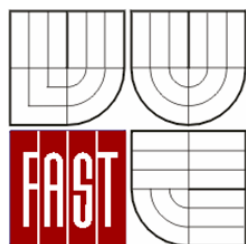




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV CHEMIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CHEMISTRY

REOLOGICKÉ VLASTNOSTI STAVEBNÍCH POJIV V ČERSTVÉM STAVU

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BUILDING BINDERS IN THEIR FRESH STATE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAELA HEGROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Mgr. MARTIN VYŠVAŘIL, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav chemie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Michaela Hegrová
Název	Reologické vlastnosti stavebních poživ v čerstvém stavu
Vedoucí bakalářské práce	Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	17. 3. 2015
Datum odevzdání bakalářské práce	27. 5. 2016

V Brně dne 17. 3. 2015

.....

doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D.
Vedoucí ústavu

.....

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

Podklady a literatura

- Ferraris, CH.F. Measurement of the rheological properties of cement paste: A new approach. Role of Admixtures in High Performance Concrete, RILEM International Symposium, Cabrera 1999, p 333–342.
- Banfill, P.F.G. The rheology of fresh cement and concrete - a review. In Proc. of 11th International Cement Chemistry Congress, Durban 2003, p. 61–130.
- Sobotka, Z. Reologie hmot a konstrukcí. Praha: Academia, 1981. Kapitola 7: Reologické vlastnosti látek, p. 269–304.
- Cardoso, F.A. et al. Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. Cement and Concrete Research, 2014, Vol. 57, p. 79–87.
- Ferraris, CH.F. et al. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. Cement and Concrete Research, 2001, Vol. 31, p. 245–255.

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

Proveďte literární rešerši o reologických vlastnostech pojiv v čerstvém stavu. Popište základní parametry reologických vlastností látek. Zaměřte se na rozdíly u jednotlivých druhů pojiv (cement, vápno, sádra, směsná pojiva, geopolymery atd.) a možnosti ovlivnění pomocí plastifikátorů. Uveďte způsoby stanovení reologických vlastností látek a porovnejte různé druhy reometrů a viskozimetrů. Pro vypracování teoretické části bakalářské práce použijte zadanou literaturu a doplňte ji o vlastní literární rešerši k tématu. V praktické části stanovte základní reologické vlastnosti stavebních pojiv v čerstvém stavu (cementová kaše, vápenná kaše, sádrová kaše, geopolymerní kaše, kaše různých druhů směsných cementů) na rotačním reometru s měřicí geometrií deska-deska. Získané výsledky graficky porovnejte a zhodnoťte. V závěru práce uveďte seznam použité literatury. Bakalářskou práci zpracujte v rozsahu 45-55 stran.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tato bakalářská práce je věnována reologickým vlastnostem stavebních pojiv. Teoretická část se zaměřuje na jednotlivé druhy stavebních pojiv, jejich reologické vlastnosti a základní parametry stanovované při charakterizaci stavebních pojiv z hlediska reologie. Dále jsou uvedeny způsoby stanovení reologických vlastností na různých typech zařízení. Praktická část se věnuje výsledkům získaných z měření na rotačním reometru s geometrií typu deska-deska. Tyto výsledky jsou následně vyhodnoceny.

Klíčová slova

Pojiva, reologie, reometr, viskozita, smyková rychlost, smykové napětí, mez toku

Abstrakt

This thesis is devoted to the rheological properties of building binders. The theoretical part focuses on individual types of building binders, their rheological properties and basic parameters determined during the rheological characterization of building binders. The practical part deals with the results obtained from the measurements on a rotational rheometer using the geometry type of plate to plate. These results are subsequently evaluated.

Keywords

Binders, rheology, rheometer, viscosity, shear rate, shear stress, yield stress

Bibliografická citace VŠKP

Michaela Hegrová *Reologické vlastnosti stavebních pojiv v čerstvém stavu*. Brno, 2016. 52 s., 9 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 24. 5. 2016

.....

podpis autora

Michaela Hegrová

Poděkování:

Touto cestou bych ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce panu Mgr. Martinu Vyšvařilovi, PhD. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly při tvorbě této práce.

Obsah

1 Úvod	10
2 Maltoviny	11
2.1 Cement	11
2.1.1 Výroba cementu	12
2.1.2 Základní slínkové minerály	12
2.2 Vápno	13
2.2.1 Vzdušné vápno	13
2.2.2 Hydraulické vápno	15
2.3 Sádra	17
2.3.1 Základní suroviny pro výrobu sádry	17
2.3.2 Výroba sádry	17
2.3.3 Rozdělení sádry a síranových pojiv	18
3 Příměsi	19
3.1 Elektrárenský popílek	20
3.2 Metakaolin	21
3.3 Křemičitý úlet	21
4 Geopolymery	22
5 Reologie	23
5.1 Nenewtonské kapaliny	23
5.2 Tixotropie a reopexie	25
5.3 Reologie cementových past	25
6 Zařízení pro měření reologických vlastností	28
6.1 Výtokové pohárky	28
6.2 Rotační reometry	28
6.2.1 Systém válec-válec	29
6.2.2 Systém deska-deska	30
6.2.3 Systém kužel-deska	30
6.3 Kapilární reometry	31
6.4 Pádové (tělískové) viskozimetry	32
7 Praktická část	33
7.1 Použité zařízení a chemikálie	33
7.2 Příprava vzorků	34

7.3	Měření meze toku a viskozity.....	36
7.4	Výsledky experimentální části.....	37
7.4.1	Toková křivka	37
7.4.2	Plastická viskozita a mez toku	40
8	Závěr	45
9	Použité zdroje.....	47
10	Seznam tabulek	50
11	Seznam obrázků.....	50
12	Seznam grafů	51
13	Seznam příloh	51
14	Přílohy	53

1 Úvod

V současné době dochází k výrazným posunům všech technologií a to i v oblasti vědního oboru, který charakterizuje tokové vlastnosti látek. Tento obor se nazývá reologie. Reologie se aplikuje nejen ve stavebnictví, ale například i v oblasti medicíny či farmakologie. Nejčastějšími přístroji používanými pro měření reologických charakteristik látek jsou reometry. Moderní reometry umožňují získat výstupní hodnoty v závislosti smykového napětí na smykové rychlosti. Tato závislost je popsána tzv. tokovou křivkou. Z těchto výsledných hodnot lze zjistit hodnoty meze toku a plastické viskozity charakterizující měřenou látku.

Reologické charakteristiky čerstvých pojivových kaší se projevují na výsledných vlastnostech ztvrdlých stavebních kompozitů. Výsledky jsou ovlivňovány množstvím použité vody, typem materiálu, použitím plastifikační přísady a také způsobem zpracování.

Tato bakalářská práce se zabývá reologickými vlastnostmi nejčastěji používaných pojiv ve stavebnictví. Jelikož je cement jednou ze základních složek betonu, bylo studováno reologické chování různých druhů cementových past. Dalšími zkoumanými pojivy byly vápenné kaše, sádrové kaše, geopolymerní kaše a kaše směsných cementů.

Cílem práce bylo porovnat základní reologické vlastnosti různých druhů stavebních pojiv v čerstvém stavu.

2 Maltoviny

Maltoviny jsou anorganická pojiva, která se vyrábí výpalem z hornin. Mezi maltoviny patří především cement, vápno a sádra. Po smísení s vodou dostávají kašovitý charakter a postupně se vytvrzují za současné změny chemického a mineralogického složení. Maltoviny jsou děleny do skupin:

- vzdušné maltoviny – stabilní pouze na vzduchu (např. vzdušné vápno, sádra, síranová pojiva, hořečnatá maltovina);
- hydraulické maltoviny – stabilní na vzduchu i pod vodou (např. hydraulické vápno, cementy);
- speciální maltoviny – žáruvzdorná pojiva, barnaté cementy.

2.1 Cement

Cement je jemně mletá anorganická látka. Cement patří mezi hydraulické maltoviny, tj. po smísení s vodou vytváří kaši (pastu), která tuhne a tvrdne na vzduchu i pod vodou. Cement je znám už od starověku a v současné době je považován za nejpoužívanější pojivo ve stavebním průmyslu. Používá se k výrobě betonu a maltových směsí [1].

Cementy jsou dle ČSN EN 197-1 rozděleny do pěti hlavních skupin:

- portlandský cement – CEM I;
- portlandský cement směsný – CEM II;
- vysokopecní cement – CEM III;
- pucolánový cement – CEM IV;
- směsný cement – CEM V.

Za římskou číslicí se uvádí hodnota pevnostní třídy – 32,5, 42,5, 52,5. Tato hodnota udává pevnost cementu v tlaku v MPa po 28 dnech, zkoušeno podle ČSN EN 196-1. Cementy, které jsou označeny písmenem R, mají vysoké počáteční pevnosti. Označení N znamená, že se jedná o cementy s normální rychlostí tuhnutí. S označením L, tj. cementy s nízkou počáteční pevností, se můžeme setkat u vysokopecních cementů [1, 2].

Dělení cementů podle chemického složení:

- křemičitanové cementy (silikátové) – převaha křemičitanů vápenatých, např. portlandský cement;
- hlinitanové cementy (aluminátové) – převaha hlinitanů vápenatých;
- ostatní cementy.

Dělení podle použití:

- cementy pro obecné užití – cementy dle normy ČSN EN 197-1;
- speciální cementy – silniční cement, hlinitanový cement, síranovzdorný cement, bílý cement, rozpínavý cement, barnatý cement.

2.1.1 Výroba cementu

Výroba cementů spočívá v natěžení vápence a podrcení, pomletí surovin, které se následně homogenizují. Surovinová směs se vypálí na mez slinutí, kdy vzniká portlandský slínek. Výpal se provádí převážně v rotačních cementářských pecích. Slínek se po zchlazení a odležení na skládce smísí s přísadami a příměsmi a rozdrtí na jemnou moučku, která se nazývá cement. Na závěr se cement plní do pytlů nebo přepravníků. Druhy cementů jsou rozlišovány barvou potisku na pytlích. Portlandský cement má černé označení, portlandský směsný zelené, vysokopecní červené, pucolánový modré a směsný cement má hnědé označení. V České republice je pouze pět aktivních cementáren. Dvě cementárny jsou na Moravě (Mokrá, Hranice) a tři v Čechách (Čížkovice, Radotín, Prachovice) [1].

2.1.2 Základní slínkové minerály

Portlandské slínky jsou směsí křemičitanů vápenatých, hlinitanů vápenatých a vápenatých železitanů. Výsledné vlastnosti slínku a cementu ovlivňuje z velké části mineralogické složení slínku. Hlavní význam pro cementy mají čtyři základní sloučeniny (*tabulka 1*). Ve slínku se nachází i složky vedlejší, jako jsou oxid vápenatý, oxid hořečnatý a sklovitá fáze. Sklovitá fáze je složená z oxidů vápenatých, hlinitých, železitých, hořečnatých a oxidů alkalických kovů [1].

Tabulka 1 Základní slínkové minerály

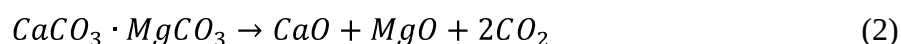
Trikalciumsilikát (alit)	C ₃ S	3CaO·SiO ₂
Dikalciumsilikát (belit)	C ₂ S	2CaO·SiO ₂
Trikalciumaluminát	C ₃ A	3CaO·Al ₂ O ₃
Tetrakalciumaluminátferit (celit)	C ₄ AF	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃

2.2 Vápno

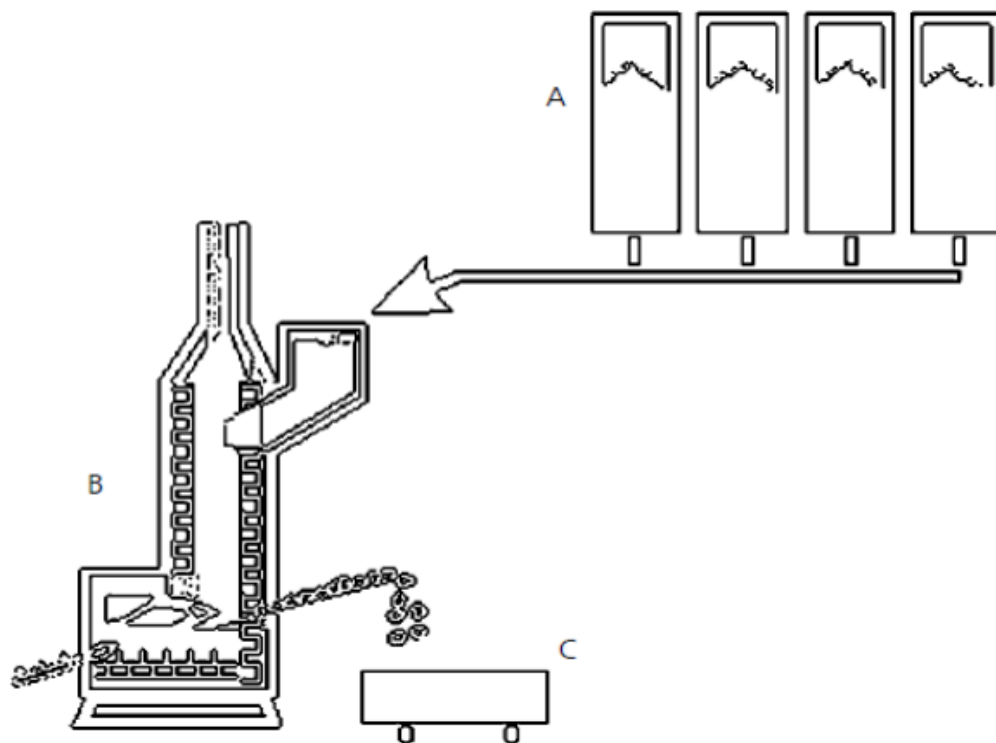
Vápno je známé pod chemickým názvem oxid vápenatý (CaO). Vápno je jednou z nejstarších maltovin. Používání vápenné malty bylo známo už ve středověku. Nejstarší pozůstatky použití vápenných past u nás jsou na stavbách z dob Velkomoravské říše. Výroba vápna měla rozmach za vlády Karla IV., kdy Praha byla centrem výroby a obchodu s vápnem. Toto vápno bylo známé jako staropražské vápno, v ostatních zemích známé pod názvem Pasta di Praga. Oblíbené vápno bylo vyráběné na Zlíchově a v Braníku. Mělo hydraulické vlastnosti a bylo používáno pro vodní stavby a mosty. Vyváželo se po celé Evropě, hlavně do Benátek a Londýna. Postupně se pálení vápna rozšířilo po celém našem území. Dnes jsou v České republice známé vápenky Mokrá, Vitošov, Štramberk, Velké Hydčice a Čertovy schody [3].

2.2.1 Vzdušné vápno

Vzdušné vápno patří mezi vzdušné maltoviny, tj. tuhne, tvrdne a zpevňuje se pouze na vzduchu. Výroba vzdušného vápna je dvoustupňová. Základní surovinou je vápenec, ze kterého je pálením vytvořeno pálené vápno, toto vápno je nazývané také jako nehašené vápno (rovnice 1). Tato reakce probíhá při teplotě 900–1100 °C. Pokud je teplota výpalu vyšší, produkt je nazýván jako tvrdě pálené vápno, které se využívá při výrobě autoklávovaného pórobetonu. Měkce pálené vápno je více reaktivní a je vhodné do omítkových malt. Místo vápence může být hlavní surovinou hořečnato-vápenatý uhličitán neboli dolomit (rovnice 2) [4].



Výroba páleného vápna může probíhat v rotačních nebo šachtových pecích. V současnosti převažuje výroba v pecích šachtových (*obrázek 1*).



Obrázek 1 Výroba vzdušného vápna v šachtové peci [4]

(A – zásobníky s vápencem, B – šachtová pec, C – odvoz vápna)

Následuje hašení páleného vápna na Ca(OH)_2 - hydroxid vápenatý. Převod z oxidu vápenatého na hydroxid vápenatý je silnou exotermickou reakcí (rovnice 3) [4].



Tabulka 2 Dělení vzdušného vápna dle ČSN EN 459-3

Druh vápna	Označení	Obsah CaO + MgO [%]	Obsah MgO [%]	Obsah SO ₃ [%]
Bílé vápno 90	CL90	≥ 90	≤ 5	≤ 2
Bílé vápno 80	CL80	≥ 80	≤ 5	≤ 2
Bílé vápno 70	CL70	≥ 70	< 5	≤ 2
Dolomitické vápno 85	DL85	≥ 85	≥ 30	≤ 2
Dolomitické vápno 80	DL80	≥ 80	≤ 5	≤ 2
Doplňující třídění	Přípona			
Nehašené vápno	Q			
Hašené vápno bílé	S			
Polohašené vápno dolomitické	S1			
Plně hašené vápno dolomitické	S2			

2.2.2 Hydraulické vápno

Hydraulické vápno patří mezi pojiva používaná již v antickém Římě. Představuje přechod mezi vzdušným vápnem a cementem. Obsahuje nejen oxid vápenatý (CaO), ale také hydraulické složky tvořené oxidem křemičitým (SiO₂), oxidem hlinitým (Al₂O₃), oxidem železitým (Fe₂O₃).

Podle technologie výroby se dělí na vápno vypalované a směsné. Vápno vypalované vzniká přímým výpalem vhodné suroviny, která již obsahuje CaO, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃. Směsné vápno je vytvořeno prostým smícháním vápna a hydraulické složky bez výpalu, poté následuje mletí a homogenizace [5].

Dělení hydraulického vápna podle hydraulických schopností:

- dle hodnoty hydraulického modulu M_H :

$$M_H = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (4)$$

Tabulka 3 Dělení hydraulického vápna dle hodnoty hydraulického modulu

Druh	Hodnota M_H
Velmi silně hydraulické vápno (Románský cement)	1,1 – 1,7
Silně hydraulické vápno	1,7 – 3,0
Středně hydraulické vápno	3,0 – 6,0
Slabě hydraulické vápno	6,0 – 9,0

- dle stupně hydratace (podle Michaelise) S_H :

$$S_H = \frac{1}{M_H} \quad (5)$$

Tabulka 4 Dělení hydraulického vápna dle hodnoty stupně hydratace

Druh	Hodnota S_H
Silně hydraulické vápno	$\frac{1}{2-3}$
Středně hydraulické vápno	$\frac{1}{3-6}$
Slabě hydraulické vápno	$\frac{1}{6-9}$

- dle stupně sycení (podle Kühla) S_s :

$$S_s = \frac{CaO}{CaO_{MAX}} \cdot 100 \quad \% ; \quad (6)$$

kde CaO je skutečný obsah v surovině a CaO_{MAX} je maximální možný obsah Ca.

Tabulka 5 Dělení hydraulického vápna dle hodnoty stupně sycení

Druh	Hodnota S_s
Silně hydraulické vápno	90 – 100 %
Středně hydraulické vápno	> 100 %
Slabě hydraulické vápno	>> 100 %

Tabulka 6 Dělení hydraulického vápna dle ČSN EN 459-1

Druh vápna	Označení	Volné vápno [%]	Obsah SO_3 [%]
Hydraulické vápno 2	HL 2	≥ 6	< 3
Hydraulické vápno 3,5	HL 3,5	≥ 6	< 3
Hydraulické vápno 5	HL 5	≥ 3	< 3
Přírodní hydraulické vápno 2	NHL 2	≥ 15	< 3
Přírodní hydraulické vápno 3,5	NHL 3,5	≥ 9	< 3
Přírodní hydraulické vápno 5	NHL 5	≥ 3	< 3

Hlavní použití hydraulických vápen je pro výrobu malt a omítek. Hydraulické vápno bývá nahrazováno cementem pro zdění nebo cementovým pojivem [4, 5].

2.3 Sádra

Sádra je anorganická prášková látka, která patří mezi vzdušné maltoviny. Základní surovinou pro výrobu sádry je sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Sádra patří mezi pojiva, která jsou používána od raného středověku. Sádra má schopnost absorbovat vlhkost, je hygroskopická. To má kladný vliv při řízení vlhkosti v domácnostech. Mezi její další vlastnosti patří nízká tepelná vodivost, nízká tepelná pohltivost a vykazuje malé objemové změny [5].

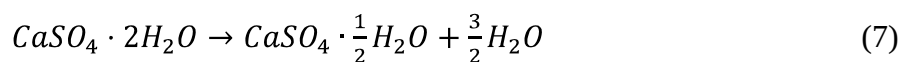
2.3.1 Základní suroviny pro výrobu sádry

Suroviny pro výrobu sádry se dělí na primární (přírodní) a druhotné (odpadní) suroviny. V dnešní době se ve stavebním průmyslu využívá více surovin odpadních.

- přírodní sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – vznik přírodního sádrovce je dán odpařováním vody ze slaných jezer nebo mořských vod. V České republice se přírodní sádrovec vyskytuje pouze v Kobeřicích u Opavy.
- přírodní anhydrit (CaSO_4) – jedná se o přírodní formu bezvodého síranu vápenatého
- průmyslové sádrovce – patří do skupiny odpadních surovin. Průmyslové sádrovce vznikají v důsledku desulfatace kouřových plynů v elektrárnách (energósádrovce) nebo v chemickém, sklářském či potravinářském průmyslu (chemosádrovce) [5].

2.3.2 Výroba sádry

Po natěžení suroviny dojde k jejímu nadrcení a uložení do zásobníků. Následuje výpal, kdy dochází k částečné dehydrataci sádrovce, při teplotě 110–150 °C (rovnice 7).

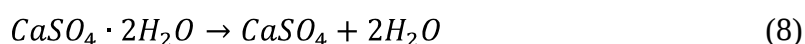


Pro výpal sádrovce je možné použít různé typy zařízení:

- rotační pece;
- šachtové pece;
- sušicí rotační mlýny;

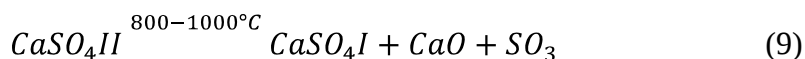
- vařáky;
- autoklávy.

Pokud dochází k dehydrataci v prostředích nasycené vodní párou, tak vzniká α -sádra. V prostředí nenasyčeném parou vzniká β -sádra. β -sádra má větší měrný povrch než α -sádra, proto potřebuje větší množství záměsové vody. To má za následek nižší pevnosti β -sádry ve ztvrdlém stavu. Při teplotách výpalu vyšších než 200 °C dochází k úplné dehydrataci sádrovce (rovnice 8). Při této reakci vznikají různé druhy anhydritu [5].



2.3.3 Rozdělení sádry a síranových pojiv

- rychle tuhnoucí sádra – je složena z α -hemihydrátu i β -hemihydrátu ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$). Vznik rychle tuhnoucí sádry je dán při teplotách okolo 150 °C. Do této skupiny je řazena sádra stavební, modelářská a štukatérská.
- pomalu tuhnoucí sádra – neboli anhydrit I (CaSO_4 I). Vzniká při výpalu na teplotu 800–1000 °C (rovnice 9). Pomalu tuhnoucí sádra se používá pro výrobu obkladových desek, podlah nebo omítek.



- sádra modifikovaná – je sádra s přídavkem přísady nebo příměsi pro lepší zpracovatelnost. Využívá se pro výrobu prvků zvukově izolačních.
- anhydritová maltovina – je vyráběna ze sádrovce a přísad vyvolávající tuhnutí při teplotě výpalu 500 °C. Používá se do omítek, dekorativních výrobků a interiérových obkladů [5].

Tabulka 7 Požadavky na dobu tuhnutí sádry a jemnost mletí sádry dle ČSN 72 2301

Druh sádry	Označení tuhnutí	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí
Rychle tuhnoucí	A	2 min	15 min
Normálně tuhnoucí	B	6 min	30 min
Pomalu tuhnoucí	C	20 min	-
Granulometrie	Označení	Max. zbytek na síť 0,2 mm	
Hrubě mletá	I	30 %	
Středně mletá	II	15 %	
Jemně mletá	III	2 %	

3 Příměsi

Příměsi jsou obvykle práškovité látky, které zlepšují některé vlastnosti betonu. Používají se jako částečná substituce pojiva. Z ekonomického hlediska je přídavek příměsí výhodný, protože při nahrazení cementu těmito látkami, dojde ke snížení ceny betonu. Příměsi se také používají jako přídavek k jemným podílům směsi plniva, neboť velikost jejich částic je menší než 0,125 mm. Dle ČSN EN 206-1 se příměsi dělí na dva typy:

- inertní příměsi (typ I);
- aktivní příměsi (typ II).

Mezi typ I neboli pasivní příměsi patří kamenná moučka, barevné pigmenty a z části i mikromletý vápenec. Tyto příměsi zlepšují reologické vlastnosti čerstvého betonu a dodávají mu hutnou strukturu.

Aktivní příměsi se dělí na latentně hydraulické látky a látky pucolánové. Latentně hydraulické látky jsou látky, které netuhnou, netvrdnou a nezpevňují se. Aby těchto schopností nabyly, stačí provést aktivaci pomocí budičů. Budiče jsou dle povahy děleny na síranové (sádrovec, anhydrit) nebo alkalické (hydroxid sodný, hydroxid draselný, cement). Mezi latentně hydraulické látky je také řazena vysokopecní jemně mletá struska. Pucolány jsou látky, které netvrdnou, netuhnou a nezpevňují se, ani vlivem budiče. Obsahují vysoký podíl amorfního oxidu křemičitého (SiO_2), který je schopen reakce s vápenatými ionty za vzniku C-S-H gelu. Podle původu jsou pucolány děleny na:

- přírodní – tufy, tufity, trasy, křemelina;
- průmyslové – vysokopecní popílký, metakaolin, křemičité úlety, jemně mletý cihlářský střepek, sklo.

ČSN EN 206-1 zavádí pro aktivní příměsi koncepci k-hodnoty, která slouží pro výpočet vodního součinitele (*rovnice 10*).

$$w_k = \frac{m_v}{m_c + k m_p}; \quad (10)$$

kde w_k je ekvivalentní vodní součinitel [-], m_v je množství záměsové vody [kg], m_c je množství cement [kg], k je k-hodnota závislá na konkrétní příměsi a m_p je množství příměsi [kg] [6].

3.1 Elektrárenský popílek

Elektrárenský popílek je nerostná zplodina, která vzniká spalováním uhlí v jemně mletém stavu. Skládá se převážně z malých kulovitých částic křemičitého skla o průměru 1-150 μm a má pucolánové vlastnosti. Ve stavebním průmyslu se popílký používají např. pro výrobu popílkových cementů nebo popílkových umělých hydraulických vápen, jako příměs do betonových směsí, jako součást lehkých pórovitých betonů nebo v silničním stavitelství pro tvorbu násypů. Popílký jsou rozděleny podle technologie spalování:

- vysokoteplotní (klasické) elektrárenské popílký;
- nízkoteplotní (fluidní) popílký.

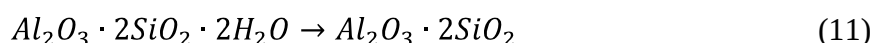
Vysokoteplotní popílek vzniká z jemně mleté suroviny, která je vysušena a poté spalována ve spalovací komoře kotle při teplotě okolo 1500 °C. Popílký mohou mít odlišné složení podle druhu použitého uhlí, průběhu spalování nebo odlučování exhalátů. Do betonu je vhodnější popílek z černého uhlí než hnědouhelný popílek, protože černé uhlí má menší proměnlivost vlastností. Přidáním popílku do betonu dochází ke snížení hydratačního tepla a pozvolnějšímu nárůstu pevností. Viditelnější nárůst pevností, oproti obyčejnému betonu, bývá mezi 28-90 dnem. Podle ASTM C 618 jsou popílký děleny na typ F a typ C.

Popílek typu F tzv. křemičitý, vzniká spalováním antracitu nebo vysoce kvalitního hnědého uhlí. Množství $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ v tomto popílku tvoří cca 70 % a méně než 10 % je zastoupeno obsahem CaO. Popílký typu F mají pucolánové vlastnosti. Naopak popílký typu C (vápenaté) mají vlastnosti hydraulické, díky vyššímu obsahu aktivního CaO. V popílku typu C je obsaženo cca 50 % $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ a více jak 20 % CaO.

Nízkoteplotní popílek vzniká tzv. fluidním spalováním ve vzhosu při teplotě cca 800 °C. Tyto popílký se používají především jako přísada do cementu [6].

3.2 Metakaolin

Metakaolin je práškovitá látka, obvykle bílé barvy. Vzniká výpalem kaolinů a kaolinitických jíílů při teplotě mezi 600–900 °C (rovnice 11). Po přidání metakaolinu do čerstvého betonu je schopen reagovat s $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Vzniklými produkty jsou hydratované kalcium silikáty a alumináty. Tyto látky pozitivně ovlivňují kvalitu a trvanlivost betonu. Metakaolin přispívá k vyšším pevnostem a lepší nasákavosti betonu. Může nahradit až 10 hmotnostních procent cementu. Metakaolin může také částečně nahradit mikrosiliku, která je cenově méně příznivá [6].



3.3 Křemičitý úlet

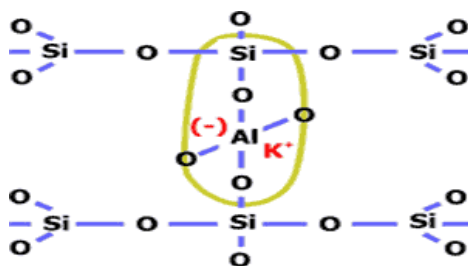
Křemičitý úlet neboli mikrosilika vzniká jako vedlejší produkt při výrobě křemíku nebo slitin, které obsahují křemík. Reakce probíhá v elektrické obloukové peci pro teplotě cca 2000 °C. Křemičitý úlet je světle až tmavě šedý práškovitý materiál, který jsou složen z amorfního oxidu křemičitého (90-98 %). Částice křemičitého úletu má průměr kolem 0,15 μm. Mikrosilika má pozitivní vliv na chemickou odolnost a pevnost betonu, jelikož reaguje se s hydroxidem vápenatým za vzniku C-S-H fáze. Jemná zrna mikrosiliky zajišťují hutnou strukturu a zvyšují soudržnost mezi cementovým tmelem a kamenivem. Výhodou je i fakt, že zabezpečuje vodotěsnost a nepropustnost, a to vede k delší trvanlivosti materiálu. Může být použita např. pro výrobu podlah, vodotěsných konstrukcí, cemento-betonových betonových krytů vozovek, mostů nebo výškových budov [6, 7].

4 Geopolymery

Geopolymery patří mezi anorganické polymerní látky, vznikající polykondenzační reakcí hlinitokřemičitých oxidů s alkalickými polysilikáty. Jsou tvořeny aluminosilikátovými řetězci z křemíku a hliníku (*obrázek 2*). Geopolymery jsou nanokompozitní látky, které mají izotropní charakter. Mohou mít strukturu amorfní nebo semikrystalickou. Pro přípravu geopolymerních materiálů nejsou zapotřebí vysoké teploty a i přesto mohou mít podobné vlastnosti jako keramické výrobky. Základními surovinami pro přípravu jsou alkalické roztoky a látky bohaté na křemík a hliník, tvořené minerály jako jsou např. jíly, kaolinity, slídy. Geopolymery vykazují vysoké počáteční pevnosti, jsou žáruvzdorné, mrazuvzdorné a odolávají kyselinám. Pro přípravu geopolimerů je vyhovující metakaolin, kvůli své vysoké pucolánové aktivitě. Geopolymery se využívají jako obměna zeolitů nebo k výrobě forem v plastikářském odvětví. Mezi tyto látky řadíme i struskoalkalické cementy, které jsou tvořeny vodním sklem a rozemletou struskou. Z těchto cementů je možné vyrobit betony s vysokými pevnostmi. Výroba geopolimerů může být až dvakrát dražší než u portlandského cementu [4, 8].

Hlavní charakteristiky molekulární struktury, které mají vliv reologické vlastnosti jsou:

- molekulová hmotnost polymeru;
- délka molekulových řetězců;
- rozložení molekulové hmotnosti;
- pohyblivost segmentů molekulových řetězců;
- ohebnost řetězců;
- velikost mezimolekulárních sil;
- stupeň síťování polymerů;
- stupeň krystalizace;
- obsah plniv a změkčovadel [9].



Obrázek 2 Struktura geopolymerního materiálu [10]

5 Reologie

Reologie je materiálová věda zkoumající deformaci a tok látky. Někdy se jí také říká „fyzika deformací“. Samotný pojem reologie pochází z řeckého slova *rheos*, které v překladu znamená řeka, proudění nebo tok a *logos* neboli věda. Počátky tohoto vědního oboru spadají do první poloviny 20. století, kdy se reologií zabýval americký chemik Eugene C. Bingham a izraelský stavební inženýr Markus Reiner. Tito vědci jsou považováni za otce reologie, kteří se řídili citátem Hérakleita „Panta Rhei“ – „Všechno plyne“. V roce 1929 vznikla americká reologická společnost The Society of Rheology. Tato společnost vydávala časopis Journal of Rheology a vymezila definici reologie, jak ji známe dnes. Nauka řeší vztahy mezi chemickým složením, strukturou a mechanickými vlastnostmi látky. Reologie zkoumá chování nejen kapalin, ale i tuhých těles, které za daných podmínek mohou také téct. Tok charakterizujeme pomocí smykového napětí a smykové rychlosti. Pokud pro chování tekutin platí Newtonův zákon viskozity, nazývají se tyto tekutiny newtonské a dynamická viskozita je vyjádřena následujícím vztahem (rovnice 12).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} ; \quad (12)$$

kde τ je smykové napětí a $\dot{\gamma}$ je smyková rychlost. Křivka popisující závislost smykového napětí na smykové rychlosti se nazývá toková křivka. Toková křivka newtonských kapalin je lineární, přičemž při nulové smykové rychlosti je nulové i napětí [11, 12].

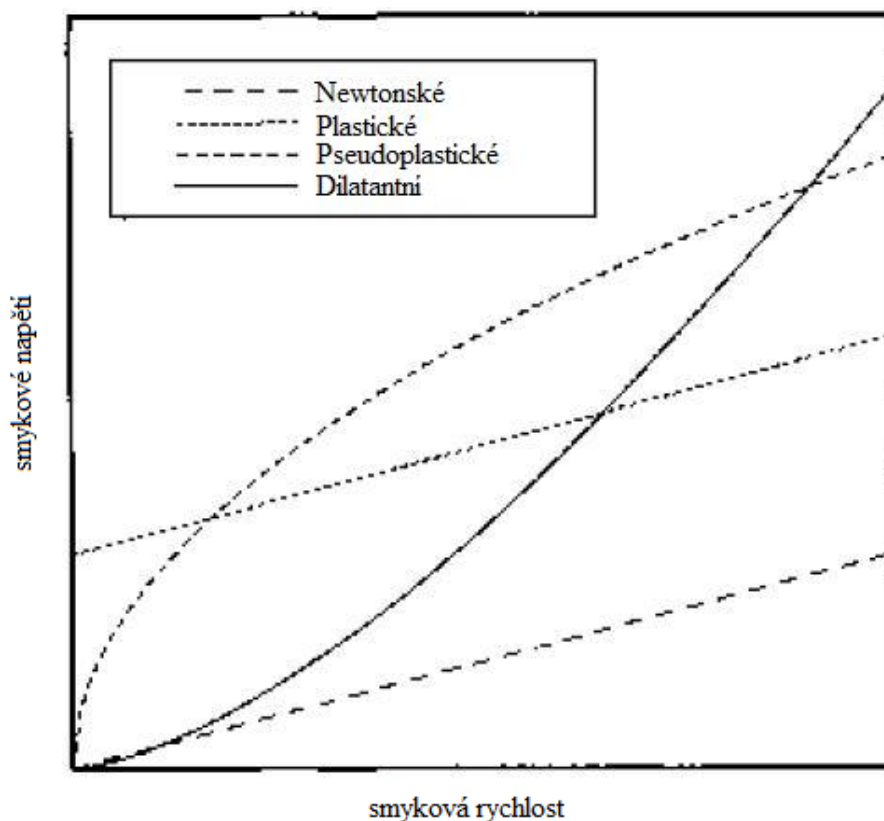
5.1 Nenewtonské kapaliny

Za nenewtonské jevy se v kapalinách považují všechny tokové vlastnosti, které nejsou pozorovatelné v kapalinách, jejichž viskozita není závislá na deformaci kapaliny. Mezi nenewtonské efekty se řadí tzv. Weissenbergův efekt, zvýšení či snížení viskozity při změně smykové rychlosti a rozšíření proudu kapaliny při výstupu z trubky. Nenewtonské kapaliny se dělí do tří základních skupin, pseudoplastické, dilatantní a plastické (obrázek 3).

Pseudoplastické látky nevykazují žádnou mez toku a jejich zdánlivá viskozita se snižuje se zvyšujícím se gradientem smykové rychlosti. Mezi pseudoplastické kapaliny můžeme zařadit některé suspenze, jako jsou hrubší disperzí koloidní roztoky a roztoky vysokomolekulárních polymerů a mýdel.

Dilatantní kapaliny mají jako pseudoplastické kapaliny nulovou mez toku, ale jejich zdánlivá viskozita se zvyšuje se vzrůstající smykovou rychlostí. Mezi dilatantní kapaliny se řadí některé koncentrované suspenze s velkými částicemi.

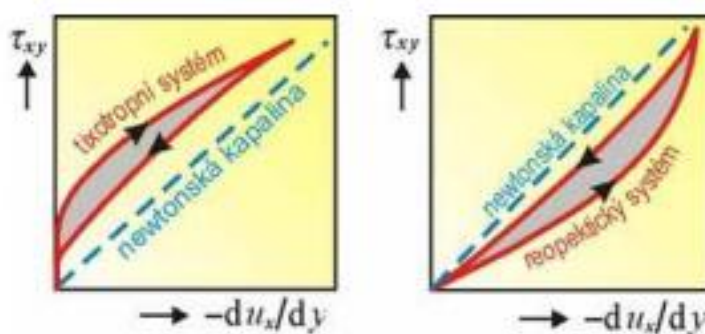
Zvláštním případem neneutonských kapalin jsou plastické kapaliny. V klidovém stavu se kapalina nachází v odporu-schopné struktuře, která nevykazuje žádné měřitelné deformační pohyby až do doby, dokud napětí v kapalině nedosáhne kritického smykového napětí. Po překročení této kritické hodnoty začne kapalina plně téci a systém vykazuje newtonské smykové napětí. Kritické smykové napětí se označuje jako mez toku. Statická mez toku značí hodnotu napětí, při které dochází k rozrušování struktury a zvyšování rychlostního gradientu a dynamická mez toku určuje napětí, při kterém kapalina teče jako newtonská kapalina. Mezi plastické kapaliny patří například koncentrované průmyslové, odpadní kaly, kašovité suspenze křídly, cementu či vápna a ze spotřebního průmyslu mohou být příkladem olejové barvy nebo zubní pasta [13, 14].



Obrázek 3 Rozdělení kapalin podle tokového chování [11]

5.2 Tixotropie a reopexie

U newtonských kapalin dochází ke změně vnitřní struktury vlivem působení deformace, což se odráží na makroskopickém chování kapaliny. Může dojít k postupnému snižování viskozity v čase při působení konstantního tečného napětí, takové tekutiny označujeme jako tixotropní. Tixotropie se objevuje u plastických a pseudoplastických tekutin. Opakem látek tixotropních jsou látky reopexní. Reopexní látky vlivem deformace v čase zvyšují svoji viskozitu a brání tak další deformaci. Tixotropní i reopexní chování je závislé na působení deformační síly a po jejím odeznění dochází opět k relaxaci tekutiny a navrácení hodnoty viskozity do předchozího stavu. Pokud byly působící síly příliš velké a došlo díky tím k mechanickému poškození molekul v kapalině, může již viskozita zůstat na nízkých úrovních nebo se nenavrátní zcela do výchozího stavu [15, 16].



Obrázek 4 Tixotropní a reopexický systém v porovnání s newtonskou kapalinou [17]

5.3 Reologie cementových past

Na výsledné reologické parametry cementových past má vliv:

- vodní součinitel;
- druh a jemnost cementu;
- druh použité přísady;
- čas a teplota.

Obecně platí, že cementy vykazují tixotropní chování. Po přidání superplastifikační přísady do cementové pasty se pasta chová jako newtonská látka při nízkých koncentracích a při vysokých koncentracích jako látka plastická. Existuje mnoho matematických vztahů, které mají za cíl definovat vlastnosti křivky toku cementové pasty. V některých případech je pochopení chování toku látek pomocí reologických modelů snazší, zejména

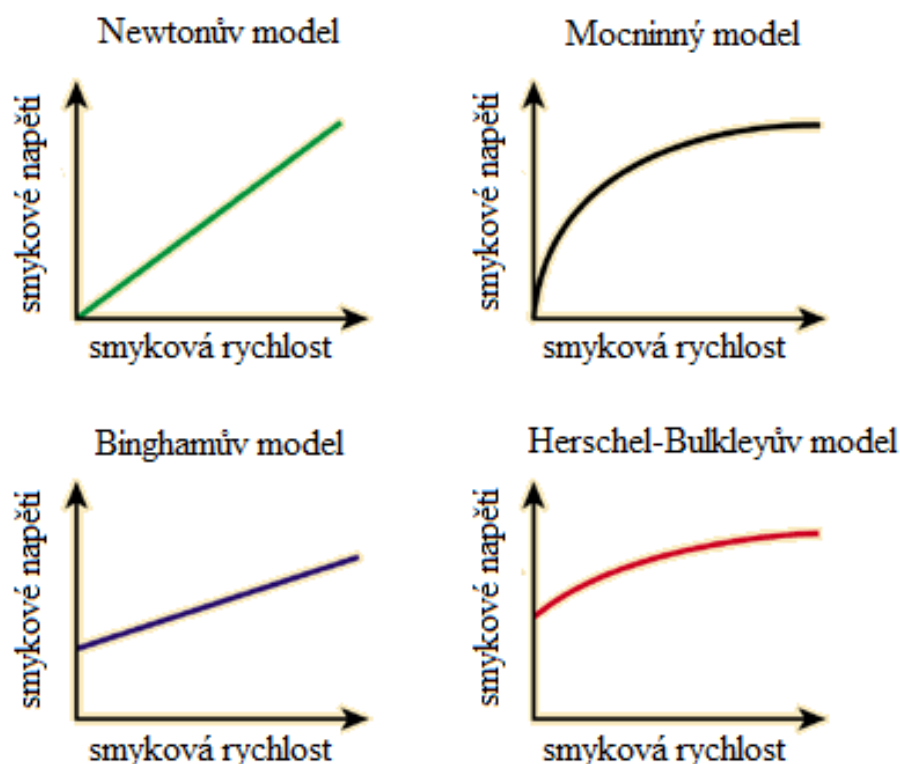
u neneutonských kapalin. Modely jsou formulovány smykovým napětím τ a smykovou rychlostí γ (tabulka 8). Plastické chování je popsáno Binghamovým modelem. Mocninný model vyjadřuje pseudoplastické chování. Model Herschel-Bulkley kombinuje dva předchozí modely, a to Binghamův a mocninný. Chování pseudoplastických látek lze popsat také pomocí Crossovy rovnice. Pokud u této rovnice platí pro viskozitu podmínka $\eta_0 < \eta$, $\eta < \eta_\infty$ a $m = 1$, je omezena na mocninný model pro pseudoplastické kapaliny. Je-li rozsah viskozity nižší a platí-li podmínka $\eta_0 < \eta$, pak je rovnice redukována na Binghamův model. Dalším modelem je poloempirický Eyringův model, který vychází z Eyringovi kinetické teorie kapalin.

Tabulka 8 Přehled reologických modelů [13]

Název rovnice	Rovnice	Definice veličin
Binghamův model	$\tau = \tau_0 + \eta_{pt}\gamma$	τ_0 : mez toku η_{pt} : plastická viskozita γ : smyková rychlost
Mocninný model	$\tau = K\gamma^n$	K : koeficient konzistence γ : smyková rychlost n : mocninný index
Herschel-Bulkley model	$\tau = \tau_0 + K\gamma^n$	τ_0 : je mez kluzu K : koeficient konzistence γ : smyková rychlost n : mocninný index
Crossova rovnice	$\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (K\gamma)^m}$	η_0 : viskozita kapalného prostředí η_∞ : viskozita, kde smyková rychlost je ∞ K, m : koeficient γ : smyková rychlost
Eyringův model	$\tau = a \sinh^{-1}(b\gamma)$	a, b : konstanta γ : smyková rychlost

Atzeni a kol. (1985) uvedl, že model Herschel-Bulkley a Eyringův model jsou přijatelné pro cementové kaše s vodním součinitelem mezi 0,30 a 0,45.

Naopak Papo uvedl, že Eyringův model nesprávně hodnotí výsledky pro cementové kaše s vodním součinitelem od 0,34 do 0,42 a Binghamův model se hodí při vyšších vodních součinitelích. Proto Herschel-Bulkley model hodnotí jako nejlepší model, který se hodí pro získání dat [13, 18].



Obrázek 5 Znáznornění vybraných reologických modelů [19]

Tabulka 9 Reologie cementové pasty, malty a betonu [11]

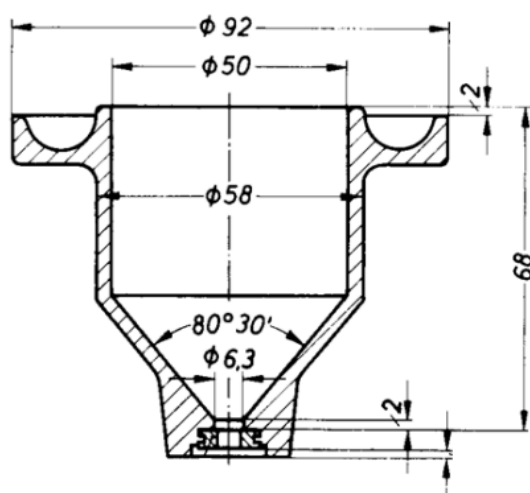
Materiál	Cementová pasta	Malta	Tekoucí beton	Samozhutnitelný beton	Beton
Mez toku [Pa]	10–100	80–400	400	50–200	500–2000
Plastická viskozita [Pa·s]	0,01–1	1–3	20	20–100	50–100

6 Zařízení pro měření reologických vlastností

Pro zjištění tokových vlastností látek se využívá mnoho rozličných postupů a zařízení. Nejčastěji jsou používány reometry a viskozimetry.

6.1 Výtokové pohárky

Mezi nejjednodušší přístroje pro stanovení viskozity patří výtokové pohárky. Tyto pohárky mají danou geometrii a objem. Vzorek pomocí gravitace protéká skrz otvor v pohárku a měří se doba toku. Tato metoda patří mezi jednoduché, levné a rychlé varianty pro stanovení viskozity. Existuje velké množství výtokových pohárků. Jeden z nejznámějších je Fordův pohárek [20].



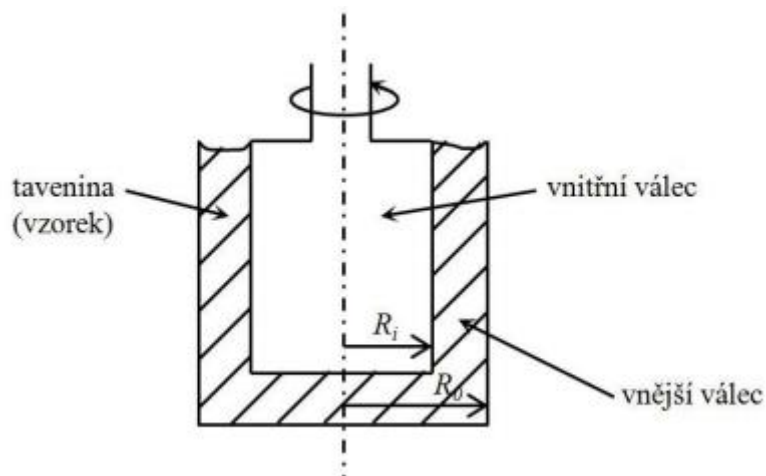
Obrázek 6 Fordův pohárek [21]

6.2 Rotační reometry

Rotační reometry umožňují stanovit viskozitu, smykové napětí, rychlost smykové deformace, ale také pomocí oscilace komplexní viskozitu nebo viskoelastické moduly. Rotační reometr se používá pro měření při nízkých smykových rychlostech (10^{-2} – 10^2 s⁻¹). Zkoušený vzorek je umístěn mezi dvě měřicí plochy, kdy jedna se pohybuje (rotor) a druhá je v klidu (stator). Nejčastěji se používá soustava deska-deska, kužel-deska nebo válec-válec. První rotační reometr představil v roce 1890 francouzský fyzik Maurice Couette, který vytvořil soustavu válec-válec. Geometrii deska-deska vymyslel v roce 1934 americký fyzik Melvin Mooney, který se později podílel spolu s Roswellem H. Ewartem na vzniku soustavy kužel-deska [22].

6.2.1 Systém válec-válec

Geometrie válec-válec je optimální pro nízkoviskózní tekutiny. Soustava se skládá ze dvou válců, kdy jeden je uvnitř druhého. Pokud vnitřní válec rotuje, pak vnější válec zůstává nepohyblivý. Kladem tohoto uspořádání je velký povrch rotoru a snadné plnění vzorku. Naopak nevýhodou je obtížnější čištění přístroje. Na obrázku (obrázek 7) je vidět uspořádání typu válec-válec.



Obrázek 7 Rotační reometr s geometrií válec-válec [22]

Smyková rychlost γ se u tohoto typu mění s poloměrem r (rovnice 13).

$$\gamma = r \frac{d\omega}{dr} ; \quad (13)$$

kde ω je úhlová rychlost. Smykové napětí τ je dáno velikostí krouticího momentu (rovnice 14).

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2} \quad (14)$$

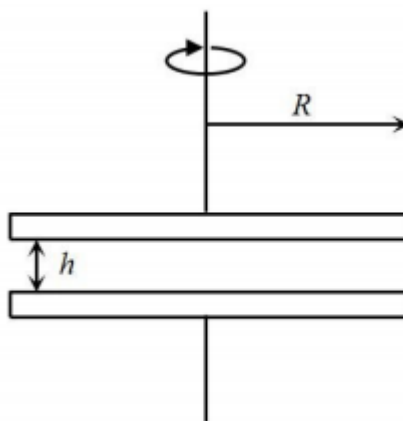
Pokud je mezi válci malá mezera, mohou být smykové napětí a smyková rychlost vyjádřeny přibližnými vztahy (rovnice 15 a 16).

$$\gamma = \frac{R_a \Omega}{R_o - R_i}, \tau = \frac{M}{2\pi R_a} ; \quad (15, 16)$$

kde R_a je střední průměr poloměru mezi R_o a R_i , R_o je poloměr vnějšího válce a R_i je poloměr vnitřního válce [21, 22].

6.2.2 Systém deska-deska

Tato geometrie je tvořena dvěma paralelními deskami. Metoda je vhodná pro středně viskózní látky, ale i pro nehomogenní materiály, jako jsou částčky nebo vlákna. Výhodou je libovolné nastavení štěrbiny, snadnější údržba geometrie a použití menšího množství vzorku. Negativní vlastností je méně přesné dávkování vzorku a nesjednocená smyková rychlost. U okraje desky je smyková rychlost vyšší, než ve středu soustavy.



Obrázek 8 Rotační reometr s geometrií deska-deska [22]

Smyková rychlost je vyjádřena pomocí poloměrů desek R , vzdáleností mezi deskami h a úhlovou rychlostí ω (rovnice 17).

$$\gamma = \frac{\omega R}{h} \quad (17)$$

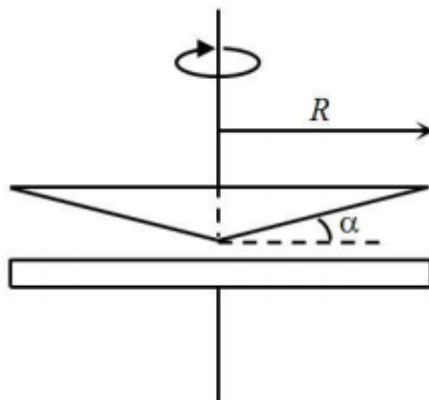
Smykové napětí je dáno uvedeným vztahem (rovnice 18):

$$\tau = \frac{2M}{\pi R^3}; \quad (18)$$

kde M je krouticí moment a R je poloměr desek [20, 21].

6.2.3 Systém kužel-deska

Soustava kužel-deska je určena pro homogenní materiály a viskózní tekutiny. Úhel mezi kuželem a deskou je obvykle $0,5^\circ$ – 4° . Výhodou toho typu je malá spotřeba zkoušeného materiálu, snadné čištění a konstantní smyková rychlost po celém vzorku. Hlavní nevýhodou je, že se geometrie kužel-deska nedá použít pro nízkoviskózní tekutiny. Vlivem odstředivé síly by došlo k odstraňování vzorku z měřicího místa zpod kužele.



Obrázek 9 Rotační reometr s geometrií kužel-deska [22]

Pro tento typ geometrie je smyková rychlost dána následujícím vztahem (rovnice 19). Pro malý úhel α mezi kuželem a deskou není závislá smyková rychlost na poloměru kužele R .

$$\gamma = \frac{\omega}{\alpha} \quad (19)$$

Smykové napětí je vyjádřeno uvedenou rovnicí (rovnice 20) [21, 22].

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3} \quad (20)$$

6.3 Kapilární reometry

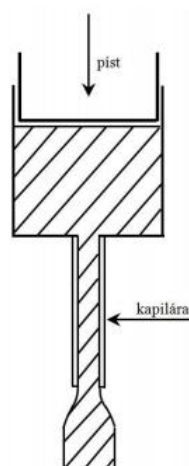
Používají se pro hodnocení při středních a vysokých smykových rychlostech ($10-10^3 \text{ s}^{-1}$). Jedním ze základních typů kapilárního reometru je přístroj pro měření indexu toku taveniny. Index toku taveniny hodnotí, kolik taveniny projde kapilárou o daném průřezu a délce za 10 minut. Hodnotu indexu obvykle uvádí výrobce v tzv. materiálovém listu. Výhodou u kapilárních reometrů je, že měří s vysokou přesností. Kapilární reometry nemohou být použity pro nenewtonské kapaliny, proto se používají kapilárních reometry s nastavitelným tlakovým spádem.

Smyková rychlost a smykové napětí pro newtonovské kapaliny je definováno vztahem (rovnice 21 a 22).

$$\gamma = \frac{4Q}{\pi R^3}; \quad (21)$$

$$\tau = \frac{\Delta p R}{2L}; \quad (22)$$

kde Q je objemový průtok v kapiláře, R je poloměr kapiláry, Δp je tlakový spád uvnitř kapiláry a L je délky kapiláry [21, 22].



Obrázek 10 Kapilární reometr [22]

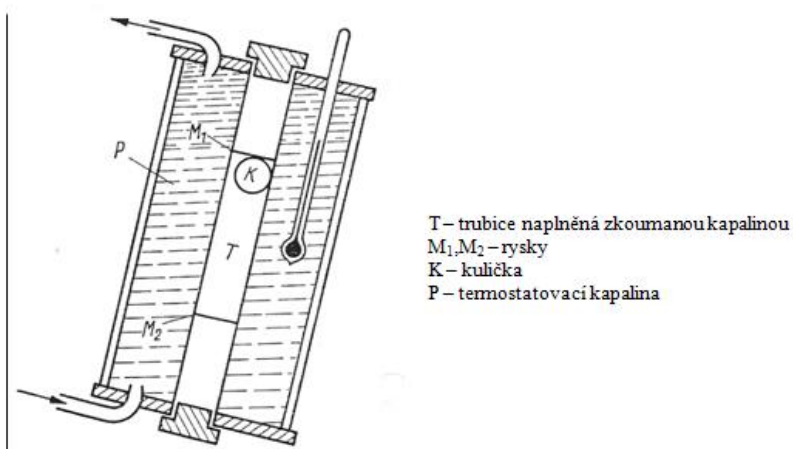
6.4 Pádové (tělískové) viskozimetry

Princip určování viskozity pádovými viskozimetry spočívá v měření rychlosti tělíska při pádu kapalinou. Tato rychlost je podle Stokesova zákona vyjádřena hustotou tělíska ρ , hustotou kapaliny ρ_0 , poloměrem tělíska r a viskozitou prostředí η (rovnice 23 a 24).

$$v = \frac{F}{6\pi\eta r} \quad (23)$$

$$F = \frac{3}{4}\pi r^3 \rho - \rho_0 g \quad (24)$$

Do této skupiny patří Höpplerův kuličkový viskozimetr (obrázek 23). Měří se doba, kdy propadne kulička trubicí se sklonem 10° . Na tělísko působí síla gravitační, vztlaková a odpor prostředí. Výhodou těchto viskozimetrů je měření širokého rozsahu viskozit. Nevýhodou je špatná údržba a možné použití jen transparentních vzorků známé hustoty [23].



Obrázek 11 Höpplerův kuličkový viskozimetr [23]

7 Praktická část

7.1 Použité zařízení a chemikálie

Zkušební zařízení:

- rotační reometr Discovery HR-1, TA Instruments.



Obrázek 12 Rotační reometr Discovery HR-1

Chemikálie:

- portlandský cement CEM I 42,5 R, Českomoravský cement, a.s., Mokrá;
- portlandský cement CEM I 42,5 R, Cement Hranice, a.s., Hranice;
- portlandský cement CEM I 42,5 R, Českomoravský cement, a.s., Radotín;
- síranovzdorný struskový cement CEM III/B 32,5 N-LH-SV, Českomoravský cement, a.s., Mokrá;
- síranovzdorný portlandský cement, RHEOCEM 650 SR, BASF spol. s r.o.;
- struska, KOTOUČ ŠTRAMBERK, spol. s r. o., Štramberk;
- zeolit, Zeobau 200, Zeocem, a.s.;
- popílek, ČEZ Energetické produkty, s.r.o., Dětmarovice;
- vápenec, Omyacarb 15-VA, Omya CZ s.r.o.;
- vápenný hydrát, Českomoravský cement, a.s., Mokrá;
- dolomitické vápno, HASIT Šumavské vápenice a omítkárny, s.r.o., Velké Hydčice;
- hydraulické vápno, Calcidur NHL 2, Zement- und Kalkwerke Otterbein GmbH & Co. KG;
- vysoce hydraulické trasové vápno, Baumit TrassitPlus, Baumit, spol. s r.o., Brandýs nad Labem;
- metakaolin, Mefisto K05, České lupkové závody, a.s., Nové Strašecí;
- vodní sklo 1,6, Vodní sklo, a.s., Ústí nad Labem;

- sušené vodní sklo, Susil MP 2,0, Vodní sklo, a.s., Ústí nad Labem;
- sádra, GYPSTREND s.r.o., Kobeřice;
- vzdušné vápno, Vápenka Čertovy schody a.s. (Skupina Lhoist), Tmaň.

7.2 Příprava vzorků

Reologické vlastnosti byly měřeny na různých pojivech o variabilních vodních součinitelích umožňujících stejnou zpracovatelnost výsledné pojivové kaše. Jednotlivé složení pojiv je popsáno v následujících tabulkách (*tabulka 10, 11, 12, 13*).

Tabulka 10 Složení měřených vzorků – cementy

Označení vzorku	Druh pojiva	Navážka	Vodní součinitel ($\frac{v}{c}$)
		[g]	
1	CEM I 42,5 R Mokrý	20	0,5
2	CEM I 42,5 R Hranice	20	0,5
3	CEM I 42,5 R Radotín	20	0,5
4	Síranovzdorný struskový cement	20	0,5
5	Síranovzdorný portlandský cement	20	0,5

Tabulka 11 Složení měřených vzorků – cement + příměs

Označení vzorku	Druh pojiva	Navážka	Vodní součinitel ($\frac{v}{c}$)
		[g]	
6	CEM I 42,5 R – Radotín + struska	20 (16+4)	0,5
7	CEM I 42,5 R – Radotín + zeolit	20 (16+4)	0,5
8	CEM I 42,5 R – Radotín + popílek	20 (16+4)	0,5
9	CEM I 42,5 R – Radotín + vápenec	20 (16+4)	0,5

Tabulka 12 Složení měřených vzorků – geopolymery, alkalická struska

Označení vzorku	Druh pojiva	Navážka
10	Mefisto K05 + vodní sklo + H ₂ O	10 g + 9 g + 8 ml
11	Mefisto K05 + vodní sklo + H ₂ O	10 g + 9 g + 4 ml
12	struska + Susil + H ₂ O	20 g + 4 g + 10 ml

Tabulka 13 Složení měřených vzorků – vápna

Označení vzorku	Druh pojiva	Navážka	Vodní součinitel ($\frac{v}{c}$)
		[g]	
13	dolomitické vápno	20	1,1
14	vápenný hydrát	20	1,1
15	hydraulické vápno	20	0,7
16	TrassitPluss	20	0,6
Označení vzorku	Druh pojiva	Navážka	Doba odležení vápna
17	CaO – 0,09 mm + H ₂ O	200 g + 640 ml H ₂ O	241 dní
18	CaO – kusové + H ₂ O	200 g + 640 ml H ₂ O	241 dní

Postup při měření probíhal následovně (tabulka 14).

Tabulka 14 Jednotlivé časy při měření

Čas [s]	Část měření
60	homogenizace směsi
300	odležení
100	předmíchání
300	měření (klesající smyková rychlost)
300	měření (rostoucí smyková rychlost)

7.3 Měření meze toku a viskozity

Celé měření bylo prováděno na rotačním reometru typu Discovery HR-1 od firmy TA Instruments. Pro měření byla použita geometrie deska-deska. U jednotlivých stavebních poživ byla měřena závislost smykového napětí na smykové rychlosti. Jelikož cementové pasty během měření reologických vlastností vykazují tixotropní chování, bylo zapotřebí měřit jednak závislost smykového napětí při zvyšující se smykové rychlosti, tak i závislost smykového napětí při snižování smykové rychlosti. Pro výpočet plastické viskozity a meze toku cementových past jsou vhodnější data naměřená při snižování smykové rychlosti [24, 25], proto jsou v níže uvedených grafech použity pouze hodnoty získané při snižování smykové rychlosti.

Před začátkem jednotlivých měření byla namíchaná pasta odležena po dobu 5 minut. Poté bylo pojivo vloženo do geometrie. Všechny operace v geometrii byly prováděny při konstantní teplotě 20 °C, která byla udržována pomocí Peltierova termočládku. V prvním kroku došlo k rozmíchání pasty při smykové rychlosti 100 s⁻¹. Následně bylo provedeno samotné měření. Nejprve byla měřena toková křivka s klesající smykovou rychlostí, poté byla měřena toková křivka, kdy se smyková rychlost zvyšovala. Bylo měřeno smykové napětí při 15 různých smykových rychlostech pro každou křivku v intervalu 0,1–100 s⁻¹. Smykové napětí bylo v každém měřeném bodě změřeno po 20 sekundách od dosažení dané rychlosti. Celý tento postup trval přibližně 18 minut.

Výpočet viskozity se dá vyjádřit podle následujícího vztahu (rovnice 23).

$$\eta = \frac{\sigma}{\gamma} ; \quad (23)$$

kde σ je smykové napětí a γ je smyková rychlost. Poté byl sestaven bodový graf, kdy jednotlivé body byly proloženy lineární funkcí Binghamova modelu.

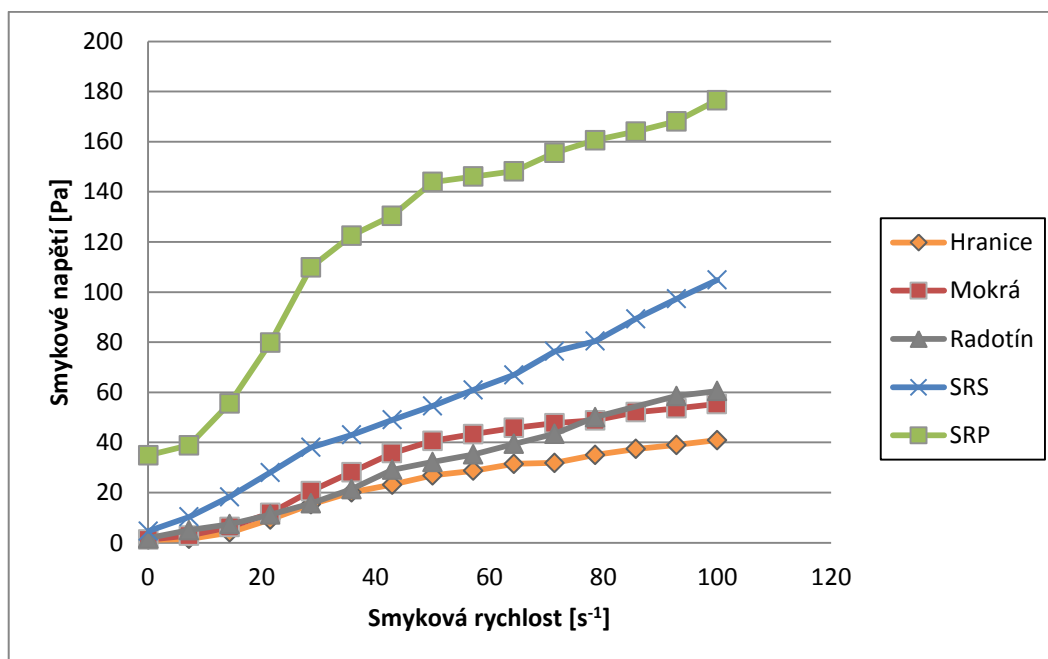
$$\tau = \tau_0 + \eta_{pt}\gamma ; \quad (24)$$

kde η_{pt} je plastická viskozita a τ_0 je mez toku [26].

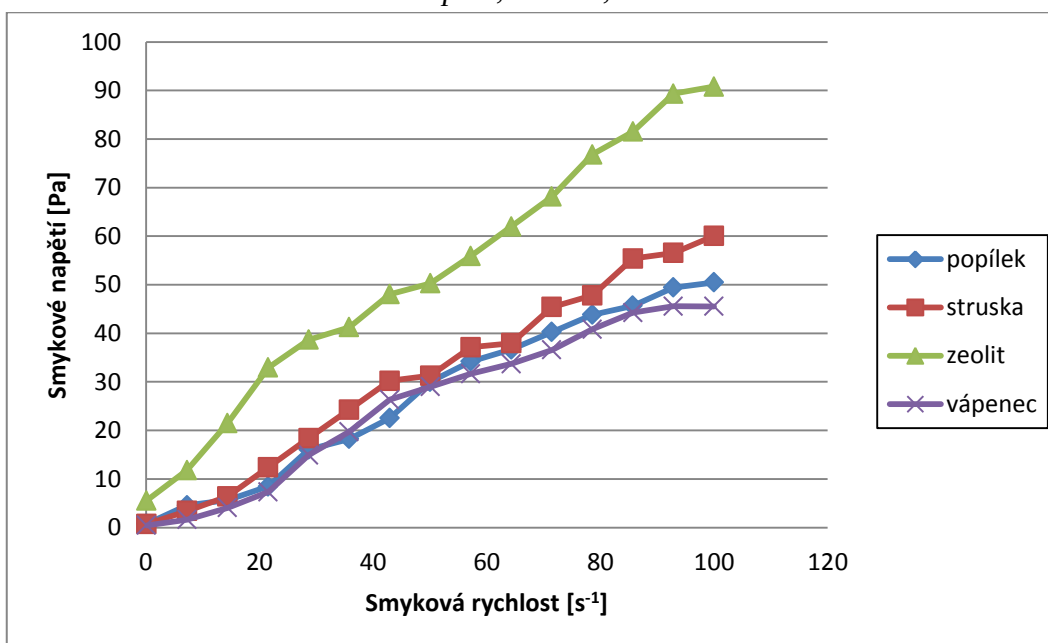
7.4 Výsledky experimentální části

7.4.1 Toková křivka

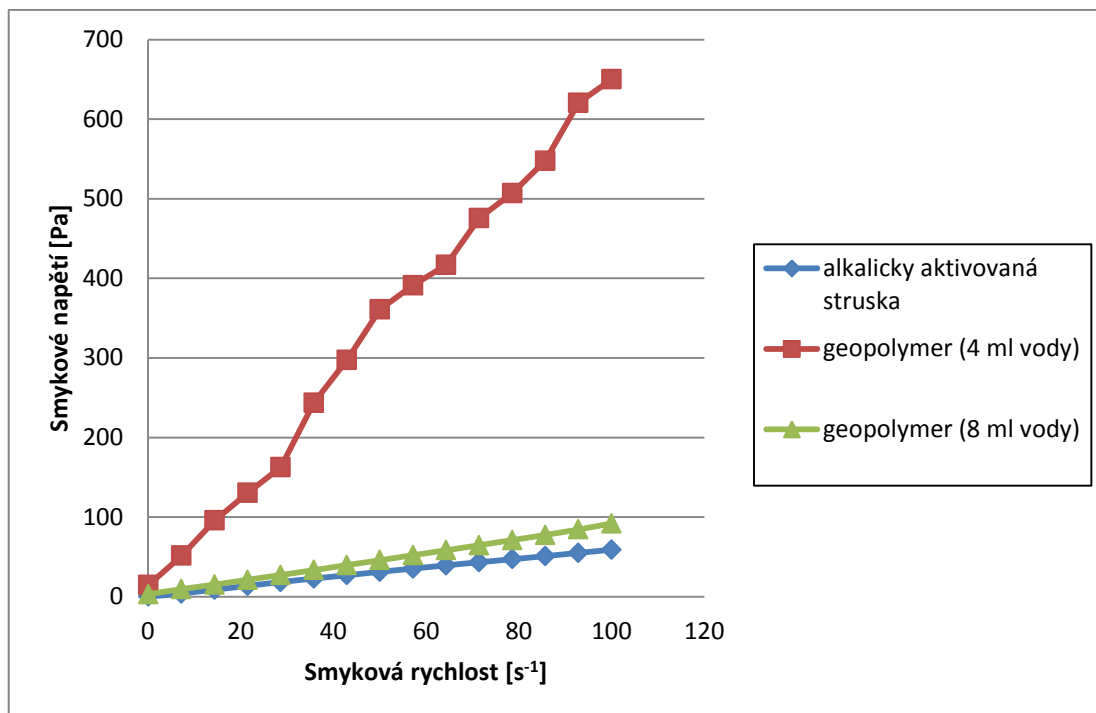
Z naměřených dat smykových rychlostí a smykových napětí byly pro jednotlivé pasty sestrojeny tokové křivky. Na těchto grafických závislostech bylo porovnáváno reologické chování past z pojiv podobného druhu.



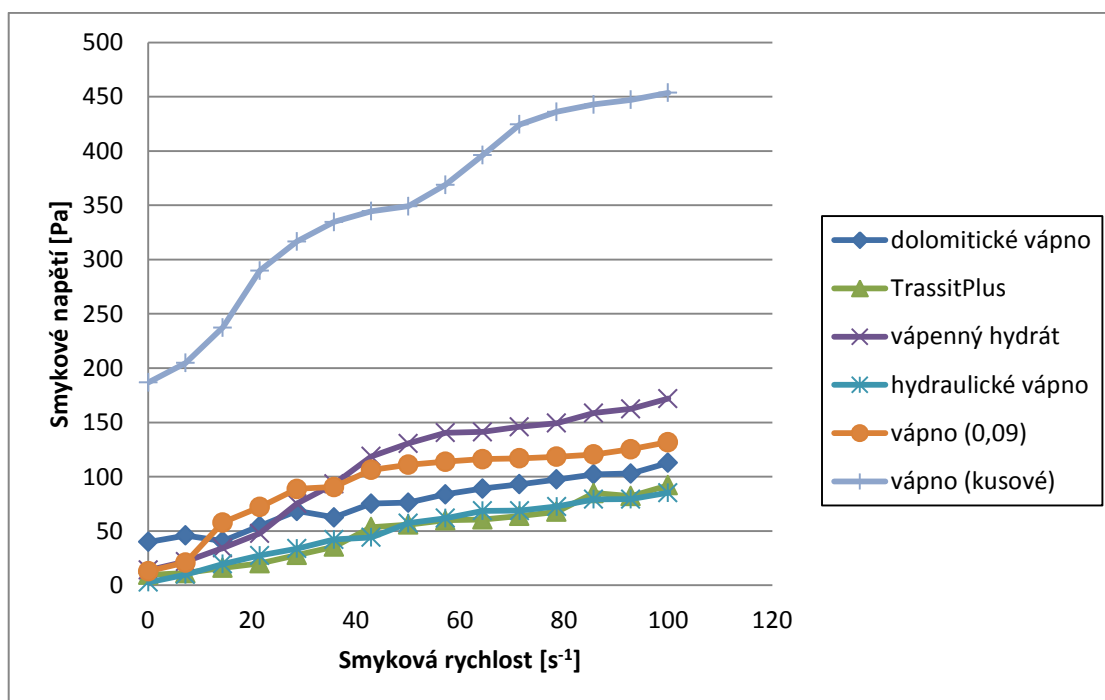
Graf 1 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u různých druhů cementových past, $v/c = 0,5$



Graf 2 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u různých druhů cementových past s příměsmi, $v/c = 0,5$



Graf 3 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u geopolymerních past s různou dávkou vody



Graf 4 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u vápenných past s různou dávkou vody

Nejdříve byly měřeny portlandské cementy z odlišných lokalit s vodním součinitelem 0,5. Zkoušení měření portlandských cementů s nižším vodním součinitelem (0,4) se ukázalo pro tento typ měření jako nevhodný, jelikož cementové pasty byly příliš husté konzistence. Při nižší dávce vody dochází ke zkrácení doby zpracovatelnosti a k dřívějšímu tuhnutí cementové pasty. Při porovnání portlandských a síranovzdorných cementů o stejném vodním součiniteli, je patrné, že portlandské cementy dosahují při stejných smykových rychlostech nižších hodnot smykového napětí. Lze tedy říci, že pasty z portlandského cementu mají nižší viskozitu a lepší zpracovatelnost než síranovzdorné cementy.

Dále byly zkoušeny cementy s příměsmi. Byl použit popílek, struska, vápenec a zeolit. Směsné cementy mají při stejném vodním součiniteli obdobné výsledky jako cementy portlandské, až na cement s přídavkem zeolitu. Ten vykazuje vyšší naměřené hodnoty smykového napětí, a proto bude vytvořená pasta více viskózní a bude tuhnout rychleji. Viskozita cementové pasty se zeolitem je vyšší, protože měrná hmotnost zeolitu se pohybuje v rozmezí $2200\text{--}2300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, to je méně než měrná hmotnost cementu ($3100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Pasta tedy obsahuje více drobných částí a viskozita je z tohoto důvodu vyšší.

Při přípravě geopolymérů byla použita různá dávka vody. Geopolymerní pasty mají vyšší hodnoty smykového napětí oproti cementovým pastám, podobně jako předchozí směs se zeolitem. Pasta s menším přídavkem vody vykazovala vysoké hodnoty smykového napětí. Voda tedy výrazně upravuje reologické vlastnosti geopolymerních směsí a významně se podílí na lepší zpracovatelnosti geopolymerních kaší.

Při stejném postupu měření byla zkoušena i sádrová kaše. Pro tento typ zkoušení je však sádra nevhodná, a proto výsledky nebyly vyhodnoceny. Důvodem je příliš rychlá hydratace a tvrdnutí sádrové kaše, které znemožňuje dosažení relevantních výsledků.

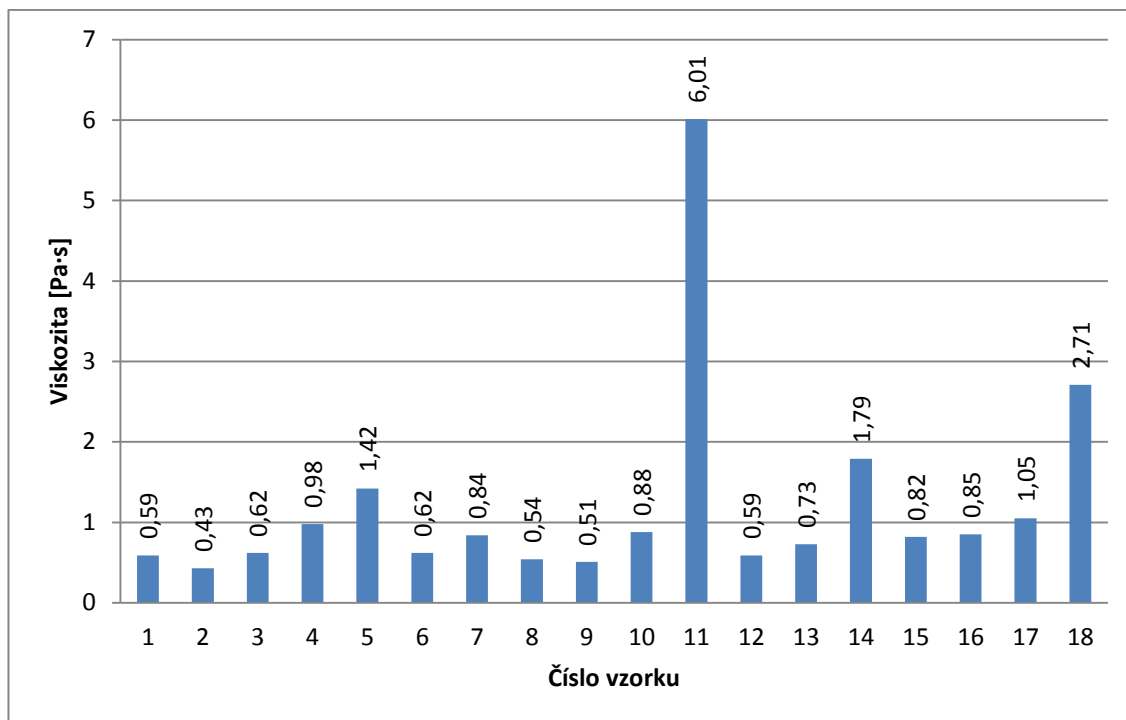
Jako poslední byly zkoušeny vápenné kaše. V této kategorii se dosaženými výsledky lišilo pouze odležené hašené vápno, vzniklé hašením kusového vápna. Tato vápenná kaše dosahovala až trojnásobných hodnot smykového napětí než ostatní vápenné kaše. Je tedy více viskózní a plastičtější, což je při použití vápenné kaše v maltách a omítkách pozitivně hodnoceno.

7.4.2 Plastická viskozita a mez toku

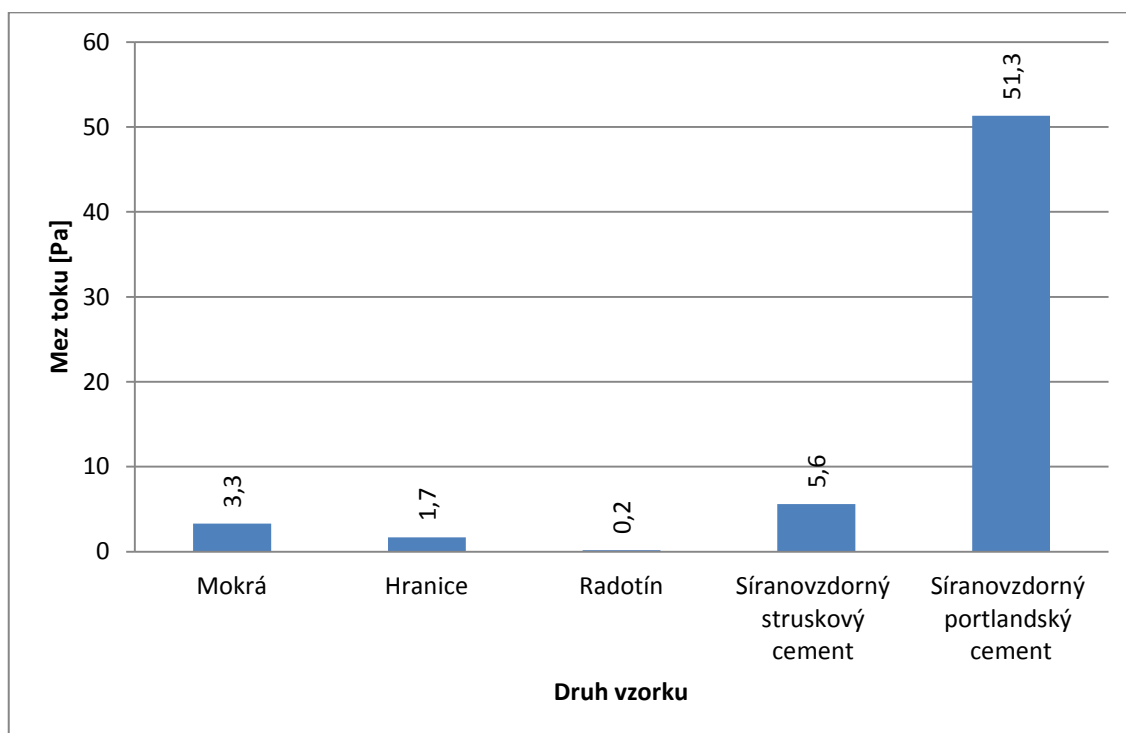
Sestrojenou tokovou křivkou byla proložena lineární funkce. Rovnice vytvořené přímkou udává hodnotu plastické viskozity a meze toku dle Binghamova. Výsledné hodnoty všech použitých vzorků jsou uvedeny v následující tabulce (tabulka 15).

Tabulka 15 Výsledné hodnoty plastické viskozity a meze toku u všech měřených vzorků získané z Binghamovy rovnice

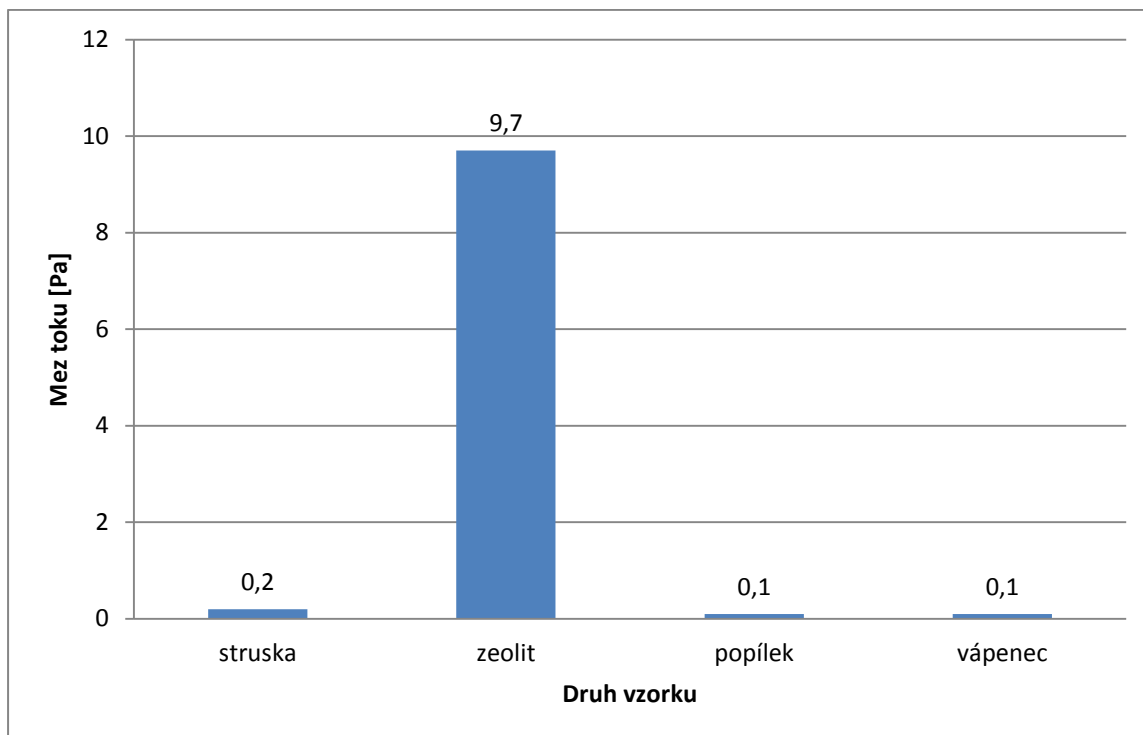
Označení vzorku	Plastická viskozita	Mez toku
	[Pa·s]	[Pa]
1	0,59	3,3
2	0,43	1,7
3	0,62	0,2
4	0,98	5,6
5	1,42	51,3
6	0,62	0,2
7	0,84	9,7
8	0,54	0,1
9	0,51	0,1
10	0,88	2,3
11	6,01	5,2
12	0,59	0,8
13	0,73	39,4
14	1,79	19,4
15	0,82	8,9
16	0,85	6,8
17	1,05	41,0
18	2,71	213,5



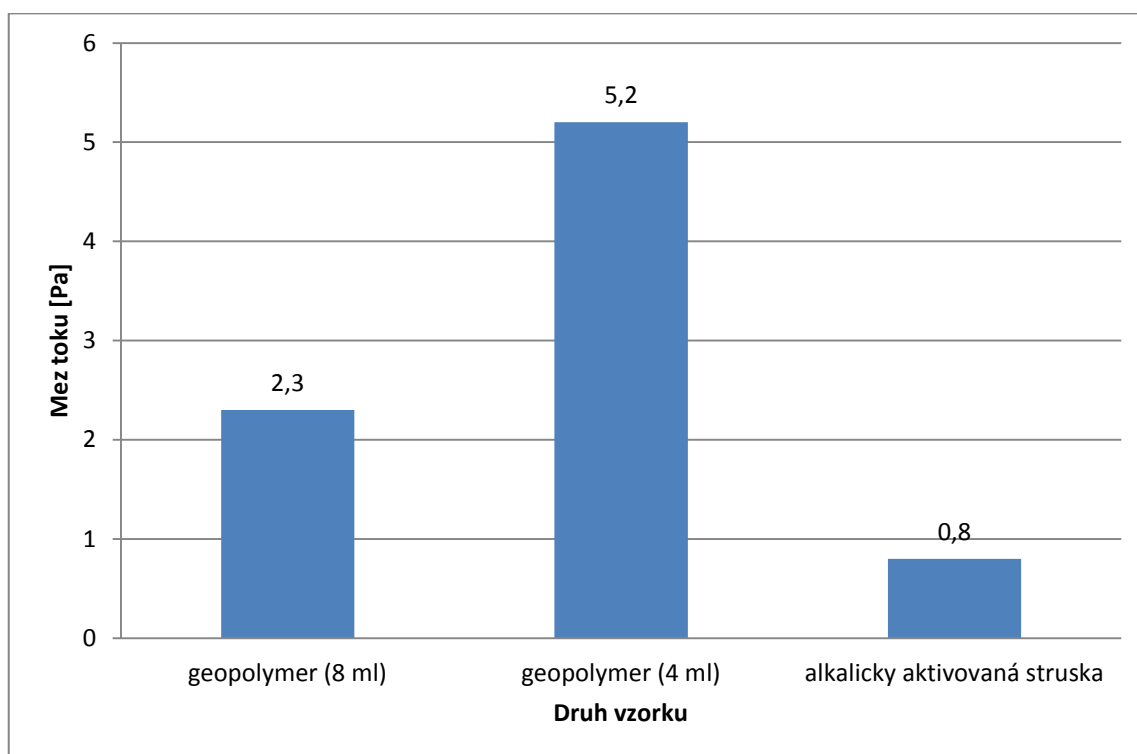
Graf 5 Porovnání plastických viskozit sledovaných pojiv



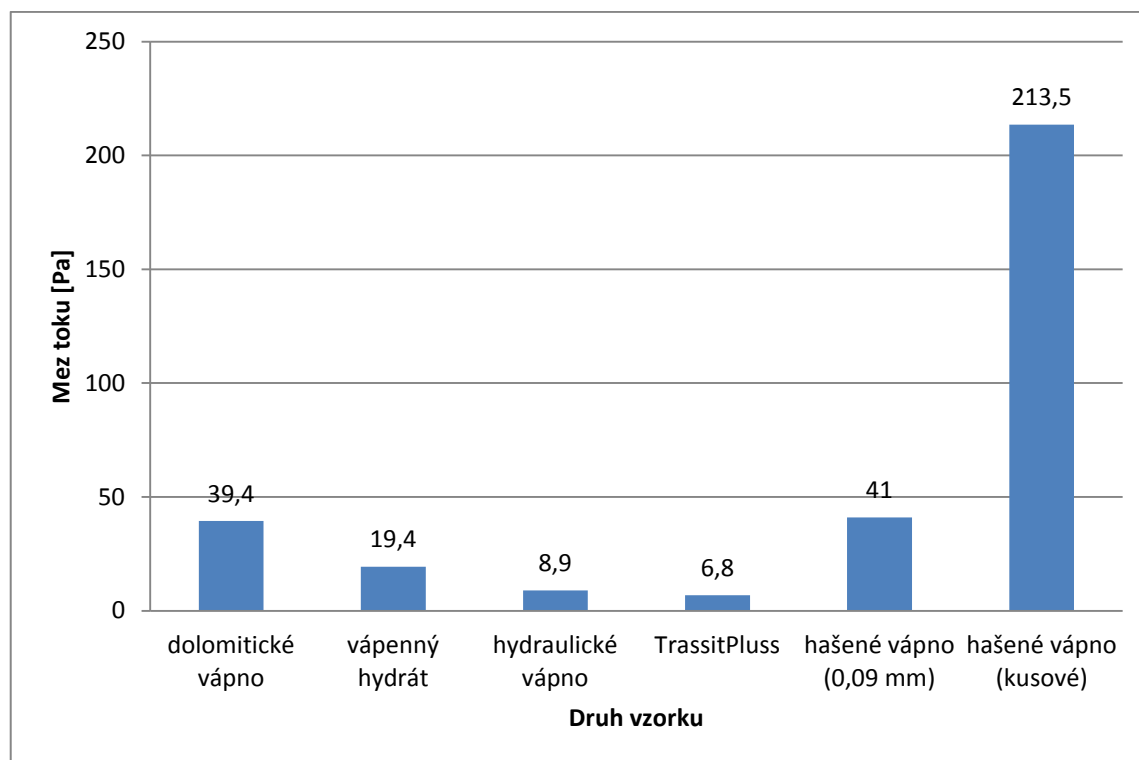
Graf 6 Porovnání mezí toku různých druhů portlandských cementů při stejném v/c



Graf 7 Porovnání mezí toku směsných cementů při stejném v/c



Graf 8 Získané meze toku pro sledované geopolymerní pasty



Graf 9 Získané meze toku pro různé druhy vápen

Plastická viskozita zkoušených cementových past se pohybuje v rozmezí 0,43–1,42 Pa·s. To odpovídá běžným hodnotám, které jsou okolo 0,01–1 Pa·s [11]. Z postupu prováděného měření bylo zjištěno, že plastická viskozita cementových past je závislá na množství přidané vody. Při snížení vodního součinitele byla pasta hutnějšího charakteru a nedovolovala snadné měření v použité geometrii. Je pravděpodobné, že pokud by se dávka vody zvýšila, viskozita by se snížila. Mez toku vyšla u portlandských cementů 0,2; 1,7 a 3,3 Pa. U síranovzdorných cementů byla hodnota meze toku vyšší, což je způsobeno odlišným chemickým složením těchto cementů. Vysoká hodnota meze toku síranovzdorného portlandského cementu je dána velice nízkou granulometrií ($D < 40 \mu\text{m}$) a větším měrným povrchem ($685 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$) oproti ostatním cementům a ke stejné zpracovatelnosti cementové kaše je v tomto případě nutná vyšší dávka záměsové vody nebo použití plastifikační přísady.

Pasty směsných cementů mají plastickou viskozitu v podobném intervalu jako pasty z portlandských cementů. Avšak mez toku mají blíží se k nule. Výjimkou je pasta se zeolitem, která má mez toku 9,7 Pa. Sledované pasty ze směsných cementů mají tedy při použití vodního součinitele 0,5 velmi dobrou zpracovatelnost a snadno tečou i při nízkých

smykových rychlostech, což může mít negativní dopad při jejich použití ve svislých aplikacích.

Na základě výsledků reologického měření lze říci, že geopolymery jsou viskózní látky, které mohou mít jak odlišné, tak podobné reologické vlastnosti, jako cementové směsi v závislosti na množství použité záměsové vody. Plastická viskozita byla výrazněji vyšší (6,01 Pa·s) pouze u geopolymerní pasty s menší dávkou vody. Hodnoty mezí toků u geopolymerních past jsou podobné výsledným hodnotám past u portlandských cementů. Hodnoty plastické viskozity vápenných past se pohybují od 0,73 do 2,71 Pa·s. Čerstvá vápenná kaše má nižší viskozitu, než odleželé hašené vápno. Měkce pálené vápno má lepší zpracovatelnost a plasticitu než vápenný hydrát. V pastách z vápna bylo zjištěno, že mez toku je vyšší než u past cementových. Hodnoty se pohybují mezi 10-40 Pa. Hašené vápno, odležené 241 dní a vyhašené z kusového vápna, má mez toku dokonce 213,5 Pa. Tato vysoká hodnota je patrně způsobena pomalým hašením kusového vápna a lepší tvorbou gelové struktury takto vzniklé vápenné kaše.

8 Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat různá stavební pojiva a jejich reologické vlastnosti. V teoretické části byly popsány jednotlivé druhy pojiv a vybraných příměsí. Dále bylo popsáno tokové chování látek a stanovení reologických vlastností pomocí různých reologických modelů. Následně bylo uvedeno, jaké typy zařízení lze použít pro určení reologických vlastností látek.

V experimentální části byly měřeny reologické veličiny na jednotlivých stavebních pojivech v čerstvém stavu. Byly použity cementové kaše, vápenné kaše, geopolymerní kaše a sádrové kaše. Měření bylo provedeno na rotačním reometru s měřicí geometrií typu deska-deska. Postup měření byl u všech surovin stejný. Suroviny byly smíseny a vzniklá směs se nechala 5 minut odležet. Poté následovalo v rotačním reometru předmíchání a následné měření závislosti smykového napětí na smykové rychlosti. Pro vyhodnocení byly použity pouze hodnoty, získané z měření při snižující se smykové rychlosti, na které byl použit Binghamův model pro zjištění plastických viskozit a mezí toků sledovaných pojiv.

Z naměřených a vyhodnocených výsledků lze říci, že reologické vlastnosti cementů jsou závislé na jejich složení. Chemické složení cementu je důvodem vzniku meze toku cementové kaše. Snížení meze toku by mohlo být provedeno přidáním superplastifikační přísady, avšak pouze do určitého množství, aby nedošlo k nežádoucím jevům jako např. odměšování vody k povrchu cementové kaše, případně přílišné tekutosti cementové kaše bránící určitým aplikacím výsledné kaše. Nízké hodnoty viskozit a mezí toků jsou naopak vyžadovány pro cementové kaše k injektážním aplikacím a zálivkám. Dále bylo potvrzeno, že reologické vlastnosti jsou závislé na vodním součiniteli.

Směsné cementy vykazují velmi malé hodnoty mezí toků, blíží se k nule. Plastická viskozita není nijak ovlivněna přidáním příměsí a nabývá podobných hodnot jako pasty z portlandských cementů.

Geopolymerní pasty vykazují za stejných podmínek podobné vlastnosti jako pasty cementové. Pouze geopolymerní pasta složená z metakaolinu Mefisto K05, vodního skla a nízké dávky vody vykazovala odlišné hodnoty.

U vápenných past jsou reologické vlastnosti podmíněny přípravou. Jedná-li se o hašené vápno má mez toku a mírně i plastická viskozita vyšší hodnoty než komerčně dostupný vápenný hydrát. Potvrdilo se též, že odleželé hašené vápno připravené z kusového páleného vápna má lepší užité vlastnosti než hašené vápno z vápna jemně mletého. Vyšší plastická viskozita a mez toku tohoto vápna zapříčiňují jeho lepší přídržnost k podkladu.

Viskozita a mez toku sádrových kaší je použitým postupem měření nezjistitelná, jelikož celý proces měření je výrazně delší než doba tuhnutí sádry. Pro měření by bylo zapotřebí použít zpomalovače tuhnutí.

9 Použité zdroje

- [1] *PŘÍRUČKA TECHNOLOGA BETON* [online]. ČESKOMORAVSKÝ BETON HEIDELBERGCEMENT Group, 2013 [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=3203>
- [2] ČSN EN 197-1. *Cement-Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [3] LOSOS, Ludvík a Miloš GAVENDA. *Štukárenství*. Praha: Grada Publishing, 2010, s. 48. ISBN 978-80-247-2175-0.
- [4] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty* [online]. 3. vydání. Praha: Jaga, 2013 [cit. 2016-01-20]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodah/sh/SH3v1.pdf>
- [5] FRIDRICHOVÁ, Marcela. *BJ16 Maltoviny: Modul M02*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014, 133 s. ISBN 978-80-214-4973-2.
- [6] HELA, Rudolf. Příměsi do betonu. *BETON - technologie, konstrukce, sanace*. 2015, 2015(2), 4-10.
- [7] Technický list MIKROSILIKA. <http://www.betonracio.sk/>
- [8] VANCHAI, Sata, Apha SATHONSAOWAPHAK a Prinya CHINDAPRASIRT. Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement & Concrete Composites*. 2012, s. 700-708. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010.
- [9] SOBOTKA, Z. *Reologie hmot a konstrukcí*. Praha: Academia, 1981. Kapitola 7: Reologické vlastnosti látek, p. 269–304.
- [10] ŘAPÍK, Michal. *Příprava geopolymérů* [online]. 2008, s. 6 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www.michalrepik.cz/materialy/priprava_geopolymeru.pdf
- [11] BANFILL, P.F.G. *The rheology of fresh cement and concrete - a review*. In Proc. Of 11th International Cement Chemistry Congress, Durban 2003, p. 61–130.

- [12] HAVRÁNEK, Antonín. *Reologie a její aplikace na biolátky* [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:uj9j6zRHK9QJ:web.ftvs.cuni.cz/elstudovna/download.php%3Fdir%3D./obsah/abi/doc%26soubor%3DReologie.doc+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>
- [13] STRUBLE, Leslie J.; JI, Xihuang. *HANDBOOK OF ANALYTICAL TECHNIQUES IN CONCRETE SCIENCE AND TECHNOLOGY*. New York, USA: William Andrew Publishing., 1999. Rheology, s. 333-367. ISBN 0-8155-1437-9.
- [14] *Reologické chování tekutin – stanovení reogramů* [online]. [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/RC.pdf>
- [15] STEFFE, James F. *Reological Methods in Food Proces Engineering*. USA: Freeman Press, 1996. 418 s. ISBN 0963203614.
- [16] SCHRAMM, Gebhard. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. Německo: Gebrüder GmbH, 1994. 290 s.
- [17] Reologické vlastnosti. BARTOVSKÁ, Ludmila a Marie ŠÍŠKOVÁ. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav* [online]. 5. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005, s. 143 [cit. 2016-02-22]. ISBN 80-7080-579-X. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-579-X/pdf/143.pdf
- [18] FERRARIS, Chiara F., “*Measurement of The Rheological Properties of High Performance Concrete*”. Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology, (1999) 104 (5), 461-478.
- [19] *Schlumberger* [online]. 2011 [cit. 2016-05-12]. Rheological models. Dostupné z <http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/r/rheological.aspx>
- [20] *Reologie* [online]. Ústav fyziky a materiálového inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [21] *Seminář reologie* [online]. Pragolab, 2015 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://www.pragolab.cz/files/download/Seminar_reologie_2015.pdf
- [22] *Měření tokových vlastností* [online]. Ústav fyziky a materiálového inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2016-03-15].
- [23] RENNER, Vratislav. *Metody měření viskozity* [online]. Integrovaná střední škola, Slaný [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://xyz12345.wz.cz/tmr/zkousky_provoz_mat.html

- [24] HEIRMAN, G., et al. Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2008, 150, s. 93-103.
- [26] FERRARIS, Chiara F. *Measurement of the rheological properties of cement paste: A new approach*. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology, 1999, p. 333-342.
- [25] WALLEVIK, Jon Elvar. Thixotropic investigation on cement paste: Experimental and numerical approach. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2005, 132, s. 86-99

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 Základní slínkové minerály

Tabulka 2 Dělení vzdušného vápna

Tabulka 3 Dělení hydraulického vápna dle hodnoty hydraulického modulu

Tabulka 4 Dělení hydraulického vápna dle hodnoty stupně hydratace

Tabulka 5 Dělení hydraulického vápna dle hodnoty stupně sycení

Tabulka 6 Dělení hydraulického vápna

Tabulka 7 Požadavky na dobu tuhnutí sádry a jemnost mletí sádry

Tabulka 8 Přehled reologických modulů

Tabulka 9 Reologie cementové pasty, malty a betonu

Tabulka 10 Složení měřených vzorků – cementy

Tabulka 11 Složení měřených vzorků – cement + příměs

Tabulka 12 Složení měřených vzorků – geopolymery, alkalická struska

Tabulka 13 Složení měřených vzorků – vápna

Tabulka 14 Jednotlivé časy při měření

Tabulka 15 Výsledné hodnoty plastické viskozity a meze toku u všech měřených vzorků

11 Seznam obrázků

Obrázek 1 Výroba vzdušného vápna v šachtové peci

Obrázek 2 Struktura geopolymerního materiálu

Obrázek 3 Rozdělení kapalin podle tokového chování

Obrázek 4 Tixotropní a reopektický systém v porovnání s newtonovskou kapalinou

Obrázek 5 Znázornění vybraných reologických modelů

Obrázek 6 Fordův pohárek

Obrázek 7 Rotační reometr s geometrií válec-válec

Obrázek 8 Rotační reometr s geometrií deska-deska

Obrázek 9 Rotační reometr s geometrií kužel-deska

Obrázek 10 Kapilární reometr

Obrázek 11 Höppnerův kuličkový viskozimetr

Obrázek 12 Rotační reometr

12 Seznam grafů

Graf 1 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u různých druhů cementových past, vodní součinitel = 0,5

Graf 2 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u různých druhů cementových past s příměsmi, vodní součinitel = 0,5

Graf 3 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u alkalicky aktivované strusky a geopolymery s různou dávkou vody

Graf 4 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u vápenných past s různou dávkou vody

Graf 5 Porovnání plastických viskozit sledovaných pojiv

Graf 6 Porovnání mezí toku různých druhů portlandských cementů při stejném v/c

Graf 7 Porovnání mezí toku směsných cementů při stejném v/c

Graf 8 Získané meze toku pro sledované geopolymerní pasty

Graf 9 Získané meze toku pro různé druhy vápen

13 Seznam příloh

Graf-P 1 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u portlandského cementu, Mokrý, $v/c = 0,5$

Graf-P 2 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u portlandského cementu, Hranice, $v/c = 0,5$

Graf-P 3 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u portlandského cementu, Radotín, $v/c = 0,5$

Graf-P 4 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u síranovzdorného struskového cementu, $v/c = 0,5$

Graf-P 5 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u síranovzdorného portlandského cementu, $v/c = 0,5$

Graf-P 6 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u směsného cementu se struskou, $v/c = 0,5$

Graf-P 7 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u směsného cementu se zeolitem, $v/c = 0,5$

Graf-P 8 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u směsného cementu s popílkem, $v/c = 0,5$

Graf-P 9 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u směsného cementu s vápencem, $v/c = 0,5$

Graf-P 10 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u geopolymery, 8 ml H_2O

Graf-P 11 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u geopolymery, 4 ml H_2O

Graf-P 12 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u alkalicky aktivované strusky

Graf-P 13 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u dolomitického vápna, $v/c = 1,1$

Graf-P 14 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u vápenného hydrátu, $v/c = 1,1$

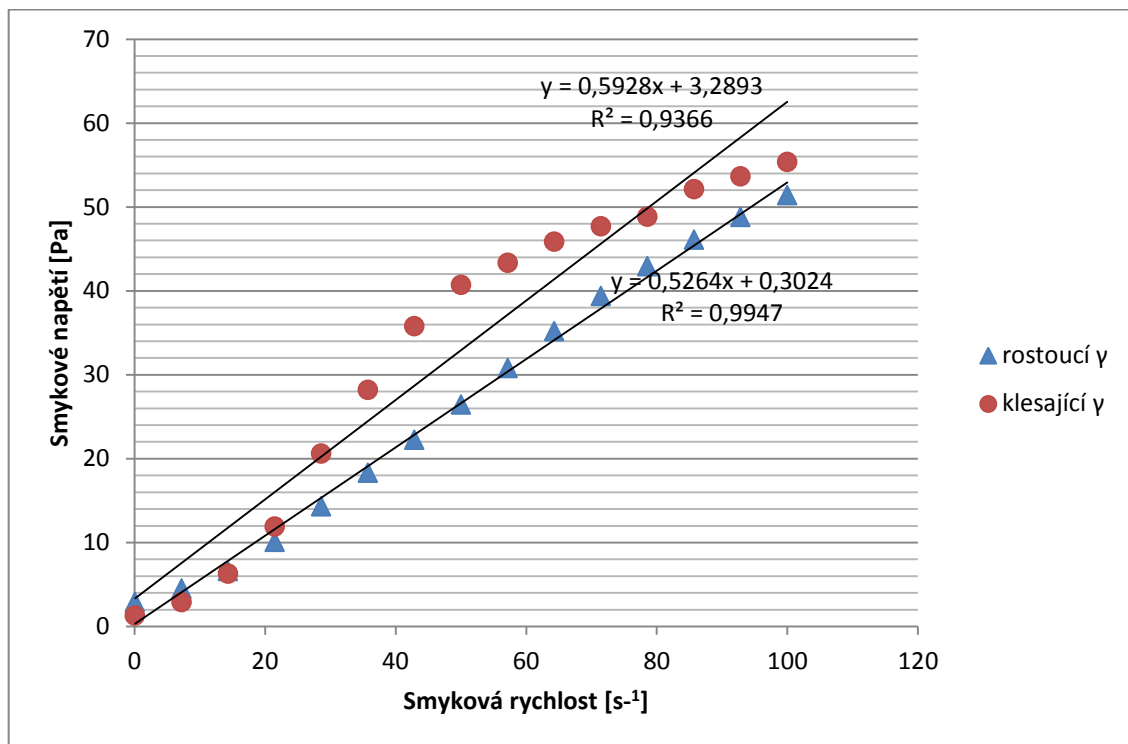
Graf-P 15 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u hydraulického vápna, $v/c = 0,7$

Graf-P 16 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u trasového vápna, $v/c = 0,6$

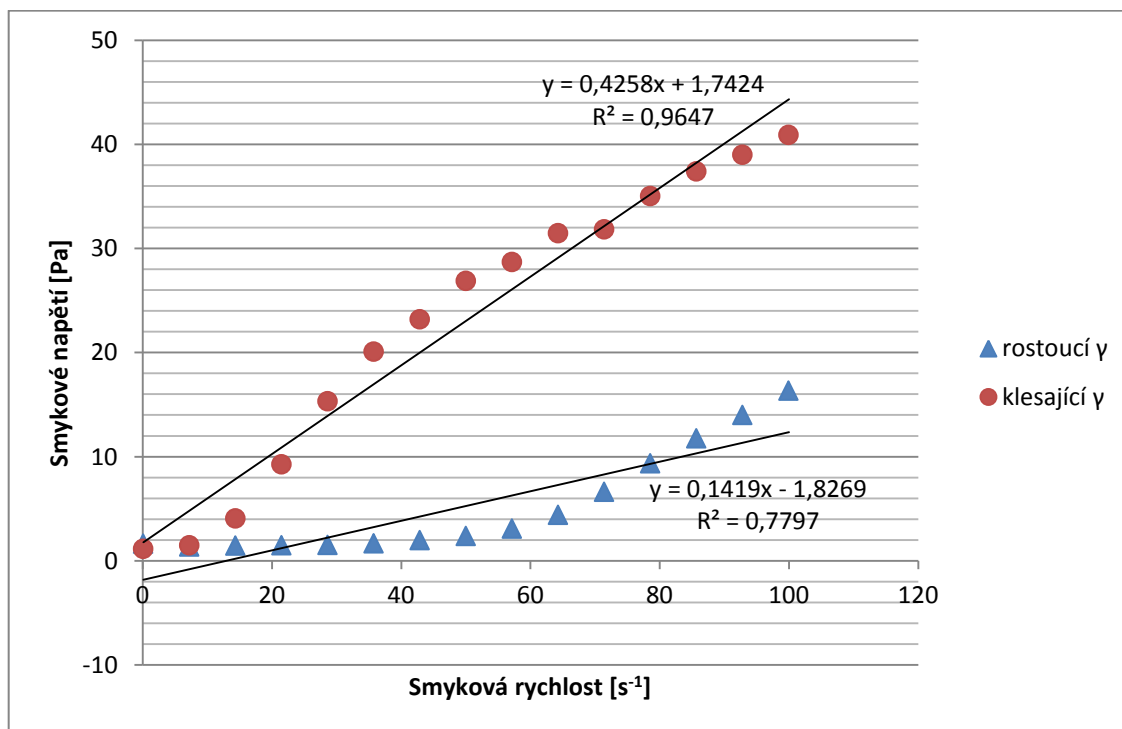
Graf-P 17 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u hašeného vápna (0,09 mm)

Graf-P 18 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u hašeného vápna (kusové)

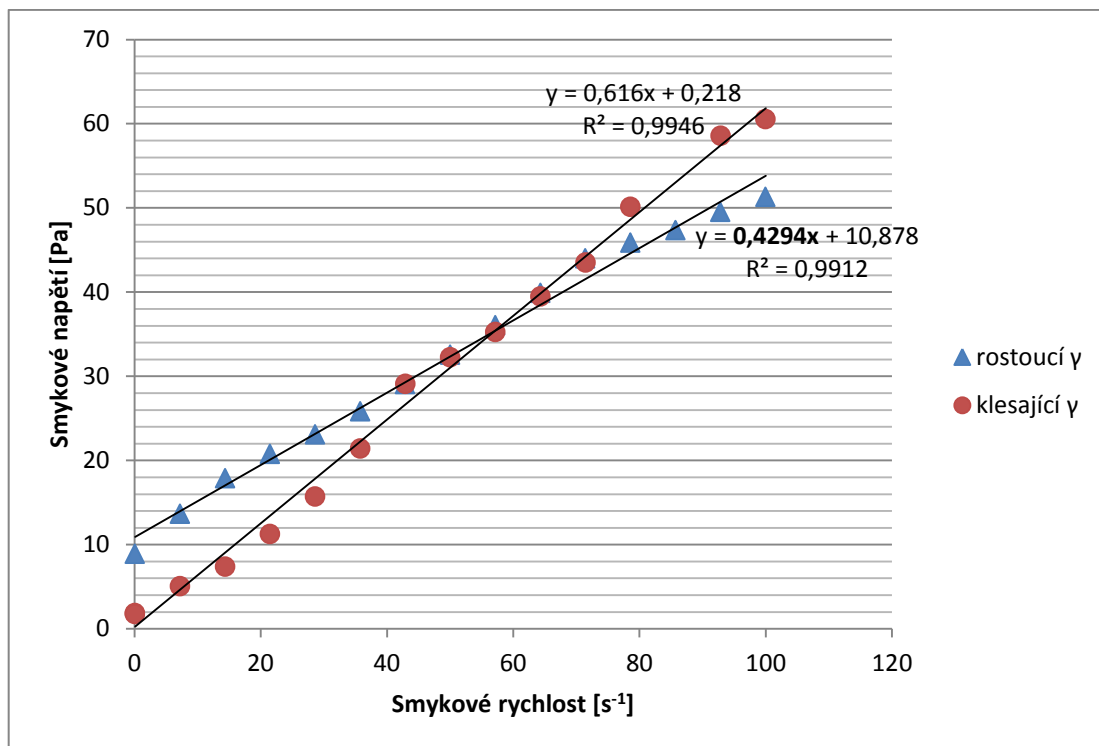
14 Přílohy



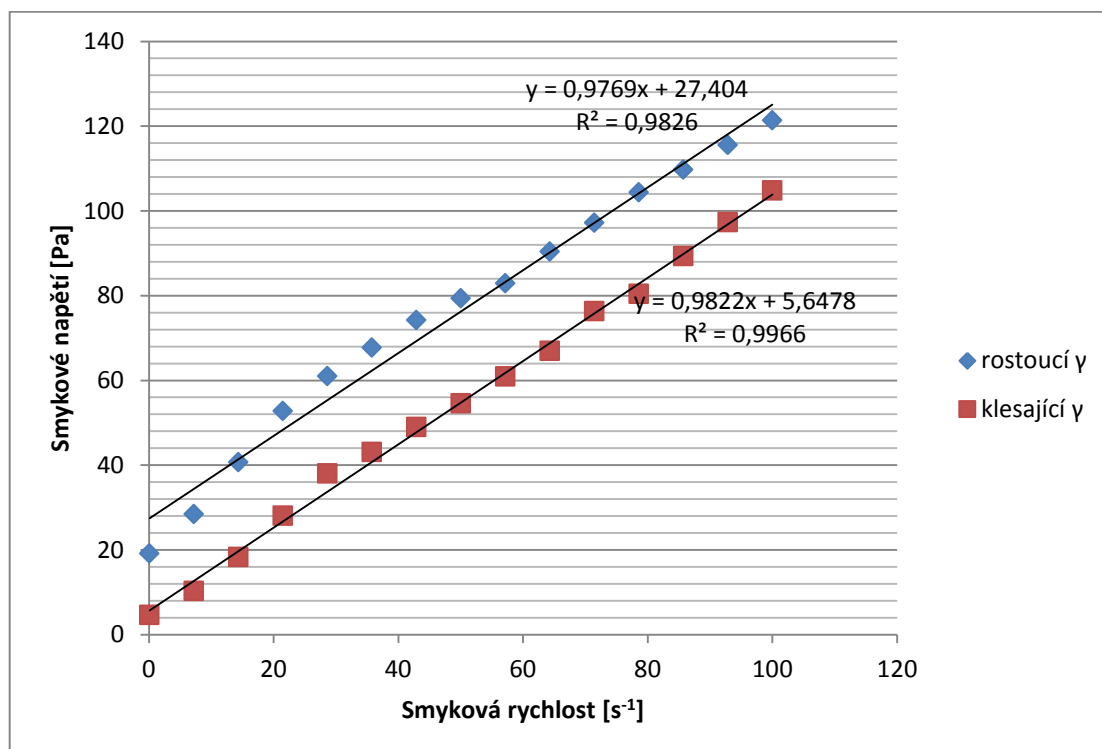
Graf-P 1 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u portlandského cementu, Mokrá, $v/c = 0,5$



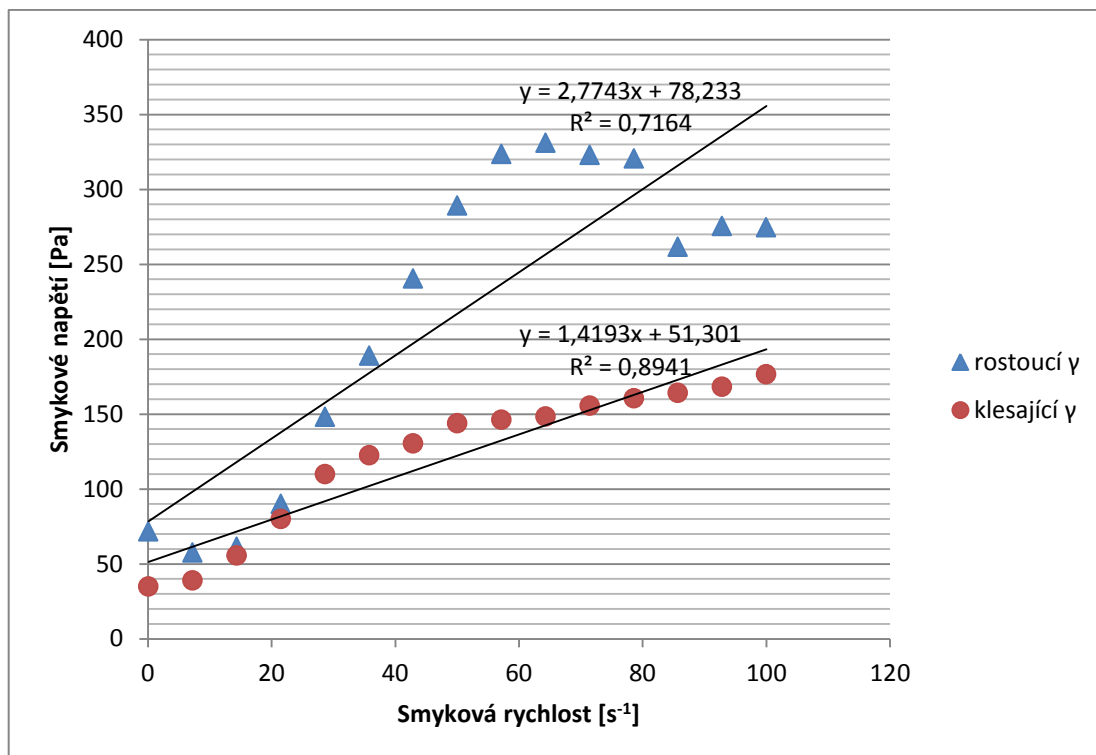
Graf-P 2 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u portlandského cementu, Hranice, $v/c = 0,5$



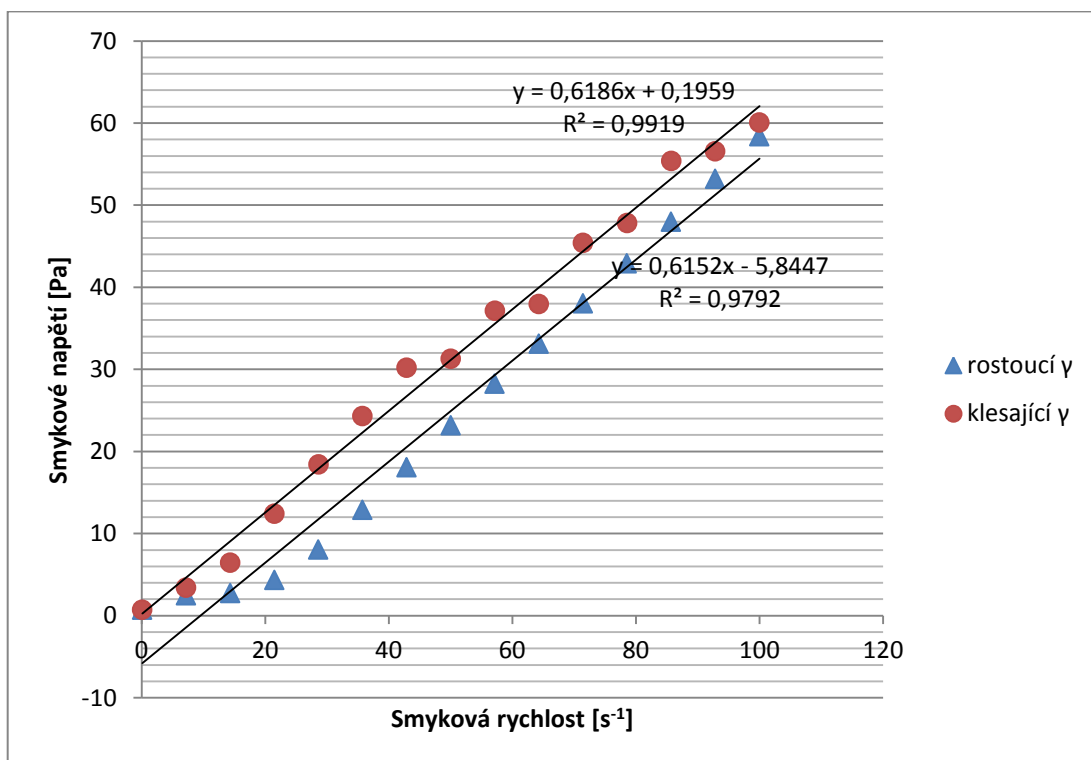
Graf-P 3 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u portlandského cementu, Radotín, $v/c = 0,5$



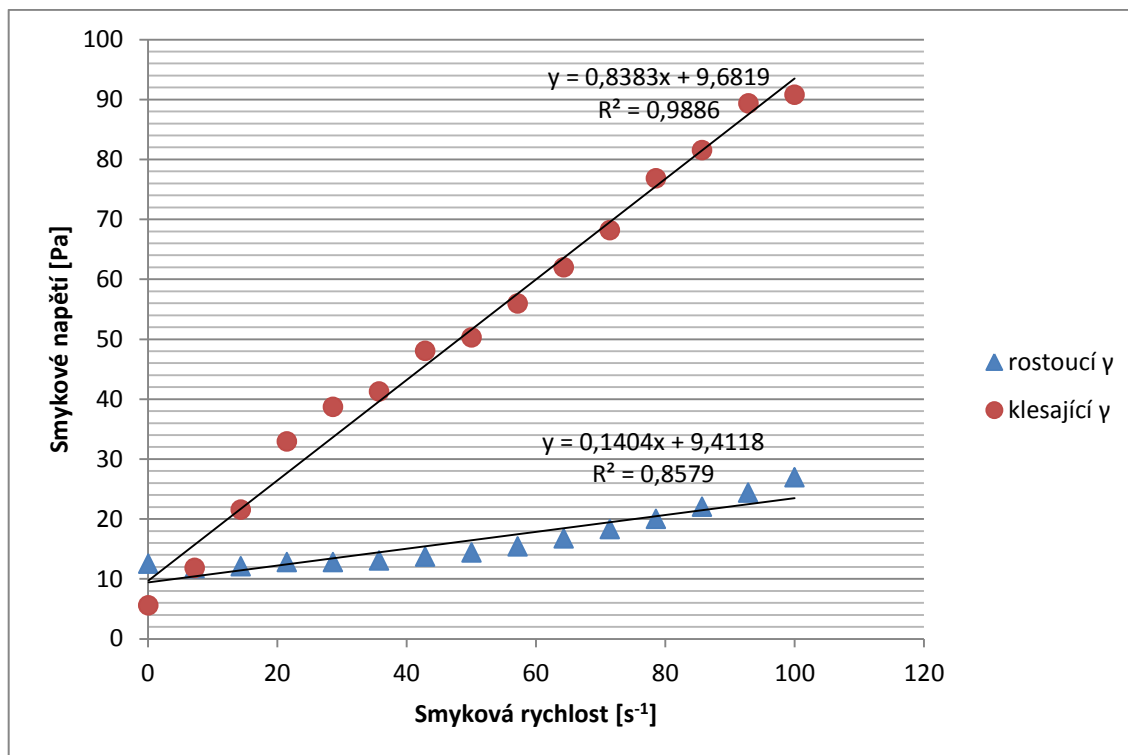
Graf-P 4 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u síranovzdorného struskového cementu, $v/c = 0,5$



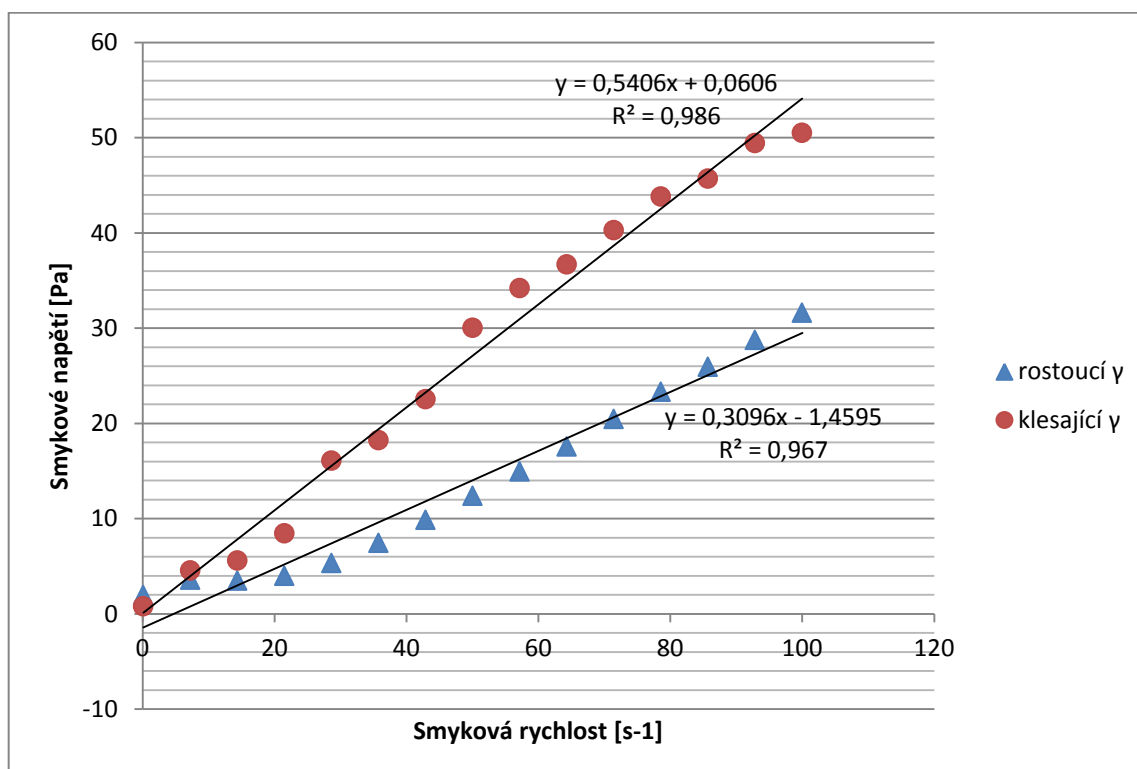
Graf-P 5 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u síranovzdorného portlandského cementu, $v/c = 0,5$



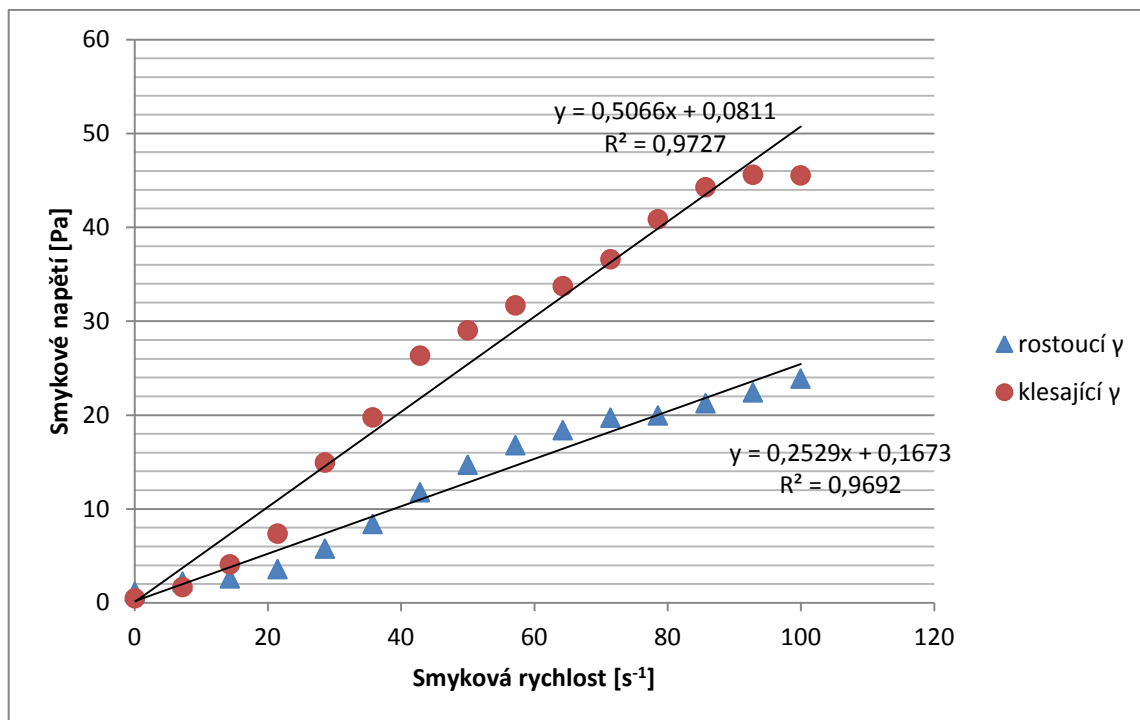
Graf-P 6 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u směsného cementu se struskou, $v/c = 0,5$



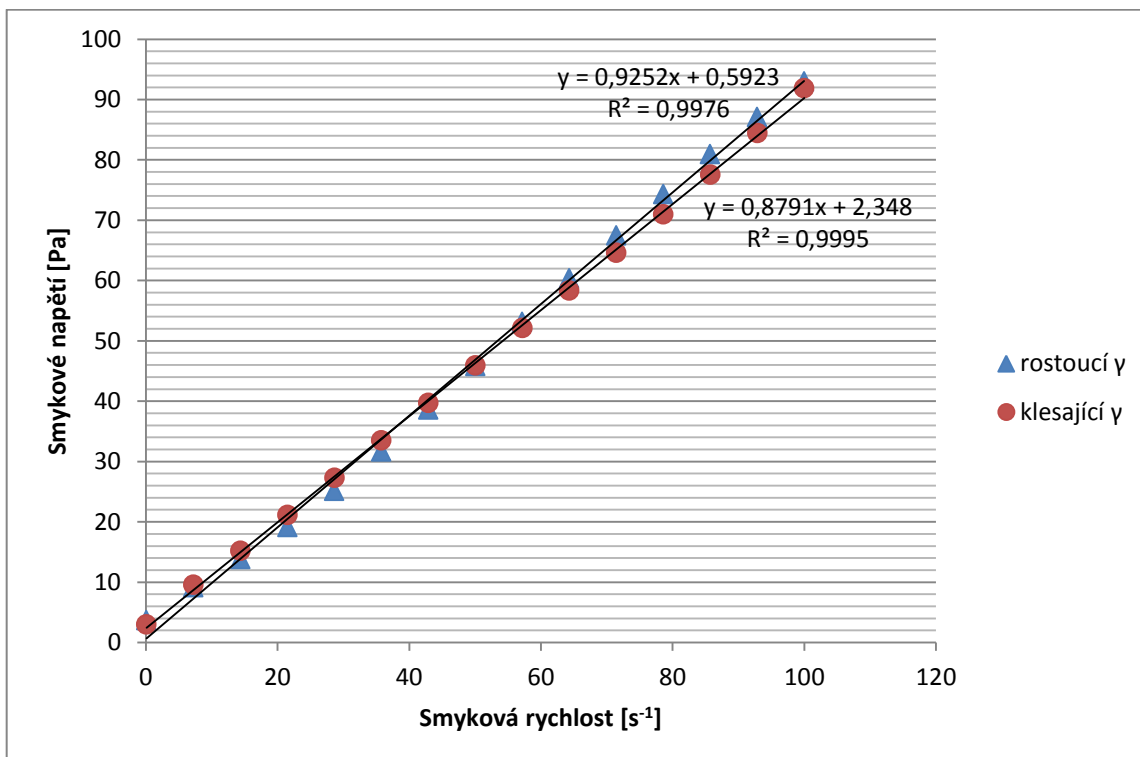
Graf-P 7 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u směsného cementu se zeolitem, $v/c = 0,5$



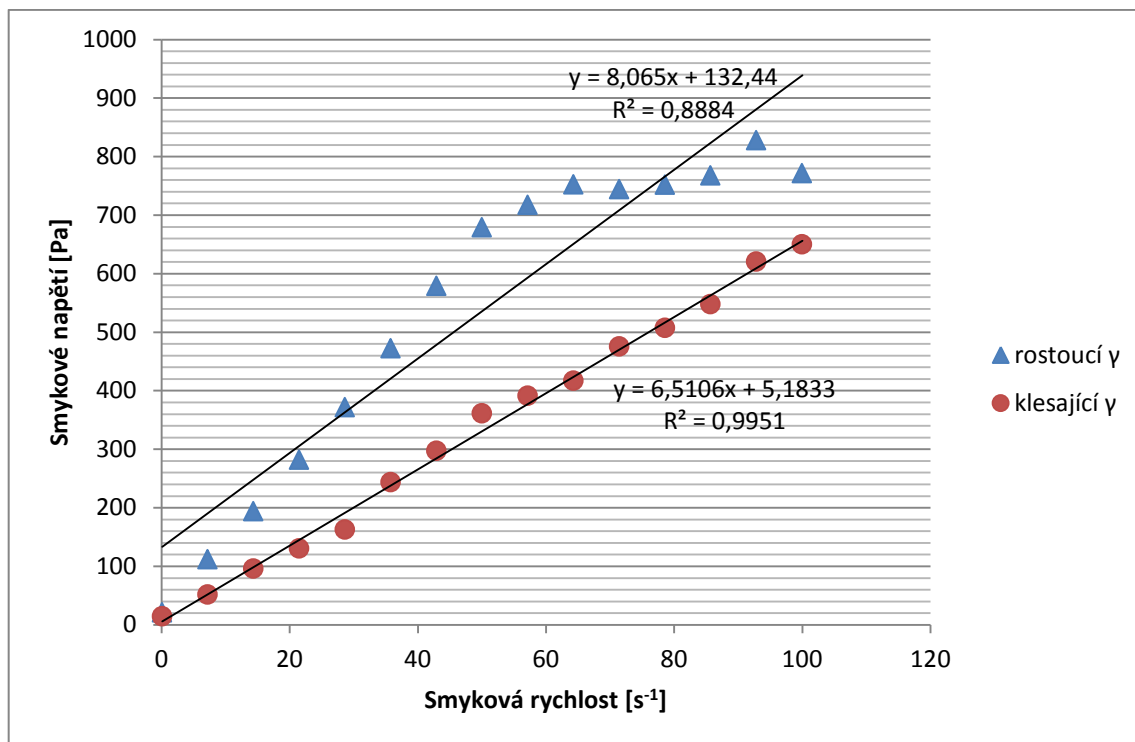
Graf-P 8 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u směsného cementu s popílkem, $v/c = 0,5$



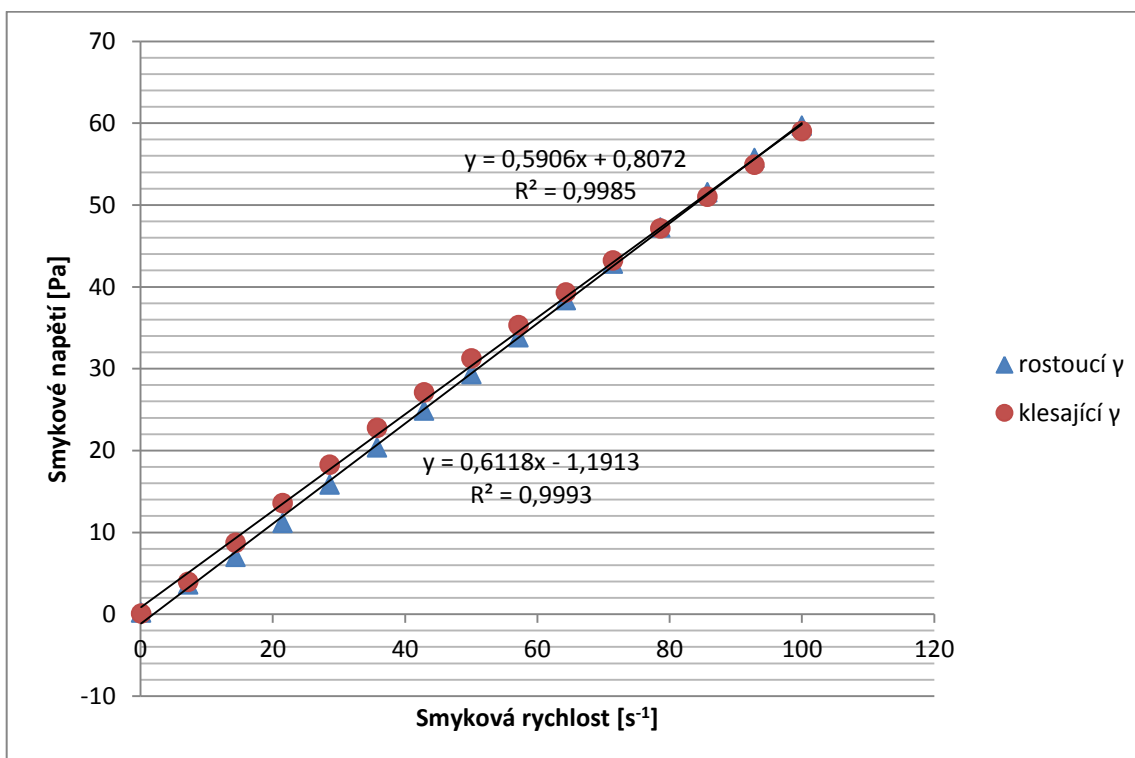
Graf-P 9 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u směsného cementu s vápencem, $v/c = 0,5$



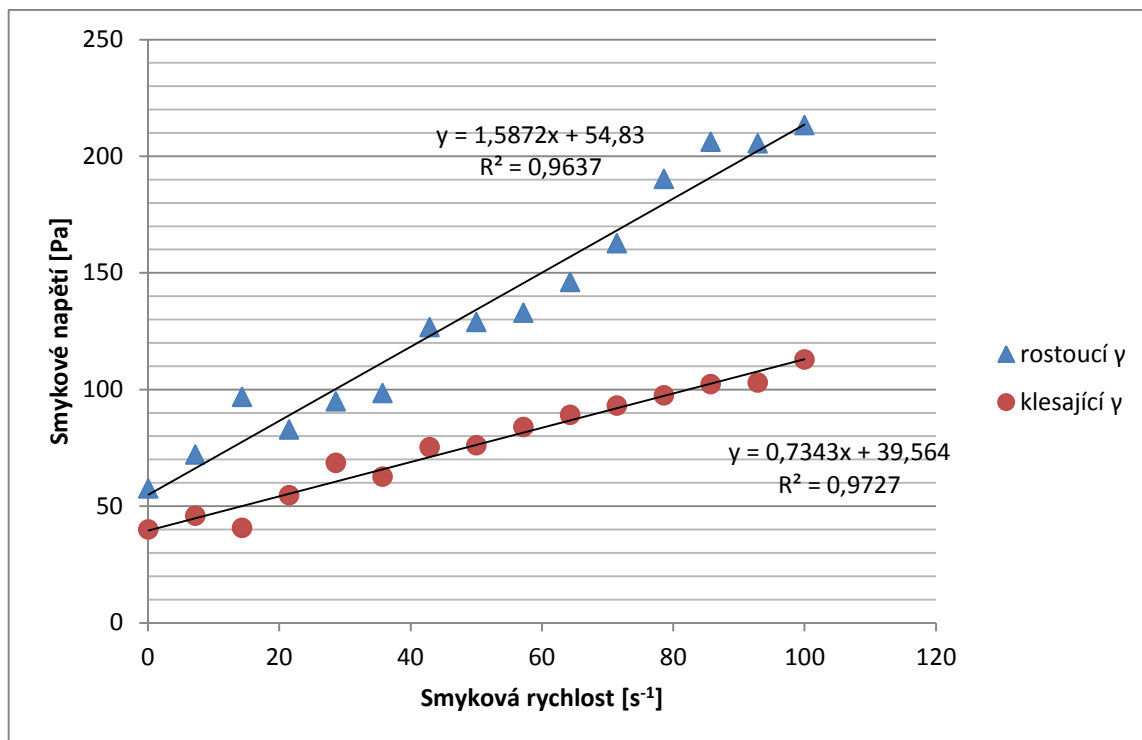
Graf-P 10 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u geopolymery, 8 ml H_2O



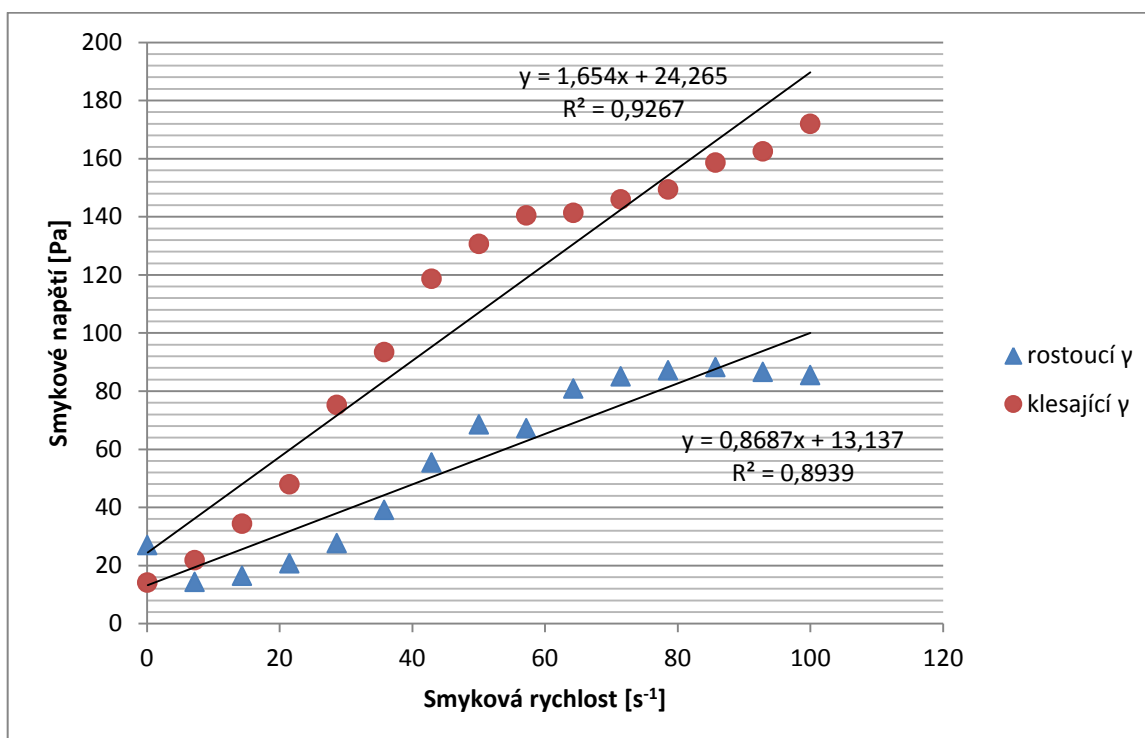
Graf-P 11 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u geopolymery, 4 ml H_2O



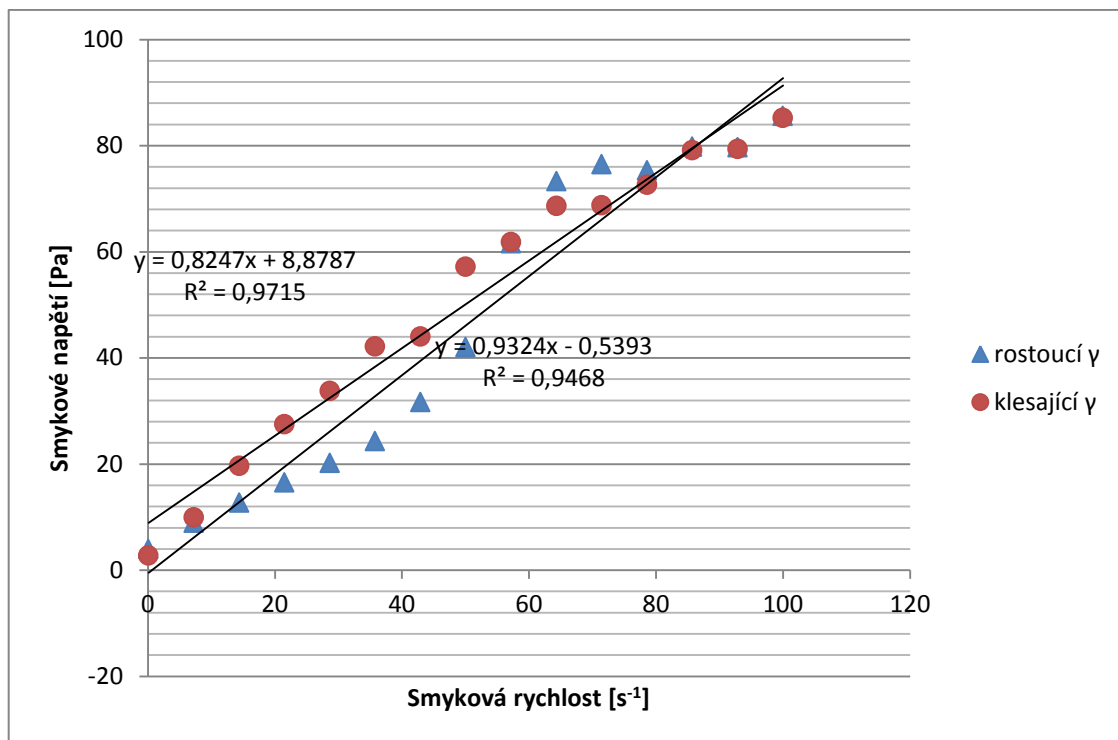
Graf-P 12 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u alkalicky aktivované strusky



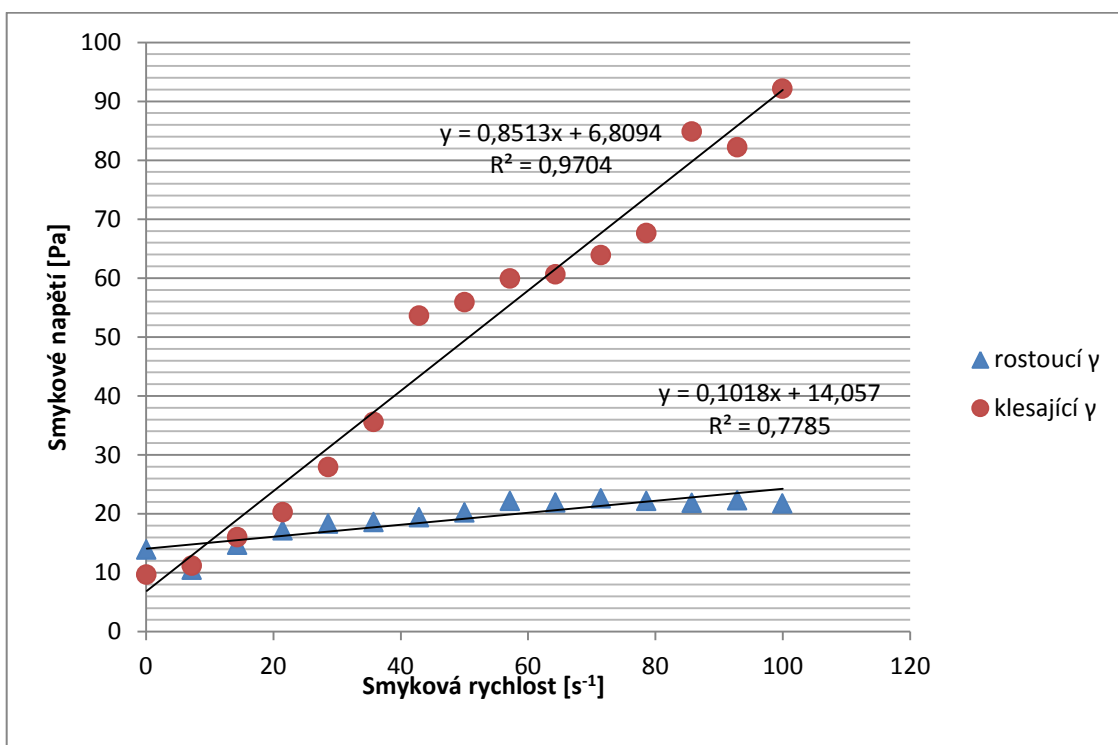
Graf-P 13 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u dolomitického vápna,
 $v/c = 1,1$



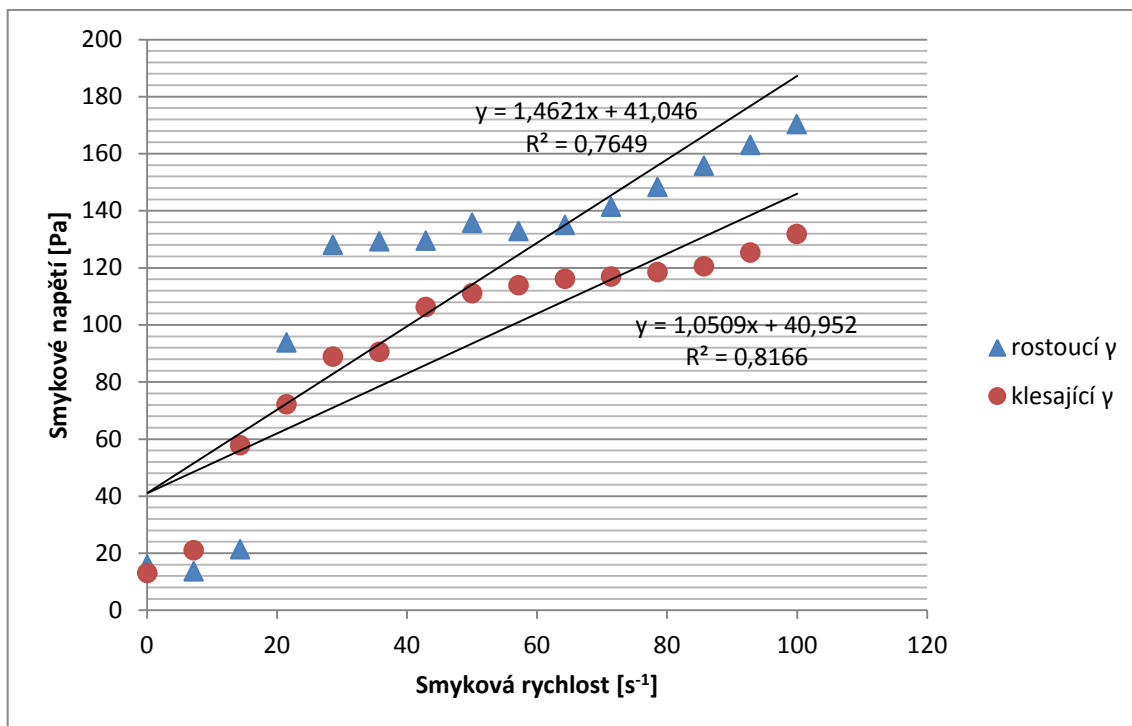
Graf-P 14 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u vápenného hydrátu,
 $v/c = 1,1$



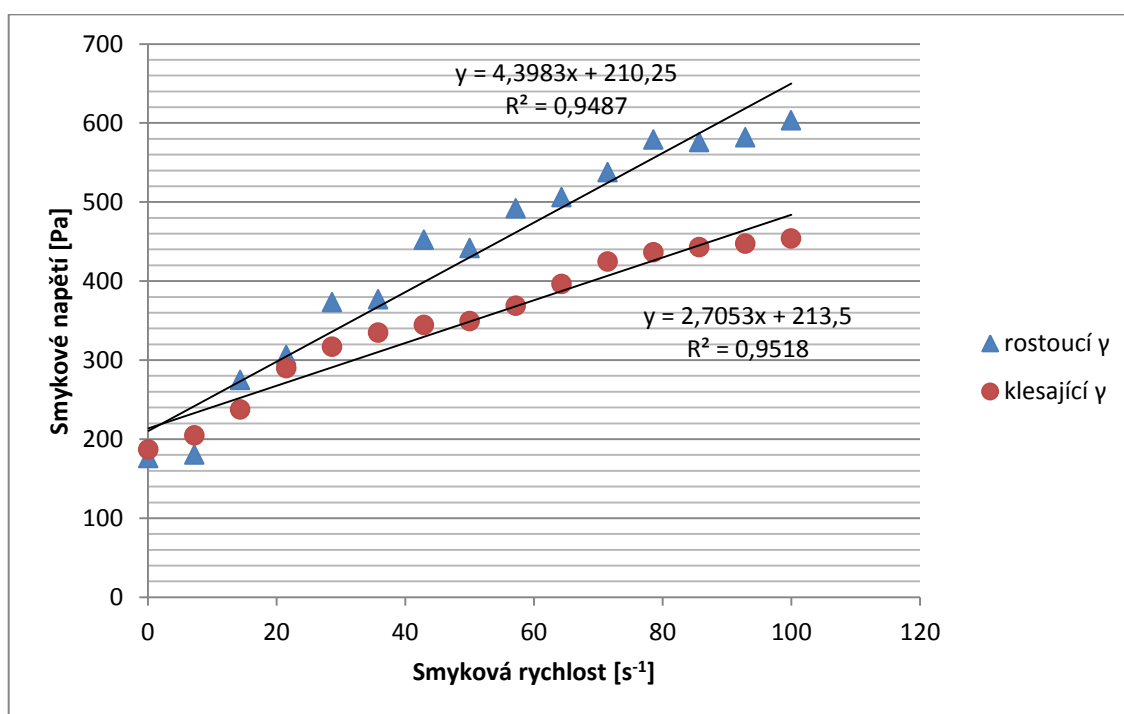
Graf-P 15 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u hydraulického vápna, $v/c = 0,7$



Graf-P 16 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u trasového vápna, $v/c = 0,6$



Graf-P 17 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u hašeného vápna (0,09 mm)



Graf-P 18 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti u hašeného vápna (kusové)