů mezi kamenivem a asfaltem. Zkapalněný asfalt proniká do pórů a trhlin v povrchu kameniva. Během ochlazování pojiva dochází k zakotvení obou látek do sebe. U této teorie je třeba uvést, že velká plocha kameniva vede ke zvětšení kontaktní plochy. Při zjednodušení mechanické teorie je předpokladem, že hladký povrch kameniva má horší přílnavost než kamenivo s povrchem drsným.

Přílnavost asfaltu ke kamenivu zlepšují následující mechanické vlivy [9]:

a) Princip zablokování:

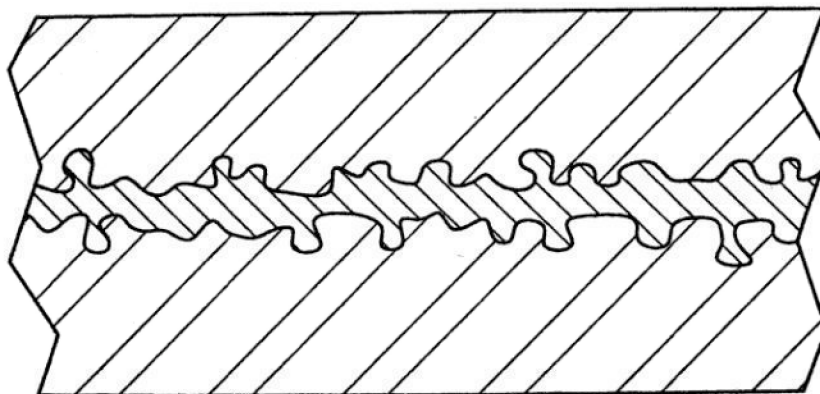
Asfalt proniká do pórů kameniva a vrstvy jsou pak dokonale fyzicky spojeny. Jakýkoliv smykový pohyb mezi oběma fázemi je omezen (obr. 2-3) [15].

b) Rozdělení napětí:

Napětí v materiálu může být odvozeno od asfaltu, který má visko – elastické vlastnosti. Zvýšená drsnost proto podporuje rozdělení napětí, které může nastat v oblastech vznikajících trhlin.

c) Nárůst specifické plochy:

Vysoká drsnost poukazuje na větší fyzickou kontaktní plochu. Síla vzájemného působení je tedy přímo úměrná této specifické ploše.

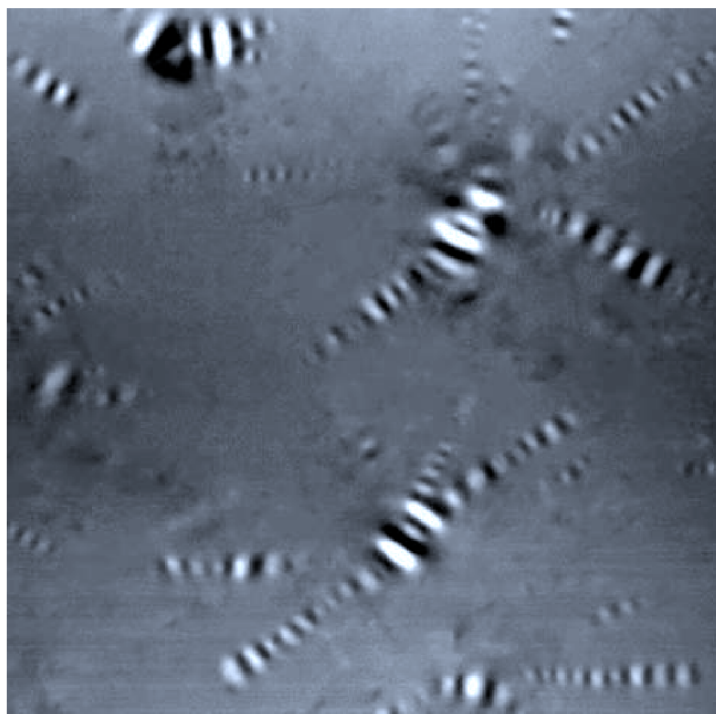


**Obr. 2-3:** Schematické znázornění mechanického zablokování [15]

Z praxe je známo, že kamenivo s porézním a mírně hrubým povrchem umožňuje lepší přilnavost. Pro dobrou schopnost povlečení a smočení kameniva asfaltem je též určující jeho textura. To umožňuje hladké povrchy potáhnout lehčeji než povrchy hrubé. Smáčivost a vyplnění pórů závisí na viskozitě asfaltu a chemismu povrchu kameniva a asfaltu.

Ve studii [16] bylo zjištěno, že jemné částice kameniva, které mají velký specifický povrch, určují počáteční odolnost proti malým smykovým silám. Toho je docíleno za předpokladu, že je použito hrubší kamenivo s vyšší smykovou odolností.

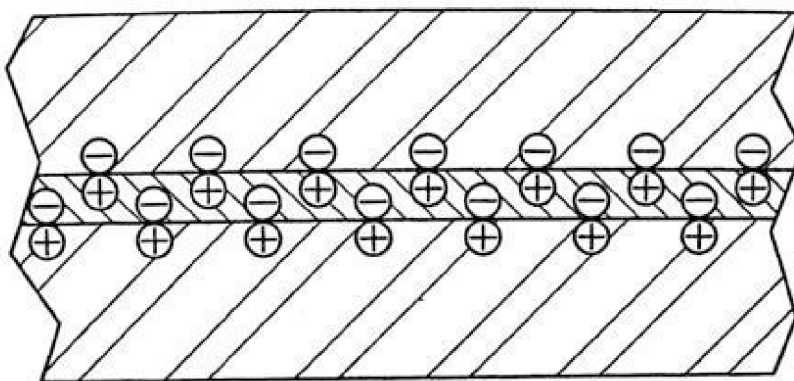
Mechanická teorie je použitelná nejen na makroskopické úrovni, ale také v mikroskopickém měřítku. Aplikací mikroskopie atomárních sil mohou být na povrchu asfaltu pozorovány dvě odlišné struktury (obr. 2-4 [17]). Je uváděno, že se v této struktuře podobné „včelám“ shromažďují asfalteny a různé formy prvků asfaltu, které jsou v důsledku rozdílu teplot vytěšňovány na povrch z vnitřku asfaltové fáze. Předpokládá se, že tyto struktury mají důležitou funkci pro přilnavost asfaltu ke kamenivu [9].



**Obr. 2-4:** Snímek asfaltu pořízený metodou mikroskopie atomárních sil, rozměr snímku (15  $\mu\text{m}$  x 15  $\mu\text{m}$ ) [17]

### 2.3.3 Teorie elektrostatická

Pevné plochy mohou mít elektropozitivní nebo elektronegativní vlastnosti (obr. 2-5 [15]). Dvě plochy, jako jsou například asfalt a kamenivo, přijdou do styku na velmi malou vzdálenost, aby mohly elektrony přecházet z jedné vrstvy do druhé, a dochází tak k vytvoření elektrické dvojvrstvy (podobně jako kondenzátor). K selhání adheze u tohoto systému dojde tehdy, pokud se zvětší náboj opačně nabitých částic na takovou mez, kdy dojde k výboji. Adhezní interakce proto může být přisuzována energii, která je potřebná k překonání Coulombovy přitažlivosti mezi opačně nabitými povrchy [9] [15].



**Obr. 2-5:** Elektropozitivní a elektronegativní povrchové vlastnosti dvojvrstev [15]

Většina plochy kameniva je v důsledku přítomnosti vody nabitá. To je způsobeno díky vysokému dipólovému momentu vody. Vrstva povrchového náboje spolu s odpovídajícími opačně nabitými ionty (protiionty) jsou označeny jako elektrická dvojvrstva [9].

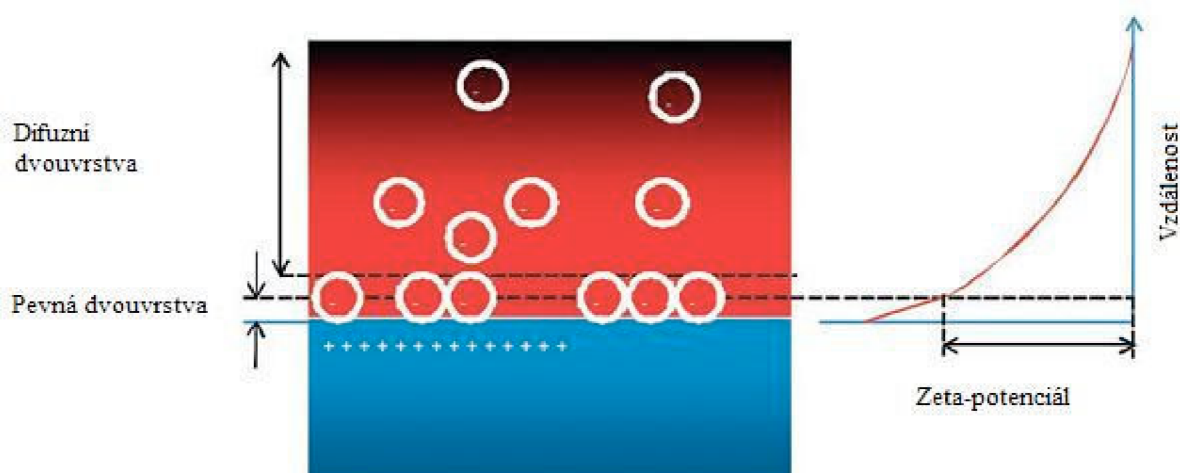
Protiionty mohou být přímo vázány na povrchu kameniva, aby se neutralizoval povrchový náboj pro vytvoření molekulární vrstvy, která se označuje jako vrstva Helmholtzova<sup>4</sup>. Realističtější model podle Sterna<sup>5</sup> ukazuje, že existuje difúzní vrstva, kde v důsledku tepelných výkyvů dochází k vytlačování protiiontů směrem od tuhého povrchu (viz obr. 2-6 [9]) [9] [18].

<sup>4</sup> Hermann von Helmholtz – německý matematik, fyzik, lékař, upřesnil zákon zachování energie. Zdroj: wikipedia.cz

<sup>5</sup> Otto Stern – německý fyzik, držitel Nobelovy ceny za fyziku za objev prostorového kvantování magnetického momentu atomu. Zdroj: wikipedia.cz



Stern zkombinoval oba různé modely a dvojvrstvy ve dvou úrovních. Vnitřní vrstva se skládá z jedné nebo více vrstev iontů a molekul, které jsou vázány na silně nabitě ploše, a proto jsou nepohyblivé. Naproti tomu difuzní vrstva se skládá z pohyblivých iontů.



**Obr. 2-6:** Elektrostatický model podle Sterna [9]

V důsledku toho existuje smyková plocha, která se nenachází bezprostředně na hranici plochy, ale v určité vzdálenosti od ní. Elektrický potenciál v této vzdálenosti se označuje jako zeta – potenciál, a může být měřen elektrokinetickými metodami [8]. Model tedy dokazuje, že i na „suchém“ povrchu kameniva jsou přítomny molekuly vody [9] [18].

Experimentálně bylo již v roce 1958 prokázáno, že i na čerstvém povrchu křemene je absorbována voda o síle několika molekulárních vrstev [19]. Při běžné teplotě směsi zůstává na povrchu kameniva alespoň jedna monomolekulární vrstva vody. Úplné odstranění vrstvy molekul vody by vyžadovalo teplotu vyšší než 1000°C. To jasně poukazuje na potřebu pečlivého vysušení kameniva při výrobě asfaltové směsi [9].

### 2.3.4 Chemická teorie [9]

Molekuly obsažené v asfaltu se skládají z dlouhých uhlíkových řetězců a kruhů, které jsou nasyceny vodíkem. Proto mají tyto molekuly nepolární charakter. Jedná se o nasycené uhlovodíky s voskovými podíly, které jsou označovány jako alkany, parafíny

nebo také alifatické (organické) sloučeniny. Nepochopitelný 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 asfaltiny představují hlavně polární složky asfaltu. Těmto složkám odpovídají molekuly s vysokou molekulovou hmotností označované jako makromolekuly.

Obalením polárních center na kamenivu nepolárními uhlovodíky může být aktivita těchto center značně snížena. 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 od povrchu kameniva.

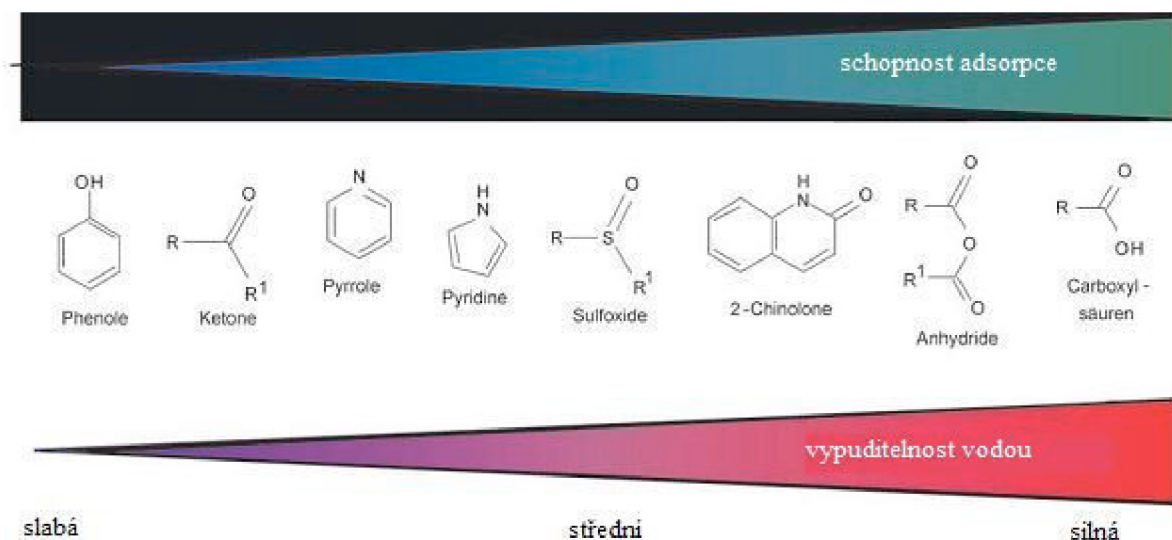
Chemické procesy interakce asfaltu a kameniva jsou složité a proměnlivé. Důsledkem toho je složitá a měnící se skladba použitých materiálů. Polární molekuly asfaltu jsou, co se týče funkčních skupin, orientovány dovnitř asfaltu a ve směru k povrchu kameniva. Přítomnost funkčních skupin, obsažených v asfaltu nebo na povrchu kameniva, vede k oblastem zvýšené reaktivity. Tyto oblasti pak mohou být označeny jako oblasti aktivní. Funkční skupiny a typické reakce, které se nacházejí v asfaltu a kamenivu, jsou zmíněny a popsány níže.

#### 2.3.4.1 *Funkční skupiny asfaltu*

Ačkoli asfalt se skládá převážně z nepolárních uhlovodíků, jsou zde také obsaženy molekuly dusíku, síry a kyslíku. Stejně tak obsahuje malé množství kovů, které mohou být považovány za "otisk" daného typu ropy. Vazbou atomů těchto kovů v uhlovodících získají molekuly asfaltu polární vlastnosti. Přestože jsou zde polární sloučeniny přítomny v nízkých koncentracích, mají významný vliv na vlastnosti asfaltu a jeho interakci s povrchem kameniva. Obrázek 2-7 [9] znázorňuje chemické struktury nejdůležitějších funkčních skupin přítomných v přírodním asfaltu, včetně těch, které jsou tvořeny oxidací [20].

Na obrázku 2-7 [9] je znázorněna afinita funkčních skupin k povrchu kameniva a jejich vytěsňovatelnost vodou. Sloučeniny z většiny absorbované povrchem kameniva, jsou

snadno přemístitelné molekulami vody. Tato skutečnost podtrhuje význam vlivu vody na trvanlivost vazby asfalt – kamenivo. Ačkoli kyselé složky, jako jsou například karboxylové kyseliny, anhydridy a 2-chinoliny, jsou v asfaltu přítomny pouze v nízkých koncentracích, jsou tyto nalezeny ve vysokých koncentracích i v absorpčních oblastech. Asfalt vykazuje zpravidla nadbytek kyselých prvků oproti množství zásaditých organických sloučenin.



**Obr. 2-7:** Intenzita adsorpční interakce mezi organickými funkčními skupinami a povrchem kameniva [9]

Zejména dvě funkční skupiny, karboxylové kyseliny a sulfoxidy, představují téměř polovinu silně absorbovaných frakcí [21]. Polyfunkční molekuly asfaltu (sloučeniny obsahující jednu nebo více funkčních skupin) jsou absorbovány silněji. Typické polyfunkční molekuly obsahují keto-skupiny, anhydridy a dusík. Některé sloučeniny dusíku, jako je například pyridin nebo pyrol, jsou, stejně jako fenoly, velmi silně absorbovány [21]. To dokazuje významný vliv organických aminů/amidů na zlepšení přilnavosti. Zřejmě je důležité, aby funkční skupiny byly nejprve v kontaktu s povrchem kameniva.

#### 2.3.4.2 Funkční skupiny povrchu kameniva

Kamenivo sestává z jednoho nebo více minerálů s definovaným chemickým složením a stanoveným uspořádáním atomů. Pokud existuje kamenivo v krystalické formě, pak je

každý atom svými sousedními atomy upevněn elektrostatickým vzájemným působením ke krystalické mřížce. Když je kamenivo rozdrveno, začnou se na nově vytvořených krystalických plochách s volnými vazbami tvořit molekuly, které zastoupí chybějící sousední atomy. Tyto atomy vytvoří nové koordinační vazby s jinými molekulami. Molekulární popis tvoří podklad pro interpretaci povrchového náboje a vysvětluje povrchovou volnou energii podle termodynamické teorie. Nové koordinační vazby mohou být vytvořeny tím, že jsou síly orientovány do krystalové mřížky a tím atomy tlačí k sobě. Dalším způsobem, jak zastoupit přerušené vazby je vazba vody a organických molekul asfaltu prostřednictvím funkčních skupin. Vzhledem k rozsáhlému přirozenému výskytu křemence a jeho známým problémům souvisejícím s citlivostí na vlhkost, jakožto příčinou poškození asfaltových krytů, byl křemenec důkladně podroben výzkumu v mnoha studiích [22] [23] [24] [25].

Aktivní oblasti těchto povrchů se skládají z hydroxylových skupin různých úrovní kyselosti až po vodíkové vazby s vysokou kyselostí.

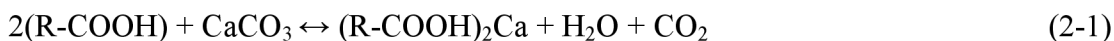
Silné elektropozitivní Lewisovské kyseliny se obvykle tvoří v horninách, které obsahují prvky hořčíku, železa a vápníku. Kyslík obsažený v oxidu křemičitém a jiných minerálech může fungovat jako Lewisovská zásada.

Oxidy a hydroxylové skupiny fungují jako silné adsorbéry molekul vody. Naopak molekuly vody mohou sloužit jako bod pro vazbu s organickými molekulami. Absorbované molekuly vody mohou být nahrazeny nebo obaleny molekulami asfaltu za předpokladu, že je kamenivo tomuto prostředí vystaveno po delší dobu. Je již dlouho známo, že kamenivo, které bylo uskladněno na dlouhou dobu, odolalo efektu strippingu lépe než kamenivo čerstvě podrcené [26]. Na povrchu kameniva jsou přítomné chemicky aktivní oblasti, které vykazují vysokou afinitu k asfaltu. Jsou to především prvky jako hliník, železo, hořčík a vápník. Prvky s nízkou vazebnou afinitou k asfaltu jsou sodík a draslík [12].

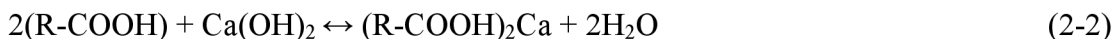
Přilnavost v systému asfalt – kamenivo je primárně určena vlastnostmi kameniva. Podíl specifického povrchu kameniva je dán tím, že čím větší je plocha povrchu kameniva, tím větší plocha na jednotku hmotnosti kameniva je k dispozici pro interakci s asfaltem.

#### 2.3.4.3 Interakce asfalt – kamenivo

Interakci mezi asfaltem a povrchem kameniva lze obecně popsat na Lewisově konceptu kyseliny a zásady. Většina kationtů jsou Lewisovské kyseliny a většina aniontů Lewisovské zásady. Lewisovské kyseliny jsou příjemci elektronového páru a Lewisovské zásady jsou naopak dárce páru elektronů. Vzájemnou reakcí Lewisovské kyseliny a zásady vznikne koordinační sloučenina, molekulární sloučenina nebo soustava zásady a kyseliny. Ačkoli jsou karboxylové kyseliny přítomny v asfaltu pouze v nízkých koncentracích, hrají velmi důležitou úlohu a významně přispívají k pevnějším vazbám. Tímto způsobem reaguje s karboxylovými kyselinami asfaltu uhličitan vápenatý. Při zpracování horkého asfaltu se zároveň vytváří nerozpustná vápenatá sůl karboxylové kyseliny, voda a oxid uhličitý (2-1):



Kdyby byl přítomen jen hydroxid vápenatý, potom vznikne pouze voda (2-2):



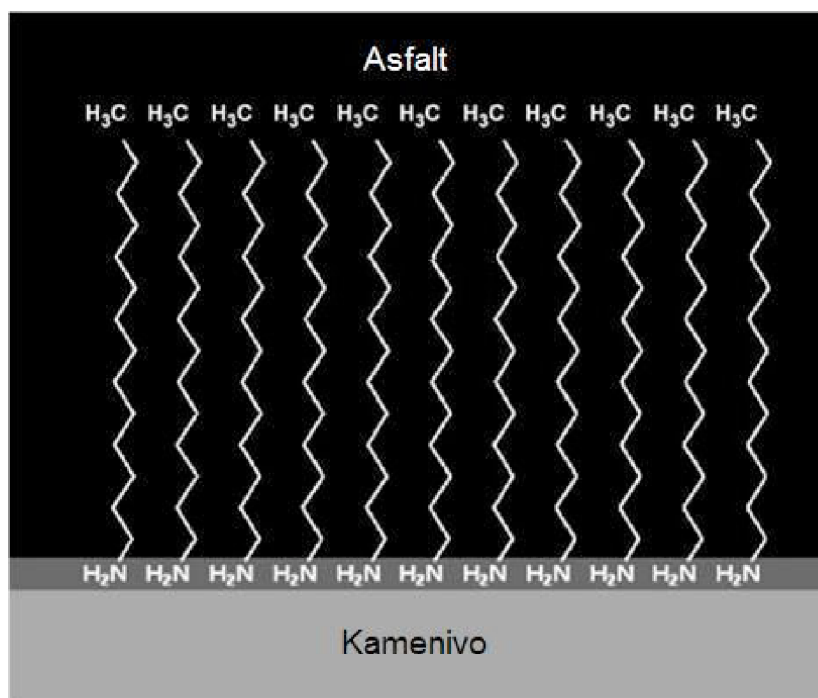
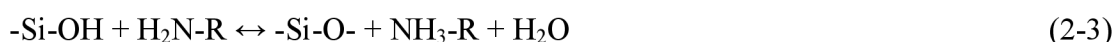
V práci [27] je uvedeno, že kamenivo může být během sušení v obalovně krátce zahřáto nad plameny o teplotě do 700 stupňů Celsia. Za těchto podmínek se uhličitan vápenatý rozkládá na oxid vápenatý a oxid uhličitý. Vzniklý oxid vápenatý reaguje okamžitě s kyselými složkami asfaltu. Přitom se vytváří ve vodě rozpustné soli, což má za následek zvýšenou nasákavost. To se týká zejména sodných a draselných solí, které zvyšují nasákavost v mezivrstvě.

Přidáním hydroxidu vápenatého jsou měněny fyzikální vlastnosti směsi během chemické interakce s asfaltem. Hydroxid vápenatý reaguje s karboxylovou kyselinou a 2-chinolinem za vzniku nerozpustných vápenatých organických solí [28]. Tím je zabráněno tomu, aby vytvořila karboxylová kyselina s křemičitým povrchem ve vodě lehce rozpustnou sloučeninu. Aktivní oblasti křemičitého povrchu zůstávají uvolněny, aby vytvořily silnou voděodolnou vazbu se skupinami asfaltu obsahujícími dusík. Tento

mechanismus vysvětluje, jak může být citlivost na vlhkost, která je příčinou degradace asfaltových krytů, snížena přidáním hydroxidu vápenatého.

Na povrchu křemičitého kameniva lze nalézt převážně slabě kyselé silanolové skupiny. Tyto skupiny vytvářejí jednoduché vazby s karboxylovými kyselinami, ale stejně snadno jsou opět vytěsněny vodou. Při hydrolýze tvoří voda silnou vodíkovou vazbu se silanovými skupinami, stejně jako atomy vodíku s karboxylovými skupinami. Důvodem pro to je skutečnost, že karboxylové kyseliny přítomné v asfaltu jsou slabé kyseliny a těžko disociují do formy iontů.

Při použití špatně přidrženého křemičitého kameniva se občas používají přísady, které jsou určeny ke zlepšení přilnavosti. Tyto přísady obsahují sloučeniny, obecně uhlovodíkové řetězce, které obsahují alespoň jeden primární, sekundární nebo terciární amin nebo amid. Polární amin/amidové skupiny jsou chemicky vázány na křemičitém povrchu (2-3), zatímco uhlovodíkové řetězce z důvodu podobných vlastností jako u asfaltu vstupují do silné interakce s asfaltovou fází (obr. 2-8 [9]) [29].



**Obr. 2-8:** Schematické znázornění orientace aminů na kamenivu [9]



S délkou uhlíkového řetězce 14 až 18 a jednou nebo dvěma amin/amidovými skupinami je možno dosáhnout optimálního účinku přilnavosti asfaltu ke kamenivu [30].

Při použití této skupiny látek je důležité si uvědomit, že tyto také reagují s kyselými složkami asfaltu za vzniku solných sloučenin. Zkušenosti ukazují, že samotná tvorba solí nevede ke ztrátě přilnavosti. Dlouhá časová prodleva (> 24 hodin) při vyšších teplotách (> 120 ° C) však vede k tepelnému rozkladu většiny aminů/amidů a tím je účinek zlepšující přilnavost, snížen. Z tohoto důvodu je dlouhodobá příměs aditiv v horkém asfaltu nevýhodná. Přímé přidání aditiva do zásobníku s asfaltem se proto nedoporučuje [29].

### 2.3.5 *Termodynamická teorie* [9]

Termodynamická teorie je nejčastěji používanou teorií k popisu adhezních jevů. Je založena na předpokladu, že lepidlo je přilepeno na podklad tehdy, pokud se projeví mezimolekulární síly v mezivrstvě. Důležitou termodynamickou veličinou, kterou lze popsat adhezní interakci, se nazývá Gibbsova<sup>6</sup> volná energie.

Gibbsova volná energie ( $\Delta G^a$ ) stanovuje rozdíl mezi počátečním a koncovým stavem systému a předpovídá, zda tento proces může probíhat za příslušných teplotních a tlakových podmínek, či ne. Záporné znaménko znamená, že je v průběhu tohoto procesu uvolňována energie, děj je tedy samovolný. Je-li  $\Delta G^a > 0$ , pak je energie absorbována z okolního prostředí. Pokud  $\Delta G = 0$ , proces je v rovnováze [31].

Velmi často je také používán termín „práce adheze“ (2-4) označován  $W^a$ . Tato veličina se od Gibbsovy volné energie liší jen značkou.

$$W^a = -\Delta G^a \quad (2-4)$$

Mezi prací adheze a povrchovou energií materiálů (2-5) stanovil Dupré důležitou rovnici:

$$W^a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (2-5)$$

---

<sup>6</sup> Josiah Willard Gibbs – americký matematik, fyzik, chemik, který zformuloval pojem termodynamické rovnováhy pomocí energie a entropie a zformuloval pravidlo chemické rovnováhy několika fází.  
Zdroj: aldebaran.cz

Rovnice je interpretována takto: pokud dva různé materiály mají společnou hraniční plochu, pak je zapotřebí k jejich vzájemnému oddělení určitá energie. Pro zcela křehké rozhraní odpovídá spotřeba energie součtu povrchových energií obou materiálů ( $\gamma_1 + \gamma_2$ ). Vzhledem k tomu, že jsou oba různé materiály nyní izolovány, chybí mezi nimi molekulární síly. Tato energie musí být tedy odečtena z energie obou nově vzniklých povrchů ( $\gamma_{12}$  – mezifázová energie). Povrchová energie materiálu může být stanovena měřením pomocí různých metod. Jednou z nejznámějších metod je měření pomocí kontaktního úhlu. Kontaktní úhel je jednoduchý způsob, jak popsat tvar tekuté kapky na povrchu materiálu.

Ačkoli měření kontaktního úhlu je vykládáno především na základě termodynamických principů, může být použito na makroskopické úrovni pro měření smáčení a rozprostření. Výrazy smáčivost, rozprostření a kontaktní úhel se často používají jako synonyma pro adhezi. Smáčení povrchu, nebo šíření kapaliny na povrchu je proces, při kterém se lepidlo dostane do blízkého kontaktu s povrchem. Smáčivost je určující podmínka pro správnou adhezi. Při dokonalém rozprostření je kontaktní úhel  $0^\circ$  a lepidlo je na povrchu rozloženo rovnoměrně.

Smáčení a rozprostření závisí také na viskozitě kapaliny, drsnosti a heterogenitě pevného povrchu.

Z hlediska termodynamiky si adhezní ( $W_a$ ) a kohezní ( $W_c$ ) síly konkurují. Tyto síly mohou být použity pro definování koeficientu rozprostření  $S$ .

$$S = W_a + W_c \quad (2-6)$$

Čím vyšší je koeficient rozprostření, tím vyšší je práce adheze oproti kohezní energii lepidla. Záporná hodnota koeficientu rozprostření  $S$  představuje koncový kontaktní úhel. Hodnota nula odpovídá rovnovážnému stavu.

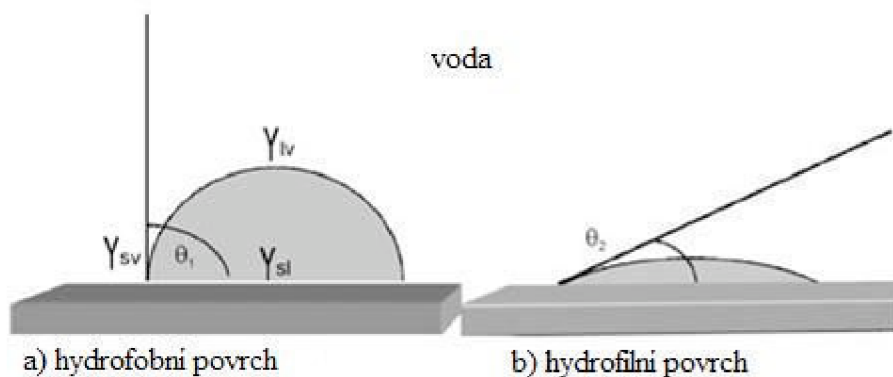
Rovnovážený stav kapky na podložce je takový, při kterém nedochází k pohybu hranice kapky. To je podmíněno rovnováhou složek povrchových napětí  $\gamma_{sv}$ ;  $\gamma_{sl}$ ;  $\gamma_{lv}$  (obr. 2.9a [9]), ležících v rovině podložky. Rovnovážený stav je popsán Youngovou rovnicí (2-7), kde  $\theta$  je stykový úhel smáčení. Tato rovnice popisuje rovnováhu kapky kapaliny na

podložce z pevné látky za předpokladu, že povrch pevné látky je zcela rovný, tvar pevné látky se během smáčení nemění a kapalina neproniká do povrchu pevné látky.

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2-7)$$

Vztah je graficky zobrazen na obrázku 2-9. Kontaktní úhel mezi pevnou plochou a kapalinou odpovídá tečně, která je tvořena spojnicí tří bodů mezi kapalinou a plynným skupenstvím. Kontaktní (stykový) úhel  $\theta_1$  na obrázku 2-9a je větší než  $90^\circ$ . V případě vody to znamená, že se kapka na povrchu obtížně rozprostírá. Povrch je tedy hydrofobní nebo též vodoodpudivý. Kapka na obrázku 2-9b se v interakci s pevnou plochou snadněji rozprostírá. Malý kontaktní úhel v tomto případě indikuje hydrofilní (vodomilný) povrch.

Každému fázovému rozhraní může být připisována volná energie nebo napětí.  $\gamma_{sv}$  je volná povrchová energie tuhé látky (podkladu) v rovnováze s roztokem nasycených par kapaliny v plynné fázi (voda).  $\gamma_{lv}$  je povrchové napětí roztoku v rovnováze s tuhou látkou a  $\gamma_{sl}$  je volná povrchová energie mezi pevnou látkou a kapalinou.



**Obr. 2-9:** Zásady měření kontaktního úhlu [9]

Obecně: Pokud má kapalina vysoké povrchové napětí, pevné těleso je pak špatně smáčivé. Pokud má pevné těleso nízkou volnou povrchovou energii, smáčivost je také špatná. Hodnota dobrého smáčení je dodržena tehdy, když smáčecí kapalina má menší nebo stejně velké povrchové napětí jako smáčené pevné těleso.

Problému určování adhezních vlastností pomocí měření kontaktního úhlu se podrobně zabývá studie [9].

## 2.4 Poruchové modely adheze [9]

V tabulce 2-2 [9] jsou uvedeny nejznámější a nejčastěji citovaná vysvětlení pro selhání adheze. Tyto modely poskytují užitečný náhled na základní mechanismy poškození. Většinou se jedná o komplexní shrnutí několika mechanismů poškození, jejichž vysvětlení vyžaduje znalost všech důležitých okrajových faktorů.

Model	Princip	Nápomocné faktory
Pórový tlak	a) Vnikání vody do pórů v důsledku mechanického namáhání b) Zvětšení objemu vody při vyšších teplotách	Silné mechanické namáhání Častý déšť Vyšší teplota s častými teplotními výkyvy
Výtlak	Průnik vody nedokonale obaleným kamenivem a tvorba separační vrstvy	Špatná smáčivost kameniva (např. vysoký obsah SiO <sub>2</sub> ), vysoká viskozita pojiva, nízký obsah pojiva
Infiltrace	Průnik vody difuzí zvenčí skrz asfaltový film nebo kapilárami v kamenivu, tvorba separační vrstvy	Tenký asfaltový film díky nízkému obsahu asfaltu, porézní kamenivo
Porušení filmu	Tvorba trhlin a průnik vody	Vysoká viskozita, křehkost asfaltu, cyklus zmrazování-rozmrazování, nízké okolní teploty s častými výkyvy, vysoká mechanická zátěž

Tab. 2-2: Mechanismy porušení [9]

### 2.4.1 Model pórového tlaku

Asfaltové vrstvy s velkým obsahem dutin umožňují volný průtok vody. Při poježdění asfaltové vrstvy pneumatikami dochází při mokru nejprve k vtlačení vody do dutin a po projetí dochází naopak k jejímu sání. Pulzní proudění vody urychluje ztrátu asfaltového filmu. Vodou naplněné póry hrají u čerstvě položených asfaltových krytů svou roli v kombinaci s poježděním dopravou a tedy i hutněním krytu. V průběhu tohoto procesu může docházet k pronikání vody do pórů v obrusné vrstvě a díky vysokému zatížení a vlivem častých změn teploty dochází k odtržení asfaltu od povrchu kameniva a následné degradaci asfaltového krytu (ravelling – eroze).

#### **2.4.2 Model výtlaku**

Na základě tohoto modelu je asfalt přichycen ke kamenivu za přítomnosti vody. Prosakující voda ovlivňuje povrchovou energii asfaltu a díky vyšší afinitě vody k ploše kameniva dochází k vytlačování asfaltu z povrchu kameniva. Tento efekt je zvláště patrný tehdy, když je kamenivo nedostatečně smočené asfaltem. Vytlačení z povrchu kameniva je tím jednodušší, čím je nižší viskozita použitého pojiva.

#### **2.4.3 Model infiltrace**

V tomto případě je povrch kameniva z velké části smočen asfaltovým filmem, kdy se voda koncentruje na rozhraní vrstev a dochází k oddělení asfaltového filmu. Buďto voda do mezivrstvy difunduje zvnějšku, nebo je to zbytková voda, která pochází ze samotného kameniva. Tento jev je pozorován především v kamenivu s vysokým podílem křemene resp. živce. Při sušení je tento proces částečně vratný, zvláště u asfaltu s nízkou viskozitou. Efekt oddělení může také nastat, když je povrch kameniva pokryt vrstvou prachu.

#### **2.4.4 Model porušení asfaltového filmu**

I přes dokonalé smočení kameniva asfaltovým filmem může dojít k jeho porušení. K tomu dochází mechanickým působením, které je způsobeno pojížděním dopravou anebo pozvolným křehnutím v důsledku oxidace asfaltu vzdušným kyslíkem. Destrukce asfaltového filmu začíná přednostně v rozích a na hranách částice kameniva. Tento jev zejména urychluje působení vody.

### **2.5 Metody měření k určení adhezních vlastností**

#### **2.5.1 Testy přilnavosti kameniva obaleného asfaltem a zkušebních vzorků**

Stripping, tedy náchylnost kameniva obaleného asfaltovým filmem ke svlečení tohoto filmu za působení vody, je hlavním problémem v mnoha zemích, a může vést k těžkým poškozením vozovky. Od roku 1930 byly ve světě vyvinuty různé testovací metody k měření interakce asfaltu a kameniva v asfaltových směsích nebo přímo na kamenivu obaleným asfaltovým pojivem. Jsou publikovány experimenty, které mají zrychleně simulovat komplexní chemicko-fyzikální procesy v asfaltovém krytu. Přímé měření

adheze a interpretace výsledků je z hlediska jejich praktického významu obtížná. Velmi často je snazší popsat příčinu adheze, neboť je většinou přímo propojená s poruchou. Největší vliv na systém asfalt – kamenivo má zřejmě voda (efekt strippingu). Proto jsou citlivost na vlhkost nebo odolnost vůči ztrátě přilnavosti považovány jako dobrý nepřímý ukazatel schopnosti asfaltu přilnout na kamenivu [9].

Často jsou také prováděny srovnávací zkoušky asfaltových vzorků v suchém stavu a po ponoření do vody. Zároveň jsou měřeny mechanické vlastnosti jako například napětí nebo různé moduly. V těchto případech jsou obtížně interpretovány výsledky a poruchové mechanismy, protože měřené vlastnosti asfaltových směsí jsou ovlivněny různými faktory (např. kohezí nebo recepturou dané asfaltové směsi). Kromě toho mohou výsledky zkoušek narušovat také účinky přetlaku vody v pórech. Na základě toho byly vyvinuty metody, které zahrnují zkoušení jak asfaltu a kameniva samostatně, tak i zkoušení na hutněných zkušebních tělesech [9].

Zkušební metody pro řešení citlivosti na vlhkost lze rozdělit do dvou kategorií [9]:

- 1) Zkoušky, které jsou prováděny na obalených částech kameniva, jako je např. zkouška rotujících lahví, zkouška ponoření do vroucí vody a zkouška ponořením (tab. 2-3 [9]).
- 2) Zkoušky, které jsou prováděny na zkušebním tělese, tj. se zhutněnou asfaltovou směsí jako například Kantabro – test, nepřímá zkouška příčným tahem (ITS), zkouška abraze (tab. 2-4 [9]).

Rozsah této práce nedovoluje blíže se věnovat zvláště jednotlivým metodám. Proto jsou v tabulkách 2-3 a 2-4 pro bližší představu uvedeny alespoň některé nejznámější používané metody včetně jejich stručných charakteristik, více viz [9].

Zkušební metoda	Objem vody [ml]	Trvání [h]	Frakce kameniva [mm]	Množství vzorku [g]	Zvláštní vlastnost
Statická zkouška ponořením (AASHTO T182, ASTM D1664)	400 (destilovaná voda)	16 – 18	jednotná velikost	100	–
Zkouška rotujících lahví (EN 11697-11, část A)	500	do 75	6/10, 5/8, 8/11; tl. 0,1 mm asfalt. filmu	510	rotace 40/60 otáček za minutu
„twit“ (Whiteoak, 1990)	destilovaná voda	48	14 mm	–	voda o teplotě 25°C
Zkouška vroucí vodou (Kennedy a kol., 1983) (ASTM D3625)	500 (destilovaná voda)	1-10 min	jednotná velikost nebo odstupňovaná	200 – 300	vroucí voda
Ancona stripping test (AST) (Bocci a Colgrande, 1993)	200 (destilovaná voda)	0,75	6/10 3g asfaltu	60	vroucí voda
Zkouška obnažení horkou vodou (Choques a Verhasselt, 1993)	600 (demineralizovaná voda)	10 min	10/ 14 1,8% asfaltu	200	vroucí voda, chemická příměs
Ultrazvuk. metoda (Vuorinen a Valtonen, 1999)	voda	–	zkušební vzorek 20x80 mm	2g asfaltu – 0,12 mm film	ultrazvuk
Zkouška čisté adsorpce (SHRP – Curtis a kol., 1993)	2	6/8	< 4,75 mm	50	140ml asfaltu rozpuštěného v toluenu
Zkouška čisté adsorpce (Walsh a kol., 1996)	2	6/8	drť < 4,75 mm	50	140ml asfaltu rozpuštěného v toluenu
Zkouška obnažení horkou vodou (ČSN 73 6160: 2000)	destilovaná voda	1	8/16 12g asfaltu	300	horká voda 60°C
Statická zkušební metoda (ČSN EN 12697-11: 2012, část B)	destilovaná voda	48	6/10 4% asfaltu	150 ks	voda o teplotě 19°C

**Tab. 2-3:** Výběr zkušebních metod pro řešení problému "strippingu" [9]

Zkušební metoda	Druh vysušování				poznámka
	Voda	Teplota	Tlak	Abraze	
Rázová metoda Vialit (ČSN EN 12272-3)	(+)	(+)	–	–	vliv namáhání
Kantabro – test	(+)	–	–	+	ztráta hmoty
Zkouška třením kola	(+)	–	–	+	pojízdní pneumatikou
ITS (ČSN EN 12697-12)	+	(+)	–	–	zamezení pórového přetlaku vody
SATS	+	+	+		vliv vodních par
PATTI	+	–	–	–	odtrhová zkouška
Zkouška otěrem za třepání (ČSN EN 12274-7)	+	–	–	+	ztráta hmoty
+ vysoušení je použito (+) vysoušení je možné použít, ale ne vždy – vysoušení není možné použít					

**Tab. 2-4:** Výběr zkušebních metod využívajících asfaltové vzorky (normativně hutněná tělesa) pro analýzu přilnavosti asfaltu nebo "strippingu" [9]



### **3. ZKOUŠKY PŘILNAVOSTI A ODOLNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ VŮČI ÚČINKŮM VODY**

V této práci je úkolem především analyzovat problematiku přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu porovnáním jednotlivých metod zadaných vedoucím bakalářské práce. Jedná se o porovnání postupů se zaměřením na metody, kdy působí ohřátá voda o různých teplotách na kamenivo obalené asfaltem, které je v této lázni ponořeno. Předmětem tohoto měření je porovnat rozdílný přístup jednotlivých norem ke klasifikaci stupně obalení kameniva asfaltovým filmem. Porovnání se týká u nás stále platné normy ČSN 73 6161: 2000 Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu [3], dále evropské normy v anglickém znění EN 12697-11: 2005 Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem [1], a porovnání návrhu švýcarského výzkumu o afinitě v této normě ze zasedání evropského výboru pro normalizaci (CEN) technické komise TC227 „Silniční materiály“ pracovní skupiny WG1 v Oslu z října 2010 [4]. Z tohoto srovnání vychází, že snahou je vytvořit v evropském prostředí co nejuniverzálnější postupy pro zkoušení přilnavosti asfaltu na povrchu kameniva s přihlédnutím k druhu používaného kameniva, odlišným klimatickým podmínkám a dalších kriterií v jednotlivých evropských státech. Zajímavé porovnání v klasifikaci obalení kameniva asfaltem bylo podrobně prezentováno v práci [32] v roce 2001, kde postup uvedený v [3] byl srovnán se zkouškou „rotujících lahví“ dle normy [1]. Došlo zde k výrazným rozdílům v procentech obalených ploch.

Ve studii [33] z roku 2012 vyšly jasné závěry o nutnosti změn mísících teplot a frakcí kameniva používaných ke zkoušení přilnavosti asfaltu ke kamenivu. Od listopadu 2012 je již u nás v platnosti novelizovaná a přejetá norma ČSN EN 12697-11 [34] v českém jazyce i s upravenými teplotami a postupy, která poslouží jako důkaz o předchozí potřebě změny těchto postupů. V dalších řádcích je uveden přehled použitých metod včetně popisu jejich postupů. Dále porovnání, zda změna evropského zkušebního postupu vede k přesnějšímu vyjádření citlivosti systému asfalt-kamenivo na účinek vody a zda je neustále potřeba zdokonalovat jednotlivé metody zkoušek přilnavosti asfaltu ke kamenivu pro použití v evropském měřítku.

### 3.1 Základní principy zkušebních metod

Ve všech metodách EN 12697-11: 2005 [1] a ČSN 73 6161 [3] jsou vybrány horniny specifické frakce kameniva a jsou obaleny horkým asfaltem. Po ochlazení se kamenivo ponoří do vody zahřáté na určitou teplotu po předem stanovenou dobu. V případě, že adheze není dostatečná, voda se infiltuje mezi tenkou vrstvou asfaltu a povrch kameniva,

	EN 12697-11: 2005			ČSN 73 6161: 2000
	Část A	Část B	Část C	
<b>Povlečení kameniva</b>				
Počet vzorků	3	<b>1 až 4</b>	2	<b>2</b>
Množství pojiva	16 g (3,1%)	<b>4% (<math>\pm x \cdot 0,5\%</math>)</b>	31,5 g (2,1%)	<b>12 <math>\pm</math> 0,3 g</b>
Frakce kameniva	8/11,2 (5,6/8; 6,3/10) mm	<b>6/10 mm</b>	7/14 mm	<b>8/16 mm</b>
Množství kameniva	510 g ve 3 sadách	<b>150 částic</b>	1500 g	<b>300 <math>\pm</math> 3 g</b>
Mísící teplota	<b>variabilní, dle ČSN EN 12697-35 + 25°C [35]</b>	<b>130 <math>\pm</math> 5°C</b>	variabilní, dle ČSN EN 12697-35 [35]	<b>variabilní, dle ČSN 73 6161, tab. 1</b>
Doba chlazení	12 h	<b>1h <math>\pm</math> 5 min</b>	okamžité hašení ve studené vodě	<b>24 h</b>
<b>Působení vody</b>				
Typ působení	rotování lahve	<b>staticky</b>	staticky	<b>staticky</b>
Teplota vody	20 $\pm$ 5°C	<b>19 <math>\pm</math> 1°C</b>	vroucí voda (90 – 100°C)	<b>60 <math>\pm</math> 3°C</b>
Doba působení	24 $\pm$ 1h	<b>48 <math>\pm</math> 1h</b>	10 min	<b>60 min</b>
<b>Posouzení stupně obalení</b>				
Stav kameniva	mokrý	<b>suchý</b>	v HCl nebo HF	<b>mokrý/suchý</b>
Posouzení výsledků	<b>vizuální odhad podílu obalení po 6 a 24 hodinách</b>	<b>počet částic ne zcela obaleného kameniva (vizuálně)</b>	titrace reakčního roztoku	<b>vizuální odhad podílu obalení s grafickou pomůckou</b>
Vyjádření výsledku	prům. plocha obalení s odhadem na 5%	<b>schválení ano/ne</b>	prům. plocha obalení s odhadem na 1%	<b>prům. plocha obalení dělená do 4 kategorií</b>

**Tab. 3-1:** Rozdíly postupů mezi evropskou a českou normou pro posouzení přilnavosti asfaltu ke kamenivu

což vede k oslabení nebo částečnému odstranění asfaltového filmu. Toto může být vyhodnoceno na základě stupně obalení kameniva. Přílnavost je charakterizována tzv. stupněm obalení. V tabulce 3-1 jsou porovnány postupy ze čtyř zkušebních metod pro posouzení přílnavosti. V tabulce 3-2 jsou pak srovnány postupy platné ČSN EN 12697-11: 2012 [34] a švýcarský návrh z roku 2010 [4].

	ČSN EN 12697-11: 2012			Švýcarský návrh: 2010	
	Část A	Část B	Část C	Část A	Část B
<b>Povlečení kameniva</b>					
Počet vzorků	3	<b>1 až 4</b>	2	2	<b>1 až 4</b>
Množství pojiva	16 g (3,1%)	<b>4% (± x·0,5%)</b>	31,5 g (2,1%)	16 g (3,1%)	<b>4% (±x·0,5%)</b>
Frakce kameniva	8/11,2 (5,6/8; 6,3/10) mm	<b>8/11,2 (6,3/10) mm</b>	8/11,2 (5,6/8; 6,3/10) mm	8/11,2 (5,6/8; 6,3/10) mm	<b>6/10 mm</b>
Množství kameniva	510 g ve 3 sadách	<b>150 částic</b>	1500 ± 2 g	510 g ve 3 sadách	<b>150 částic</b>
Mísící teplota	variabilní, dle ČSN EN 12697-35 [35]	<b>variabilní, dle ČSN EN 12697-35 -15 ± 5°C</b>	variabilní, dle ČSN EN 12697-35 [35]	<b>variabilní, dle ČSN EN 12697-35 [35]</b>	<b>variabilní, dle ČSN EN 12697-35 [35]</b>
Doba chlazení	12 h	<b>1h ± 5 min</b>	okamžité hašení ve studené vodě	12 h	<b>1h ± 5 min</b>
<b>Působení vody</b>					
Typ působení	rotování lahve	<b>staticky</b>	staticky	rotování lahve	<b>staticky</b>
Teplota vody	20 ±5°C	<b>19 ±1°C</b>	vroucí voda (90 – 100°C)	20 ±5°C	<b>40°C</b>
Doba působení	24 ±1h	<b>48 ±1h</b>	10 min	24 ±1h	<b>24 h</b>
<b>Posouzení stupně obalení</b>					
Stav kameniva	mokrý	<b>suchý</b>	v HCl nebo HF	mokrý	<b>suchý</b>
Posouzení výsledků	vizuální odhad podílu obalení po 6 a 24 hod. pomocí graf. pomůcky	<b>počet částic ne zcela obaleného kameniva /vizuální graf. pomůckou</b>	titrace reakčního roztoku	<b>vizuální odhad podílu obalení po 6 a 24 hod. pomocí graf. pomůcky</b>	<b>vizuální odhad podílu obalení s grafickou pomůckou</b>
Vyjádření výsledku	prům. plocha obalení s odhadem na 5%	<b>schválení ano/ne, nebo viz část A</b>	prům. plocha obalení s odhadem na 1%	prům. plocha obalení s odhadem na 5%	<b>prům. plocha obalení s odhadem na 5%</b>

**Tab. 3-2:** Rozdílné postupy mezi evropskou normou z roku 2012 a švýcarským pozměňovacím návrhem z roku 2010

V následující části jsou popsány charakteristiky použitých materiálů, postupy jednotlivých norem a švýcarský návrh. V části laboratorního měření, pro potřeby ověření rozdílů, jsou pak použity postupy **tlustě** zvýrazněné v tabulkách 3-1 a 3-2. Tyto se týkají především statické metody ponoření vzorků kameniva obaleného asfaltem, na různou dobu a při různé teplotě, do vodní lázně.

Postup podle revidované Evropské normy z listopadu 2012 nebyl v této práci již testován z důvodu vejítí do platnosti během již rozpracovaného měření. V závěru jsou shrnuty výsledky měření a doporučení.

## 4. CHARAKTERISTIKY POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

### 4.1 Kamenivo

Pro tuto práci bylo zvoleno kamenivo z lokality Želešice. Třídícím znakem kameniva je jeho obsah  $\text{SiO}_2$ . Podle jeho množství se kamenivo dělí do čtyř kategorií:

- 1) kyselé (obsah  $\text{SiO}_2$  nad 65% hmotnosti),
- 2) neutrální (obsah  $\text{SiO}_2$  52% až 65% hmotnosti),
- 3) bazické (obsah  $\text{SiO}_2$  40% až 52% hmotnosti)
- 4) ultra bazické (obsah  $\text{SiO}_2$  pod 40% hmotnosti).

Druh horniny z Želešic (obr. 4-1 [32]) je charakterizován jako amfibolit. Jedná se o metamorfovanou horninu, v níž hlavními minerály jsou obecný amfibol a plagioklas. Je to jemnozrnná hornina se zřetelně vyvinutou foliací. Obsah  $\text{SiO}_2$  řadí tuto horninu mezi bazické. Obsahy dalších důležitých prvků jsou uvedeny v tabulce 4-1.

	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$
%	48,6	12,5	1,30	11,8	13,00	0,50	0,40

**Tab. 4-1:** Obsah minerálů v kamenivu z oblasti Želešice [32]



**Obr. 4-1:** Kamenivo – lokalita Želešice [32]

## 4.2 Asfalt

Pro zkoušky byl použit asfalt 50/70 (AP-65), což je silniční asfalt polofoukaný (oxidovaný) získávaný oxidační dehydrogenací vakuových zbytků nebo různých směsí vakuových zbytků a vakuových destilátů vzdušným kyslíkem. Ty se liší od silničních asfaltů ropných větším obsahem asfaltenů, větším bodem měknutí a vyšším bodem lámavosti, tedy lepší tepelnou stabilitou. AP-65 se vesměs používá pro výrobu asfaltových, za horka obalovaných stavebních směsí. Lze ho využít i pro jiné úpravy (nátěry) nebo jako výchozí surovinu pro výrobu asfaltových emulzí nebo ředěných asfaltů. Významnou charakteristikou asfaltů při aplikaci v praxi jsou jejich mechanicko-fyzikální vlastnosti (tab. 4-2). Ty jsou definovány technickou normou ČSN EN 12591 [36].

	Jednotka	Zkušební metoda	Asfalt 50/70
Penetrace při 25°C	0,1 mm	ČSN EN 1426	50 – 70
Bod měknutí	°C	ČSN EN 1427	46 – 54
Bod vzplanutí, min.	°C	ČSN EN 22592	230
Rozpustnost, min.	% (m/m)	ČSN EN 12592	99
Změna hmotnosti po stárnutí, max.	% (m/m)	ČSN EN 12607-1	0,5
Zbylá penetrace po stárnutí, min.	%	ČSN EN 1426	50
Bod měknutí po stárnutí, min.	°C	ČSN EN 1427	48
Obsah parafínů, max.	%	ČSN EN 12606-1	2,2
Zvýšený bod měknutí po stárnutí, max.	°C	ČSN EN 1427	9
Bod lámavosti, max.	°C	ČSN EN 12693	-8

**Tab. 4-2:** Přehled mechanicko-fyzikálních vlastností asfaltu 50/70 (AP-65)

## 5. POPISY JEDNOTLIVÝCH METOD

### 5.1 ČSN 73 6161: Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu

#### 5.1.1 *Předmět*

Předmětem této normy je zkoušení přilnavosti asfaltů používaných v silničním stavitelství s penetrací od 15 do 210, ředěných asfaltů a asfaltových emulzí ke kamenivu. Norma je v platnosti od května roku 2000.

Přilnavost je zde hodnocena procentem obalené plochy zrn kameniva na konci zkoušky. Výsledkem je aritmetický průměr ze dvou souběžně provedených stanovení. Pro vyhodnocování slouží tabulka 5-2 se vzory asfaltem obalených zrn znázorňující vzhled zrn při procentech obalení povrchu 20, 40, 50, 70, 80, 90, a 100%. Přilnavost se hodnotí jako:

- a) **Výborná**, má-li více než 75% zrn zkušební vzorku 100 % obalení plochy (A) a u zbývajících zrn nesmí být obalená plocha nižší než 90% (B).
- b) **Dobrá**, má-li více než 75% zrn zkušební vzorku 90% (B) obalení plochy (nebo větší) a u zbývajících zrn nesmí být obalená plocha nižší než 80% (C).
- c) **Vyhovující**, má-li více než 75% zrn zkušební vzorku 80% (C) obalení plochy (nebo větší) a u zbývajících zrn nesmí být obalená plocha nižší než 70% (D).
- d) **Nevyhovující**, má-li méně než 75% zrn zkušební vzorku 80% (C) obalení plochy.

Uvedeným zatříděním je jednoznačně definováno vyhodnocení zkoušky.

#### 5.1.2 *Zkušební zařízení a pomůcky*

Krystalizační skleněná miska minimálního průměru 150mm včetně víka pro vzorky obaleného kameniva (obr. 5-1), porcelánová miska stejného průměru o výšce minimálně 90mm pro mísení směsi (obr. 5-2), digitální váha (obr. 5-3), porcelánová špachtle, elektrická sušárna s regulací teploty 40 – 200 °C (obr. 5-5), plechovka s objemem

maximálně 250ml na asfaltové pojivo (obr. 5-4), normovaná síta na kamenivo dle ČSN ISO 565 [37] (obr. 5-6), vodní lázeň s termostatem s možností regulace teploty 40 – 60 °C pro temperování, destilovaná voda.



**Obr. 5-1:** Krystalizační skleněná miska se skleněným víkem



**Obr. 5-2:** Keramická mísa



**Obr. 5-3:** Digitální váha



**Obr. 5-4:** Plechovka s asfaltovým pojivem





**Obr. 5-5:** Elektrická sušárna



**Obr. 5-6:** Vibrační stroj s normovanými sítí

### 5.1.3 Příprava zkoušky

Na zkoušku je potřeba asi 65g asfaltového pojiva zbaveného nečistot a 650g kameniva. Provádí se na dvou vzorcích. Používá se na kamenivo frakce 8-16, které se zbaví podsítného na síti 8 a nadsítného na síti 16 (obr. 5-7), potom se promyje tekoucí vodou až do odstranění všech nečistot. Nakonec se nechá vysušit v sušárně při teplotě 105 – 110 °C.



**Obr. 5-7:** Kamenivo frakce 8-16 mm

#### 5.1.4 *Postup zkoušky se suchým kamenivem*

Do dvou porcelánových misek se naváží  $(300 \pm 3)$ g kameniva a vloží se do vyhřáté sušárny. Asfaltové pojivo v kovové nádobce se vloží do druhé sušárny. Teploty obou sušáren jsou podle druhu asfaltového pojiva uvedeny v tabulce 5-1 této normy. Doba ohřevu materiálů v obou směsích je v předem předeřtých sušárnách přibližně 30 minut. Po temperování se co nejrychleji do porcelánové misky s kamenivem naváží zahřáté asfaltové pojivo (obr. 5-8) podle tabulky 5-1. Poté ohřátou špachtlí kamenivo důkladně promícháme s asfaltovým pojivem až do úplného obalení zrn (obr. 5-9). Doba míchání je přibližně kolem 5 minut. Obalené kamenivo se ihned přemístí do skleněné misky, kde se rovnoměrně rozprostře na dně. Nezakryté obalené kamenivo se ponechá 24 hodin při laboratorní teplotě.



**Obr. 5-8:** Směs před mícháním



**Obr. 5-9:** Smíchaná směs

Po uplynutí stanovené doby se na obalené kamenivo nalije destilovaná voda ohřátá na teplotu obnažovací vody podle tabulky 5-1, zakryje se krycím sklem a vloží se do vodní lázně, ohřáté na teplotu obnažovací vody na 60 minut.

Míra porušení asfaltového povlaku se hodnotí vizuálně na obou vzorcích obaleného kameniva, které zůstává ponořené ve vodě (obr. 5-10). Jako pomůcku pro vyhodnocení lze použít lupu a rozsvícenou lampu.

Druh asfaltového pojiva	Hmotnost asfaltového pojiva v g	Teplota ve °C <sup>***</sup>		
		asfaltového pojiva	kameniva	obnažovací vody
Asfalt penetrace 151až 210	12 ±0,3	140 ±5	130 ±5	60 ±3
Asfalt penetrace 101až 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 70 s	12 ±0,3	50 ±3	50 ±3	40 ±
Anionaktivní asfaltová emulze	Pozn. <sup>**</sup>	Pozn. <sup>**</sup>	Pozn. <sup>**</sup>	60 ±3
Kationaktivní asfaltová emulze	Pozn. <sup>**</sup>	Pozn. <sup>**</sup>	Pozn. <sup>**</sup>	60 ±3

<sup>\*</sup> Navažuje se podle obsahu asfaltového pojiva v emulzi tak, aby hmotnost zbytkového asfaltu byla 18 g.

<sup>\*\*</sup> 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.

<sup>\*\*\*</sup> U modifikovaných pojiv uvádí pracovní teploty asfaltu i kameniva jejich výrobce.

**Tab. 5-1: Pracovní teploty [3]**



**Obr. 5-10: Rozprostřené částičky obaleného kameniva po zalití destilovanou vodou a temperování**










### 5.1.5 Postup zkoušky s vlhkým kamenivem

Do dvou porcelánových misek se naváží  $(300 \pm 3)$ g kameniva, zalije destilovanou vodou a ponechá 60 minut v klidu. Poté se kamenivo procedí na síť 2 mm a ponechá na něm při laboratorní teplotě. Kamenivo se obaluje asfaltovým pojivem bez zahřátí podle tabulky 5-1, dále se postupuje jako při práci se suchým kamenivem.

### 5.1.6 Vyhodnocení přilnavosti

Přilnavost se hodnotí procentem obalené plochy zrn kameniva na konci zkoušky. Výsledkem je aritmetický průměr ze stanovení na obou vzorcích. Pomůckou pro vyhodnocování poslouží tabulka 5-2 této normy.

Obalená plocha v %	Asfaltem obalené zrna kameniva	Charakteristika asfaltového spojení filmu se zrnem kameniva	Poznámka
100		A	Celé zrna obaleno, hrany a rohy mohou být slabě potaženy průsvitným filmem
90		B	Zrna obaleno slabě, na zbylé ploše mohou být drobně 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

Tab. 5-2: Vyhodnocení přilnavosti [3]

## 5.2 EN 12697-11: 2005 Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem

### 5.2.1 *Předmět normy*

Tato evropská norma specifikuje postupy pro stanovení afinity mezi kamenivem a asfaltem a její vliv na citlivost této kombinace ke ztrátě přilnavosti. Jejím účelem je spíše napomoci projektantům asfaltových směsí navrhnout konkrétní směs než samotné provedení typové zkoušky. Citlivost ke ztrátě přilnavosti stanovená těmito postupy je nepřímým měřítkem schopnosti pojiva přilnout k různým typům kameniva, nebo schopnosti různých pojiv přilnout k danému kamenivu. Norma je dělena do tří částí dělených podle jednotlivých metod:

#### A) Metoda rotující lahve

V této metodě je afinita vyjádřena vizuálním zaznamenáním stupně obalení zrn kameniva na nezhutněných pojivem obalených zrnech minerálního kameniva po vlivu mechanického míchání za přítomnosti vody. Tato zkouška je jednoduchou subjektivní zkouškou určenou především pro méně abrazivní kameniva.

#### B) Statická metoda

Tato metoda je jednoduchá, ale subjektivní zkouška, která je méně přesná. Obecně ji lze použít i u kameniv s vysokou hodnotou ohladitelnosti PSV (z angl. polish stone value). Afinita je zde vyjádřena vizuálním zaznamenáním stupně obalení zrn kameniva asfaltem na nezhutněných pojivem obalených zrnech minerálního kameniva po uložení ve vodě.

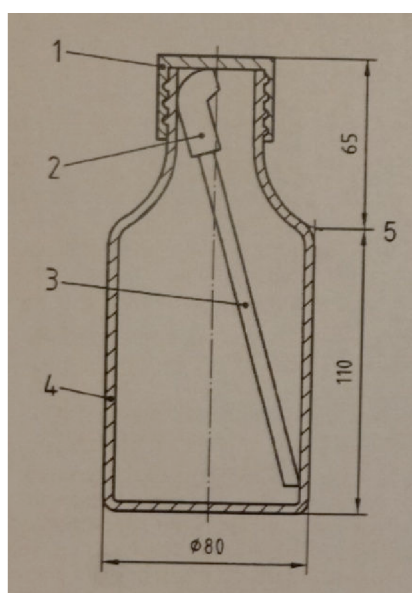
#### C) Metoda ztráty přilnavosti ve vroucí vodě

V této zkušební metodě se afinita vyjadřuje stanovením stupně obalení zrn kameniva asfaltem nezhutněných pojivem obalených zrn minerálního kameniva po ponoření do vroucí vody za definovaných podmínek. Zkouška varem je objektivní a velmi přesnou metodou. Z důvodu využívání reakčních činidel typu kyseliny fluoro- a chlorovodíkové jsou zde zvláštní požadavky na BOZP.

### 5.2.2 Podstata zkoušky

Kamenivo se proseje v souladu s normou EN 12697-2 [38]. Standardní velikost je frakce 8-11,2 mm (alternativně 5,6-8 mm nebo 6,3-10 mm), která se propláchne, usuší a smíchá s asfaltem tak, aby bylo dosaženo jeho rovnoměrného obalení.

U metody popsané v části A je asfaltem obalené kamenivo umístěno na kovovou desku nebo papír potažený silikonem a je skladováno při pokojové teplotě přes noc. Poté se rozdělí do tří dílčích vzorků k analýze. Každý dílčí vzorek je přenesen do lahve naplněné vodou a skleněnou tyčinkou (obr. 5-11 [1]).



Legenda:

- 1 – šroubovací víčko
- 2 – pryžová hadička
- 3 – skleněná tyčinka
- 4 – skleněná zkušební lahev
- 5 – hladina vody

**Obr. 5-11:** Zkušební lahev s příslušnými rozměry [1]

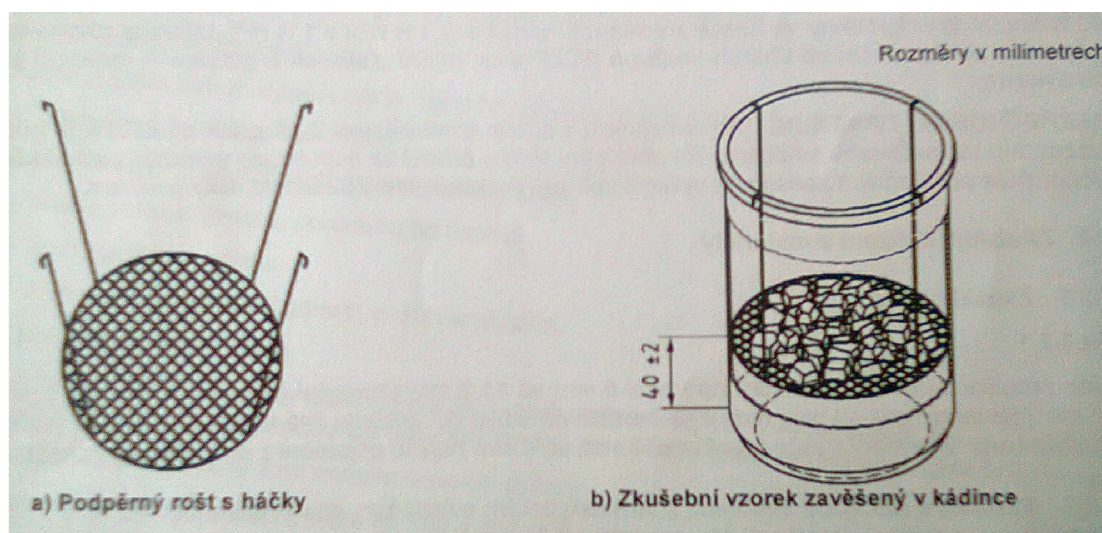
Lahev se uzavře a umístí do zařízení pro rotaci lahví (obr. 5-12 [32]). Lahve jsou rotovány při pokojové teplotě a při určité rychlosti. V určených časových intervalech dva na sobě nezávislí technici vizuálně odhadnou stupeň obalení částecek kameniva asfaltem s přesností na 5 %.



**Obr. 5-12:** Zařízení pro rotaci lahví [32]

U statické metody uvedené v části B je asfaltem obalené kamenivo ponořeno do destilované vody na dobu 48 hodin při teplotě 20 °C. Po uplynutí této doby se vizuálně posoudí počet zrn, která již nejsou obalena.

Pro metodu uvedenou v části C je asfaltem obalené kamenivo vystaveno ztrátě přilnavosti ve vroucí vodě za zvláštních podmínek pomocí jednoduchého přístroje (obr. 5-13 [1]), ve kterém nedochází k místnímu přehřívání.



**Obr. 5-13:** Zkušební nastavení [1]

Při kontaktu s chemickým činidlem, jehož spotřeba je úměrná neobalenému povrchu kameniva, se stanoví míra pokrytí asfaltem podle kalibrační křivky stanovené přesně definovaným postupem. Použitým činidlem je kyselina chlorovodíková pro vápenatá kameniva a kyselina fluorovodíková pro křemičito-vápenatá nebo vápenatá kameniva.

Všechny metody jsou zde uvedeny pro přehled a ucelený náhled na normu. V této práci však není předmětem posuzovat metody v částech A a C. Podrobné postupy těchto metod lze nalézt v samotné normě. V následujících oddílech je práce zaměřena na podrobnější popis statické zkoušky části B.

### 5.2.3 *Statická metoda*

#### 5.2.3.1 *Zkušební zařízení a pomůcky*

- Nádoba s plochým dnem (obr. 5-1) – tato nádoba musí mít dno dostatečné šířky, aby umožňovala umístění 150 zrn kameniva v jedné vrstvě, a musí mít dostatečnou výšku umožňující úplné ponoření kameniva ve vodě.
- Míchací mísa (obr. 5-2) – objem 1,5 l.
- Sušárna (obr. 5-5) – zařízení pro oddělený ohřev kameniva a pojiva na teplotu danou v rozsahu 135 °C.
- Destilovaná voda.

#### 5.2.3.2 *Příprava zkoušky*

Odebere se vzorek kameniva v souladu s ČSN EN 932-1 [39] ze zásobníku nebo skládky v lomu s převládající frakcí 6-10 mm a odešle se do laboratoře v souladu s ČSN EN 932-2 [40]. Vzorek asfaltu se odlije do utěsněné kovové nádoby.

Vzorky kameniva se připraví v souladu s normou EN 12697-2 [38], aby byla získána sada 150 zrn kameniva propadnuvšího zkušebním sítem 10 mm a zachyceného na síti 6 mm (obr. 5-14).





**Obr. 5-14:** Odpočítaných 150 zrn kameniva frakce 6/10 mm

#### 5.2.3.3 *Postup zkoušky*

Zrna kameniva a pojiva a míchací miska se ohřejí odděleně na teplotu  $(130 \pm 5)^\circ\text{C}$ . Do míchací nádoby se vloží vzorek kameniva a přidá podíl pojiva rovnající se 4% celkové hmotnosti částic kameniva (obr. 5-8). Vzorky se ručně promíchají tak, aby bylo kamenivo rovnoměrně obaleno pojivem (obr. 5-9).

Pokud nejsou všechna zrna kameniva celistvě obalena asfaltem po 5 minutách mísení, je nutné opakovat zkoušku s novým vzorkem kameniva a zvýšeným podílem pojiva. Podíl pojiva musí být zvyšován v krocích 0,5% hmotnosti kameniva, dokud není směs kompletně obalena.

Obalený vzorek kameniva se umístí do misky a zamezí se vzájemnému kontaktu mezi jednotlivými částicemi.

Miska se nechá stát po dobu  $1 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ , poté se vzorek zcela zalije destilovanou vodou o teplotě  $(19 \pm 1)^\circ\text{C}$ , tedy laboratorní teplotě. Tato teplota se udržuje po dobu  $(48 \pm 1) \text{ h}$ . Po uplynutí stanovené doby ponoření se vylije voda a obalený vzorek se nechá oschnout. Všechna zrna kameniva se zkontrolují, zda jsou kompletně obalena pojivem. Pokud jsou pojivem neúplně obalena více než tři zrna kameniva vzorku, je nutné zopakovat uvedený postup zkoušky na třech dalších vzorcích. Tyto zkoušky mohou být prováděny současně.

#### 5.2.3.4 *Vyhodnocení přilnavosti*

Výsledkem pro každý druh kameniva je počet zrn kameniva s neúplným obalením zrn kameniva pojivem. Pokud dojde k opakování zkoušek z důvodu neobalení tří a více zrn, musí být výsledek střední hodnotou (průměrem) ze čtyř zkoušek.

### 5.3 **Švýcarská metoda**

#### 5.3.1 *Předmět*

Jedná se o návrh [4] vycházející ze švýcarské národní normy [2]. Tento návrh má upravit stávající evropskou normu EN 12697-11: 2005. V části A metody rotujících lahví se jedná o změnu mísící teploty a posuzování stupně obalení dle grafického vzoru. Pro přehled jsou v tabulkách 3-1 a 3-2 změny zvýrazněny **červenou** barvou.

V části B statické metody jde o změnu směšovací teploty, délky a teploty temperování a o změnu posuzování stupně obalení kameniva asfaltovým pojivem pomocí grafického vzoru (změny jsou v tabulkách 3-1 a 3-2 zvýrazněny **modře**).

K tomuto kroku bylo přistoupeno z důvodu nedostatečné průkaznosti chování asfaltového filmu na povrchu kameniva. Část C zůstává nezměněna.

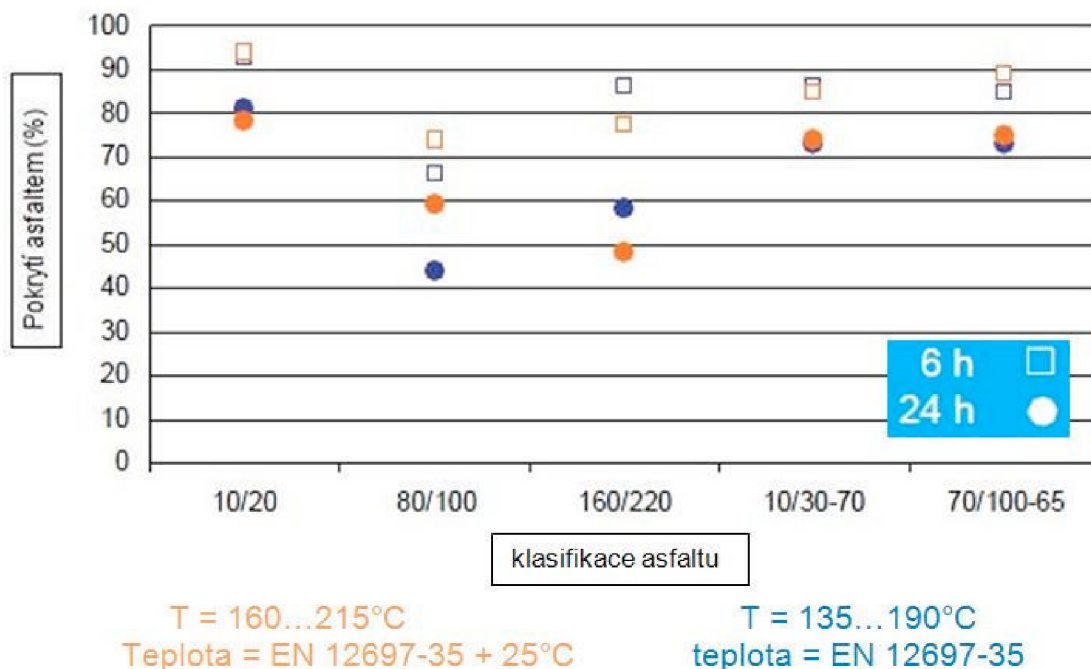
#### 5.3.2 *Metoda rotující lahve*

##### 5.3.2.1 *Navrhované změny*

Podle normy EN 12697-11 musí být teplota pro míchání kameniva s asfaltem o 25 °C vyšší než referenční teplota směsi, jak je definováno v normě ČSN EN 12697-35 [35]. Posuzování stupně obalení kameniva pojivem je hodnoceno vizuálně, po 6 h, 24 h, případně i větších intervalech, s přesností na nejbližších 5 %. Obalení je tedy zařazeno až ve 20 kategoriích (5, 10, 15, ..., 100 %).

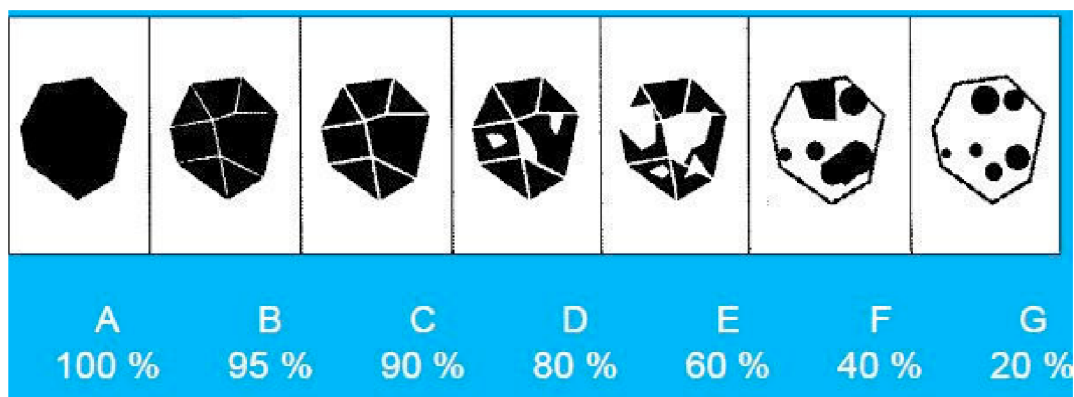
Studie [4] ukazuje, že mísící teplotě + 25 °C, je možné se vyhnout. Byly provedeny testy válcování lahví s použitím referenčního typu kameniva, které bylo obaleno asfaltem různých penetrací. Kamenivo bylo vystaveno rotaci v lahvích 6 a 24 h a následně byl posuzován stupeň obalení kameniva a rozdíly u vzorků zkoušených s teplotou předepsanou v EN 12697-35 + 25 °C a bez této teploty. Je zde jasně dokázáno, že se lze

vyhnout extra teplotě 25 °C. Vliv rozdílných teplot u jednotlivých vzorků byl minimální. Vše je přehledně znázorněno na obrázku 5-15 [4].



**Obr. 5-15:** Obalení asfaltem v závislosti na různých dobách působení vody za rozdílných teplot [4]

Pro zjednodušení posuzování stupně obalení povrchu kameniva asfaltem byl použit grafický vzor, přejatý ze švýcarské normy (obr. 5-16 [2]). Je zde znázorněn stupeň obalení kameniva dělený do 7 kategorií s odpovídající hodnotou v procentech obalené plochy.



**Obr. 5-16:** Vyhodnocení stupně obalení povrchu kameniva asfaltem dle normy [2]

### 5.3.3 Statická metoda

V následujících oddílech je značná část věnována vysvětlení, proč a jak bylo přistoupeno k návrhu dle švýcarského postupu a co vedlo k otázce, proč by se měly teploty temperování a metoda posuzování stupně obalení změnit.

#### 5.3.3.1 Navrhované změny

Pro zkoušky obalení kameniva asfaltem ve švýcarských testech bylo použito pět různých typů asfaltových pojiv, včetně PmB, s penetrací v rozmezí od 10 do 200 [0,1 mm]. Tato pojiva reprezentují nečastěji používané typy pojiv ve Švýcarsku.

Bylo použito minerální kamenivo, které vystihuje nejčastější švýcarské typy hornin používané v tamním silničním stavitelství, mezi nimi i švýcarská referenční směs, která se skládá z 5 typických druhů kameniva charakteristických pro tuto zemi (tab. 5-3 [33]).

Název vzorku	Původ	Druh
M1	Ambrosini (Lodrino TI)	granitická rula
M2	St-Léonard (VS)	křemenec
M3	Gasperini (Attinghausen UR)	alpský vápenec
M4	Balmholz (Sundlauenen BE)	alpský vápenec
M5	Comibit (Sigrino TI)	vápenec/dolomit
M6	Aebisholz (Oensingen SO)	aluviální sedimenty
M7	Referenční směs z 5 druhů kameniva	
M8	Weiach (ZH)	aluviální sedimenty
M9	Oldis (Haldenstein GR)	aluviální sedimenty
M10	Bartenheim (F)	aluviální sedimenty

**Tab. 5-3:** Přehled kameniva [33]

#### 5.3.3.2 Vyhodnocení statické zkoušky podle EN 12697-11 část B

Švýcarsko s úspěchem používalo po mnoho let statickou zkoušku ponořením do vody. Protože metoda popsána v EN 12697-11 části B se podobá švýcarské metodě, byla provedena předběžná studie s použitím původní evropské metody v části B. Studie byla prováděna z důvodu možného nahrazení švýcarské národní normy. Zkouška proběhla na pěti typech asfaltových pojiv, včetně dvou pojiv typu PmB, smíchaných s referenční směsí kameniva M7. Směs M7 charakterizuje nejčastější směs kameniva používanou ve

Švýcarsku, skládající se z pěti druhů odlišné petrografie. Pro asfalt 70/100 byla navíc testována přilnavost s kamenivem M1 a M4.

Zkouška nebyla úspěšná u polymerem modifikovaných pojiv a tvrdého asfaltu 10/20, protože nebylo dosaženo kompletního obalení, a v některých případech se obalené částice lepily k sobě a tvořily hrudky (tab. 5-4 [33]). Posouzení stupně obalení kameniva pojivem bylo znemožněno těsným slepením jednotlivých částic k sobě. V případě neúplného obalení evropská norma navrhuje zvýšení množství pojiva v krocích po 0,5 %. Toto navyšování pojiva je do určité míry účinné u nemodifikovaného asfaltu, ale selhává v případě "mazlavých" polymerních asfaltů s vysokou viskozitou.

V části B evropské normy je teplota mísení asfaltového pojiva a kameniva 130 °C a je konstantní pro všechna pojiva bez ohledu na jejich viskozitu. Tato teplota je příliš nízká pro tvrdé asfalty a vysoce modifikované PmB. Tento nedostatek se vyskytuje pouze v části B. V částech A a C je teplota směsi závislá na viskozitě a řídí se referenčními teplotami  $T_R$  pro přípravu horké směsi uvedenými v EN 12697-35 [33]. Ve snaze vyhnout se tvorbě shluků byla pro zkoušky přilnavosti opakovaně použita referenční teplota směsi  $T_R$  pro horké směsi, která je obdobou teploty směsi definované v metodě uvedené v části C.

Díky této změně v postupu obalování se podařilo, aby byla každá částice zcela povlečena a separována od sousedních částic po temperování ve vodní lázni.

S výjimkou nejměkčího pojiva vedly všechny zkoušky k úplnému obalení částic kameniva a to pro oba typy kameniva M1 a M4 s různým složením (tab. 5-4 [33]). Důvodem tohoto výsledku byla nízká teplota kondicionování 19 °C. U pojiva se střední a vysokou viskozitou bylo při této teplotě porušení asfaltového filmu na povrchu kameniva velmi pozvolné.

druh pojiva	druh kameniva	počet nekompletně obalených částic	
		mísící teplota 130 °C	mísící teplota $T_R = 135 \dots 180 \text{ °C}$ Dle EN 12697-35
asfalt 70/100	M7	12	0
asfalt 70/100	M4	8	0
asfalt 70/100	M1	7	0
asfalt 10/20	M7	shluky	0
asfalt 160/220	M7	25	5
PmB 10/30-70	M7	shluky	0
PmB 70/100-65	M7	shluky	0

**Tab. 5-4:** Výsledky obalení při použití původní metody uvedené v části B [33]

Výsledky předběžné studie poukázaly na tři hlavní nedostatky normy EN 12697-11:

- konstantní mísící teplota
- nízká teplota vody při kondicionování
- necitlivé vyhodnocení výsledku (vyhoví / nevyhoví)

První dva parametry byly studovány podrobněji a jsou popsány v následujících oddílech.

#### 5.3.3.3 Změny v hodnocení u metody v části B

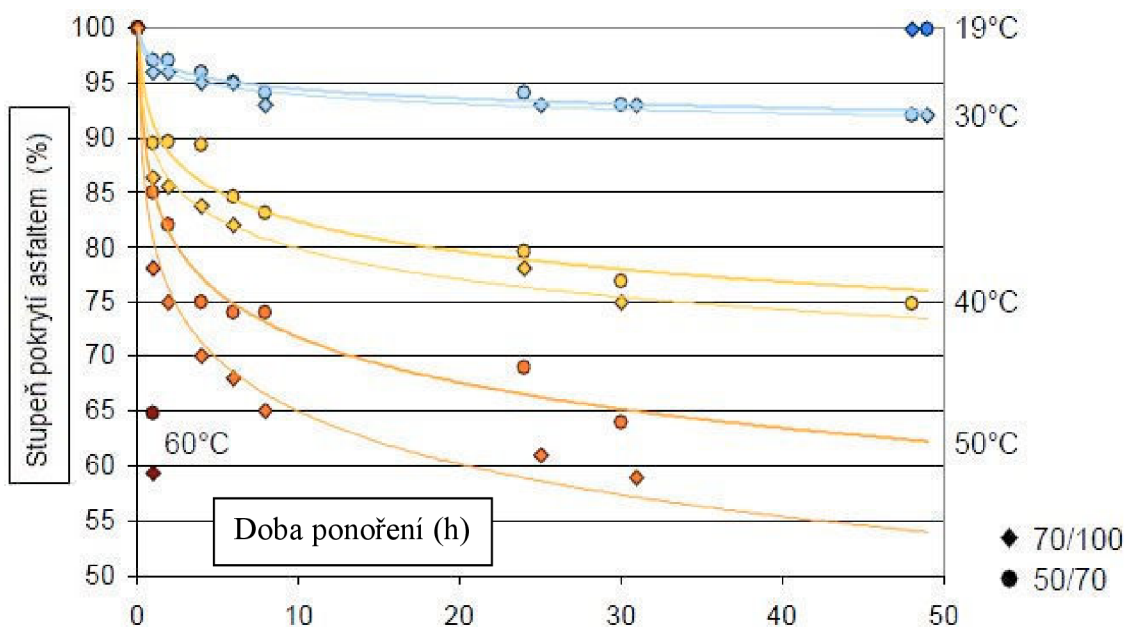
Pro vyhodnocení výsledků výpočtu dle EN 12697-11 části A byl použit navíc grafický vzor ukazující různé stupně obalení částic (obr. 5-16 [2]). Stupeň povlaku se počítá jako průměr stupně obalení všech částic v procentech.

Výsledky předběžné studie ukázaly, že teplota vody 19 °C, předepsaná ve statické metodě B, nezpůsobuje narušení asfaltové vrstvy na povrchu kameniva. Pokud je požadován stupeň povlečení kameniva jako konečný výsledek, je třeba zvýšit tepelné namáhání na tuto vazbu z důvodu lepší průkaznosti stupně obalení u jednotlivých typů pojiva a kameniva. To vede k otázce o správné teplotě působící vody, která byla řešena v první sérii zkoušek se zaměřením na změnu teploty temperovací vody v rozmezí 19 – 60 °C. Byla vybrána dvě nemodifikovaná pojiva s různou tuhostí pro hodnocení teploty temperovací vody. Mísící teplota byla nastavena na 150 °C pro asfalt s penetrací

50/70 a 145 °C pro asfalt 70/100 v souladu s referenční teplotou  $T_R$  pro výrobu horké směsi, která je definována v EN 12697-35 [35].

Obrázek 5-17 [33] ukazuje stupeň povlečení kameniva dvěma typy pojiva, kdy na částice působila voda o různé teplotě během předepsané doby ponoření. S rostoucí teplotou vody klesal stupeň obalení a rozdíl mezi těmito dvěma pojivy rostl. Při 50 °C lze vyčíst již dobrou rozlišovací schopnost, ovšem tato teplota je vyšší než je teplota bodu měknutí pojiva. Při této teplotě je pojivo již tekutina, která neodráží skutečný stav v silniční výstavbě ve střední Evropě [33].

Jako dobrý kompromis se jevila volba teploty vody 40 °C. U 90 % pojiv používaných ve Švýcarsku je jejich bod měknutí pod 40 °C. Tato teplota také realističtěji simuluje stav na povrchu silnic při dešti za slunečného počasí, kdy po určitou dobu dochází k ochlazování povrchu na cca 40 °C. V teplejších klimatických pásmech může být vyšší teplota kondicionování užitečná, protože povrch krytu je vystavován vyšší teplotě.



**Obr. 5-17:** Stupeň obalení kameniva asfaltem v závislosti na teplotě vody a době ponoření; asfalt 50/70: kruhy, asfalt 70/100: diamanty [33]

Mísící teplota se liší u všech metod evropské normy. Dvě z nich se odkazují na referenční teplotu  $T_R$  (tab. 5-5 a 5-6 [33]) pro výrobu horké směsi (v části C,  $T = T_R$ ; v části A,  $T = T_R + 25$  °C). U tvrdých asfaltů (například asfalt 20/30) mísící teplota  $T_R +$

25 °C vykazuje teploty blížíící se k 200 °C. To je více, než je přípustná maximální teplota pro ohřev asfaltových pojiv, která je definována jako teplota bodu měknutí + 100 °C [41]. To poukazuje na rozpor mezi normou pro přípravu analytických vzorků asfaltu [41] a normou pro laboratorní výrobu horké směsi [35].

druh pojiva	bod měknutí [°C]	mísící teplota $T_R$ (podle EN 12697-35) [°C]	mísící teplota $= T_R - 15$ °C [°C]
10/20	58 – 78	dle výrobce (cca. 180-190)	
20/30	55 – 63	180	165
35/50	50 – 58	165	150
50/70	46 – 54	150	135
70/100	43 – 51	145	130
100/150	39 – 47	140	125
160/220	35 – 43	135	120

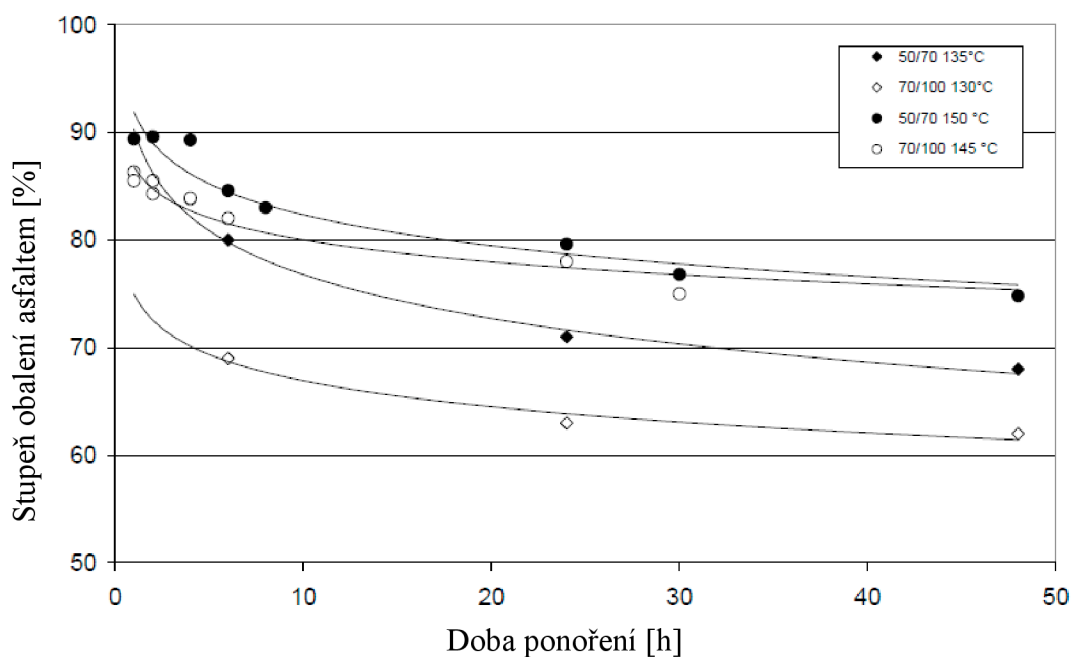
**Tab. 5-5:** Mísící teplota pojiva podle EN 12697-35 [33]

druh PmB	bod měknutí [°C]	mísící teplota T dle výrobce [°C]	mísící teplota $T - 15$ °C [°C]
10/30-70	71	180	
70/100-65	65	180	
E 25/55-65	64	160	150
E 65/105-60	75	150	135
C 25/55-55	59	155	130
C 45/80-50	56	145	125

**Tab. 5-6:** Mísící teplota modifikovaných pojiv dle výběru autorů [33]

Na obrázku 5-17 [33] jsou dále znázorněny výsledky zkoušek dvou druhů pojiv, vycházející velmi těsně, s výjimkou teploty 50 °C. Za účelem zvýšení citlivosti zkušební metody ponořením bylo rozhodnuto provést další zkoušky při mísící teplotě  $T_R - 15$  °C (tabulka 5-5 a 5-6 [33]). Výsledky znázorněné na obrázku 5-18 [33] ukazují výrazný vliv mísící teploty směsi na obalení kameniva asfaltem, přičemž výrazný účinek se projevil u třídy asfaltu 70/100. Při použití vyšších mísících teplot  $T_R$  byla sice adheze mezi asfaltem a kamenivem účinnější, o to menší pak byl zřetelný rozdíl stupně obalení. Nižší mísící teploty  $T_R - 15$  °C měly naopak za následek nižší afinitu a jasnější rozlišení mezi různými tuhostmi pojiva. Z tohoto důvodu je pro oblast Švýcarska navržena směšovací teplota  $T_R - 15$  °C [33].

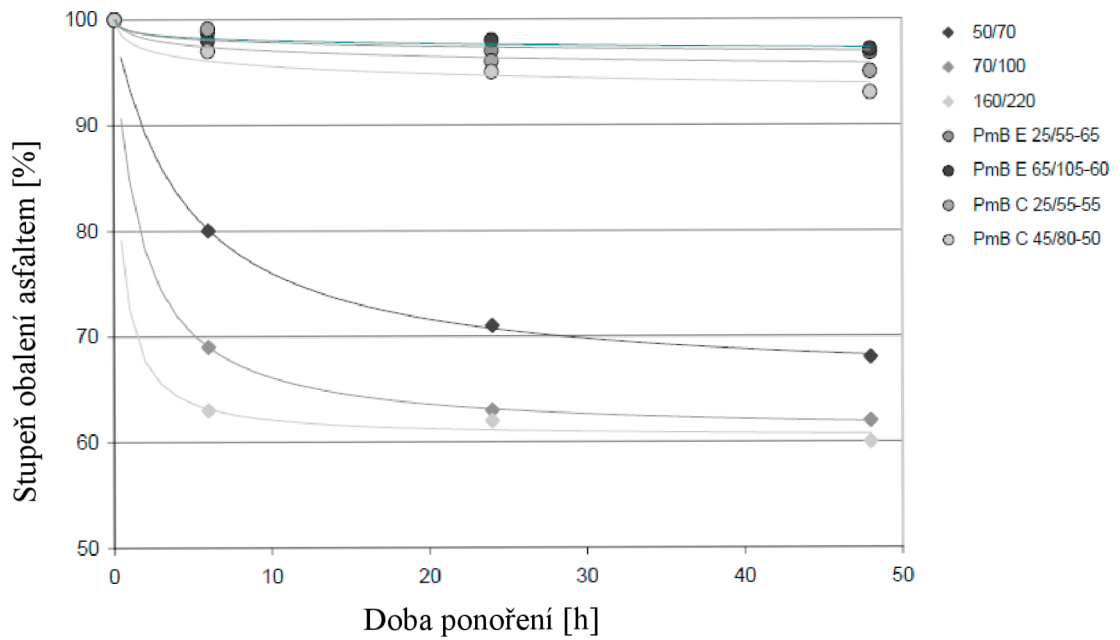




**Obr. 5-18:** Stupeň obalení kameniva asfaltem v závislosti na mísící teplotě směsi a době ponoření; teplota kondicionování: 40°C [33]

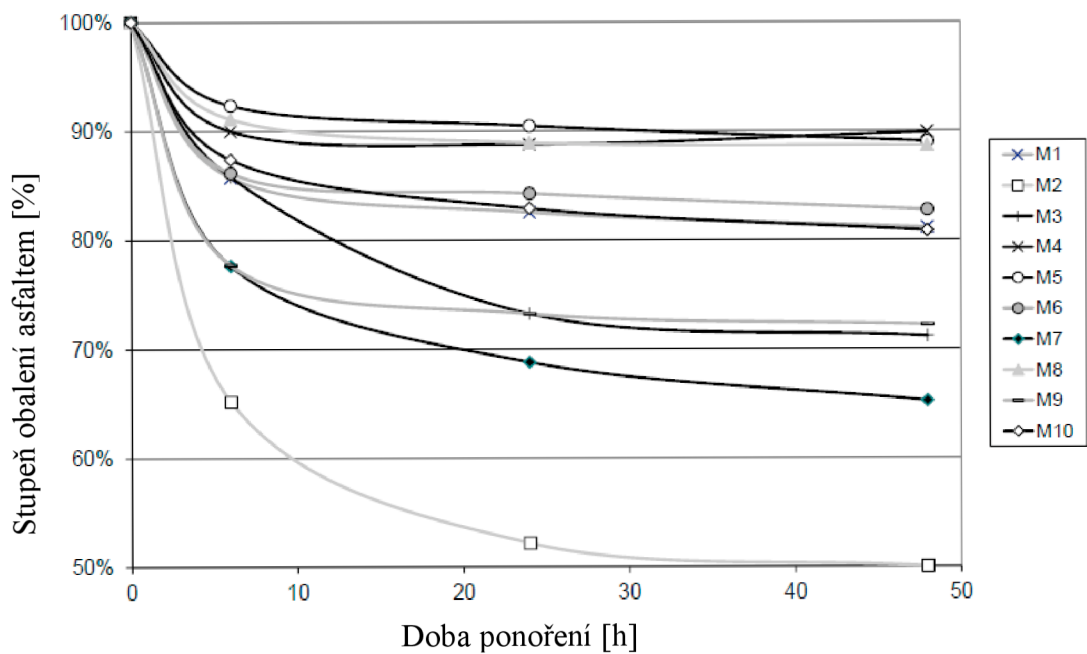
#### 5.3.3.4 *Ověření platnosti zlepšené metody B s různými typy pojiva a kameniva*

Zlepšená metoda B byla prověřena řadou různých typů pojiva a kameniva. Dobrá vypovídací schopnost se projevila u nemodifikovaných pojiv. Polymerem modifikovaný asfalt měl za následek téměř úplné obalení (obr. 5-19 [33]). Nelze s jistotou uvést, zda lze tento jev přičíst vynikajícím adhezním vlastnostem polymerem modifikovaných pojiv.



**Obr. 5-19:** Stupeň obalení u různých pojiv na referenční směsi M7; teplota kondicionování 40 °C [33]

Stejně tak jako u zkoušených asfaltů, měla zkouška dobrou vypovídací schopnost i u různých druhů kameniva, přestože stupeň obalení se pohyboval pod 50 %.



**Obr. 5-20:** Obalení asfaltem u různých druhů kameniva při použití asfaltu 70/100; teplota kondicionování 40 °C

Toto zjištění vede k otázce, zda je citlivost zkoušky dostačující. Bývalá Švýcarská norma [2] používá pro kondicionování teplotu vody 60 °C a dobu chlazení 5 minut. To v některých případech vedlo až k méně jak 30 % obalené plochy kameniva. Tento jev lze připsat vyšší teplotě vody oproti předepsané teplotě v EN, a tedy i rychlejšímu efektu strippingu. Nižší teplota kondicionování, společně s dobou ochlazování 60 minut dle evropské normy, může vysvětlovat poměrně vysoký stupeň obalení asfaltem, které lze pozorovat na obrázku 5-20 [33].

#### 5.3.3.5 Závěry

Závěrem byly shrnuty následující návrhy, které by měly zlepšit postup a průkaznost statické metody B v normě EN 12697-11 [33]:

- Použití referenční teploty  $T_R$  z normy pro laboratorní výrobu horké směsi [35]. Pro lepší rozlišení výsledků je doporučeno použít teplotu směsi  $T_R - 15$  °C.
- Zvýšení teploty vody pro temperování na 40 °C namísto původních 19 °C. Tato teplota se může lišit v závislosti na klimatických podmínkách jednotlivých států a prodloužení doby temperování na 24 h.
- Vyjádření výsledků procentuelní plochou obalení asfaltovým filmem jako v části A této normy za pomoci grafického vzoru.

Co se týče posuzování stupně obalení podle grafického vzoru a jeho procentuelního odstupňování, nelze si nevšimnout nápadné podobnosti vzoru přejatého z bývalé švýcarské normy s českou národní normou ČSN 73 6161. Je jen otázkou, kde se tato podobnost vzala.

## **6. POPIS PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK S UVEDENÍM VÝSLEDKŮ**

### **6.1 ČSN 73 6161: Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu**

#### **6.1.1 Popis provedené zkoušky**

Podstatou zkoušky bylo obalit kamenivo asfaltovým pojivem za podmínek předepsaných v normě ČSN 73 6161 [3] a vystavit ho na jednu hodinu účinkům teplé obnažovací vody. Byla prováděna na dvou vzorcích vysušeného kameniva o hmotnosti 300 g. Zkouška byla aplikována na kamenivu vyráběném v lomu Želešice frakce 8 – 16. Zrna byla obalena asfaltovým pojivem penetrace 50/70 bez použití adhezní přísady.

#### **6.1.2 Vyhodnocení zkoušky se suchým kamenivem**

Po hodinovém působení teplé obnažovací vody 60 °C se vizuálně vyhodnotila míra porušení asfaltového povlaku na hranách a plochách jednotlivých zrn zkoušeného kameniva. Míra svlečení kameniva od asfaltu byla posuzována nezávisle dvěma pracovníky. Pomůckou pro hodnocení byla tabulka 5-2 [3]. Výsledky zkoušky dokumentují přiložené fotografie (obr. 6-1 až 6-2).

U pojiva 50/70 došlo působením obnažovací teplé vody k minimálnímu účinku odstranění asfaltového filmu z kameniva. Na malých ploškách zůstaly volné neobalené části. Z důvodu tmavosti kameniva byla použita pro hodnocení lupa a rozsvícená lampa. V souladu s normou je stupeň obalení, stanovený na dvou vzorcích dvěma nezávislými pracovníky, charakterizován písmenem C – vyhovující. Celková obalená plocha po zkoušce byla větší než 80 %.



**Obr. 6-1:** Vzorek č. 1A pro zkoušku obalení dle ČSN 73 6161



**Obr. 6-2:** Vzorek č. 1B pro zkoušku dle ČSN 73 6161

### **6.1.3**      *Výsledky prováděné zkoušky*

Protokol o provedené zkoušce, tabulky a výsledky jsou uvedeny v Příloze A.

## **6.2 EN 12697-11: 2005: Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem**

### **6.2.1 *Popis provedené zkoušky***

Podstatou zkoušky bylo obalit 150 zrn kameniva asfaltovým pojivem za podmínek předepsaných v normě EN 12697-11 [1] a vystavit ho na 48 hodin účinkům obnažovací vody o teplotě 20 °C. Byla prováděna na jednom vzorku vysušeného kameniva. Zkouška byla aplikována na kamenivu vyráběném v lomu Želešice frakce 6 – 10. Zrna byla obalena asfaltovým pojivem penetrace 50/70 bez použití adhezní přísady.

### **6.2.2 *Vyhodnocení zkoušky***

Po 48 hodinách působení obnažovací vody teploty 20 °C a odlití vody se na suchu vizuálně vyhodnotila míra porušení asfaltového povlaku na hranách a plochách jednotlivých zrn zkoušeného kameniva. Míra svlečení kameniva od asfaltu byla posuzována vizuálně, podle kritéria počtu neobalených zrn, kdy při více jak tří neobalených zrnech byla zkouška neplatná.

U pojiva 50/70 došlo působením obnažovací vody k nulovému účinku odstranění asfaltového filmu z kameniva (obr. 6-3). Pro snadnější určování procenta obalené plochy zrn kameniva asfaltem posloužila lampa. Obalení dosáhlo 100 % plochy, proto nebylo přistoupeno ke zkouškám s dalšími vzorky. To svědčí o špatné průkaznosti této zkoušky na obalení zrn kameniva asfaltem.





**Obr. 6-3:** Vzorek č. 2 pro zkoušku dle EN 12697-11: 2005

### **6.2.3**      *Výsledky prováděné zkoušky*

Protokol o provedené zkoušce, tabulky a výsledky jsou uvedeny v Příloze B.

## **6.3**      **Návrh změny podle švýcarského návrhu**

### **6.3.1**      *Popis provedené zkoušky*

Podstatou zkoušky bylo obalit 150 zrn kameniva asfaltovým pojivem za podmínek předepsaných v normě EN 12697-11 [1] a vystavit ho na 24 hodin účinkům obnažovací vody o teplotě 40 °C. Byla prováděna na čtyřech vzorcích vysušeného kameniva, kdy bylo spočítáno 150 zrn na každý vzorek dané frakce. Tyto vzorky byly zváženy pro určení správného množství (4 % hmotnosti kameniva) asfaltového pojiva. Zkouška byla aplikována na kamenivu vyráběném v lomu Želešice frakce 6 – 10. Zrna byla obalena asfaltovým pojivem penetrace 50/70 bez použití adhezni přísady.

### 6.3.2 Vyhodnocení zkoušky

Po 24 hodinách působení obnažovací vody teploty 40 °C a odlití vody se na suchu vizuálně vyhodnotila míra porušení asfaltového povlaku na hranách a plochách jednotlivých zrn zkoušeného kameniva. Míra povlaku asfaltu na kamenivu byla posuzována vizuálně. Pomůckou pro hodnocení byla tabulka (obr. 5-16) podle normy SN 670460 [2]. Výsledkem je procentuelní podíl obaleného kameniva stanovený aritmetickým průměrem ze čtyř vzorků. Výsledky zkoušky dokumentují přiložené fotografie (obr. 6-4 až 6-7).

U prvního vzorku došlo působením obnažovací vody k minimálnímu účinku odstranění asfaltového filmu z kameniva, avšak nebyla dostatečně obalena více jak tři zrna kameniva, jak udává norma EN 12697-11 [1]. Z toho důvodu bylo přistoupeno k dalším třem zkouškám na jednotlivých vzorcích prováděných současně. U každého vzorku byla neobalená zrna oddělena a vyrovnána do jednotlivých kategorií stupně obalení. Celková plocha obalení ze všech čtyř vzorků činila 94 %, podle grafického vzoru (obr. 5-16 [2]) tato hodnota odpovídala písmenu C. Dále se již návrh nezabýval, co písmenné označení vyjadřuje (jako je to například u ČSN 73 6161).



**Obr. 6-4:** Vzorek č. 3A





**Obr. 6-5:** Vzorek č. 3B



**Obr. 6-6:** Vzorek č. 3C



**Obr. 6-7:** Vzorek č. 3D

### **6.3.3**      *Výsledky prováděné zkoušky*

Protokol o provedené zkoušce, tabulky a výsledky jsou uvedeny v Příloze C.

## 7. ZÁVĚR

Bakalářskou prací byly ověřeny možnosti změn mísících teplot a posuzování stupně obalení podle různých statických metod. Co se týká srovnání výše uvedených norem ČSN 73 6161 [3], EN 12697-11 [1] a návrhu na změnu evropské normy podle švýcarské metodiky [4], všechny zkoumají odolnost asfaltových směsí vůči účinku vody. Teplota temperovací vody a teplota mísení směsi je u těchto zkoušek odlišná. ČSN 73 6161 a švýcarský návrh jsou si podobnější, protože vyhodnocování zkoušek se provádí vizuálně, a ukazatelem je procento obalené plochy po ukončení zkoušky podle grafického vzoru. U evropské normy je vyhodnocení obalení zrn kameniva asfaltem určeno jen na základě necitlivého hodnocení výsledku (vyhoví / nevyhoví).

V chování vazby asfalt – kamenivo ve vozovce dochází ke kombinaci jak mechanického omílání způsobeného dopravním zatížením, tak k vytěsňování asfaltu vodou. S přihlédnutím k působení vody na svlečení kameniva obaleným asfaltovým pojivem vychází česká norma jako nejprůkaznější zkouška ze všech porovnávaných metod pro zkoušení asfaltů v klimatu ČR. Je to z důvodu jak již dlouhodobého používání tohoto postupu včetně užívání grafického vzoru pro odhad procenta obalení kameniva, tak jeho nenáročnosti na laboratorní podmínky a vybavení. Návrh změny evropské normy je logickým vyústěním její nedostatečné průkaznosti a tedy i správným krokem pro její vylepšení. Co se týče ověření měřením, švýcarský návrh se choval velmi podobně jako česká norma. Používání grafického vzoru, zvýšení temperovací teploty a zkrácení doby jejího působení vedla k lepší průkaznosti evropské normy. Jako dobrá volba se tedy jevilo tyto změny aplikovat.

V současné normě EN 12697-11: 2012 [34], jsou některé změny (tab. 3-2) skutečně aplikovány, avšak rozhodující teplota temperování 19 °C a doba temperování 48 h zůstaly zachovány. Teplota pro mísení směsi byla změněna z původních 130 °C na variabilní teplotu danou druhem pojiva podle normy EN 12697-35. Obalení asfaltem je posuzováno počtem ne zcela obalených částic kameniva nebo s použitím grafického vzoru. Průkaznost těchto změn je tedy potřeba důkladně experimentálně ověřit.



## 8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DRAFT prEN 12697-11: 2005. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 11: *Determination of the affinity between aggregate and bitumen*. February 2005. 28 s.
- [2] SN 670 460: 1997. Bituminöses Mischgut, Prüfvorschriften – *Haftvermögen von bituminösen Bindemitteln an Mineralstoffen*, VSS Ausgabe, 1997.
- [3] ČSN 73 6161. *Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu*. Brno: ČNI, květen 2000. 12 s.
- [4] ANGST, C. - BELTZUNG, F.- HUGENER, M. *Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen - nationale Umsetzung der EN*, Forschungsauftrag VSS 2005/505, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, ASTRA Bericht 1289, 2010.
- [5] MOSTAFA, A. - A. ABD EL HALIM, et al. *Laboratory testing of moisture susceptibility of asphalt concrete mixes - An overview*, MAIREPAV'03 - Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, University of Minho, Guimarães, Portugal, 2003.
- [6] LITTLE, D.N. - JONES IV, D.R. *Chemical and mechanical process of moisture damage in hot-mix asphalt pavements, Proceedings of Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements*, A National Seminar, Topic 2, 2003.
- [7] GUBLER, R. - PARTL, M. - CANESTRARI, F. - GRILLI, A. *Influence of water and temperature on mechanical properties of selected asphalt pavements, Materials and Structures* 38, 523-532, 2005.
- [8] AIREY, G. D. - CHOI, Y. K. *State of the Art Report on Moisture Sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials, Road Materials and Pavement Design* 3(4): 355 – 372, 2002.
- [9] VOLKER, H. - FRIEMEL-GÖTTLICH, B. *Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode* [online] September 2009, poslední aktualizace 28.07.2011 [cit. 2013-15-05]. Dostupné z: <<http://bast.opus.hbz.nrw.de/volltexte/2011/128/pdf/S59.pdf>>.

- [10] 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.
- [11] BOJKOVSKÝ, M. *Termodynamika – van der Waalsovy síly* [online]. 2009, [cit. 2013-15-05]. Dostupné z: <http://fikus.omska.cz/~bojkovsm/termodynamika/vdws.html>
- [12] JAMIESON, I. L. - MOULTHROP, J. S. - JONES, D. R.: *SHRP results on binderaggregate adhesion and resistance to stripping*. Asphalt Yearbook 1995, 17-21, 1995.
- [13] KUDRNA, J. Návrh a stavba vozovek. Krytové vrstvy vozovek. *Materiály a hmoty ve výstavbě pozemních komunikací* [online]. 2011, 22 s. [cit. 2013-15-05]. Dostupné z: <http://www.vzdelavanimkequalite.cz/PDFs/DT%203%20Asfaltove%20vrstvy.pdf>.
- [14] HARNSBERGER, M. *Catalytic effects of aggregate on oxidation*. Presented at Aging of Paving Asphalts Conference. Laramie, Wyoming: Western Research Institute, 2003.
- [15] MESSLER, Robert W. *Joining of materials and structures: from pragmatic process to enabling technology*. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004, 790 s. ISBN 07-506-7757-0.
- [16] MASAD, E. - TASHMAN, L. - LITTLE, D. N. - ZBIB, H. *Viscoplastic modeling of asphalt mixes with the effects of anisotropy, damage and aggregate characteristics*. Submitted to the Journal of Mechanics of Materials, 2004.
- [17] MASSON, J. F. - LEBLOND, V. - MARGESON, J. *Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy*, Journal of Microscopy, 221, pp. 17-29, 2006.
- [18] BARTOVSKÁ, L. – ŠIŠKOVÁ, M. *Co je co v povrchové a koloidní chemii: Modely elektrické dvojvrstvy* [online]. Praha: VŠCHT. Verze 1.0, 2005 [cit. 2013-15-05]. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es001/hesla/modely\\_elektricke\\_dvojvrstvy.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es001/hesla/modely_elektricke_dvojvrstvy.html).
- [19] THELEN, E. *Surface energy and adhesion properties in asphalt-aggregate Systems*. HRB Bulletin 192 (pp. 63-74). Washington D.C.: Highway Research Board, 1958.

- [20] PETERSEN, C. J. *Quantitative functional group analysis of asphalts using differential infrared spectrometry and selective chemici reactions - Theory and application*. Transportation Research Record, 1096, 1, 1986.
- [21] PETERSEN, C. J. - PLANCHER, H. *Model studies and interpretive review and the competitive adsorption and water displacement of petroleum asphalt chemical functionalities on mineral aggregate surfaces*. Petroleum Science & Technology, 16, 89-131, 1998.
- [22] CURTIS, C. W. - CLAPP, D. J. - JEON, Y. W. - KIGGUNDU, B. M. *Adsorption of model asphalt functionalities, AC-20, and oxidized asphalts on aggregate surfaces*. Transportation Research Record, 1228, 112- 127, 1989.
- [23] ARDEBRANT, H. - PUGH, R. J. *Surface acidity/basicity of road stone aggregates by adsorption from non-aqueous solutions*. Colloids and Surfaces, 53, 101-116, 1991.
- [24] PARK, S. - JO, M. C. - PARK, J. B. *Adsorption and thermal desorption behaviour of asphalt-like functionalities on silica*. Adsorption Science & Technology, 18, 675-684, 2000.
- [25] ERNSTSSON, M. - LARSSON, A. *A multianalytical approach to characterize acidic adsorption sites on a quartz powder*. Colloids and Surfaces, 168, 215-230, 1999.
- [26] HARDERS, O. - NOSLER, I. *Einfluss der Oberflächenaktivitat von Mineralstoffen auf das Gebrauchsverhalten von Walzasphalt*. Bitumen, 65, 1, 2003.
- [27] LOGARAJ, S. *Chemistry of asphaltaggregate interaction - Influence of additives*. Presented at the Moisture Damage Symposium, Laramie, Wyoming, 2002.
- [28] LITTLE, D. N. - JONES, D. R. *Chemical and mechanical mechanisms of monture damage in hot mix asphalt pavements*. National Seminar in Moisture Sensitivity, San Diego, California, 2003.
- [29] SCHINDLBAUER, H. - SCHEUER, F. *Über die Stabilität von basischen Haftmitteln in Strassenbitumen*. Bitumen, 3, 98-103, 1986.

- [30] TARRAR, A. R. - WAGH, V. P. *The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding*. Report SHRP-A/ UIR-91-507. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1992.
- [31] BOJKOVSKÝ, M. *Termodynamika – Gibbsova energie* [online]. 2009, [cit. 2013-15-05]. Dostupné z: [http://fikus.omska.cz/~bojkovsm/termodynamika/gibbsova\\_energie.html](http://fikus.omska.cz/~bojkovsm/termodynamika/gibbsova_energie.html).
- [32] RADIMSKÝ, M. *Využití prEN 12697-11 a prEN 12697-12 do soustavy ČSN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, 2001. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Květoslav Urbanec
- [33] HUGENER, M. – BELTZUNG, F. – ANGST, C. *Affinity between bitumen and aggregates: Improvement of the EN static test method* [online]. Presented at 5th Euraspalt & Eurobitume Congress, Istanbul 2012, [cit. 2013-15-05]. Dostupné z: <http://www.impbautest.ch/upload/cms/user/2012-06-A5EE-141.pdf>.
- [34] ČSN EN 12697-11. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 11: Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem*. Praha: ÚNMZ, listopad 2012. 12 s.
- [35] ČSN EN 12697-35+A1. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 35: Laboratorní výroba směsi*. Brno: ČNI, prosinec 2007. 28 s.
- [36] ČSN EN 12591. *Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty*. Brno: ČNI, září 2009. 28 s.
- [37] ČSN ISO 56. *Zkušební síta. Kovová tkanina, děrovaný plech a elektroformovaná folie. Jmenovité velikosti otvorů*. Brno: ČNI, říjen 1994. 8 s.
- [38] ČSN EN 12697-2+A1. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 2: Zrnitost*. Brno: ČNI, prosinec 2007. 12 s.
- [39] ČSN EN 932-1. *Zkoušení všeobecných vlastností kameniva - Část 1: Metody odběru vzorků*. Brno: ČNI, prosinec 1997. 28 s.
- [40] ČSN EN 932-2. *Zkoušení všeobecných vlastností kameniva - Část 2: Metody zmenšování laboratorních vzorků*. Brno: ČNI, březen 2000. 16 s.
- [41] EN 12594 *Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků*. Brno: ČNI, srpen 2007. 12 s.

## 9. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1:	Schéma adheze v asfaltu [9].....	12
Obr. 2-2:	Typické povrchové chemické reakce křemene a vápence v různém pH prostředí [9].....	16
Obr. 2-3:	Schematické znázornění mechanického zablokování [15].....	17
Obr. 2-4:	Snímek asfaltu pořízený metodou mikroskopie atomárních sil, ..... rozměr snímku (15 $\mu\text{m}$ x 15 $\mu\text{m}$ ) [17].....	18 18
Obr. 2-5:	Elektropozitivní a elektronegativní povrchové vlastnosti dvojvrstev [15] ..	19
Obr. 2-6:	Elektrostatický model podle Sterna [9].....	20
Obr. 2-7:	Intenzita adsorpční interakce mezi organickými funkčními skupinami a povrchem kameniva [9].....	22
Obr. 2-8:	Schematické znázornění orientace aminů na kamenivu [9].....	25
Obr. 2-9:	Zásady měření kontaktního úhlu [9] .....	28
Obr. 4-1:	Kamenivo – lokalita Želešice [32] .....	38
Obr. 5-1:	Krystalizační skleněná miska .....	41
Obr. 5-2:	Keramická mísa .....	41
Obr. 5-3:	Digitální váha .....	41
Obr. 5-4:	Plechovka s asfaltovým pojivem .....	41
Obr. 5-5:	Elektrická sušárna .....	42
Obr. 5-6:	Vibrační stroj s normovanými sítý .....	42
Obr. 5-7:	Kamenivo frakce 8-16 mm.....	42
Obr. 5-8:	Směs před mícháním .....	43
Obr. 5-8:	Smíchaná směs .....	43
Obr. 5-10:	Rozprostřené částičky obaleného kameniva po zalití destilovanou vodou a temperování .....	44
Obr. 5-11:	Zkušební lahev s příslušnými rozměry [1].....	47
Obr. 5-12:	Zařízení pro rotaci lahví [32] .....	48
Obr. 5-13:	Zkušební nastavení [1] .....	48
Obr. 5-14:	Odpočítaných 150 zrn kameniva frakce 6/10 mm .....	50
Obr. 5-15:	Obalení asfaltem v závislosti na různých dobách působení vody za rozdílných teplot [4] .....	52



Obr. 5-16: Vyhodnocení stupně obalení povrchu kameniva asfaltem dle normy .....	52
Obr. 5-17: Stupeň obalení kameniva asfaltem v závislosti na teplotě vody a době ponoření; asfalt 50/70: kruhy, asfalt 70/100: diamanty [33].....	56
Obr. 5-18: Stupeň obalení kameniva asfaltem v závislosti na mísící teplotě směsi a době ponoření; teplota kondicionování: 40°C [33].....	58
Obr. 5-19: Stupeň obalení u různých pojiv na referenční směsi M7; teplota kondicionování 40 °C [33].....	59
Obr. 5-20: Obalení asfaltem u různých druhů kameniva při použití asfaltu 70/100; teplota kondicionování 40 °C.....	59
Obr. 6-1: Vzorek č. 1A pro zkoušku obalení dle ČSN 73 6161 .....	62
Obr. 6-2: Vzorek č. 1B pro zkoušku dle ČSN 73 6161 .....	62
Obr. 6-3: Vzorek č. 2 pro zkoušku dle EN 12697-11: 2005.....	64
Obr. 6-4: Vzorek č. 3A .....	65
Obr. 6-5: Vzorek č. 3B.....	66
Obr. 6-6: Vzorek č. 3C.....	66
Obr. 6-7: Vzorek č. 3D .....	67

## 10. SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1: Adhezní modely [9].....	15
Tab. 2-2: Mechanismy porušení [9].....	29
Tab. 2-3: Výběr zkušebních metod pro řešení problému "strippingu" [9] .....	32
Tab. 2-4: Výběr zkušebních metod využívajících asfaltové vzorky (normativně hutněná tělesa) pro analýzu přilnavosti asfaltu nebo "strippingu" [9] .....	33
Tab. 3-1: Rozdíly postupů mezi evropskou a českou normou pro posouzení přilnavosti asfaltu ke kamenivu.....	35
Tab. 3-2: Rozdílné postupy mezi evropskou normou z roku 2012 a švýcarským pozměňovacím návrhem z roku 2010 .....	36
Tab. 4-1: Obsah minerálů v kamenivu z oblasti Želešice [32].....	38
Tab. 4-2: Přehled mechanicko-fyzikálních vlastností asfaltu 50/70 (AP-65).....	39
Tab. 5-1: Pracovní teploty [3].....	44
Tab. 5-2: Vyhodnocení přilnavosti [3] .....	45
Tab. 5-3: Přehled kameniva [33] .....	53

Tab. 5-4:	Výsledky obalení při použití původní metody uvedené v části B [33] .....	55
Tab. 5-5:	Mísící teplota pojiva podle EN 12697-35 [33].....	57
Tab. 5-6:	Mísící teplota modifikovaných pojiv dle výběru autorů [33] .....	57

## SEZNAM ZKRATEK

ČSN	česká technická norma
ČSN EN	evropská norma převzatá do národního systému norem ČR
ČNI	český normalizační institut
ÚNMZ	úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
EN	evropská norma
prEN	návrh evropské normy
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci
TC	technická komise (Technical Committee)
CEN	evropský výbor pro normalizaci (European Committee for Standardization)
WG	pracovní skupina (Working Group)
PmB	polymerem modifikované asfaltové pojivo

## PŘÍLOHA A:

### ČSN 73 6161 - Stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu

Statická metoda

#### PROTOKOL O PROVEDENÉ ZKOUŠCE

ČÍSLO VZORKU:	1
PŮVOD KAMENIVA	kamenolom Želešice
FRAKCE KAMENIVA:	8/16 mm
HM. KAMENIVA/ZKOUŠKU	(300 ± 3) g
ASFALT PENETRACE:	50/70 polofoukaný
PODÍL POJIVA K POKRYTÍ KAMENIVA:	(12 ± 3) g dle tab. 1 normy ČSN 73 6161
OBJEDNATEL:	VUT Brno, FAST - Ústav pozemních komunikací
DATUM:	8.4.2013
MÍSTO:	Laboratoř ústavu PKO
ČAS:	10:00
LABORATOŘ:	Akreditovaná silniční laboratoř ústavu PKO Fakulta stavební, VUT Brno, Veveří 95, budova C, 1.NP
ZKOUŠEJÍCÍ PRACOVNÍK:	Petr Vlk
KONTROLUJÍCÍ PRACOVNÍK:	Pavel Straka
VEDOUcí PRACOVNÍK:	doc. Dr. Ing. Michal Varaus
ZKUŠEBNÍ POSTUP:	ČSN 73 6161: 2000
TEPLOTA OBALOVÁNÍ:	(160 ± 5) °C dle tab. 1 normy ČSN 73 6161
DOBA TEMPEROVÁNÍ:	1 h
TEPLOTA OBNAŽOVACÍ VODY:	(60 ± 3) °C
PROCENTO OBALENÉ PLOCHY:	91 %

vyhodnocení dle tab. 2 normy ČSN 73 6161		vzorek 1A							
		hodnocení Vlk				hodnocení Straka			
charakteristika	obalená plocha [%]	počet zrn [ks]	podíl z počtu zrn [%]	obalení [%]	přilnavost dle normy	počet zrn [ks]	podíl z počtu zrn [%]	obalení [%]	přilnavost dle normy
A	100	70	63,6	63,6	vyhovující	75	66,4	66,4	dobrá
B	90	30	27,3	24,5		26	23,0	20,7	
C	80	0	0,0	0,0		12	10,6	8,5	
D	70	10	9,1	6,4		0	0,0	0,0	
E	50	0	0,0	0,0		0	0,0	0,0	
F	40	0	0,0	0,0		0	0,0	0,0	
G	20	0	0,0	0,0		0	0,0	0,0	
celkem		110	100,0	94,5		113	100,0	95,6	

vyhodnocení dle tab. 2 normy ČSN 736161		vzorek 1B							
		hodnocení Vlk				hodnocení Straka			
charakteristika	obalená plocha [%]	počet zrn [ks]	podíl z počtu zrn [%]	obalení [%]	přilnavost dle normy	počet zrn [ks]	podíl z počtu zrn [%]	obalení [%]	přilnavost dle normy
A	100	70	71,4	71,4	vyhovující	0	0,0	0,0	vyhovující
B	90	10	10,2	9,2		0	0,0	0,0	
C	80	5	5,1	4,1		100	100,0	80,0	
D	70	10	10,2	7,1		0	0,0	0,0	
E	50	3	3,1	1,5		0	0,0	0,0	
F	40	0	0,0	0,0		0	0,0	0,0	
G	20	0	0,0	0,0		0	0,0	0,0	
celkem		98	100,0	93,4		100	100,0	80,0	

Aritmetický průměr ze 4 výsledků

90,9%

→ VYHOVUJÍCÍ

## **PŘÍLOHA B:**

### **EN 12697-11 - Stanovení přilnavosti mezi kamenivem a asfaltem**

*Část B: Statická metoda*

#### **PROTOKOL O PROVEDENÉ ZKOUŠCE**

ČÍSLO VZORKU:	2
PŮVOD KAMENIVA	kamenolom Želešice
FRAKCE KAMENIVA:	6/10 mm
POČET ČÁSTIC KAMENIVA/ZKOUŠKU:	150 ks
HMOTNOST KAMENIVA:	201,1 g
ASFALT PENETRACE:	50/70, polofoukaný
PODÍL POJIVA K POKRYTÍ KAMENIVA:	8,1 g (4% hmotnosti kameniva)
OBJEDNATEL:	VUT Brno, FAST - Ústav pozemních komunikací
DATUM:	12.4.2013
MÍSTO:	Laboratoř ústavu PKO
ČAS:	10:00
LABORATOŘ:	Akreditovaná silniční laboratoř ústavu PKO Fakulta stavební, VUT Brno, Veverí 95, budova C, 1.NP
ZKOUŠEJÍCÍ PRACOVNÍK:	Petr Vlk
KONTROLUJÍCÍ PRACOVNÍK:	Pavel Straka
VEDOUcí PRACOVNÍK:	doc. Dr. Ing. Michal Varaus
ZKUŠEBNÍ POSTUP:	EN 12697-11: 2005
TEPLOTA OBALOVÁNÍ:	(130 ± 5) °C
TEPLOTA OBNAŽOVACÍ VODY:	(19 ± 1) °C
DOBA TEMPEROVÁNÍ:	(48 ± 1) h
POČET PLNĚ OBALENÝCH ZRN:	150 ks
POČET NEÚPLNĚ OBALENÝCH ZRN:	0 ks

**Švýcarský návrh změny EN 12697-11**  
**Stanovení přilnavosti mezi kamenivem a asfaltem**

*Část B: Statická metoda*

**PROTOKOL O PROVEDENÉ ZKOUŠCE**

ČÍSLO VZORKU:	<b>3</b>
PŮVOD KAMENIVA	<b>kamenolom Želešice</b>
FRAKCE KAMENIVA:	<b>6/10 mm</b>
POČET ČÁSTIC KAMENIVA/ZKOUŠKU:	<b>150 ks</b>
ASFALT PENETRACE:	<b>50/70, polofoukaný</b>
PODÍL POJIVA K POKRYTÍ KAMENIVA:	<b>4% hmotnosti kameniva</b>
OBJEDNATEL:	<b>VUT Brno, FAST - Ústav pozemních komunikací</b>
DATUM:	<b>8.4.2013</b>
MÍSTO:	<b>Laboratoř ústavu PKO</b>
ČAS:	<b>10:00</b>
LABORATOŘ:	<b>Akreditovaná silniční laboratoř ústavu PKO Fakulta stavební, VUT Brno, Veverří 95, budova C, 1.NP</b>
ZKOUŠEJÍCÍ PRACOVNÍK:	<b>Petr Vlk</b>
KONTROLUJÍCÍ PRACOVNÍK:	<b>Pavel Straka</b>
VEDOUCÍ PRACOVNÍK:	<b>doc. Dr. Ing. Michal Varaus</b>
ZKOUŠEBNÍ POSTUP:	<b>viz. norma EN 12697-11</b>
TEPLOTA OBALOVÁNÍ:	<b>150°C+20°C dle tab.1 EN 12697-35</b>
TEPLOTA OBNAŽOVACÍ VODY:	<b>40 °C</b>
DOBA TEMPEROVÁNÍ:	<b>24 h</b>
PROCENTO OBALENÉ PLOCHY:	<b>96,4 %</b>

Podíl asfaltu potřebného k plnému obalení kameniva (4%)

čís. vzorku kameniva	hmotost kameniva [g]	pojivo (4%) [g]
3A	194,4	7,8
3B	193,3	7,8
3C	202,2	8,1
3D	204,9	8,2

charakteristika	obalená plocha [%]	vzorek 3A			vzorek 3B		
		počet zrn [ks]	procentuelní podíl [%]	obalení [%]	počet zrn [ks]	procentuelní podíl [%]	obalení [%]
A	100	120	80,0	80,0	88	58,7	58,7
B	95	0	0,0	0,0	16	10,7	10,1
C	90	13	8,7	7,8	16	10,7	9,6
D	80	14	9,3	7,5	21	14,0	11,2
E	60	3	2,0	1,2	9	6,0	3,6
F	40	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
G	20	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
	<b>celkem</b>	<b>150</b>	<b>100,0</b>	<b>96,5</b>	<b>150</b>	<b>100,0</b>	<b>93,2</b>

charakteristika	obalená plocha [%]	vzorek 3C			vzorek 3D		
		počet zrn [ks]	procentuelní podíl [%]	obalení [%]	počet zrn [ks]	procentuelní podíl [%]	obalení [%]
A	100	94	62,7	62,7	134	89,3	89,3
B	95	30	20,0	19,0	16	10,7	10,1
C	90	17	11,3	10,2	0	0,0	0,0
D	80	7	4,7	3,7	0	0,0	0,0
E	60	2	1,3	0,8	0	0,0	0,0
F	40	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
G	20	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
	<b>celkem</b>	<b>150</b>	<b>100,0</b>	<b>96,4</b>	<b>150</b>	<b>100,0</b>	<b>99,5</b>

Aritmetický průměr ze 4 výsledků 96,4 %

Grafický vzor:

