

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**  
**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**Katedra technologie staveb**



**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Využití alkalicky aktivovaných materiálů  
ve vibrolisovaných prvcích**

**Application of alkali activated materials  
in vibro-compressed elements**

**Ing. Tomáš Váchal, Arquitecto Técnico**

**2018**

**Školitel: doc. Ing. Pavel Svoboda, CSc.**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předkládanou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Svobody, CSc. a pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů:

GAČR 104/12/0102 „Alumosilikátové polymerní pěny“

SGS10/232/OHK1/3T/11 „Experimentální analýza kompozitů obsahujících materiály šetrné k životnímu prostředí“

SGS13/164/OHK1/3T/11 „Kompozitní materiály na bázi ternárních pojiv“

SGS16/198/OHK1/3T/11 „Ternární pojiva na bázi fluidních úletových popílků“

CZ.1.07/2.3.00/30.0034 „Podpora zkvalitnění týmů výzkumu a vývoje a rozvoj intersektorální mobility na ČVUT v Praze“

V Praze dne.....

.....  
Ing. Tomáš Váchal, Arquitecto Técnico

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu disertační práce panu doc. ing. Pavlu Svobodovi, CSc. za konstruktivní kritiku, rady a připomínky, kterými mě při zpracování práce vedl.

Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D. za uvedení do problematiky alkalicky aktivovaných materiálů a za neocenitelné rady z oblasti praktického využití betonů a betonových materiálů, Bc. Lence Myškové za vždy perfektně připravené pracovní podmínky v laboratoři, a též všem svým kolegům, se kterými jsem měl tu čest, pracovat v týmu POPbeton. Děkuji za spolupráci společnosti BASF Stavební hmoty Česká republika s.r.o., Zkušební laboratoř betonu Praha při provedených zkouškách.

Ze všeho nejvíce musím poděkovat své manželce, rodině a přátelům, kteří mě celou dobu studií a výzkumu napomáhali shovívavostí a materiální i psychickou podporou.

## Anotace

### Využití alkalicky aktivovaných materiálů ve vibrolisovaných prvcích

Celosvětová koncepce využitelnosti druhotných surovin je tématem dnešní doby. Pouze menší část stavební produkce je realizována s použitím druhotných surovin. Z tohoto důvodu je stavebnictví důležitým průmyslovým oborem s potenciálem pro navýšení a rozšíření využití těchto „odpadů“, neboť v každé době zůstává aktivní částí českého průmyslu a má velkou kapacitu pro spotřebování nepotřebné zpracovatelné suroviny. S ohledem na současnou energetickou koncepci České republiky a mnoha jiných států má získávání energie ze spalování uhlí významnou roli. Nejvýznamnějším zdrojem pro získávání elektrické energie a pro zajištění dálkového vytápění pro Českou republiku je uhlí. Ačkoliv lze předpokládat, že v následujících letech se bude nadále snižovat podíl energie získané ze spalování uhlí, je samozřejmé, že uhlí si zachová pozici jednoho z nejvýznamnějších zdrojů energetické koncepce České republiky. S ohledem na to bude elektrárenský popílek, který je odpadem ze spalování, nadále produkován jako druhotná surovina. Aktuální možnosti využití této suroviny jsou pouze omezené, a proto v současnosti nelze zcela zpracovat veškeré množství elektrárenského popílku vyprodukovaného v České republice. Různý typ spalování a různá technologie spalování zapříčiňují generování různých typů popílků, jež mají velice proměnlivé vlastnosti, které jsou ovlivněny konkrétní použitou technologií spalování uhlí a také typem spalovaného uhlí. V České republice převažuje charakteristickou měrou hnědé uhlí. S ohledem na typ spalování převládá úletový popílek. Mezi největší výhody úletového popílku patří relativní chemická stálost a jeho fyzikální parametry, které je možné poměrně dobře specifikovat.

Metody zpracování úletového popílku jsou v dnešní době známou věcí a jsou harmonizovány řadou norem a technologických postupů pro jeho využití. Ve stavebnictví je úletový popílek nejčastěji a nejvýznamněji využíván jako příměs do betonu nebo asfaltových výrobků a také jako zásyp v podkladních vrstvách pro další konstrukce. Ani toto využití nemůže zajistit spotřebování veškeré produkce, která se v České republice blíží 10 miliónům tun za rok. Z tohoto hlediska je nutné najít další uplatnění úletového popílku. Možným východiskem pro využití této suroviny je alkalická aktivace tohoto materiálu. Aktivovaný úletový popílek je možné využít jako samostatné pojivo v betonové směsi, ve které zcela nahrazuje cementové pojivo, zatímco výsledné vlastnosti takového betonu jsou v mnoha pohledech příznivější než u cementového betonu. Oproti tomu jiné vlastnosti jsou horší, mezi ně patří hlavně technologie výroby této betonové směsi, která je neporovnatelně náročnější z hlediska technologické kázně a vlivu vnějších faktorů.

Betonové vibrolisované výrobky se v ČR začaly ve větším množství (objem i sortiment) objevovat na trhu až po roce 1990 z důvodu možnosti dovozu zahraničních technologických linek a zlepšení zpracování betonové směsi tzv. vibrolisováním. Výrobky jsou okamžitě po vyrobení odformovány a ponechány na podložkách nebo dokonce přímo ukládány na palety. V těchto výrobcích je část pojiva, cementu, nahrazena černouhelným popílkem. Zkoumání možností částečné či plné náhrady tohoto pojiva alkalicky aktivovaným hnědouhelným popílkem je zajímavým a atraktivním úkolem, který zvýší využití této druhotné suroviny a zmenší dopad na životní prostředí.

Cílem práce bylo prověřit možnost využití alkalicky aktivovaných materiálů ve vibrolisovaných prvcích a následně navrhnout vhodnou směs a využít ji v betonu tak, aby se svými vlastnostmi přiblížila cementové směsi. Ke splnění těchto cílů bylo třeba pro navržený materiál POPbeton na bázi alkalicky aktivovaného úletového popílku zanalyzovat vlastnosti po mechanické a reologické stránce, provést referenční směs a navrhnout novou směs pro použití ve vibrolisovaných prvcích. Rešerše způsobů výroby a vlastností stávajících vibrolisovaných prvků, výsledky, provedená zjištění, měření a detailní zhodnocení mechanických a reologických vlastností navržených směsí jsou náplní této práce. Tato práce dává odpovědi na reálné možnosti a hranice využití alkalicky aktivovaných popílků, zejména hnědouhelných popílků produkovaných v České republice pro použití ve vibrolisovaných prvcích.

**Klíčová slova:** *geopolymer, alkalicky aktivované materiály, vibrolis, zpracovatelnost, pevnost, reologie*

## **Abstract**

### Application of alkali activated materials in vibro-compressed elements

The global concept of usability of secondary raw materials is current theme. Only smaller part of construction industry production is realized by use of secondary materials, in this field the construction industry is important branch of industry for increase and spread of use of these “wastes“ because in every time part of Czech industry remains active and has wide capacity for use of redundant processable material. With regard to the current energy conception of Czech Republic and many other states recovery of energy from coal combustion has significant role. The most significant source for electric energy and for district heating in Czech Republic is coal. Although it can be assumed that the share of energy from coal combustion will continue to decrease in the following years, it is obvious that coal will retain position of one of the most important sources of energy conception in the Czech Republic. Taking this into account the power station ash, waste from combustion, will be still produced as secondary material. Current possibilities of use of this material are limited and unable to fully process all production. Different type of combustion – different combustion technology cause generation of different types of ashes, which have very variable qualities, which are influenced by specifics of used coal combustion technology and also by qualities of type of combusted coal. In Czech Republic, brown coal dominates to a characteristic degree. With regard to type of combustion the fly ash dominates. Among the greatest advantages of fly ash are relative chemical stability and its physical parameters, which can be fairly well specified.

Methods of fly ash processing are in this time known and harmonized by many standards and technological processes for its use. In construction industry, the fly ash is most often and most significantly used as admixture for concrete or asphalt products as well as used as backfill in underlying layers for other constructions. Even this use can't ensure use of all production, which in Czech Republic is approaching 10 million tons per year. From this point of view, it is necessary to find other use of fly ash. Possible way out for use of this material is alkali activation of this material. Activated fly ash can be used as separate binder in the concrete mixture in which it completely replaces the cement binder, while the resulting properties of such concrete are in many ways more favourable than those of cement concrete. On the other hand, other properties are worse including technology of producing of these concrete mixtures, which is incomparably more demanding in terms of technological discipline and the influence of external factors.

Concrete vibro-compressed products have begun to occur on the market in Czech Republic in bigger volume (volume and assortment) after 1990 due to the

possibility of foreign technology lines import and improvement of processing of concrete mixture by vibro-compression. Products are unformed and left on pads immediately after production or directly stored in pallets. In this products part of the binder, cement, is replaced by black coal ash. Possibility of partial or full replacement of this binder by alkali-activated brown coal ash is interesting and attractive task, which will increase use of this secondary material and will reduce its impact on the environment.

Goal of this thesis was to investigate possibility of use of alkali-activated materials in vibro-compressed elements and then to design proper mixture and use it in concrete in a way that it will be close in its qualities to the cement mixture. To fulfil these goals it was necessary to analyse qualities of proposed POPbeton material from mechanical and rheological site, process referential mixture and design new mixture for use in vibro-compressed elements. The research of the production and properties of the existing vibro-compressed elements, results, findings, measurements and detailed evaluation of the mechanical and rheological properties of the proposed mixtures are the content of this thesis. This thesis gives answers for real possibilities and limits of the use of alkali-activated ash, especially brown coal fly ash produced in the Czech Republic in vibro-compressed elements.

**Keywords:** *geopolymer, alkali-activated materials, vibro-compress, workability, mechanical characteristics, rheology*

# Obsah

ÚVOD.....	7
Cíle práce.....	10
Přínos disertační práce.....	11
<b>1. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Alkalicky aktivované materiály a betony - současný stav dané problematiky .....</b>	<b>13</b>
1.1.1 Začátky alkalické aktivace.....	13
1.1.2 Geopolymerace.....	13
1.1.3 Novodobý výzkum alkalické aktivace v zahraničí.....	13
1.1.4 Výzkum v České republice a POPbeton .....	14
<b>1.2 Reologie.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Působení vlivu teploty na alkalicky aktivované betony na bázi popílků .....</b>	<b>15</b>
<b>1.4 Odolnost proti působení povětrnostních vlivů a odolnost proti namáhání nesilovými účinky .....</b>	<b>17</b>
1.4.1 Princip fungování provzdušněných betonů .....	17
1.4.2 Podobné výzkumy a jejich výsledky.....	17
1.4.3 CHRL.....	17
<b>1.5 Zhutňování betonových směsí.....</b>	<b>18</b>
1.5.1 Parametry procesu zhutňování.....	18
1.5.2 Praktické způsoby zhutňování betonové směsi.....	20
<b>1.6 Vibrolisované prvky a jejich výroba.....</b>	<b>24</b>
1.6.1 Historie vibrolisované dlažby ve světě .....	24
1.6.2 Historie vibrolisované dlažby v ČR .....	25
1.6.3 Současný stav .....	25
1.6.4 Srovnání typů vibrolisů z hlediska typu budičů.....	26
1.6.5 Popis vibrolisu.....	27
1.6.6 Funkce vibrolisu .....	29
1.6.7 Význam rázů.....	30
1.6.8 Buzení .....	31
1.6.9 Výroba betonového zboží (dlažby) na karuselových lisech a stacionárních vibrolisech.....	33
<b>1.7 Vibrolisované výrobky a požadavky na ně.....</b>	<b>40</b>
1.7.1 Betonové dlažební desky .....	40
1.7.2 Betonové obrubníky .....	40
1.7.3 Prvky opěrných stěn.....	40
1.7.4 Betonové tvárnice .....	41
1.7.5 Bednicí tvárnice .....	41
1.7.6 Dílce pro studny .....	41
1.7.7 Prvky pro ploty .....	42
<b>1.8 Shrnutí charakteristiky vibrolisovaných prvků a problém realizace vibrolisovaných prvků.....</b>	<b>42</b>
1.8.1 Neoficiální informace z výroby vibrolisovaných výrobků.....	42
1.8.2 Zásada pro experimentální část práce.....	43
<b>2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>45</b>
<b>2.1 Provedené experimenty a stav řešeného úkolu.....</b>	<b>45</b>
<b>2.2 Použité metody aktivace popílku a přípravy vzorků.....</b>	<b>45</b>
<b>2.3 Popis vstupních materiálů pro výrobu zkušebních vzorků.....</b>	<b>46</b>
2.3.1 Popílek .....	46
2.3.2 Alkalický aktivátor – vodní sklo.....	47
2.3.3 Hydroxid sodný .....	47
2.3.4 Plnivo.....	48
2.3.5 Přísady a příměsi .....	48



2.3.6	Měření objemové hmotnosti kameniva .....	50
<b>2.4</b>	<b>Provedená měření a experimenty na nevíbrolisovaných směsích</b>	<b>50</b>
2.4.1	Výroba vzorků nevíbrolisovaných prvků .....	50
2.4.2	Měření pevnosti betonové směsi .....	51
2.4.3	Měření změn hmotnosti .....	52
2.4.4	Vliv teploty na průběh alkalické aktivace .....	52
2.4.5	Vliv doby temperování na průběh alkalické aktivace .....	52
2.4.6	Zpracovatelnost čerstvého POPbetonu .....	53
2.4.7	Měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu .....	54
2.4.8	Měření pevností v závislosti na množství reologické vody .....	54
2.4.9	Měření pevností v závislosti na množství provzdušňovací přísady ..	55
2.4.10	Objemová hmotnost v závislosti na množství provzdušňovací přísady	55
2.4.11	CHRL a spacing factor v POPbetonu .....	56
2.4.12	Vyhodnocení měření (provzdušňovací přísada) .....	58
<b>2.5</b>	<b>Referenční směs pro víbrolisovaný prvek - provedená měření a experimenty</b> .....	<b>59</b>
2.5.1	Výchozí receptura víbrolisovaného prvku pro návrh alkalicky aktivovaného materiálu .....	59
2.5.2	Výroba vzorků referenční směsi pro víbrolisované prvky .....	60
2.5.3	Měření pevnosti referenční betonové směsi .....	60
2.5.4	Zpracovatelnost čerstvé referenční směsi .....	61
2.5.5	Měření obsahu vzduchu v čerstvé referenční směsi .....	61
2.5.6	Měření pevností referenční směsi v závislosti na množství reologické vody	61
2.5.7	Objemová hmotnost referenční směsi v závislosti na množství provzdušňovací přísady .....	62
2.5.8	Vyhodnocení měření (referenční směs) .....	62
<b>2.6</b>	<b>Navržená směs pro víbrolisovaný prvek - provedená měření a experimenty</b> .....	<b>62</b>
2.6.1	Navržená receptura alkalicky aktivovaného materiálu .....	62
2.6.2	Výroba vzorků směsi pro víbrolisované prvky .....	63
2.6.3	Měření pevnosti směsi pro víbrolisované prvky .....	64
2.6.4	Zpracovatelnost čerstvé směsi pro víbrolisované prvky .....	64
2.6.5	Měření obsahu vzduchu v čerstvé směsi pro víbrolisované prvky ..	65
2.6.6	Měření pevností směsi pro víbrolisované prvky v závislosti na množství reologické vody .....	65
2.6.7	Měření pevností směsi pro víbrolisované prvky v závislosti na množství provzdušňovací přísady .....	65
2.6.8	Vyhodnocení měření (směsi pro víbrolisované prvky) .....	66
<b>2.7</b>	<b>Laboratorní podmínky - výroba směsí, vybavení a měření</b> .....	<b>66</b>
<b>3</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....	<b>72</b>
<b>3.1</b>	<b>Provedená měření a experimenty na nevíbrolisovaných směsích</b>	<b>73</b>
3.1.1	Měření pevnosti betonové směsi .....	73
3.1.2	Měření změn hmotnosti .....	74
3.1.3	Vliv teploty na průběh alkalické aktivace .....	75
3.1.4	Vliv doby temperování na průběh alkalické aktivace .....	76
3.1.5	Zpracovatelnost čerstvého POPbetonu .....	77
3.1.6	Měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu .....	79
3.1.7	Měření pevností v závislosti na množství reologické vody .....	79
3.1.8	Měření pevností v závislosti na množství provzdušňovací přísady ..	80
3.1.9	Objemová hmotnost v závislosti na množství provzdušňovací přísady 83	83
3.1.10	CHRL a spacing factor v POPbetonu .....	84
3.1.11	Vyhodnocení měření (provzdušňovací přísada) .....	86

<b>3.2</b>	<b>Provedená měření a experimenty referenční směs pro vibrolisovaný prvek.....</b>	<b>87</b>
3.2.1	Měření pevnosti referenční betonové směsi .....	87
3.2.2	Zpracovatelnost čerstvé referenční směsi.....	88
3.2.3	Měření obsahu vzduchu v čerstvé referenční směsi.....	90
3.2.4	Měření pevností referenční směsi v závislosti na množství reologické vody	90
3.2.5	Objemová hmotnost referenční směsi v závislosti na množství provzdušňovací přísady .....	91
3.2.6	Vyhodnocení měření (referenční směs).....	91
<b>3.3</b>	<b>Provedená měření a experimenty na vibrolisovaných směsích</b>	<b>92</b>
3.3.1	Měření pevnosti směsi pro vibrolisované prvky .....	92
3.3.2	Zpracovatelnost čerstvé směsi pro vibrolisované prvky.....	93
3.3.3	Měření obsahu vzduchu v čerstvé směsi pro vibrolisované prvky....	95
3.3.4	Měření pevností směsi pro vibrolisované prvky v závislosti na množství reologické vody.....	95
3.3.5	Měření pevností směsi pro vibrolisované prvky v závislosti na množství provzdušňovací přísady .....	96
3.3.6	Vyhodnocení měření (směsi pro vibrolisované prvky) .....	98
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>101</b>
	<b>ZDROJE A POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>105</b>
	<b>OSTATNÍ ZDROJE .....</b>	<b>113</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>114</b>
	<b>Obrázky .....</b>	<b>114</b>
	<b>Grafy.....</b>	<b>115</b>
	<b>Tabulky.....</b>	<b>116</b>

## Úvod

Tématem této disertační práce je využití alkalicky aktivovaných materiálů ve vibrolisovaných prvcích. Byl zahájen průzkum poznání o této problematice, který tvořil podklad pro rozvoj disertační práce a obsahoval: rešerši a analýzu současného stavu poznání pro výzkum nových stavebních materiálů na bázi alkalicky aktivovaných úletových popílků. V tomto studiu se autor zabývá výzkumem a rozvojem programu POPbeton. POPbeton (pozn.: popílkový beton) je uměle vytvořený název pro nový betonový produkt, ve kterém bylo cementové pojivo úplně nahrazeno pojivem z alkalicky aktivovaného úletového popílku. Následně zkoumá stávající stav poznání o vibrolisovaných prvcích, jejich vlastnostech, použití, požadavcích na výrobky a metody výroby.

Úkolem této práce je odpovědět na otázku, jak lze využít alkalicky aktivované materiály ve vibrolisovaných prvcích. Pro výzkum této otázky bude využit stávající vyvinutý materiál POPbeton, který má některé vlastnosti podobné nebo stejné jako cementový beton a naopak v některých vlastnostech se od cementového betonu výrazně liší.

V rámci řešení dlouhodobého výzkumu, který probíhá na VŠCHT v Praze a ČVUT v Praze, Fakultě stavební, byl prokázán pozitivní či negativní vliv přísad a příměsí na průběh aktivace úletového popílku v rámci projektů: GAČR 104/12/0102 „Alumosilikátové polymerní pěny“, GAČR 103/08/1639 „Mikrostruktura anorganických alumosilikátových polymerů“, GAČR 103/05/2314 „Mechanické a inženýrské vlastnosti geopolymerních materiálů na bázi alkalicky aktivovaných popílků“, IGS CTU0900311 „Vliv přísad a příměsí na hodnoty fyzikálně mechanických a chemických vlastností POPbetonu“, SGS10/232/OHK1/3T/11 „Experimentální analýza kompozitů obsahujících materiály šetrné k životnímu prostředí“.

Úletový popílek je v České republice produkován uhelnými elektrárnami a též teplárnami. V dnešní době je jako odpad po spalování uhlí produkována pouze struska a různé druhy popílků. Úletový popílek, s ohledem na technologie spalování používané v ČR, tvoří největší část odpadu po spalování uhlí. Jedná se o popílek, který je zachycován na odlučovačích po vyhoření jemně mletého uhlí. Dříve byl tento popílek unášen s ostatními spaliny do ovzduší a odtud plyne jeho název úletový popílek (též anglicky fly ash). Roční produkce tohoto typu popílku se blíží 10 miliónům tun.

Pro možnost druhotného využití odpadů ze spalování uhlí, existuje řada předpisů a norem, jedná se hlavně o řadu ČSN 72 2071 [1] nebo ČSN 72 2080 [2], i přesto většina popílků ukončí svůj životní cyklus uložením jako odpad a není již dále druhotně využita. Hlavní příčinou jsou proměnlivé vlastnosti odpadních popílků a strusky, které jsou způsobeny např. technologií spalování, způsobem

odsíření a též významně ovlivněny typem uhlí, které je determinováno svou lokalitou těžby. V podmínkách České republiky jsou rozlišovány hlavně popílký hnědouhelné a černouhelné. Ve světě lze nalézt také významné technologie pro spalování lignitu. Výrazně největší část produkce úletového popílku v České republice tvoří hnědouhelný úletový popílek. Černouhelný úletový popílek je dnes ve stavebnictví bezvýhradně využíván jako inertní příměs do cementových betonů nebo jiných cementových produktů, kde díky tomu způsobuje při zpracování tohoto typu betonů nemalou úsporu cementu. Hlavní výhodou černouhelných úletových popílků je jejich nižší rozdílnost v chemickém složení a zároveň větší reaktivnost. Zpracování černouhelných úletových popílků jako druhotné suroviny je snazší a v České republice jsou většinou bezzbytkově zpracovány. Hnědouhelný úletový popílek, který pochází z různých lokalit České republiky, vykazuje větší proměnlivost, hlavní rozdíly pak lze nalézt v chemickém složení a ve velikosti částic úletového popílku. Samozřejmě i hnědouhelný úletový popílek je využíván jako inertní příměs do cementového betonu a jiných výrobků na bázi cementu, ale také pro stabilizaci podloží, jako příměsi do cihlářských výrobků, k výrobě pórobetonu, dále umělého kameniva a v neposlední řadě do asfaltových výrobků. I přes toto druhotné využívání je jeho větší část skládkována nebo je využit pro zpětné zasypávání dolů a není dále jinak použit. Z těchto důvodů je hlavní pozornost v této práci soustředěna na hnědouhelné úletové popílků a další možné využití produktů z nich.

Hlavním účelem výše zmíněných výzkumných projektů bylo využití úletových popílků jako druhotných surovin. Jako příhodný způsob pro využití těchto popílků se nabízí alkalická aktivace. Touto metodou se úletový popílek přetvoří na aktivní pojivo či samostatnou kompaktní hmotu, která má široké spektrum použití např. ve stavebnictví a ve výrobě nových materiálů. Tímto způsobem zpracovaný popílek může nahradit některé výrobně energeticky náročné produkty např. cement, asfalt a apod. Velmi pozitivní vliv má druhotné využití tohoto odpadu také na životní prostředí, neboť tento odpadní produkt je dále zpracováván bez přidané zátěže pro životní prostředí a nadto za určitých podmínek může zčásti zaměnit produkci stávajících energeticky náročných surovin. Za určitých podmínek by bylo možné nové materiály na bázi alkalicky aktivovaných popílků využít v oblastech se speciálními nároky na odolnost proti vlivu prostředí viz Minaříková [3], vysokých teplot viz Minaříková a Škvára a kol. [3;4] nebo fixaci těžkých kovů viz Škvára a kol. [4,5].

Základem této práce byly poznatky, které vznikly na Ústavu skla a keramiky VŠCHT v Praze a Fakultě stavební ČVUT v Praze. Historie byla popsána Ing. Šulcem [6]. Od roku 1992 probíhaly zkoušky alkalicky aktivované strusky a od roku 1997 zkoušky alkalicky aktivovaných popílků. Principem alkalické aktivace je reakce aktivátorů (v tomto případě Na nebo K silikát + NaOH či KOH), které jsou ve formě roztoku přidány k vlastní matici hmoty, což je v tomto kontextu úletový

popílek. Takto aktivovaný popílek vytvoří kašovitou lepidlou hmotu, která vytváří pojivo. Popílek byl aktivován za teplot v rozmezí 0 - 80°C po různě dlouhou dobu. Teplota, při které k aktivaci dochází, je rozhodující pro celkovou dobu zrání a tvrdnutí této hmoty. Zvýšení teploty v průběhu zrání této hmoty přináší nejen urychlení aktivace popílku, ale v konečném důsledku i o něco lepší vlastnosti výsledné hmoty. Zvyšuje se tak ale energetická náročnost na výrobu a též se částečně snižuje efekt použití energeticky nenáročných odpadních surovin. Proto byla hlavní pozornost soustředěna na aktivaci za teplot 20 - 25°C. Pokud je k tomuto pojivu ve fázi míchání přidáno plnivo, vzniká materiál, který dostal označení POPbeton.

V této práci byly popisovány materiály a výrobky, které vycházejí z úletového popílku. Použitý princip aktivace popílku byl podobný tomu, který popsal Gluchovskij [8] a Davidovits [9], ale s rozdílnou aktivovanou látkou, kterou nebyla struska ani kaolín a metakaolín, ale úletový popílek. Úletový popílek svým chemickým složením koresponduje s výše zmíněnými materiály, výrazně se však liší svými fyzikálními vlastnostmi způsobenými hlavně vysokou teplotou, kterou při spalování prochází uhlí. Významným pozitivním faktorem popílku je sklovitá část povrchu, která je významně odolná proti chemickým i mechanickým vlivům.

Základní materiál používaný ve výzkumu byl materiál POPbeton, který byl detailně popsán a vyvíjen Šulcem [6] a byly popsány rozdíly s cementovým betonem viz dále. POPbeton je kompozitní materiál svoji podstatou připomínající cementový beton. Tento materiál je cementovému betonu podobný hlavně přípravou, zpracovatelností, využitím a některými vlastnostmi konečného materiálu. Nejdůležitějším rozdílem je použité pojivo, ve kterém je cement zcela nahrazen aktivovaným úletovým popílkem. Rozdílný je i proces tvorby struktury hmoty. U cementu je pro konečné vlastnosti hmoty určující hydratační proces. U alkalicky aktivovaného popílku je nejdůležitějším faktorem koncentrace aktivačního roztoku a poměr mezi jednotlivými aktivátory. Nároky na přípravu jsou v tomto ohledu významnější než je tomu u cementu, neboť se jedná o vícesložkový aktivátor, který musí být v dostatečné koncentraci, aby zajišťoval jednak průběh samotné aktivace a dále též dostatečnou zpracovatelnost hmoty. Voda byla v této kompozici pouze ve funkci transportního média, které zajišťovalo pravidelné rozmístění aktivátorů na povrchu jednotlivých zrn úletového popílku, při podmínce co nejvyšší koncentrace aktivačního roztoku. Další neméně důležitá funkce vody v kompozici byla zajištění dostatečné zpracovatelnosti POPbetonu. Tyto dvě skutečnosti, jdoucí proti sobě, tak vytvářely zdánlivou analogii s cementovým betonem. Zjištěné skutečnosti o průběhu a tvorbě POPbetonu byly použity jako základ této disertační práce.

Dnešní doba klade důraz na využitelnost druhotných surovin zejména ve stavebnictví. S ohledem na provedený výzkum a zjištěné vlastnosti POPbetonu byla navržena úvaha o použití tohoto materiálu ve výrobcích používaných ve

stavebnictví, které neplní nosné funkce. Vlastnosti tohoto produktu by mohly předurčit POPbeton pro využití v materiálech, kde lze jako výhody využít jeho výhodné vlastnosti odolnosti vůči vnějším vlivům.

Betonové vibrolisované výrobky se na území ČR začaly rozšiřovat a ve větším množství objevovat na trhu až po roce 1990 z důvodu možnosti dovozu zahraničních technologických linek a následného zlepšení zpracování betonové směsi tzv. vibrolisováním. V těchto výrobcích je část pojiva, hlavně cementu, nahrazena černouhelným popílkem. Zkoumání možností částečné či plné náhrady tohoto pojiva alkalicky aktivovaným hnědouhelným popílkem je zajímavým a atraktivním úkolem, který zvýší využití této druhotné suroviny a zmenší dopad na životní prostředí.

Obsahem této disertační práce je zanalyzování vybraných vlastností materiálu POPbeton s ohledem na jeho využitelnost ve vibrolisovaných prvcích.

### ***Cíle práce***

Po analýze současného stavu poznání v oblasti alkalicky aktivovaných materiálů konkrétně betonů na bázi úletových popílků byly stanoveny a shrnuty cíle disertační práce v následujících bodech. Tato disertační práce se nebude zabývat modelováním vibračních desek, forem ani samotného vibrolisu, ale návrhem, přípravou a ověřením určitých vybraných vlastností alkalicky aktivovaných materiálů. Pro tento návrh byla provedena rešerše existujících používaných vibrolisovaných prvků, jejich vlastností, metod výroby a zkušebních metod pro tyto prvky, pro ověření byla upravena převzatá receptura používaná při výrobě v praxi. Z důvodu utajení není v této práci název společnosti uveden.

Cíle disertační práce jsou rozvrženy do **dvou částí**. **První část** řeší stanovení vlastností alkalicky aktivované betonové směsi na bázi aktivovaného popílku. Cílem bylo zjistit limity samotné aktivované hmoty popílku, mechanické vlastnosti, včetně vlivu teploty, doby temperování na mechanické vlastnosti betonu, reologické vlastnosti směsi a odolnost směsi proti CHRL. **Druhá část** řeší návrh směsi pro vibrolisované prvky z tohoto materiálu s limitací na technické možnosti laboratoře, vycházející z převzaté receptury vibrolisovaného betonového prvku. Cílem bylo zajistit takové vlastnosti, které umožňují především případné uplatnění této hmoty v praxi a její uzpůsobení požadavkům stavebních procesů. Jde zejména o mechanické vlastnosti a reologické vlastnosti směsi.

Dílčí cíle první části jsou shrnuty v následujících bodech:

- Rešerše stávajícího stavu poznání jako podkladu pro následující postup ve výzkumu
- Přehled současné problematiky zejména českých alkalicky aktivovaných popílků

- Provedení vstupních experimentů na alkalicky aktivované směsi POPbeton pro stanovení:
  - pevnosti betonové směsi v tlaku
  - vlivu teploty na průběh alkalické reakce
  - vlivu doby temperování na průběh alkalické reakce a náběhy pevnosti v tlaku
  - vlivu na reologické vlastnosti (vodní součinitel, zkouška sednutí kužele a rozlítí)
  - obsahu vzduchu v čerstvém betonu
  - odolnosti proti CHRL

Dílčí cíle druhé části jsou shrnuty v těchto bodech:

- Zahájení vývoje betonů s alkalicky aktivovaným popílkem jako betonu pro vibrolisované prvky a návrh směsi pro vybraný vibrolisovaný prvek
- Provedení vstupních experimentů alkalicky aktivované směsi pro vibrolisované směsi pro stanovení:
  - pevnosti v tlaku vibrolisované směsi
  - vlivu na reologické vlastnosti (vodní součinitel, zkouška sednutí kužele a rozlítí)
  - pevnosti v tlaku v závislosti na množství reologické vody
  - pevnosti v tlaku v závislosti na množství provzdušňovací přísady
  - obsahu vzduchu v čerstvé směsi a provzdušnění

### ***Přínos disertační práce***

Hlavním přínosem disertační práce je pokračování vývoje bezcementového betonu, který spočíval v rozsahu provedených měření a zkoušek, ze kterých bylo možné popsat vývoj a průběh aktivace úletového popílku a materiálu POPbeton. Byl popsán vliv teploty temperování a doby temperování na mechanické vlastnosti materiálu, vliv množství záměsové vody na zpracovatelnost produktu a na mechanické vlastnosti, množství vzduchu v čerstvé směsi, vliv provzdušnění a množství provzdušňovací přísady na mechanické vlastnosti a odolnost materiálu proti zmrazovacím cyklům a při zkouškách odolnosti proti CHRL a stanovení parametru spacing factor (součinitel prostorového rozložení pórů).

Na základě zjištěných výsledků byly zanalyzovány parametry a využitelnost alkalicky aktivovaných materiálů ve vibrolisovaných prvcích. S ohledem na tento cíl byla zpracována rešerše o vibrolisovaných materiálech, jejich výrobě, vlastnostech a výrobcích, které jsou z nich vyráběny.

Byla vyrobena referenční čistě betonová směs z převzaté receptury pro konkrétní vibrolisovaný prvek a navržena receptura na bázi alkalicky aktivovaného

materiálu POPbeton. Pro obě směsi byl proveden velký rozsah měření a zkoušek, ze kterých bylo možné popsat mechanické vlastnosti a zpracovatelnost materiálu. Byl popsán vliv množství záměsové vody na zpracovatelnost produktu a na mechanické vlastnosti, množství vzduchu v čerstvé směsi, vliv provzdušnění a množství provzdušňovací přísady na mechanické vlastnosti materiálu.

Některé práce, které se zabývají alkalicky aktivovanými materiály, se soustředí na úzce specifické použití či speciální materiál pro úzký okruh využití. Velmi často není proveden rozsah zkoušek, který by umožňoval vyslovit závěry pro skutečné využití a zejména chybí vyhodnocení, které by popisovalo chování hmoty.

Zahraniční práce většinou pojednávají o černouhelných popílcích a nebyly řešeny jako kompozitum pojiva a plniva. V této práci byl proveden potřebný rozsah zkoušek, který umožnil popsat výsledné vlastnosti hmoty a možnost jejího využití. Jako rozhodující porovnávací kritérium pro využití materiálu byla zvolena pevnost v tlaku, která byla pro betonové materiály nejdůležitějším faktorem a od které lze spoustu dalších veličin odvodit.



## **1. Teoretická část**

### **1.1 Alkalicky aktivované materiály a betony - současný stav dané problematiky**

#### **1.1.1 Začátky alkalické aktivace**

Myšlenka alkalické aktivace úletových popílků vznikla na základě předchozích prací zabývajících se zejména alkalickou aktivací bezsádrovcových cementů [7], dále navazuje na výzkum profesora V. D. Gluchovského, který tento princip využil v materiálech příhodně nazvaných - Gruntocemety. Tento objev byl popsán ve stejnojmenné knize, která vyšla v roce 1959 [8] a první patenty byly přihlášeny už v roce 1958 (uděleno v roce 1972). Dalším výzkumem na Ukrajině se zabýval tým profesora P. Krivenka [10-14] (princip metody spočívá v aktivaci strusky).

U počátků výzkumu alkalicky aktivovaných prvků byly na katedře technologie staveb, na kterou navazuje výzkumná práce autora, předchůdci pan Ing. Tomáš Strnad, Ph.D. [15] a Ing. Rostislav Šulc, Ph.D. [6]. Na výzkum těchto předchůdců autor práce navazuje a v této práci detailně analyzoval vybrané vlastnosti tohoto materiálu a rozvinul výzkum směrem k dalšímu využití navrženého materiálu a podobných materiálů ve vibrolisovaných prvcích.

#### **1.1.2 Geopolymerace**

Podnětem pro rozvoj alkalicky aktivovaných materiálů bylo znovuobjevení principu tzv. geopolymerace. Tento koncept byl poprvé použit profesorem Josephem Davidovitem v roce 1974 na egyptologickém kongresu v Lyonu. Davidovits [9] popsal metodu přípravy umělého kamene, kterou dle jeho tvrzení používali staří Egypťané při stavbě pyramid před více než 4500 lety. Základem pro jeho experiment byla jílovitá spraš s vysokým obsahem oxidu křemičitého a oxidu hlinitého včetně příměsí kaolinitického jílu (náhrada původního rozdrceného egyptského vápence). Jako aktivátor směsi byl použit natron (dekahydrát uhličitanu sodného). Davidovitsova definice zní: "Geopolymer (ASP = alumosilikátový polymer) je látka, která vzniká anorganickou polykondenzací tzv. geopolymerací".

#### **1.1.3 Novodobý výzkum alkalické aktivace v zahraničí**

Mnoho vědeckých týmů po celém světě provádělo výzkum alkalické aktivace alumosilikátových materiálů právě na černouhelném popílků, navíc velmi často s příměsí metakaolinu. Mezi nejdůležitějšími jsou tyto: Hardjito, Wallah, Sumajouw, a Rangan z Austrálie [16,17] a Van Deventer et al. z Austrálie [18], Xu et al. [19]; Phair et al. [20], Palomo et al. ze Španělska [21], Kriven et al. ze Spojených států amerických [22], Zhang, Sun and Li et al. z Číny [23] a další.

Tato a další pracoviště usilovala o rozšíření portfolia vyráběných cementových betonů o nový druh bezcementového betonu, který by mohl zmírnit dopady nevýhod spojených s výrobou Portlandského cementu (velká spotřeba energie při jeho výrobě a emise skleníkových plynů) a nevýhod vlastního cementového betonu (nízká odolnost za vysokých teplot a malá odolnost vůči kyselinám, síranům, atd.).

Zájem o černouhelný popílek na celosvětové úrovni je zapříčiněn tím, že tato odpadní surovina má významný potenciál ve formě pojiva do bezcementového betonu.

#### **1.1.4 Výzkum v České republice a POPbeton**

Fundamentem této práce jsou vědomosti, které byly získány při výzkumu na Ústavu skla a keramiky VŠCHT v Praze a Fakultě stavební ČVUT v Praze. Od roku 1973 zde začaly prvotní experimenty s alkalicky aktivovaným cementem a po roce 1979 došlo k formulaci principů bezsádrovcového portlandského cementu. Do roku 1989 pak probíhaly zkoušky a vývoj alkalicky aktivovaného bezsádrovcového cementu s významnými výsledky [24]. Také zde od roku 1992 byly prováděny zkoušky alkalicky aktivované strusky a od roku 1997 také zkoušky alkalicky aktivovaných popílků. Obecně je principem alkalické aktivace reakce aktivátorů sodných či draselných s hydroxidy sodnými či draselnými, které se ve formě roztoku přidají k matici látky (úletového popílku). Aktivovaný popílek se „promění“ v kašovitou lepidlou hmotu tvořící pojivo. Přidáním plniva k tomuto pojivu ve fázi míchání, vzniká materiál označovaný jako POPbeton.

POPbeton je kompozitní materiál, který svou podstatou připomíná cementový beton. Tento materiál má s cementovým betonem podobné znaky: příprava, zpracovatelnost, využití a některé vlastnosti konečného materiálu.

### **1.2 Reologie**

Reologie čerstvého betonu jsou vztahy mezi napětím, třením, viskozitou a deformací. Zjednodušeně by se dalo říci, že reologie popisuje chování čerstvého betonu. Reologie má význam pro dopravu a zpracování zejména u samozhutnitelného betonu [25].

Pro zjišťování reologie betonů jsou používány metody pro stanovení vlastností čerstvého betonu. Z hlediska vlastností čerstvého POPbetonu byly vybrány metody, které jsou normované pro cementové betony, ale bylo možné je použít i pro bezcementové betony na bázi alkalicky aktivovaných úletových popílků. Tyto metody jsou popsány v těchto normách: ČSN EN 12350-1 (Zkoušení čerstvého betonu: část 1 Odběr vzorků) [26], ČSN EN 12350-2 (Stanovení konzistence - Zkouška sednutím kužele) [27], ČSN EN 12350-5 (Stanovení konzistence - Zkouška rozlitím) [28], ČSN EN 12350-7 (Stanovení objemové

hmotnosti čerstvého betonu) [29] a ČSN EN 12350-6 (Stanovení obsahu vzduchu čerstvého betonu - Tlakoměrná metoda) [30].

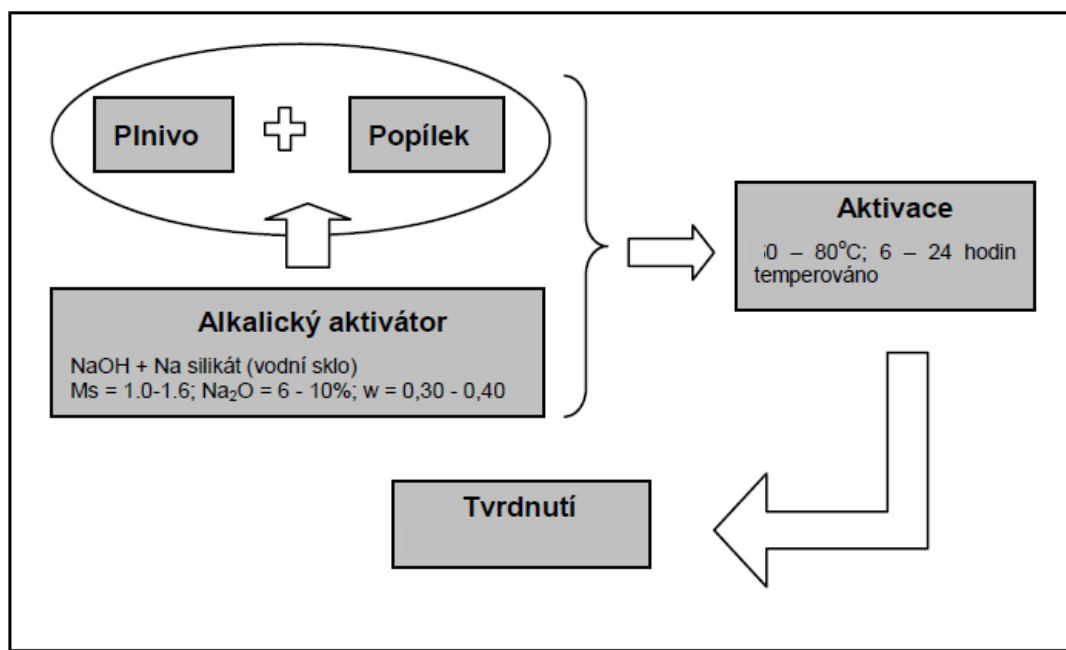
Za množství vody potřebné k dosažení dobré zpracovatelnosti se u betonu ASP považuje vodní součinitel  $w$  v rozmezí od 0,3 do 0,35 viz Strnad [15]. V literatuře se přesněji nepodařilo nalézt zmínku o úloze vody během polymerace, ani o jejím množství nutném k ideálnímu průběhu polymerace. Andini et al. [31] pouze zdůrazňuje, aby bylo použito takové množství záměsové vody, které zabezpečí rozpuštění hydroxidů sodného resp. draselného (tj. aktivátorů polymerace) a zároveň zaručí dobrou zpracovatelnost směsi. V jeho případě byl vodní součinitel  $w = 0,18$  resp.  $w = 0,28$ . Podle dosavadních výzkumů v programu GAČR [32] je určitá část vody spotřebována chemickou reakcí alkalických aktivátorů s popílkem a zůstatek tvoří voda volná - nadbytečná. S vyšším vodním součinitelem v betonu ASP se zvětšuje pórovitost a smrštění, zpomaluje se tvrdnutí a zhoršují se mechanické vlastnosti. U každé vyráběné směsi je proto nutné zajistit nejmenší vodní součinitel tak, aby byla směs dobře zpracovatelná a současně dosáhla po odpaření volné vody požadovaných vlastností.

Reologické vlastnosti čerstvého betonu jsou závislé na obsahu popílku ve směsi. Směsi s vyšší dávkou popílku mají v porovnání s čerstvým cementovým betonem jiný reologický charakter. Viskozita alumosilikátové polymerní kaše je výrazně vyšší než viskozita kaše z portlandského cementu. Z toho vyplývá v obou případech prodloužená doba při vibračním i jiném zpracování betonů a velmi citlivě navrhované skládání plniva, tedy pevných složek směsi – kameniva. I přes vyšší viskozitu a poměrně vysokou lepivost čerstvé kompozice dochází při vyšším vodním součiniteli ke gravitační segregaci hrubých a těžších zrn kameniva, spojené s vytěsňováním malty a kaše k povrchu zpracované směsi čerstvého betonu. K tomuto stavu dochází nejen při intenzivním dynamickém zpracování vibrací, ale i pouhým volným uložením lité kompozice čerstvého alumosilikátového polymerního betonu. Pro dosažení optimálních výsledků postačuje obsah 300 kg popílku na 1 m<sup>3</sup> betonu. Při vysoké dávce popílku lze připravit beton s nízkým obsahem vody beze ztráty akceptovatelné zpracovatelnosti. U kaší, malt i betonů z alumosilikátových polymerů byla zjištěna relativně vysoká pórovitost (až 50 %) bez ohledu na charakter podmínek přípravy. Ve směsi byly přítomny uzavřené kulové póry, které byly vytvořeny rozpuštěním původních částic popílku resp. zavlčením vzduchu při přípravě. Ve hmotě alumosilikátového polymeru na bázi popílků byly přítomny zbytky původních částic popílku, na nichž je patrný vliv postupného rozpouštění [33].

### **1.3 Působení vlivu teploty na alkalicky aktivované betony na bázi popílků**

Podmínky pro výrobu ASP betonu na bázi alkalicky aktivovaného úletového popílku – (anglicky alkali activated fly ash – AAFA) byly popsány dle následujícího

schématu na obrázku (Obrázek 1) používaného v České republice a upraveného v zahraničí používaných podmínek při experimentech prováděných Ranganem a Haradhjitem [34]. Takto aktivovaný popílek vytvoří kašovitou lepkovou hmotu - pojivo. Popílek byl aktivován za teplot v rozmezí 0°C – 80°C [35-38] po různě dlouhou dobu.



Obrázek 1 Výroba POPbetonu

Zdroj: [35]

Teplota, při které k aktivaci docházelo, byla rozhodující pro celkovou dobu zrání a tvrdnutí této hmoty. Zvýšení teploty v průběhu zrání této hmoty přinášelo nejen urychlení aktivace popílku, ale v konečném důsledku i o něco lepší vlastnosti výsledné hmoty. Zvyšovala se ale energetická náročnost na výrobu a též se částečně snižoval efekt použití energeticky nenáročných odpadních surovin. Proto byla hlavní pozornost soustředěna na aktivaci za teplot 20 – 25 °C.

V zahraniční ani české literatuře nebyla do té doby popsána možnost přípravy AAFA za nižších teplot (kolem 20 °C), většina autorů [39,40,41,42] se zabývala pouze tvrdnutím za vyšších teplot (40 °C – 90 °C), případně za vyšších teplot a vysoké relativní vlhkosti (rH až 99 %). Vždy bylo dodáváno teplo vnějším zdrojem a to buď při temperování v sušárně či v parní komoře. Takto připravený beton vykazoval značné rozdíly podle množství dodané vody – vodního součinitele a době expozice v prostředí s vyšší teplotou. Pro běžné použití u AAFA betonů bylo nutné též zajistit a ověřit jejich vlastnosti při působení nižších teplot a bez další dodávané energie.

## **1.4 Odolnost proti působení povětrnostních vlivů a odolnost proti namáhání nesilovými účinky**

### **1.4.1 Princip fungování provzdušněných betonů**

Kapilární porozita, která v betonu bez použití přísad při výrobě vzniká, má za následek, že do betonu může vnikat vlhkost a střídavým působením teploty, která zapříčiní změnu skupenství vody na led, dochází k postupné degradaci. Princip provzdušnění je uzavření volné kapilární porozity systémem kulových uzavřených pórů. Pomocí provzdušňovací přísady dochází v betonu k tvorbě kulových pórů [43]. Důležitý je především obsah mikropórů, pórů menších než 0,3 mm. Tyto mikropóry již neumožňují průchod pro vodu v kapalném skupenství, neboť jsou uzavřené (přerušené). Tím se zamezuje vnikání vlhkosti do betonu.

U provzdušněných betonů je třeba vzít v úvahu, že 1 % objemu vzduchu obvykle snižuje krychlenou pevnost přibližně o 3 % a že povolené kolísání obsahu vzduchu je až +3 % nad požadovaným minimální obsahem [44].

Provzdušňovací přísada [45–48] je doporučena pro skoro všechny betony, především ke zlepšení odolnosti proti zmrazovacím cyklům, když jsou betony vystaveny vlhkosti a chemikáliím v chladných oblastech.

### **1.4.2 Podobné výzkumy a jejich výsledky**

Hong-Qiang et al. [49] and Li-kun [50] zkoumali odpady u neprovzdušněných betonů po různých zmrazovacích cyklech. Vliv roztoku NaCl, zmrazovacích cyklů a odpady u betonů byly zkoumány Sun et al. [51]. Cohen et al. [52] zkoumal mechanické vlastnosti u neprovzdušněných vysokopevnostních betonů po zmrazovacích cyklech.

Huai-Shuai a Ting-Hua [53] zkoumali vliv zmrazovacích cyklů u provzdušněného betonu na jeho odolnost. Byly vyrobeny provzdušněné betony v rozdílných pevnostních třídách (C20, C25, C30, C40 a C50) se stejným množstvím provzdušňovací přísady a byly zkoumány jejich mechanické vlastnosti.

### **1.4.3 CHRL**

Principem zkoušky odolnosti proti CHRL (chemickým rozmrazovacím látkám) je působením chloridů v kombinaci s opakovaným zmrazováním a rozmrazováním. Při zkoušce se používá roztok 3 % NaCl a následně dochází k cyklování vzorku (zmrazováním a rozmrazováním), kdy je 3 hodiny teplota -18 °C, 3 hodiny +5 °C, délka jednoho cyklu je 6 hodin. Po 25 cyklech se zváží a přefiltruje odpad. Po vysušení odpadlých částic z povrchu se stanoví jejich hmotnost a přepočítá se na plochu povrchu zkušebního tělesa 1m<sup>2</sup> a stanoví se odpad betonu v g/m<sup>2</sup>. Měření se opakuje po 50, 75, 100 a případně 125 cyklech.

Zkouška stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek je normována a řídí se normami ČSN 73 1326 (Metoda A) [54] a dle ČSN 73 1326 Změna Z1 [55].

Při výzkumu pánů Huai-Shuai a Ting-Hua [53] byly zkoumány mechanické vlastnosti betonů s různým množstvím provzdušňovací přísady. Hmotnostní ztráta byla definována jako:

$$4. \quad \Delta W_n = \frac{G_o - G_n}{G_o} \times 100, \quad (1)$$

v tomto vztahu  $\Delta W_n$  byl odpad po  $n$  zmrazovacích cyklech (%),  $G_n$  byla hmotnost vzorků po  $n$  cyklech a  $G_o$  byla hmotnost před zmrazovacími cykly.

Bylo popsáno, že odolnost proti zmrazovacím cyklům je vyšší u provzdušněných betonů než u neprovzdušněných.

## **1.5 Zhutňování betonových směsí**

Popis principu a konceptu zhutňování betonových směsí byl převzat a upraven z habilitační práce od prof. Ing. Rudolfa Hely, CSc. [56].

*Jak uvádí Hela [56]: Jakýkoliv čerstvý beton uložený do bednění nebo formy vykazuje určitou úroveň s „nakypřením“, ta je odvislá od různého složení betonové směsi a na postupu dopravy a ukládání. Hlavním úkolem hutnění při výrobě hutných a zhutňovaných betonů je redukovat objem mezer v nakypřeném čerstvém betonu, případně nejmenší objem pórů vzduchu v betonu. Optimální hodnota objemu pórů v této směsi by dle odborné literatury měl být maximálně 2 %. Hlavním předpokladem je, aby hutnicí proces probíhal co nejrychleji a energetická náročnost celého zhutňovacího procesu byla co nejmenší.*

Z technologického hlediska je při zhutňovacím procesu zpracování čerstvého betonu nutné, aby betonová směs dokonale zaplnila každé místo formy, aby došlo k zachování potřebných určených tvarů a rozměrů výrobků a potřebné kvality jejich povrchů. Mimo předchozích požadavků je nutné z hlediska mechanických a statických požadavků zaručit, aby vložené prvky výztuže byly dokonale obalené z důvodu zaručení spolupůsobení výztuže a betonu.

### **1.5.1 Parametry procesu zhutňování**

Mezi hlavní parametry, které jsou kontrolovány a jsou ovlivnitelné při zhutňovacím procesu, jsou dle Říhy [57] zhutňovací rychlost, intenzita, odpor a zhutňovatelnost betonové směsi.

Zhutňovací rychlost lze definovat dle Říhy [57], jako *rychlost zmenšování mezerovitosti betonové směsi, tzn. poměr úbytku objemu mezer v BS k okamžitému objemu zhutňované směsi za jednotku času.*

Zhutňovací intenzitu Říha [57] definuje jako *množství zhutňovací energie přicházející do betonové směsi jednotkou plochy za jednotku času zhutňování*. Zjednodušeně lze toto popsat jako vliv vnějších sil, tzn. účinnosti zhutňovacího zařízení na průběh a rychlost zhutňování.

Zhutňovací odpor lze definovat dle Říhy [57], jako *odpor, který je nutné překonat, aby zhutňování probíhalo. Je dán hodnotou zhutňovací intenzity, kterou je třeba v určité fázi zhutňování vynaložit, aby se dosáhlo určité zhutňovací rychlosti*.

Zhutňovatelnost Říha [57] definuje jako *převrácenou hodnotou zhutňovacího odporu, je to vlastně zhutňovací rychlost, která se v určité fázi zhutňování dosáhne použitou intenzitou zhutňování*. Tento parametr lze chápat jako vliv reologického charakteru a vnitřních vlastností betonové směsi. Toto znamená, že vyjadřuje objem mezer, o který lze zmenšit objem čerstvého betonu za předpokladu dodání jednotky hutní energie na jednotku plochy. Tento parametr zhutňovatelnosti dle Říhy [57] *je nepřímo úměrná konzistenci – při nižší konzistenci (měkčí, pohyblivější směs) se konstantní jednotkou energie dosáhne většího objemu zmenšení mezer a naopak*.

Z technologického hlediska je dle Hely [56] pro dosažení potřebného určité úrovně zhutnění čerstvého betonu v optimálním čase nutné splnit tyto principy:

- Při požadavku na omezení maximální doby zhutňování betonové směsi je potřebné zvýšit zhutňovatelnost čerstvého betonu (změnit konzistenci – zpracovatelnější betonovou směs) nebo zvýšit intenzitu hutnění.
- Je-li zhutňovatelnost definována složením betonové směsi, je potřebné upravit intenzitu nebo dobu hutnění.
- Pokud je zhutňovací intenzita definována konkrétním zhutňovacím způsobem a účinností zhutňovacího zařízení, je potřebné změnit zhutňovatelnost (tzn. konzistenci či složení betonové směsi) nebo upravit dobu hutnění.

Z technologického hlediska lze dosáhnout požadované zhutnění také kombinací změn všech výše uvedených parametrů hutnění.

Závěrem Říha [58] shrnuje, *za použití uvedených hlavních parametrů zhutňování a matematických vztahů pro zákonitosti sedání v časovém průběhu zhutňování odvozených z experimentálních měření lze sestavit regresní vztahy, které stochastický proces zhutňování betonové směsi mohou popisovat přesněji a s jejichž pomocí lze dosáhnout intenzifikace procesu zhutňování hlavně při použití technologie vibrace nebo vibrolisování*.

Z výše uvedeného vyplývá, že úpravou zhutňovatelnosti (tzn. složení čerstvého betonu a měrný objem) a také upraveným měrným zhutňovacím výkonem daného použitého zařízení je možné upravit zhutňovací rychlost

a samozřejmě také dobu hutnění. Hela [58] také uvádí, že *rozdělení zhutňovací energie v objemu betonové směsi nebývá rovnoměrné a tedy ani zhutňování nebude v celém objemu probíhat stejně a rovnoměrně.*

### 1.5.2 Praktické způsoby zhutňování betonové směsi

Aplikace teoretických poznatků pro hutnění betonové směsi je nutná pro úspěšné praktické zvládnutí výroby kvalitních betonů.

Dokonalé zhutnění betonové směsi v praxi je předpokladem pro dosažení požadovaných vlastností betonu. Hutnost směsi přímo ovlivňuje především pevnost, odolnost a trvanlivost betonu, z čehož plyne požadavek, aby beton obsahoval nízké množství pórů a mezer.

Způsoby zhutňování závisí na vlastnostech zhutňované betonové směsi (složení, konzistence), požadavcích na hotový beton (pevnost, odolnost, trvanlivost, mezerovitost), objemu betonové směsi a tvaru konstrukce (horizontální, vertikální, plošné, prutové) a na místě použití (staveniště, výrobná, zdroje energie) a na míře vyztužení.

Podstatou zhutňování betonové směsi v praxi je vynutit relativní pohyb všech složek betonu tak, aby se vzájemně co nejtěsněji seskupily a vytvořily kompaktní beton bez mezer a pórů s použitím co možná nejmenšího množství energie. Stupeň zhutnění by měl být v celém objemu stejný a rovnoměrný.

Pro úspěšné provedení praktické aplikace hutnění betonu je nutné provést následující kroky a) a b):

- a) před zahájením ukládání betonové směsi je nutno provést:
  - i. kontrolu bednění, lešení
  - ii. kontrolu stavu vyztuže
  - iii. přípravu povrchu dříve uloženého betonu
  - iv. kontrolu provedení izolací, prostupů apod.
- b) dodržet zásady ukládání betonové směsi:
  - i. ukládání se provádí dle předem vypracovaného výrobního – technologického postupu
  - ii. zahájit ukládání co nejdříve po zamíchání, aby se omezila ztráta zpracovatelnosti
  - iii. ukládání provádět plynule na místo určení, pokud možno ve vodorovných vrstvách v tloušťce v závislosti na zhutňovacích prostředcích
  - iv. provádět ukládání tak, aby nedocházelo k rozmísení betonové směsi – betonová směs se nesmí házet do hloubky větší než 1,5 m, při použití žlabů trub a hadic maximálně 0,5m
  - v. je nutné zamezit posunutí či přetvoření vyztuže, kanálků apod.



- vi. nelze ukládat novou vrstvu betonu na předchozí dosud nezhuštěnou vrstvu
- vii. při ukládání betonové směsi na šikmý podklad se musí začít s hutněním v nejnižším místě a postupovat proti spádu
- viii. přerušit betonování je možno pouze tak dlouho, dokud čerstvý beton nedosáhne hodnoty 3,5 MPa dle zkoušky tuhnutí betonu. Pokud se takto nestanoví doba přerušování, je nutno provést pracovní spáru a pokračovat v betonáži za normálních podmínek nejdříve za 18 hodin,
- ix. pracovní spáry se provádí dle zpracované technologické dokumentace (technologického postupu)
- x. v případě mimořádných podmínek (klimatické podmínky, apod.) je nutné aplikovat speciální postupy i po uložení betonu, např. zimní opatření pro betonáž a ošetřování betonu

Mezi základní způsoby zhutňování betonové směsi v praktické aplikaci – při betonáži patří:

- a) lití
- b) propichování
- c) dusání (pěchování)
- d) lisování a vibrolisování
- e) vibrování
- f) odsávání
- g) odstředování
- h) torkretování
- i) injektování
- j) hlazení

Pro vybrané způsoby zhutňování je níže uveden jejich popis a omezující podmínky jejich použití.

### **Lití**

Předpokladem použití tohoto způsobu zhutňování je vhodná směs s takovým obsahem vody a jemných částic, u které dochází k odstranění mezer pouhým roztečením (gravitací), tj. vypuzení vzduchu vlastní hmotností (směsi tekuté). Nevýhodou takto vyrobených betonů je však velká pórovitost „cementového kamene“ v důsledku nadbytečného množství záměsové vody, která se odpaří a vzniknou druhotné póry, které snižují pevnost betonu (do 15 MPa). Další nevýhodou je možnost segregace betonové směsi během dopravy, ukládání a zhutňování.

V současné době je možno omezit množství vody použitím plastifikátorů a stabilizátorů (viz samozhutnitelný beton).

### **Propichování**

Zatékání betonové směsi do bednění a odchodu vzduchu ze směsi se napomáhá propichováním tyčemi kruhového průřezu ( $\Phi$  16 až 25 mm), aby mohly snadno proniknout i hustou výztuží. Konce tyče mají být tupě zaobleny. Použití pro betonové směsi konzistence měkké až velmi měkké.

### **Dusání (pěchování)**

Je vhodné u směsi málo měkkých až zavlhých (směsi měkčích konzistencí by se rozstříkávaly). Při nárazech pěchu na povrch uložené betonové směsi dochází ke vzájemnému přiblížení částic a k vypuzování vzduchu z dusané vrstvy. Výška dusané vrstvy je volena přibližně jako pětinasobek největšího zrna kameniva a současně nemá být vyšší než 150 mm. Dusání je ukončeno, vystoupí-li na povrch zhutněného betonu cementový tmel nebo voda. Následují-li rázy rychle za sebou, jedná se o tzv. rychlopěchování (strojní pěchy pracují 500 až 1200 rázy/min, jejich hmotnost je přibližně 40 až 60 kg). Vzhledem k tomu, že rázy pěchu vyvozují značné tlaky na bednění, je nejvhodnější použití v místech aplikace bez bednění – např. základové konstrukce apod.

Pozn. Při provádění drobných prací se používá ruční dusání (hranolek, kuláč), zhutnění se napomáhá poklepem na bednění, příp. poklepem na výztuž (není možné provádět poklep na výztuž v již tuhoucím betonu).

### **Lisování a vibrolisování**

Zmenšení objemu betonové směsi se docílí působením vnějšího tlaku. Používá se při průmyslové výrobě prefabrikátů obvykle v kombinaci s vibrováním a to pro výrobu tenkostěnných prvků, prvků malých rozměrů, prvků nevyztužených příp. vyztužených zvláštním druhem výztuže (nebezpečí posunu výztuže při lisování).

### **Vibrování**

Vibrování je v praxi nejrozšířenější způsob zhutňování. Jedná se v podstatě o rychle za sebou působící rázy na částice betonové směsi, které vyvozují více či méně pravidelné kmitání. Při vibraci částice betonové směsi kmitají se stejnou amplitudou jen v těsné blízkosti zdroje vibrace, s rostoucí vzdáleností od zdroje a větší hmotou všech kmitajících částí (formy a směsi) dochází k útlumu vibrační energie, dochází k horšímu zhutňování. Vibrace (doba vibrace) závisí na řadě parametrů (frekvenci, amplitudě, max. zrychlení, intenzitě vibrace, složení a konzistenci betonové směsi). Mezi nejpoužívanější vibrační nástroje patří:

- a) vibrátory ponorné – dle způsobu buzení vibrace se dělí na mechanické, elektromagnetické a hydraulické

Mezi nejčastěji používané ponorné vibrátory patří ty mechanické s elektrickým pohonem. Skládají se z elektromotoru (příkon 0,7 až 3 kW), ohebné hřídele a vibrační hlavice  $\Phi$  do 100 mm. Hlavice obsahuje rotor - nevyvážené těleso, které vytváří kmitavý pohyb otáčkami okolo 100 – 130 otáček za vteřinu. Výkon ponorného vibrátoru dle typu přibližně 10 až 20 m<sup>3</sup> /hod. Hutnění se provádí po vrstvách. V současné době se užívají i vibrátory, které mají elektromotor umístěný přímo v hlavici, měnič může být integrován do spínače.

Postup práce probíhá následovně. Nejprve dojde k ponoření vibrátoru (sklon cca 10°) a následně probíhá hutnění. Hutnění je ukončeno, jakmile se mezery vyplnily a na povrchu se vytvoří vystupující cementový tmel. Vibrátor se vytahuje pomalu. Zhutňování musí být provedeno rovnoměrně v celém objemu.

b) povrchové vibrátory – přenáší vibrační energii do směsi z vibračních zařízení přikládaných na povrch zhutňovaného prvku, mezi nejčastější patří:

- vibrační desky
- vibrační latě a lišty
- rotační vibrační hladidla

Účinnost povrchové vibrace do hloubky vibrované vrstvy je omezena, obvyklá maximální tloušťka je 150 až 200 mm.

c) zhutňování vibrací nepřímou, mezi nejčastější patří:

- vibrátory příložné (skládají se z elektromotoru a výstředníku, upevňují se na vhodné místo na bednění).

Použití: např. na pojízdná bednění tunelů, zárubních zdí, na formy prefabrikátů apod.

d) vibrační soustavy - vnáší vibraci do betonové směsi v celém výrobku najednou, mezi nejčastější patří:

- vibrační formy (např. výroba dílců ve svislé poloze)
- vibrační soustavy spodní (stolové vibrátory, vibrační stolice)
- vibrační soustavy vnitřní (vibrační jádra)
- vibrační soustavy povrchové (vibrační štíty)

### **Vakuování**

Hutnosti směsi se docílí dodatečným odstraněním vzduchu a vody z betonové směsi. Vakuování lze provádět dvěma způsoby:

- odvzdušňování - z čerstvého betonu se odsává pouze vzduch

- odsávání - z čerstvého betonu se odsává vzduch i voda, ve které je však i rozpuštěný cement

Vakuování se provádí pomocí speciálních odsávacích štítů, v současné době se používají vakuovací rohože a polštáře. Ve vnitřní komůrce štítu se vyvodí podtlak 60 až 80 kPa, účinek odsávání je do hloubky přibližně 150 až 200 mm. Doba odsávání dle tloušťky betonové vrstvy (na 10 mm tloušťky betonu odsávání cca 1 minuta).

Použití: odsávací rohože např. při zhotovování podlah (vysoká hutnost, urychlení nárůstu pevnosti). Pozn. k odsávání je možné užít i speciální odsávací trubice.

### **Odstředování**

Jedná se o zvláštní druh vibrolisování. Ke zhutnění směsi dochází odstředivým tlakem za současného chvění otáčejících se forem. Odstředivý tlak se pohybuje kolem 200 kPa, otáčky 7-15 za vteřinu.

Použití: výroba betonových trub, stožárů apod.

## **1.6 Vibrolisované prvky a jejich výroba**

### **1.6.1 Historie vibrolisované dlažby ve světě**

Začátky použití betonových prvků lze datovat do období první poloviny 19. století. Následující data byla převzata a přeložena od Fifielda [59]. První patent na pevné betonové bloky byl udělen v roce 1832 v Anglii. První významná zkouška aplikace prvků z betonové dlažby se objevila v Neuss (Německo) v roce 1936. Zde byly poprvé ve skladbě pro těžkou dopravu úspěšně testovány obdélníkové tvarovky s mokřým odlitkem o rozměrech 240 x 120 x 80 mm. Nicméně před druhou světovou válkou byly betonové dlaždice z velké části viděny pouze jako náhrada za kamenné dlažby.

Hlavní důsledky pro vývoj betonové blokové dlažby nastaly v poválečném Holandsku, když v padesátých letech 20. století došlo k výraznému nárůstu počtu obyvatel Nizozemska. Toto spolu s potřebami rekonstrukce válečných škod vedlo k velkému nárůstu poptávky po nových domcích. To vedlo k nedostatku cihel, výrobci museli přepínat většinu své výroby a dlažby byly neochotně přijaty jako náhrada za cihly. Nizozemská vláda požádala výrobce, aby konkurenčně vyráběl betonovou dlažbu jako náhradu jílové dlažby: tato výzva byla splněna již v roce 1951 panem Hollandem, který vlastnil tehdy Holland Beton ve Westervoortu: nyní společnost Struyk Verwoe (CRH).

Následující data byla převzata a přeložena z firmy Gopavers [60]. Úspěch betonových dlažeb v Nizozemí se rychle rozšířil do Německa a v září 1964 Němci vytvořili první národní normu pro betonové dlaždice: DIN 18 501. Tento výrobek byl obecně znám jako dlažba „Hollandstone“ o rozměrech 200x100x80mm. V 70.

letech 20. století dochází k výrobě prvních betonových prvků dlažby na automatizovaných strojích.

V 70. letech se technologie výroby rozšířila po Evropě a dalších částech světa včetně Spojených států. Od té doby Amerika zaznamenala výrazný nárůst výroby betonových spojovacích dlažeb, která postupně rostla.

### **1.6.2 Historie vibrolisované dlažby v ČR**

Následující data byla převzata a upravena od firmy MCT [62]. Betonové vibrolisované výrobky se v ČR začaly ve větším množství (objem i sortiment) objevovat na trhu až po roce 1990. Po roce 1990 byl umožněn dovoz zahraničních technologických linek, umožňujících zpracování betonové směsi tzv. vibrolisováním, kdy je kombinovaným účinkem vibrace a přítlaku zpracovávána pouze zavlhlá betonová směs. Výrobky jsou okamžitě po vyrobení odformovány a ponechány na podložkách nebo dokonce přímo ukládány na palety. Z těchto podložek jsou výrobky po zatvrdnutí betonu baleny do palet. Tento proces, který nevyžaduje, aby výrobky zrály ve formách, a umožňuje okamžité další použití formy, vedl k možnosti vyrábět obrovská množství výrobků v krátkém časovém období. Mezi nejčastější sortiment vibrolisovaných prvků patří: dlažebními bloky, zatravnovací tvarovky, dlažební desky, obrubníky, palisády, plotové prvky, tvarovky opěrných stěn, zdící tvárnice, atd. Tyto prvky lze vzhledem k dnešním pokročilým technologiím barvit do různých odstínů barev.

### **1.6.3 Současný stav**

Pro výrobu stavebních komponent na bázi betonu se využívá ve větší míře k hutnění betonové směsi vibrace. Z tohoto důvodu jsou výrobní linky doplněny vibračními lisami, které jsou umístěny jako poslední prvek řetězce výroby. V těchto lisách dochází k zhutňování betonové směsi do předdefinovaných tvarovaných forem.

Kvalita výrobku je velmi ovlivňována průběhem hutnění směsi. Při vibraci je nutné, aby došlo k rovnoměrnému zhutnění v celém objemu betonové směsi. Pokud by k tomu nedošlo, je ohrožena kvalita výrobku, neboť by mohla být ovlivněna požadovaná pevnost a při praktickém použití či užívání finálního výrobku by mohlo dojít k prasknutí, případně by se části výrobku mohly začít drobit.

Na samotný průběh hutnění může mít vliv mnoho parametrů, mezi kterými jsou následující: konstrukce prvku vibrolisu, jeho jednotlivé části a v neposlední řadě také konstrukce použitých forem, které mohou svým tvarem zásadně ovlivnit přesný tvar požadovaného výrobku. Při finální etapě výrobního procesu dochází k vibraci formy, která svým kmitáním v určité míře může ovlivnit kvalitu finálního produktu.

Všechny produkováné betonové výrobky s ohledem na požadavek závazných právních předpisů podléhají přísné výstupní kontrole. Při průzkumech

ve výrobně firmy B&BC Zbůch, které uvádí Synáč [63], bylo odhaleno, že za určitých podmínek dochází k nerovnoměrnému hutnění betonové směsi v rámci jedné formy a výrobky mohou mít rozdílné mechanické vlastnosti, konkrétně rozdílnou pevnost v tlaku s ohledem na to, v jaké části formy se výrobky vyskytují. Z tohoto důvodu je možné předpokládat, že při vibračním hutnění betonové směsi dochází k nerovnoměrnému kmitání formy, což způsobuje také i rozdílné zhutnění betonové směsi.

Proces samotného vibračního hutnění je ovlivňován řadou různých parametrů, mezi které patří např. modální vlastnosti formy, způsob kotvení formy pomocí silentbloků, tuhosti samotných silentbloků, režim buzení, atd. nad rámec těchto parametrů je potřeba zmínit, že k samotnému hutnění směsi bylo využito rázů, které jsou zdrojem silných nelinearit v celém systémovém procesu výroby prvků. Samotný vibrolis takto prezentuje nelineární dynamický systém a pro vyřešení problému dynamického chování by bylo nutné aplikovat metody z oblasti nelineární dynamiky. Tato práce se nezabývá řešením tohoto problému, ale je nutné tuto problematiku a komplikaci zmínit k úplnosti řešeného tématu.

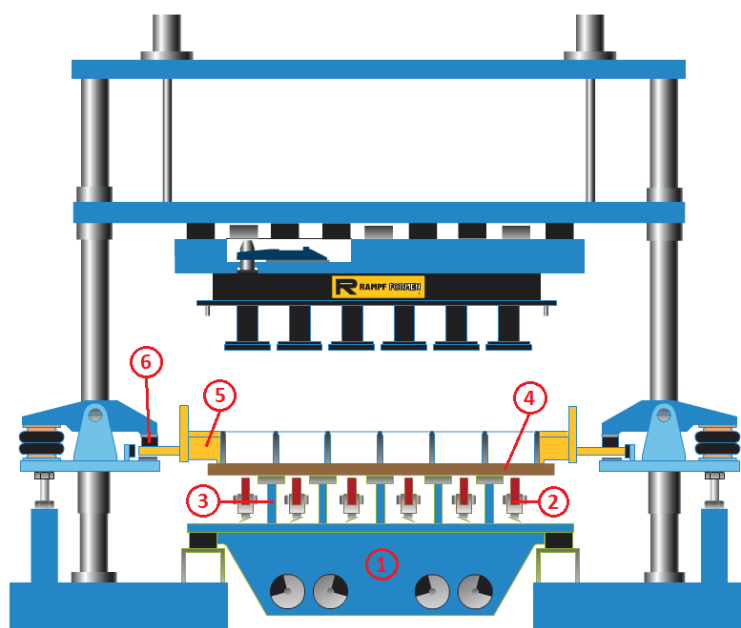
#### **1.6.4 Srovnání typů vibrolisů z hlediska typu budičů**

Nutno podotknout, že existuje řada různých typů vibrolisů, které se liší hlavně ve výrobních parametrech (tzn. rychlost přípravy jedné série výrobků, množství a kapacita betonu v zásobnících, maximální rozměry a počty výrobků) a v neposlední řadě v rozměrech celého stroje pro výrobu prvků. Tyto stroje - vibrolisy je možné také rozdělit dle toho, jakým způsobem dochází k realizaci samotného buzení (tomu je podrobněji věnována podkapitola 1.6.8). Příkladem lze uvést, že starší vibrolisy, mezi jejichž zástupce patří výrobky např. od firmy Colorbeton, jak uvádí Staněk [64], využívají dvojici mechanických budičů poháněných frekvenčně asynchronním elektromotorem. Tyto budiče jsou propojeny ozubeným převodem. Pro každý z těchto pracovních cyklů dochází k rozběhu a zastavení budičů. Tyto budiče využívají frekvenci buzení 102Hz.

V jiném případě lze uvést příklad moderního vibrolisu např. od firmy HESS (typ RH 1500 2V), který používá dvě dvojice budičů. Pro regulaci velikosti budící síly během chodu stroje je používána změna poloměru nevývahy na rotoru pomocí planetového diferenciálu. Mimo pracovní cyklus vibrace, tzn. při chodu „naprázdno“ je poloměr nevývahy nulový a tedy není nutné elektromotory zastavovat. Výsledkem této konstrukce je nejen delší životnost mechanických částí, tzn. elektromotorů, ložisek, apod., ale také dochází k redukci času mezi dvěma navazujícími vibračními procesy hutnění. Využitá frekvence buzení je měnitelná, jako nejvhodnější je většinou použita frekvence 50Hz.

### 1.6.5 Popis vibrolisu

Samotný stroj sloužící při výrobě vibrolisovaných prvků, tzn. vibrolis, je komplexní mechanické zařízení, jehož cílem je zhutňování betonové směsi rozdílných betonových výrobků. Popis a údaje k vibrolisům byly převzaty a upraveny od Synáče [63]. Na obrázku (Obrázek 2) jsou označeny jeho důležité části, jejichž význam je v následujícím textu popsán.



Obrázek 2 Schéma vibračního lisu na betonovou směs  
Zdroj Synáč V. [63]

Detailní popis vibrolisu je popsán Synáčem [63] a prezentovaná schémata a fotografie byly převzaty z jeho práce. Pro zhutnění betonové směsi uložené ve formě je nutné definované buzení, které provede požadované rozkmitání formy na čerstvý beton. Buzení je zajištěno frekvenčně řízenými elektromotory se setrvačníky s excentricky rozloženou hmotou (viz bod 1 na Obrázek 2), ty jsou pevně spojeny se stolem vibračního lisu. Uložení stolu je provedeno v rámu tak, aby mohlo docházet pouze k pohybům ve vertikálním směru. Rotory s excentrickými setrvačníky svou rotací způsobují, že samotný stůl započne harmonicky kmitat. K tomuto stolu jsou připojeny pevně i vibrační lišty (viz bod 3 ukazuje Obrázek 2 a fotografie Obrázek 4), které kopírují svislý pohyb stolu. Tento pohyb se přenáší ze stolu na podložku (viz bod 4 ukazuje Obrázek 2), která leží volně na dorazových lištách (viz bod 2 zobrazuje Obrázek 2 a fotografie Obrázek 4). Další prvky, tzn. dorazové lišty jsou spojeny pevně s rámem vibrolisu. Harmonický pohyb se takto přenáší z podložky na formu (viz bod 5 na Obrázek 2 a fotografie Obrázek 3), která je „uzamknuta“ v silentblocích (viz bod 6 na Obrázek 2 a fotografie Obrázek 5) a přitlačena definovanou silou vytvořenou pneumatickými válci k podložce.



*Obrázek 3 Pohled na formu upnutou ve vibrolísu  
Zdroj Synáč V. [63]*



*Obrázek 4 Pohled na vibrační (zelené) a dorazové (černé) lišty vibrolísu  
Zdroj Synáč V. [63]*





*Obrázek 5 Pohled na uspořádání silentbloků v rámu vibrolisu  
Zdroj Synáč V. [63]*



*Obrázek 6 Pohled na zhuštěné betonové výrobky umístěné na podložce  
Zdroj Synáč V. [63]*

### **1.6.6 Funkce vibrolisu**

Popis fungování jednoho konkrétního vibrolisovacího zařízení je následující. Dopravní mechanismus, který je součástí výrobní linky, dopraví do prostoru vibrolisu vtažením prázdnou podložku, která je zastavena nad dorazovými lištami, na které je podložka spuštěna a ponechána volně. Na tuto podložku je z horní části pracovního prostoru vibrolisu působením hydraulických mechanismů spuštěna forma v silentblocích, která podložku přitiskne k dorazovým lištám. V tomto okamžiku je vibrolis připraven k procesu vibrace. Před procesem samotné vibrace dochází k naplnění formy betonovou směsí. Tento proces má dvě fáze plnění. Na rozdílných stranách vibrolisu jsou umístěny dva kontejnery

s betonovou směsí. Samotné plnění probíhá tak, že v první fázi dojde k naplnění poloviny formy z jednoho kontejneru, který následně přes formu přejeđe, aby při svém návratu do původní pozice setřel zbytkový čerstvý beton, který zůstal mimo otvory na formě. V následující druhé fázi dojde k naplnění druhé poloviny formy z druhého kontejneru. Po ukončení těchto dvou fází je forma plná betonové směsí a dochází k samotnému hutnění. Na horní sekci vibrolisu jsou umístěna „kladiva“, jejich funkce spočívá ve stlačení hutněného betonu. Následujícím krokem v procesu výroby vibrolisovaného prvku je stlačení hutněného betonu, k tomu dochází sestoupením výše zmíněných kladiv, v tento okamžik je zahájen proces vibrace, tzn. celý proces zhutnění směsí. Fáze vibrace trvá přibližně 5 vteřin, tento časový interval je možné upravovat provozním nastavením obsluhou vibrolisu dle požadavků na různé typy výrobků. Po dokončení fáze vibrace, tzn. po každém cyklu dochází ke zdvihu formy o definovanou výšku, aby podložka se zhutněným výrobkem byla posunuta mimo pracovní prostor vibrolisu. Po opuštění prostoru této podložky, je její místo obsazeno novou prázdnou podložkou a cyklus se celý opakuje. Kompletní výrobní cyklus vibrace včetně dopravy podložky do a z prostoru vibrolisu trvá přibližně 25 vteřin.

### 1.6.7 Význam rázů

Následující informaci o významu rázů pro vibraci byla převzata a upravena od Hely [66]. Rázové děje při vibračním hutnění vznikají dvěma způsoby, za první při kontaktu podložky mezi formou a vibračními lištami a za druhé při kontaktu mezi podložkou s formou a dorazovými lištami. První případ vzniku rázové síly nastane tehdy, když se harmonicky buzená vibrační lišta dostává do kontaktu s podložkou, která volně leží na dorazových lištách. Po překonání gravitační a předpínací síly formy se podložka s formou nepatrně nadzvedne z dorazových lišt. Při zpětném pohybu desky k dorazovým lištám může dojít k dvěma případům, které závisí na nastavení vibrolisu:

#### 1) *Kontakt s dorazovými lištami*

Podložka se při poklesu dostane do kontaktu s dorazovými lištami, tím vzniká druhý případ rázu. Poté do podložky opět zespodu narazí vibrační lišty a vznikne znovu první případ rázu. Děj se takto cyklicky opakuje.

#### 2) *Kontakt s vibračními lištami*

Podložka se při poklesu nedostane do kontaktu s dorazovými lištami, ale narazí do ní znovu stoupající vibrační lišty. Tím opět vznikne první případ rázové síly. Děj se takto opět opakuje.

Oba případy rázu, které mohou nastat při zpětném pohybu podložky s formou, jsou ovlivnitelné frekvencí a velikostí budící síly, obsluha tedy může nastavit vibrolis tak, jak je požadováno pro konkrétní případ.

Dorazové lišty jsou seřiditelné – lze změnit jejich výšku. Takto lze ovlivnit rychlost dopadu podložky s formou na lišty (tzn. i vzniklá energie). Zvýšením nebo snížením dorazových lišt lze také ovlivnit rychlost nárazu vibračních lišt do podložky. Při rázovém buzení působí síla velmi krátkou dobu, řádově několik milisekund. Avšak ráz má tu vlastnost, že při kontaktu vybudí spektrum vlastních tvarů a frekvencí formy. Tím je možno lépe směs ztuhnout. Vzhledem k opotřebení je nutné pravidelně kontrolovat rovinatost obou druhů lišt, aby při hutnění docházelo ke kontaktu lišt a podložky v celé možné kontaktní ploše.

Tato práce se nezabývá významem rázů, ale je nutné tuto problematiku zmínit k úplnosti řešeného tématu.

## **1.6.8 Buzení**

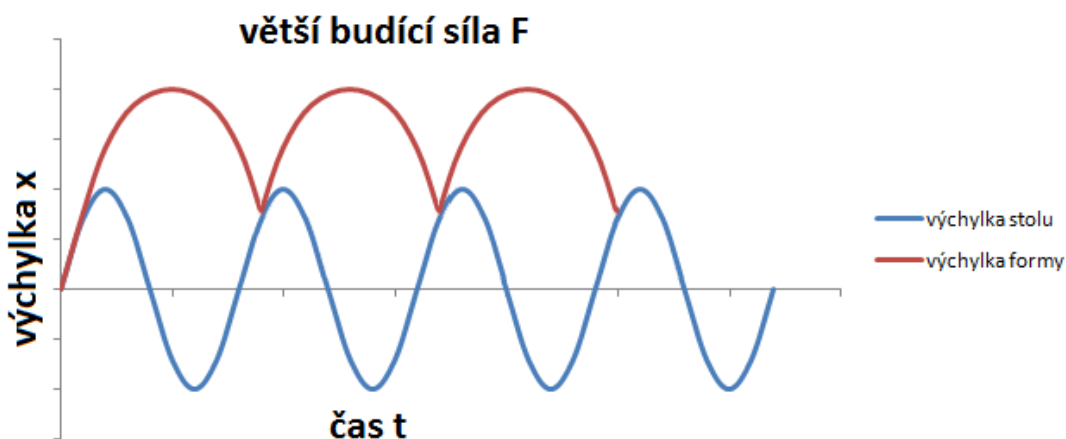
### **1.6.8.1 Vliv budící síly**

Následující informace o buzení při vibraci byla převzata a upravena od Hely [66]. Použitá grafická znázornění byla převzata od Synáče [63]. Budící síla je velmi důležitý parametr a velmi na ní závisí kvalita ztuhnutí. Musí být dostatečně velká, aby nadzdvihla podložku s předepnutou formou a došlo k odlehnutí. Měla by však být volena i s ohledem na co nejmenší namáhání stolu. Při zvolení menší budící síly bude stůl s vibračními lištami nadzdvihávat podložku s formou nad vibrační lišty jen nepatrně (viz Obrázek 7). Naopak při zvolení větší budící síly bude stůl formu nadzdvihávat více. Na formu budou působit velké rázy, ale zároveň bude docházet k většímu opotřebení součástí (viz Obrázek 8). Proto je nutné volit potřebný kompromis.

U vibrolisů se používají dva druhy buzení formy s podložkou. Předchozí popis se týkal již popsání vibrolisu firmy HESS, který využívá buzení rázové. Při tomto druhu buzení dochází k uvolnění kinetické energie rázu, která se spotřebuje na práci potřebnou ke ztuhnutí betonové směsi. Existují ale také vibrolisy, které využívají pouze harmonické buzení. Je to tedy případ, kdy harmonicky buzený stůl je pevně spojen s podložkou a formou a je zde absence dorazových i vibračních lišt, díky kterým v případě rázového buzení ráz vzniká.



Obrázek 7 Vliv menší budící síly na odlehnutí formy od stolu  
Zdroj Synáč V. [63]



Obrázek 8 Vliv větší budící síly na odlehnutí formy od stolu  
Zdroj Synáč V. [63]

#### 1.6.8.2 Vliv délky času buzení

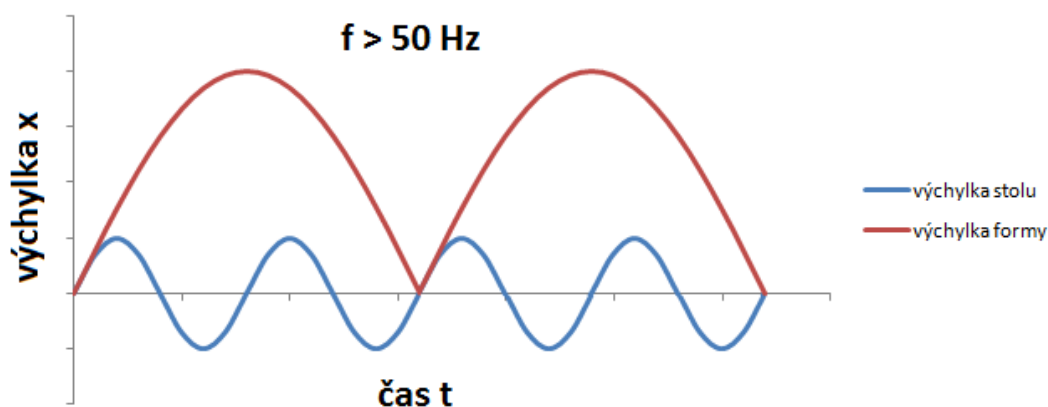
Časem vibrace je značně ovlivněna kvalita zhutnění betonové směsi. U většiny vibrolisů se tato veličina pohybuje v rozmezí 3 – 5 sekund a je nastavitelná obsluhou stroje.

Delší čas vibrace než 5 sekund nemá na kvalitu zhutnění již téměř žádný vliv a zbytečně by byly namáhány a opotřebovávány mechanické části vibrolisu. Tento jev je způsoben změnou tlumení betonové směsi v průběhu vibrace. Na začátku vibrace je tlumení nejvyšší, s rostoucím časem tlumení klesá, až se při úplném zhutnění stane velmi malé.

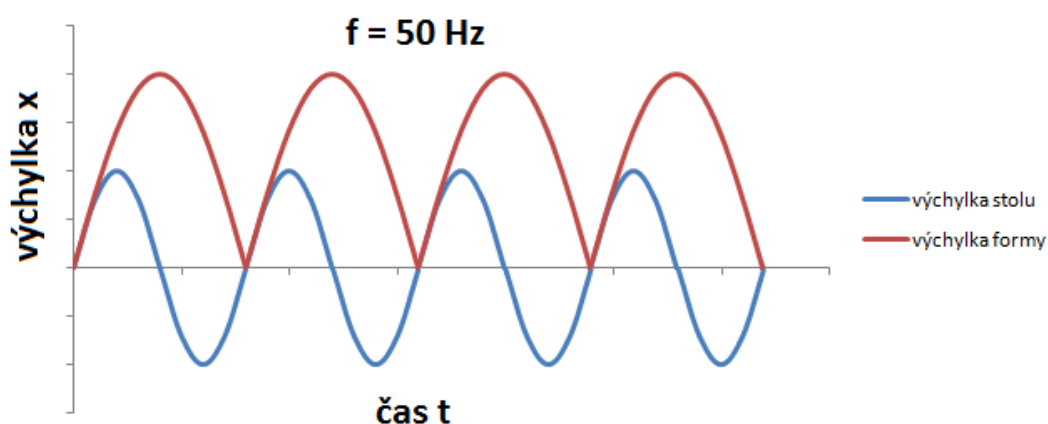
#### 1.6.8.3 Vliv frekvence buzení

Většina vibrolisů používá budiče s plynule nastavitelnou frekvencí. To zajišťují frekvenčně řízené elektromotory. Dříve se používaly budiče se stálou frekvencí 50Hz. U vyšších frekvencí se ale obtížněji nastavuje okamžik, kdy

vibrační lišta narazí do podložky. Je to proto, že s rostoucí frekvencí se zkracuje doba periody výkmitu stolu a vibračních lišt. V době, kdy podložka s formou odlehnou od vibračních lišt (okamžik, kdy podložka s formou nemá kontakt ani s vibračními, ani dorazovými lištami), proběhne několik cyklů stolu s vibračními lištami (viz Obrázek 9 a Obrázek 10). Proto se může stát, že při vyšších frekvencích se prodlouží doba nutná pro správné zhutnění směsi.



Obrázek 9 Kmity stolu a formy pro frekvence větší než 50Hz  
Zdroj Synáč V. [63]



Obrázek 10 Kmity stolu a formy pro frekvence rovné 50Hz  
Zdroj Synáč V. [63]

Tato práce se nezabývá problematikou buzení, ale je nutné tuto problematiku zmínit k úplnosti řešeného tématu.

### 1.6.9 Výroba betonového zboží (dlažby) na karuselových lišech a stacionárních vibrolisech

Následující informaci o výrobě byla převzata a upravena od Hely [66] a společnosti Longinottigroup [69]. Použitá grafická znázornění byla převzata od Mrkvici [65], Meluzína a Říhy [67]. Postup výroby betonové dlažby je soubor jednotlivých procesů a zásad, které je nutno dodržovat, aby výsledná dlažba měla

požadované parametry. V této části textu budou popsány jednotlivé kroky od samotného dávkování surovin, po jejich homogenizaci a následné hutnění.

#### 1.6.9.1 Dávkování surovin

Betony používané k vibrolisování jsou koncepčně suché směsi, z toho důvodu se využívá regulačního dávkování. Jako první se do míchačky přivádí jemné a hrubé kamenivo, následně se přidává barevný pigment, pokud je v receptuře, cement, příměsi a část záměsové vody. Následuje dávkování plastifikační přísady a další části vody, kterou se propláchlo dávkovací zařízení na plastifikátor. Nakonec se přidává ještě konečná dávka vody, aby bylo dosaženo požadované konzistence.

Dávkování je možné provádět:

- hmotnostně - je přesnější a spolehlivější než objemové, doporučuje se. Využívá se při dávkování kameniva, cementu, vody, přísad.
- objemově – je méně přesné, využívá se při dávkování vody a tekutých přísad

Dávkování jednotlivých materiálů musí být provedeno s definovanou přesností, která je uvedena v normě ČSN EN 73 2400 - Provádění a kontrola betonových konstrukcí [61]. U kameniva, cementu a vody by neměla být větší odchylka než 3 % od hodnoty předepsané v řešené receptuře. U tekutých přísad je maximální odchylka 5 %.

Výše uvedeným požadovaným přesnostem vyhovuje pouze hmotnostní dávkování, jedinou výjimkou je objemového dávkování vody a tekutých přísad. Správné dávkování je hlavním základním předpokladem výroby kvalitních betonů stejných vlastností a následně kvalitních dílců po celou dobu výroby.

Kamenivo je do míchačky dopravováno ze zásobníků pásovými dopravníky a elevátory. Vážení bývá často tenzometrické přímo na pásových dopravnících. Zvláštní pozornost si zaslouží navažování kameniva drobné frakce 0-4 mm, kde může obsahovat velké množství vlhkosti, které by mohlo nepříznivě ovlivnit vodní součinitel. U vibrolisovaných výrobků je zásadně potřeba dosáhnout suché směsi čerstvého betonu, takže kontrola vlhkosti surovin je velmi důležitá. Jedním z efektivních řešení může být změna množství záměsové vody v závislosti na vlhkosti jemné frakce - písku.

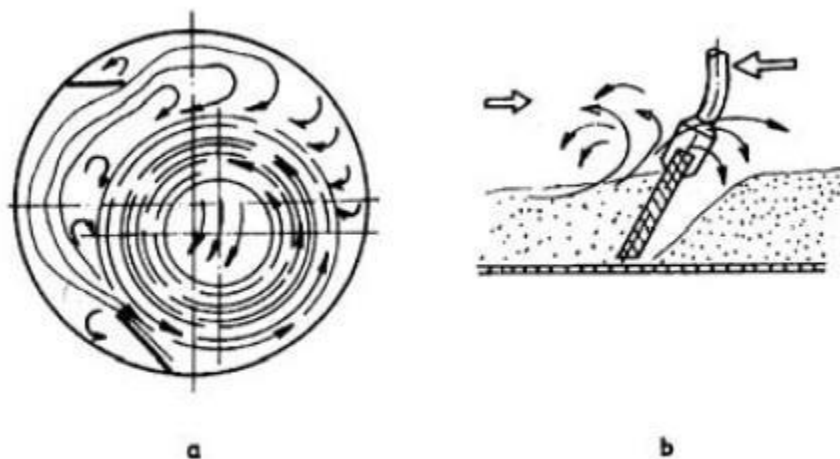
Cement je dopravován ze sil šnekovými dopravníky. Zde je stejný způsob dávkování jako u kameniva, tzn. dávkování probíhá hmotnostní metodou a nejvhodnější je odvažování pomocí tenzometrických vah, které jsou nejpresnější. Záměsová voda je dopravována z vodovodu potrubím a odvažována pomocí tenzometrických vah. Samotné dávkování vody nemusí být jen

hmotnostní ale také objemové, případně průtokové. Průtokové dávkování za určitých podmínek nemusí splňovat podmínky přesnosti dávkování.

Přísady bývají dávkovány v tekuté formě a většinou ve velmi malém množství. Dávkování přísad se pohybuje v rozmezí mezi 0,2 - 2,0 % z hmotnosti cementu. Vzhledem k tomu, že jde o velmi malé množství, bývá často přísada smíchána s částí záměsové vody, aby se dosáhlo požadované účinnosti přísady.

### 1.6.9.2 Míchání betonu

Zásadním úkolem míchání je výroba betonové směsi, vytvořená dokonalým promícháním základních složek betonové směsi (pojivo - cement, plnivo – kamenivo a záměsová voda) a vedlejších složek (přísady a příměsi). Míchání betonu se provádí v míchačkách s nuceným oběhem, které jsou většinou opatřeny pohyblivými a stíracími lopatkami. Funkce stíracích lopatek je odstranění čerstvé betonové směsi ze stěn a dna. Pohyblivé mísící lopatky tzv. mixery, které se otáčejí kolem své osy, promíchávají betonovou směs. Při výrobě dvoubarevného zboží (např. dlažby), jsou v procesu výroby dvě míchačky. První větší míchačka se používá standardně pro větší objemy, tzn. pro míchání betonu do jádrové vrstvy výrobku. Druhá menší míchačka se používá pro menší objemy, tzn. pro míchání barevného betonu do nášlapné - pohledové vrstvy. Standardní způsob vyprazdňování míchaček je ze spodu míchačky, kdy dojde k odsunutí části dna pomocí hydraulických válců.



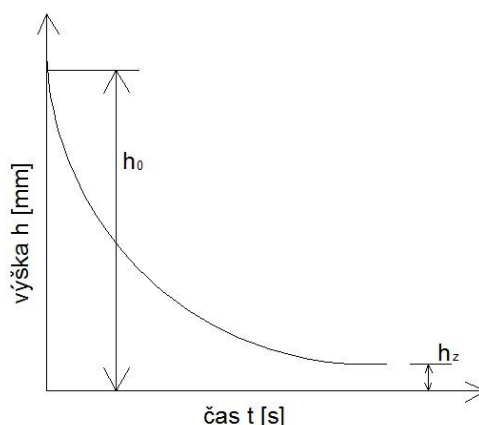
Obrázek 11 Pohyb míchané směsi v míchačkách  
a - horizontální; b - vertikální  
Zdroj [65]

### 1.6.9.3 Tváření výrobku na vibrolisu

Tváření výrobku je velmi důležitý proces, při kterém výrobek dostává svůj konečný tvar, jakost a výsledný vzhled.

## Princip zhutňování

Základním principem zhutňování je dosáhnout co nejmenší mezerovitosti výrobku, tudíž co největší hutnosti, která má pozitivní dopad na trvanlivost výrobku. Eliminací vzduchových pórů dostává beton větší odolnosti vůči nasákavosti, a tím pádem je i více odolnější vůči mrazu. Obecně také platí, že čím je beton hutnější, tím jsou i větší pevnosti. U dokonalého zhutnění betonu se dá docílit velmi nízké pórovitosti.



Obrázek 12 Graf průběhu zhutňování a změny mezerovitosti  
Zdroj Meluzín O. - Říha J. [67]

Z grafu (Obrázek 12) lze vyčíst, že po zhutnění betonu za určitý čas dojde k poklesu výšky z  $h_0$  na  $h_z$ , toto je způsobené vlivem vypuzení vzduchu z matrice betonu a změnou mezerovitosti.

## Metoda vibrolisování

Vibrolisování je typ zhutňování, při kterém je směs betonu hutněna vibracemi za současného přítlaku lisovací desky ze shora. Jedná se o výhodný typ hutnění, který odstraňuje většinu nevýhod samotného hutnění lisováním nebo vibrováním.

Samotné hutnění spočívá v tom, že je na horní povrch betonu přiložen vibrační štít, který zároveň působí jako lis. Vibracemi se jednotlivá zrna rozkmitají v závislosti na své velikosti a hmotnosti a snaží se zaujmout co nejstabilnější polohu. Při tomto jevu beton mění svoji konzistenci do polotekutého stavu. Jelikož použité betony bývají suchých konzistencí (V0,V1), je nutné používat vibrace s kombinací dolisovacího tlaku. Účelem dolisovacího tlaku je, aby se cementový tmel dostal do všech mezer mezi kamenivem, a zároveň byla vytlačena nadbytečná voda ze zhutněného výrobku. Přítlak – dolisovací tlak může být aktivní nebo pasivní. Při aktivním přítlaku působí dolisovací deska i s osazenými budiči vibrace, zde je však nutno zamezit vzájemnému sladění frekvencí budičů na dolisovací desce a budičů umístěných ze spodu formy. V opačném případě by mohla nastat situace, že by nedocházelo k vibrování. Při pasivním přítlaku působí pouze dolisovací deska. Dolisovací tlak nemusí být s ohledem na existenci vibrací

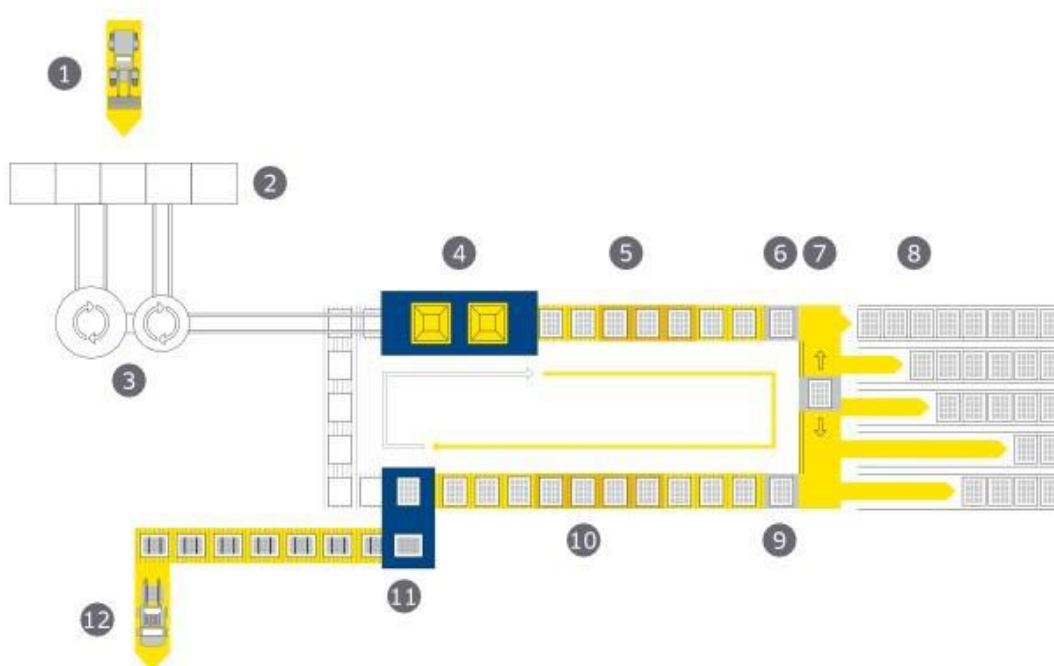


velký. Pohybuje se v jednotkách do 10 kPa a je vyvozen hydraulickou cestou. U vibrací je nutno nastavit ideální dobu vibrace, aby bylo ztuhnutí co nejúčinnější z důvodu energetické náročnosti tohoto procesu a zároveň by časově dlouhá vibrace prodloužila i výrobní takt linky a zvýšila by se doba nepříjemného hluku, který působí negativně na okolní prostředí.

Při výrobě drobného betonového zboží jsou standardně používány dva typy vibrolisů:

- stacionární vibrolis
- karuselový vibrolis

#### Stacionární vibrolis

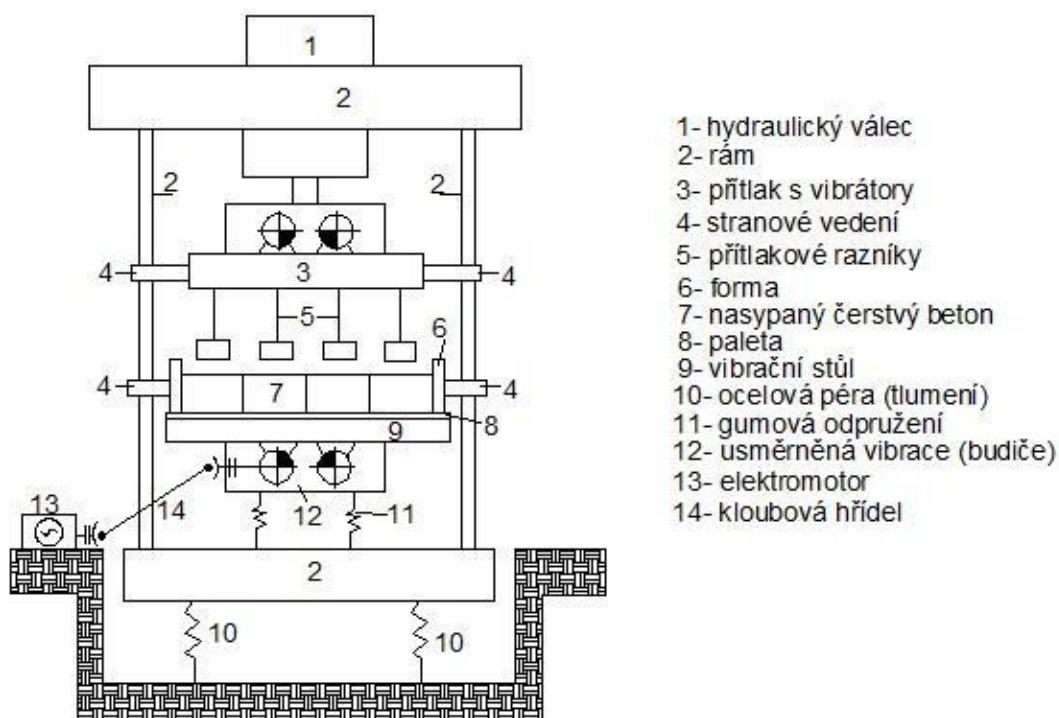


Obrázek 13 Schéma způsobu výroby betonové dlažby na stacionárním vibrolisu  
Zdroj stránky společnosti Masa - group [68]

1 - dodávka surovin; 2 - zásobní síla, dávkovací linka; 3 - betonárna; 4 - stacionární vibrolis; 5 - kontrola kvality výrobků; 6 - výtah; 7 - transport stohovacího zařízení; 8 - vytvrzovací komory; 9 - vykladač výrobků z vytvrzovacích komor; 10 - kontrola kvality výrobků; 11 - balicí linka; 12 - transport hotových výrobků.

Komentář a obrázky k vibrolisu a jeho popis byl převzat a upraven od společnosti Masa – group [68] a Hely [66]. Tento typ vibrolisu dokáže vyrobit za jeden výrobní cyklus více betonových prvků najednou. Délka jednoho výrobního cyklu se pohybuje v rozmezí od 20 s do 40 s. Tváření výrobku probíhá pomocí výrobních (nejčastěji ocelových) forem o ploše 0,75 m<sup>2</sup> - 1,1 m<sup>2</sup>, které jsou uloženy a přikotveny pomocí hydraulických nebo pneumatických zámků, na dřevěných nebo ocelových podložkách. Čerstvá betonová směs je z násypky

dopravena do forem pomocí zavážecích vozíků. V dnešní době se většinou vyrábí dlažba dvouvrstvá, z tohoto důvodu mají vibrolisy dvě násypky, zvláště pro beton na jádrovou vrstvu a nášlapnou vrstvu, a dva zavážecí vozíky. Nejprve se forma naplní betonem pro jádrovou vrstvu s hrubší frakcí kameniva (do 11 mm) do definované výšky. Výška plnění bývá o něco větší, než je výška forem z toho důvodu, že před zhutněním (často jen spodní vibrací) se částečně dostane z čerstvého betonu vzduch s výsledným poklesem výšky betonové vrstvy. V další fázi se nanese nášlapná (pohledová) vrstva, tvořená kamenivem drobné frakce (do 2 mm) a poslední finální fází je spuštěna vibrace za současného dolisovacího tlaku. Výrobek dosahuje ihned po dokončení vibrolisování manipulačních pevností v tlaku, takže se ihned odformovává a je na tvářecí podložce přemístěn po válečkové nebo řetězové dráze do stohovacího vozu, který po zaplnění své kapacity zajíždí do vytvrzovacích komor, kde výrobky před dalšími operacemi nabývají mechanických vlastností (pevností v tlaku) po dobu 1 až 2 dnů. Ve vytvrzovacích komorách musí být dosaženo vlhkosti vzduchu minimálně 80 %, neboť je nutné zajistit ošetření čerstvého výrobku, který má po vylisování velmi malé procento vody. Tato přijatá vlhkost - voda je potřebná při procesu nabývání pevností v tlaku.



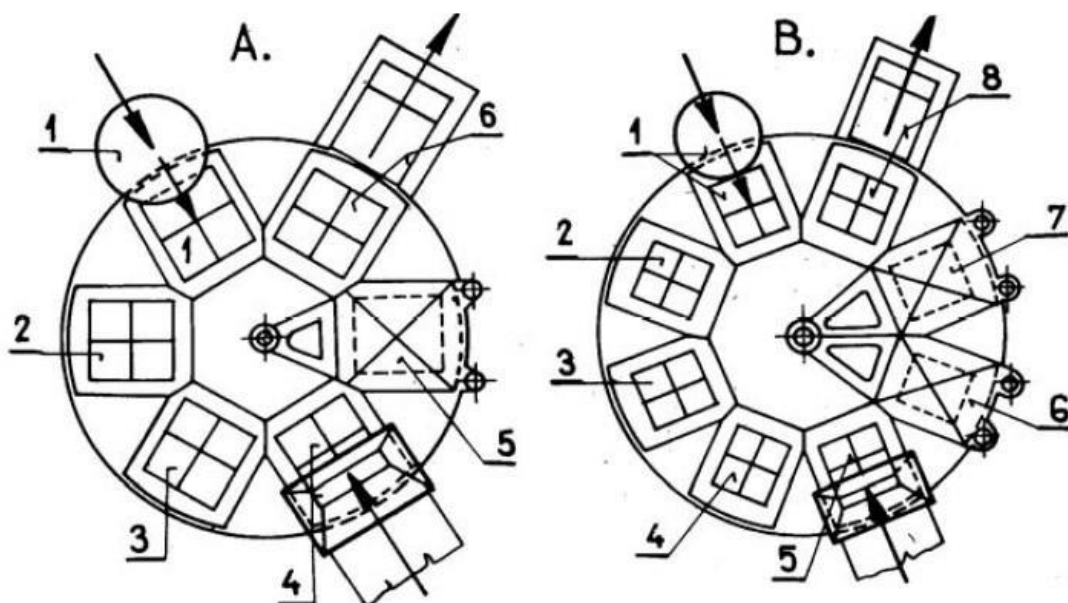
Obrázek 14 Schéma stacionárního vibrolisy  
Zdroj Meluzín O. - Říha J. [67]

### Karuselový vibrolis

Tento typ vibrolisu se využívá jak pro jednovrstvou, tak i dvouvrstvou dlažbu, má ale jinou technologii výroby a nižší výkony (50 - 250 m<sup>2</sup>/h) než stacionární vibrolis. Vibrolis se skládá ze 4 - 8 postů, na kterých se vždy provádí daná

operace. Po provedení dané operace se karuselový stůl pootočí o jedno místo. Na prvním postu se při výrobě dvouvrstvých dlažeb dávkuje jemnozrná (pohledová) vrstva betonu (u stacionárních vibrolisů je tento postup opačný, začíná se jádrovou vrstvou). Dojde k pootočení na druhý post, kde se tato vrstva nepříliš intenzivně zhutní pomocí spodní vibrace, aby se čerstvý beton rovnoměrně rozprostřel po celé ploše formy, a stůl se pootočí na třetí post, kde se nadávkuje a pomocí „rozprostírače“ rozetře hrubozrná velmi suchá jádrová směs. Stůl se pootočí na čtvrtý post, kde se beton předlisuje tlakem do 20 MPa a odlehčí se z důvodu odchodu vzduchu. Na pátém postu je beton vystaven vysokotlakému lisování v hodnotách 40 až 60 MPa. Po ukončení vylisování jsou výrobky ihned odformovány a pomocí hydraulického zařízení jsou výrobky přeneseny na podložky, kterými se zaplní zavážecí vozíky. Tyto vozíky následně jako u stacionárních vibrolisů zajíždí do zracích komor.

Touto technologií výroby lze vyrábět dlažby hladké, barevné, reliéfní, vymývané, broušené, teracové, tryskané, broušeno-tryskané nebo curling. Takto vyrobené dlaždice bývají velikostí například 30 x 30; 40 x 40; 40 x 60 cm o tloušťce 40 až 60 mm, nebo velkoformátové plošné dlažby 80 x 60; 80 x 80; 105 x 50 cm, tloušťky 100 mm, tyto jsou vhodné pro pochozí plochy, ale i pro těžší provoz.



Obrázek 15 Způsob vytváření teracových dlaždic na karuselovém lisu  
Zdroj Hela R. [66]

A) Vibrolis sestávající se z 6 postů: 1 - dávkování teracového betonu; 2 a 3 - zhutňování teracového betonu spodní vibrací; 4 - plnění podkladní jádrové vrstvy; 5 - vibrolisování ve dvou fázích (nízkotlaké, vysokotlaké); 6 - odběr dlaždic.

B) Vibrolis sestávající se z 8 postů: 1 - dávkování teracového betonu; 2 až 4 - spodní vibrace teracového betonu; 5 - plnění podkladní jádrové vrstvy; 6 - předlisování za vibrace; 7 - vysokotlaké vibrolisování; 8 - odběr dlaždic.

## **1.7 Vibrolisované výrobky a požadavky na ně**

Mezi nejčastější sortiment vibrolisovaných prvků patří: dlažební bloky, zatravnovací tvarovky, dlažební desky, obrubníky, palisády, plotové prvky, tvarovky opěrných stěn, zdící tvárnice, atd.

Zde jsou uvedeny jednotlivé dnes vyráběné vibrolisované prvky, distribuované na českém trhu včetně požadavků na vlastnosti u těchto výrobků dle příslušné harmonizované normy s požadavky technické specifikace.

### **1.7.1 Betonové dlažební desky**

Harmonizovaná norma: ČSN EN 1339:2004 Betonové dlažební desky – Požadavky a zkušební metody [70]

Požadavky:

- Dovolené odchylky rozměrů [mm]: ČSN EN 1339:2004 čl. 5.2.4
- Odolnost vůči povětrnostním vlivům: ČSN EN 1339:2004 čl. NA. 4.1.1 (ČSN 73 1326/Z1, metoda A)
- Pevnost v ohybu: ČSN EN 1339:2004 čl. 5.3.3
- Odolnost proti obrusu: ČSN EN 1339:2004 čl. 5.3.4 (příl. H)
- Odolnost proti smyku/skluzu: ČSN EN 1339 čl. 5.3.5

### **1.7.2 Betonové obrubníky**

Harmonizovaná norma: ČSN EN 1340:2004 Betonové obrubníky – Požadavky a zkušební metody [71]

Požadavky:

- Dovolené odchylky rozměrů [mm]: ČSN EN 1340 NA. 3.1
- Odolnost vůči povětrnostním vlivům: ČSN EN 1340, NA. 4.1.1 (ČSN 73 1326/Z1, metoda A)
- Pevnost v ohybu: ČSN EN 1340 čl. 5.3.3
- Odolnost proti obrusu: ČSN EN 1340 čl. 5.3.4 (příl. H)
- Odolnost proti smyku/skluzu: ČSN EN 1340 čl. 5.3.5

### **1.7.3 Prvky opěrných stěn**

Harmonizovaná norma: ČSN EN 15258:2008 Betonové prefabrikáty – Prvky opěrných stěn [72]

Požadavky:

- Pevnost betonu v tlaku - Beton C 30/37: ČSN EN 15258:2008
- Mezní pevnost v tahu a mez kluzu oceli B 500A: ČSN EN 15258:2008
- Únosnost nebo mechanická pevnost výpočtem: ČSN EN 15258:2008

- Odolnost proti korozi: ČSN EN 15258:2008
- Odolnost povrchu proti účinkům CHRL: ČSN 731326/Z1, metoda A [73]

#### **1.7.4 Betonové tvárnice**

Harmonizovaná norma: ČSN EN 771-3:2011 Specifikace zdících prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem [74]

Požadavky:

- Rozměrová tolerance, (kat. D1): ČSN EN 771-3:2011 čl. 5.2.2
- Objemová hmotnost: ČSN EN 771-3:2011 čl. 5.4
- Pevnost v tlaku průměrná, kolmo na ložnou plochu, vztaženo na celkovou plochu, kategorie I: ČSN EN 771-3:2011 čl. 5.5.1
- Mrazuvzdornost: ČSN EN 771-3:2011 čl. 5.7
- Nasákavost: : ČSN EN 771-3:2011 čl. 5.8
- Propustnost vodních par: ČSN EN 771-3:2011 čl. 5.10
- Reakce na oheň: ČSN EN 771-3:2011 čl. 5.11
- Přídržnost (stanovená hodnota): ČSN EN 771-3:2011 čl. 5.12
- Hmotnostní aktivita 226Ra a Index hmotnostní aktivity: Vyhláška 307/2002 Sb. ve znění vyhl. č. 499/2005 Sb. [75]
- Ekvivalentní tepelná vodivost: ČSN EN 771-3:2011 čl. 5.6

#### **1.7.5 Bednicí tvárnice**

Harmonizovaná norma: ČSN EN 15435:2009 Betonové prefabrikáty - Bednicí tvárnice z obyčejného a lehkého betonu - Vlastnosti výrobku [76]

Požadavky:

- Rozměrová tolerance: ČSN EN 15435 čl. 4.4.1
- Objemová hmotnost: ČSN EN 15435 čl. 4.5
- Pevnost v tlaku průměrná, kolmo na ložnou plochu, vztaženo na celkovou plochu, kategorie I: ČSN EN 15435 čl. 4.9.1
- Pevnost bočnic v ohybu: ČSN EN 15435 čl. 4.9.3
- Mrazuvzdornost: ČSN EN 15435 čl. 4.13
- Nasákavost: ČSN EN 15435 čl. 4.12
- Propustnost vodních par: ČSN EN 15435 čl. 4.8
- Reakce na oheň: ČSN EN 15435 čl. 4.7
- Hmotnostní aktivita 226Ra a Index hmotnostní aktivity: Vyhláška 307/2002 Sb. ve znění Vyhl. č. 499/2005 Sb. [75]

#### **1.7.6 Dílce pro studny**

Harmonizovaná norma: ČSN EN 1917:2004 Vstupní a revizní šachty z prostého betonu, drátkobetonu a železobetonu [77]

Požadavky:

- Pevnost betonu v tlaku: ČSN EN 1917 čl. 4.2.2
- Únosnost ve vrcholovém tlaku: ČSN EN 1917 čl. 4.3.5
- Únosnost ve svislém směru: ČSN EN 1917 čl. 4.3.6
- Nasákavost betonu: ČSN EN 1917 čl. 4.2.7
- Obsah chloridů v betonu: ČSN EN 1917 čl. 4.2.6

### **1.7.7 Prvky pro ploty**

Harmonizovaná norma: ČSN EN 12839:2012 Betonové prefabrikáty – Prvky pro ploty [78]

Požadavky:

- Pevnost betonu v tlaku: ČSN EN 12839 čl. 4.2
- Mezní pevnost oceli v tahu: ČSN EN 13369 čl. 4.1.3 [79]
- Mez kluzu oceli: ČSN EN 13369 čl. 4.1.4
- Únosnost: ČSN EN 12839 čl. 4.3.3
- Trvanlivost (mrazuvzdornost): ČSN EN 12839 čl. 4.3.7 (ČSN 731322)

## **1.8 Shrnutí charakteristiky vibrolisovaných prvků a problém realizace vibrolisovaných prvků**

Z výše uvedených rešerší je zřejmé, že návrh směsi pro vibrolisované prvky je závislý na konkrétním zařízení, tzn. typu vibrolisu, nastavení intenzity vibrací, frekvence vibrací, počtu a typu budičů, času vibrace, intenzitě a velikosti rázu, frekvence a velikost budící síly.

### **1.8.1 Neoficiální informace z výroby vibrolisovaných výrobků**

Na českém trhu bylo osloveno několik výrobců a dodavatelů vibrolisovaných prvků s žádostí po spolupráci na výzkumu. Během této práce byly zjištěny postupy výroby prvků, ale striktně bylo jednotlivými společnostmi zakázáno použití jejich know-how v publikační činnosti.

Obecně lze shrnout poznatky z neoficiální rešeršní činnosti u výrobce s francouzským vibrolisem následně a jsou zde uvedeny i rozdíly oproti jiným evropským výrobcům.

#### **Rozdíly mezi výrobcí vibrolisů**

- Jde zejména o usměrněnou vertikální vibraci na vibračním stole (francouzští výrobci). Na rozdíl od německých výrobců, kde je vibrace všesměrná (tedy i horizontální).
- Umístění motorů vibrátoru mimo rám a jejich nezávislé napojení na vibrátory. Tím je dané menší zatížení motorů a též jejich menší opotřebení.

- Tuhost vibračního stolu - jeho speciálně navržená konstrukce zajišťuje rovnoměrnou vibraci po celé ploše podložky, na rozdíl od většiny německých strojů, kde všesměrná vibrace není rovnoměrná.
- Lisovací tlaky jsou malé, použití lisu je vhodné jen k dotvarování povrchů výrobků.
- Polohovací zařízení, které při ukončení vibrace „zamkne“ podložku s formou ve stabilizované poloze. Při vypnutí vibrátorů před sejmutím podložky z vibračního stolu, nedochází vlivem snížení frekvence vibrací k nežádoucím jevům – „rozházení“ směsi ve formě.
- Systém plnění je kontrolován s vysokou přesností, technologie násypek a doplňování betonu do násypek je kontrolována s pomocí laserových čidel.

### **Zásady pro výrobu vibrolisovaných výrobků**

- Pro vibrolisované prvky je nejdůležitější systém vibrace, tlak je víceméně sekundární a slouží spíše k utváření výsledných povrchů vibrolisovaných prvků.
- Vibrolisované prvky jsou značně porézní a prodyšné, přesto významně pevné.
- Trendy současné výroby ve Francii se zaměřují výhradně na tenkostěnné vibrolisované tvárnice. Ve Francii zcela nahrazují pro tradiční systém pálených cihel a pórobetonových tvárnice.
- Pro jednoduché výrobky zámkové dlažby je ve Francii (snad v EU) zakázáno použití vícevrstevných (často dvoubarevných) prvků, neboť dochází k odlupování horních vrstev.

### **Receptura pro vibrolisované prvky**

- Plnivo se skládá z frakce 4-8 mm a někdy též 0-4 mm. Osvědčené složení je 70-80 % frakce 4-8 mm a 20-30 % frakce 0-4 mm.
- Pojivo je cement (jakákoliv třída) 6-8 % z celkové hmotnosti směsi pro tenkostěnné tvárnice a až 18 % pro zámkovou dlažbu.
- Část cementu lze nahradit příměsí (do 15 %).
- Tato směs je ve stroji lisována při vibracích 35Hz a posléze 75Hz za působení tlaku.

## **1.8.2 Zásada pro experimentální část práce**

Ve spolupráci s firmou MARSTON byl konzultován návrh prototypu laboratorního vibrolisovacího zařízení a byla získána cenová nabídka. Z důvodu nedostatku finančních prostředků na katedře a v řešeném grantu nebyl zakoupen tento stroj.

Pro zkušební sérii by bylo nutné do míchacího zařízení ve vibrolisovacím zařízení přidat alkalicky aktivované přísady ručně, neboť stávající vibrolisované prvky nejsou takto doplňovány. Stávající směsi jsou tvořeny plnivem (frakce 4-8 a 0-4), pojivem (cement) a část pojiva je nahrazována příměsí (popílek).

Po dlouhém a vyčerpávajícím jednání většina výrobců odmítla poskytnout svá zařízení pro možné budoucí použití pro zkušební sérii vzorků, neboť měla pochybnost o možné kontaminaci výrobního zařízení alkalicky aktivovanou směsí. Toto omezení vyplynulo také ze striktních akreditačních či ověřovacích podmínek u jednotlivých výrobců vibrolisovaných prvků.

S ohledem na tuto skutečnost bylo nutno připravit směs na bázi alkalicky aktivovaných prvků v omezených laboratorních podmínkách s využitím lisovacího zařízení a vibračního stolu.



Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

## **2 Experimentální část**

### **2.1 Provedené experimenty a stav řešeného úkolu**

V experimentální části práce byly popsány všechny experimenty a jejich výsledky, které byly provedeny během začátku výzkumu v průběhu doktorského studia.

Experimentální část byla rozdělena do pěti základních kapitol. První je tvořena popisem metod aktivace popílku a přípravy vzorků použitých pro výrobu směsí.

V druhé části byly popsány používané materiály. Většina materiálů je používána v programu POPbeton od jeho prvopočátků a v této části byly sumarizovány jejich vlastnosti. Navíc bylo provedeno stanovení objemové hmotnosti použitého plniva, aby bylo možné s větší přesností stanovit další návaznosti.

Třetí až pátá část obsahuje sekci čistě experimentální, kdy byly popsány mechanické, reologické a další vlastnosti zkoumaných směsí a prvků. Nejdříve byly provedeny pokusy a měření na nevibrolisovaných směsích, které byly alkalicky aktivované. Toto bylo provedeno z důvodu potřeby zjištění jejich vlastností. Ve čtvrté části byla provedena měření na referenční receptuře poskytnuté jedním výrobcem vibrolisovaných prvků. V poslední, páté části, byla navržena směs na bázi alkalicky aktivovaných materiálů vycházející z předchozího výzkumu pro použití ve vibrolisovaných směsích a provedeny experimenty a základní měření a zjištění mechanických a reologických vlastností.

### **2.2 Použité metody aktivace popílku a přípravy vzorků**

Výzkum využití úletových popílků z velkých topenišť (především elektráren) probíhal a nadále probíhá ve spolupráci Katedry technologie staveb ČVUT FSv v Praze a Ústavu skla a keramiky VŠCHT v Praze od roku 2003. Navazuje na výzkum alkalicky aktivních materiálů, který již několik let probíhal v Ústavu skla a keramiky. Cílem této spolupráce je aplikace získaných výsledků výzkumu do praktického užití ve stavební praxi. Na základě alkalické aktivace úletového popílku byl vytvořen nový materiál, ve kterém jako pojivo funguje aktivovaný úletový popílek.

Aktivace popílku byla standardně prováděna temperováním popsaným u Svobody a kol. [80] bez použití regulátoru tuhnutí a za upravených podmínek byla provedena aktivace i bez temperování popsaného výše. Tato metoda je používána jako standardní postup výroby alkalicky aktivovaných směsí POPbeton®. Při výrobě betonové směsi byl použit popílek o velikosti středního zrna ověřený při pokusech s mletím Šulcem a Svobodou [80]. Tento výzkum

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

navázal na předchozí výzkum v aktivaci úletových popílků temperováním i bez temperování viz Šulc a Svoboda [81] a Váchal a Svoboda [82].

## 2.3 Popis vstupních materiálů pro výrobu zkušebních vzorků

Hlavními složkami, které byly ve výzkumu používány, byly ty, které tvoří budoucí betonovou směs. Popis používaných materiálů pro výrobu alkalicky aktivovaných směsí byl navržen a definován při předchozím výzkumu a shrnut v disertační práci Ing. Šulce [6]. Popis jednotlivých surovin v této podkapitole vychází z jeho zjištěných výsledků a výzkumu a doplňuje ho o nutné definice a charakteristiky potřebné pro další výzkum v poli alkalicky aktivovaných materiálů.

### 2.3.1 Popílek

Úletový popílek je formován jemnými částicemi. Jejich velikost je většinou dána jemností mletí před vstupem do práškového roštu. V průběhu spalování dochází k dílčímu tavení minerálních složek, které jsou v ochlazovacích komínkách rychle zchlazeny a na povrchu se vytváří sklovité fáze, jak je popsáno u Hemmingsa a Berryho [83]. Jedná se o křemičitohlinitanové sklo, u něhož je obsah krystalické fáze 10 – 15 %. Celkově úletový popílek obsahuje 80 % skelné fáze, 8 % mulitu, 5 % křemene, až 2 % hematitu, někdy i 2 – 3 % uhlíku. Ostatní fáze jsou skoro zanedbatelné [84]. Snímky popílku z teplárny a elektrárny Opatovice realizované na elektronovém mikroskopu na popílku z elektrárny teplárny Opatovice prezentují typickou strukturu.

Jako základní vstupní surovina pro betonovou směs byl použit popílek z teplárny a elektrárny Opatovice, který byl navržen jako reprezentativní materiál pro kompletní program POPbeton. Hlavní příčinou výběru tohoto popílku je jeho naturalita, tzn. jedná se o hnědouhelný popílek, který v České republice tvoří naprostou většinu produkce, přibližně se jedná o 80 % [85]. Navíc jeho složení jak z chemického hlediska, tak z hlediska fyzikálních vlastností zůstávalo v průběhu různých odběrů neměnné.

Chemické složení bylo analyzováno na přístroji ARL 9400 – XRF spectrometer, na VŠCHT v Praze. Chemické složení popílku použitého v programu POPbeton je v tabulce (Tabulka 1) a celkové poměry v kompozici jsou v tabulce (Tabulka 2).

Tabulka 1 Chemické složení popílku

Složení popílku Opatovice [%]			
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO
0,5285	0,3184	0,00359	0,0176

Zdroj: Vlastní zpracování

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

*Tabulka 2 Celkové poměry v kompozici*

SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> / Na <sub>2</sub> O	CaO / SiO <sub>2</sub>
1,9967	6,5767	0,0277

*Zdroj: Vlastní zpracování*

### 2.3.2 Alkalický aktivátor – vodní sklo

V literatuře popsane případy uvádějí jako aktivátor reakce křemičitan sodný - Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> nebo draselný – K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, tzn. sodné nebo draselné vodní sklo, a dále hydroxid sodný – NaOH či hydroxid draselný – KOH. Vzhledem k výrobním procesům byly vybrány sodné aktivátory, které byly výrazně levnější, jak uvádí Žamborský [90], než ty draselné, a navíc s nimi bylo dosaženo lepších výsledků při aktivaci popílků, jak uvádějí také Fernández-Jiménez a Palomo [91] či Šulc a Svoboda [92]. Proto se tato práce dále zaměřila jen na použití sodných aktivátorů.

Základní surovinou pro výrobu tohoto syntetického silikátu je oxid křemičitý, který je získáván nejčastěji ze sklářského písku (SiO<sub>2</sub>, 70-75 %).

Vzniklá kyselina křemičitá je tekutá jen za určitého pH. Po jeho snížení dochází k vylučování gelu a tvrdnutí vodního skla.

Vodní sklo bylo použito jako aktivátor aktivace popílku. Jeho hodnoty byly pravidelně v průběhu provádění experimentů kontrolovány, aby nedocházelo k výkyvům zejména z důvodů vysychání.

### 2.3.3 Hydroxid sodný

Hydroxid sodný – NaOH je silně zásaditá anorganická sloučenina. V současné době je veškerý hydroxid sodný vyráběn elektrolytickým rozkladem roztoku chloridu sodného NaCl (solanky), přičemž vedlejším produktem elektrolýzy je vzniklý plynný chlór. Pro zamezení zpětné reakci chlóru s vzniklým hydroxidem jsou používány tři různé metody: 1) amalgamová metoda, 2) diafragmová metoda a 3) membránová metoda.

Finálním produktem průmyslové prvovýroby je vodný roztok obsahující 50 % NaOH, jak uvádí Spolana a.s. [93]. Tento roztok je možné dále upravovat, např. k odvodňování a zpracování do formy peciček, granulí nebo lístků. Takto připravený pevný NaOH je používán především v chemických laboratořích jako produkt pro čištění odpadů nebo ve farmaceutickém průmyslu.

Aktivátorem zaručujícím v aktivačním roztoku dostatečně vysoké pH byl hydroxid sodný, který byl zvolen jako etalon. Hydroxid sodný byl používán jako roztok, ale též v pevném skupenství ve formě peciček či kuliček.

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

### 2.3.4 Plnivo

Pro výrobu POPbetonu bylo uvažováno s použitím plniva, které je běžně používáno v cementových betonech a celý program byl zaměřen pouze na použití kameniva. Podle zavedené „betonářské“ terminologie byly odlišeny AAFA pasty a kaše, AAFA malty (plnivo do velikosti zrna 4 mm) a AAFA beton – POPbeton (s plnivem do velikosti zrna 22 mm). Zkratka AAFA, anglicky alkali activated fly ash, vyjadřuje suroviny na bázi alkalicky aktivovaného úletového popílku. Samotné kamenivo je v ČR definováno podle ČSN EN 206-1 [86]. Veškeré kamenivo použité pro přípravu betonu bylo deklarováno podle ČSN EN 12620 jako kamenivo do betonu. Tato norma je však pouze deklarační a nikoli hodnotící. Při výrobě AAFA betonů byly používány pro návrh množství kameniva a složení jednotlivých frakcí stejné zásady a postupy jako u cementových betonů.

Pro přípravu betonů bylo použito jemné kamenivo těžené jedné frakce 0 - 4 mm z lokality Dobříň. Pro výrobu betonů bylo také použito drcené kamenivo z kamenolomu Zbraslav frakce 4 - 8 mm a 8 - 16 mm.

### 2.3.5 Přísady a příměsi

Přísady a příměsi do betonu jsou v ČR ale i v Evropě definovány normou ČSN EN 206-1. V této normě je uvedeno, že: „přísada (admixture) je materiál, který upravuje vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého betonu, přidávaný během míchání betonu v malém množství v poměru ke hmotnosti cementu“ a dále že „příměs (addition) je práškový materiál, který se přidává do betonu za účelem zlepšení určitých vlastností nebo k docílení speciálních vlastností betonu.“

**Přísady** – lze definovat jako látky, které jsou přidávány během míchání do betonu v malých množstvích, nejčastěji od 0,2 % do 5 % v poměru na hmotnost cementu. Jejich účelem je modifikace vlastností čerstvého nebo tvrdnoucího betonu. Jejich množství je obecně malé a musí být respektováno, zejména nesmí dojít k překročení horního limitu pro jejich použití. Přísady lze dělit podle toho, jaké vlastnosti betonu jsou jimi upravovány:

- vodoredukující - nahrazují v betonu „technologickou vodu“, která je potřebná pro dosažení požadované konzistence betonu, tyto se ještě dělí na:
  - plastifikační
  - superplastifikační
- stabilizační – přísady zabraňující segregaci kameniva v betonech s vyšším stupněm konzistence
- provzdušňovací – vytváří v betonu malé uzavřené póry a tím snižuje množství otevřených pórů a zvyšuje odolnost proti zmrazovacím cyklům a při zkouškách odolnosti proti CHRL
- urychlující tuhnutí – pro použití při výrobě betonu v zimním období

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

- urychlující tvrdnutí – pro použití při výrobě betonu v zimním období
- zpomalující tuhnutí – používají se hlavně pro zajištění dostatečné doby na transport a zpracování betonu u transportbetonů
- těsnící a hydrofobizační – používají se k dosažení vodonepropustnosti betonů tzv. vodotěsných betonů nebo k povrchovým nátěrům betonů, které zamezují vnikání vody do betonu
- ostatní – ostatní příměsi, které nemají tak široké spektrum uplatnění, mezi tyto příměsi patří biocidní, pěnotvorné, plynotvorné a adhezní přísady.

Pro použití v navrhovaných betonových směsích byly z přísad použity výhradně vodoredukující (plastifikační a superplastifikační) a provzdušňující. Vodoredukující přísady měly za úkol zlepšit zpracovatelnost AAFA past a betonů, které se odlišují naturalitou od cementových betonů. Připravená AAFA pasta či beton mají lepivou až „medovitou“ konzistenci, kterou je potřebné upravit tak, aby hmota byla zpracovatelná podobným způsobem, jako jsou cementové pasty a betony.

Provzdušňující přísadou použitou v experimentech byl:

- Glenium ACE 40 - Superplastifikátor druhé generace polymerů polykarboxyetherů, který má všeobecné použití. Jeho doporučené dávkování pro cementové betony osciluje v rozmezí 0,6 - 1,0 % na množství cementu.

Pro výrobu betonů byla použita tato superplastifikační přísada:

- MICRO-AIR 114 DE (Mischöl LP 75) - Koncentrát provzdušňovací přísady pro maltu a beton. Má stejné použití jako MICRO-AIR 125, má však odlišnou koncentrací. Doporučené dávkování je pohybuje 0,05 – 0,3 % na množství cementu.

**Příměsi** – jedná se o jemné anorganické nebo organické látky, které se dodávají do betonu za účelem zlepšení jeho vlastnosti nebo dosažení jiné požadované vlastnosti. Množství příměsi v betonu je procentuálně vyšší než u přísad, obvykle se pohybuje v rozmezí 5 % – 20 %. Je nutné započítat jejich množství do betonu při výpočtu obsahu složek. Dle ČSN EN 206-1 se příměsi dělí na dva typy.

- Typ I: Téměř inertní příměsi, například filery (kamenná moučka, jemně mletý vápenec) dle ČSN EN 12620 nebo pigmenty dle ČSN EN 12878.
- Typ II: Pucolány nebo latentní hydraulické příměsi, například popílek do betonu dle ČSN EN 450-1 [87], křemičitý úlet dle ČSN EN 13263 [88] nebo struska dle ČSN EN 15167-1 [89].

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

Pro výrobu betonových směsí v programu POPbeton ani při dalších experimentech nebyly využity příměsi.

### 2.3.6 Měření objemové hmotnosti kameniva

Na vzorcích popílkového betonu byla měřena objemová hmotnost kameniva. Objemová hmotnost kameniva byla měřena ve třech stavech: sypaná, sypaná v setřeseném stavu a objemová ve vodě. K měření byl použit odměrný válec, kalibrovaná váha a vibrační stolek. Výsledky měření byly následně zaznamenány.

Objemovou hmotnost kameniva 0-4 ukazuje Tabulka 3.

*Tabulka 3 Objemové hmotnosti použitého kameniva 0 - 4*

frakce	0-4	objem. hmotnost g/ml
sypaná		1,667
sypaná v setřeseném stavu		1,837
objem. ve vodě		2,561

*Zdroj: Vlastní zpracování*

Objemovou hmotnost kameniva 4-8 ukazuje Tabulka 4.

*Tabulka 4 Objemové hmotnosti použitého kameniva 4 - 8*

frakce	4-8	objem. hmotnost g/ml
sypaná		1,455
sypaná v setřeseném stavu		1,598
objem. ve vodě		2,611

*Zdroj: Vlastní zpracování*

Objemovou hmotnost kameniva 8-16 ukazuje Tabulka 5.

*Tabulka 5 Objemové hmotnosti použitého kameniva 8 - 16*

frakce	8-16	objem. hmotnost g/ml
sypaná		1,432
sypaná v setřeseném stavu		1,650
objem. ve vodě		2,608

*Zdroj: Vlastní zpracování*

Výpočet objemové hmotnosti použitého kameniva slouží k následnému ověření celkové objemové hmotnosti betonové směsi. Průměrná objemová hmotnost používaného kameniva je přibližně 2,59 t/m<sup>3</sup>.

## 2.4 Provedená měření a experimenty na nevíbrolisovaných směsích

### 2.4.1 Výroba vzorků nevíbrolisovaných prvků

Pro porovnávací zkoušky byl použit popílek z teplárny v Opatovicích, který byl používán v programu POPbetonu® jako standardní pojivo. Jako plnivo bylo

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

použito kamenivo ze tří frakcí (0/4 Dobříň, 4/8 Zbraslav a 8/16 Zbraslav). Aktivátorem popílku bylo vodní sklo sodné a hydroxid sodný. Vytvořená záměs byla plněna do forem a vibrována po dobu 1 min. Měření pevností bylo prováděno na tělesech 100 x 100 x 100 mm v hydraulickém lisu.

Standardní složení záměsi je dáno v tabulce (Tabulka 6).

*Tabulka 6 Složení záměsi POPbetonu*

Složení záměsi POPbetonu						
Popílek [kg]	Kamenivo [kg]	Vodní sklo [kg]	NaOH [kg]	Voda [l]	Superplastifikátor [kg]	w
17,49%	73,37%	5,42%	1,27%	2,10%	0,35%	0,413

*Zdroj: Vlastní zpracování*

Navážené a připravené složky byly zpracovány dle následujícího postupu za průběžného míchání v míchačce RUBY MIX 50 l s upraveným míchadlem. Prvním bodem bylo smíchání různých frakcí kameniva a přidání smáčecí vody. Po promíchání byl přidán popílek a následně všechny suché složky (hydroxid). Následným bodem bylo přidání vodního skla. Do kvalitně promíchané směsi byla postupně přidána dávka plastifikátoru a provzdušňovadla. Takto vytvořená záměs byla plněna do forem (kostek 100/100/100 mm) a vibrována po dobu 1 min.

Postup přípravy vzorků:

1. Dávkování kameniva do míchačky.
2. Dávka technologické vody.
3. Dávkování popílku a příměsí do míchačky.
4. Pevný NaOH se rozpustí ve vodním skle mimo míchačku.
5. Aktivační roztok byl následně nalit do míchačky s popílkem.
6. Míchání v míchačce.
7. Dávka technologické vody na konzistenci.
8. Míchání v míchačce celkově po dobu max. 6 minut.
9. Plnění forem.
10. Vibrování směsi ve formách po dobu 1 min.

## **2.4.2 Měření pevnosti betonové směsi**

Hlavní ověřovanou vlastností byla pevnost v tlaku zkušebních vzorků, pro ucelení celého výzkumu byla pro tato měření použita tělesa o rozměrech 10 x 10 x 10 cm.

Tato charakteristika těles byla měřena v souladu s používaným postupem i pro cementové betony. Samotná pevnost v tlaku vyjadřuje velikost napětí dosaženého v místě porušení při zániku celistvosti betonu. Před vlastní zkouškou

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

je potřebné vždy ověřit geometrii zkušebního tělesa. Pokud by při zkoušce došlo k nestandardnímu porušení, tento vzorek je nutné ze zkoušky vyloučit, neboť u něj lze předpokládat nějakou chybu. O každé zkoušce a jejích výsledcích je zpracován záznam - protokol.

Zkoumané vzorky musely být suché, zkontrolované z hlediska rozměrů a geometrie. Následně byly správně umístěny a řádně orientovány mezi dvě ocelové desky na lisu (zkušební stroj). S ohledem na nutnost ověření pevností v tlaku u řešených vzorků nebyly v plné míře dodrženy podmínky příslušné české normy na zkoušení ztvrdlého betonu, neboť ani stářím ani rozměrem neodpovídají požadavkům této normy.

Postup dokončení přípravy vzorků betonové směsi byl po zamíchání, uložení do forem a vibrování pro vyrobené vzorky následující. Vzorky připravené pomocí temperování byly uloženy do sušárny a při teplotě 80 °C / 60 °C / 40 °C ponechány takto po dobu 24 hodin. Po ukončení temperování byly tyto vzorky odformovány. Vzorky připravené „za studena“ byly ponechány ve formě po dobu 7 dní při teplotě 20 °C a následně odformovány. Dalším krokem bylo uložení vzorků ke skladování či okamžitému měření.

#### **2.4.3 Měření změn hmotnosti**

Pro jednotlivé vzorky vyrobených betonů byl měřen úbytek hmotnosti kostek během temperování. Změny hmotnosti u kostek byly měřeny rozdílem hmotností kostek v čerstvém stavu a následně u zkoušených vzorků při pevnostních zkouškách.

Pro jednotlivé teploty temperování byly zaznamenány výsledky změn hmotnosti, které jsou uvedeny v kapitole 3.1.2.

#### **2.4.4 Vliv teploty na průběh alkalické aktivace**

U vzorků ze záměsi, které byly připraveny temperováním (80 °C, 60 °C a 40 °C po dobu 24 hod.) i jako netemperované (při 20 °C „za studena“), byl zkoumán vliv různých teplot na průběh alkalické reakce. Pro zjištění této charakteristiky byla na vzorcích měřena tlaková pevnost po 7, 14, 28 a 60 dnech s ohledem na různé teploty při výrobě. Konstantním faktorem při těchto testech byla doba aplikace zvýšené teploty při výrobě, konkrétně se jednalo o 24 hodinový cyklus.

Výsledky těchto měření, tzn. vlivu teploty na průběh alkalické aktivace POPbetonu, jsou uvedeny v kapitole 3.1.3.

#### **2.4.5 Vliv doby temperování na průběh alkalické aktivace**

Kromě variabilní teploty při výrobě vzorků byl zkoumán také důsledek jiné fyzikální veličiny, která může výsledné mechanické vlastnosti determinovat. Další variantou byla příprava vzorků temperováním po různě dlouhou dobu, tzn., byl



Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

měněn čas expozice čerstvě vyrobených vzorků v sušárně při definované teplotě. Doby temperování byly 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72, 96 hodin a 7 dní. Na vzorcích byla okamžitě po skončení temperování a odformování zkušebních těles měřena tlaková pevnost. Konstantním faktorem při těchto testech byla teplota v sušárně při výrobě vzorků, konkrétně se jednalo o teploty 80 °C, 60 °C a 40 °C. Výsledné hodnoty pevností v tlaku zkušebních vzorků jsou uvedeny v kapitole 3.1.4.

#### **2.4.6 Zpracovatelnost čerstvého POPbetonu**

Další zkoumanou vlastností betonové směsi bylo popsání charakteristiky čerstvé POPbetonové směsi, konkrétně zpracovatelnost čerstvého betonu.

Konzistencí čerstvého betonu lze rozumět odpor proti přetváření. Konzistence vyjadřuje vlastnost čerstvého betonu, tzn. jak moc je tekutý nebo naopak sypký. Konzistence je rozdělena do několika tříd v souladu s použitou metodou zkoušení. Zkoušení konzistence betonu je možné provádět 4 základními metodami: 1) stupeň zhutnění, 2) sednutí kužele, 3) rozlité a 4) zkouška VeBe. S ohledem na možnosti laboratoře byly vybrány následující metody.

Pro zjištění konzistence čerstvé směsi byly provedeny měření a zkoušky v souladu s příslušnou normou ČSN EN 12350-2 [27] a ČSN EN 12350-5 [28]: 1) sednutí kužele (Abrams) a 2) rozlité (Graf). Pro provedená měření byla použita betonová směs, při které byla provedena aktivace popílku temperováním popsaným u Svobody a kol. [94] s rozdílností v nepoužití regulátoru tuhnutí a také došlo k aktivaci bez temperování.

Pro zkoušení zpracovatelnosti čerstvé směsi byl měněn vodní součinitel v betonu v rozmezí od 0,286 do 0,426.

Zkoušky sednutí kužele a rozlitém byly prováděny dle platných norem.

##### **Zkouška konzistence betonu sednutím kužele - Abrams**

Zkouška konzistence pomocí sednutí kužele není vhodnou metodu při použití kameniva v betonu větší než 40mm, takže pro vyrobené vzorky byla optimální. Postup zkoušky je následující: zkušební nádoba je naplněna do 1/3 objemu a vložený materiál je zhutněn 25 vpichy propichovací tyče. Tento postup se opakuje i pro dalších 2 vrstvy, dokud není zkušební nádoba (kužel) naplněná betonem po okraj. Následně dochází k odstranění zkušební nádoby nazdvižením a během 5 až 10 sekund se změří sednutí hmoty, tzn. rozdíl mezi původní a sednutou výškou vzorku. Správný výsledný kužel má mít objemový vzhled symetrický a celkově neporušený. Výsledek zkoušky, tzn. podle velikosti sednutí, rozdělí betonovou směs do pěti tříd - konzistencí betonu: S1, S2, S3, S4 a S5.

##### **Zkouška konzistence betonu rozlitém**

Zkouška konzistence pomocí rozlité není vhodnou metodu při použití kameniva v betonu větší než 63mm, takže pro vyrobené vzorky byla optimální.

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

Čerstvý beton je pomocí zednické lopatky nebo jiné dostupné nádoby naplněn do navlhčené zkušební nádoby (Abramsův kužel) umístěné na setřásacím stolku ve dvou vrstvách, kdy je každá vrstva 10x zhutněna dusadlem. Následně dochází k odstranění formy a k 15 zdvihům horní desky stolku o 40 mm pro rozlití betonu. Pomocí metru nebo pravítka je změřen průměr rozlitého betonu ve dvou vzájemně kolmých osách a je spočítán průměr hodnot. Pokud by během zkoušky došlo k segregaci betonu, je nutné zkoušku vyhodnotit jako nevyhovující. Podle rozlití se klasifikuje konzistence na F1 až F6.

Výsledky obou zkoušek jsou uvedeny v kapitole 3.1.5.

#### **2.4.7 Měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu**

Pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu byla provedena zkouška dle ČSN EN 12350-7: Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody [30].

##### **Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu – tlakoměrná metoda**

Tato zkouška je vhodná pro zhutněný čerstvý beton z hutného nebo těžkého kameniva o max. velikosti zrn 63 mm. Tato metoda není vhodná pro betony s lehkým nebo s velmi pórovitým kamenivem a se zpěněnou vysokopevní struskou. Pro vyrobené vzorky byla tato metoda optimální. Zahájením zkoušky dochází k plnění a zhutňování nádoby ve třech vrstvách, kdy ihned po uložení je každá vrstva hutněna bez nadměrné segregace a bez odlučování vody v tomto případě propichovací nebo zhutňovací tyčí. Následně se příruba nádoby a víka důkladně očistí a víko se připevní neprodyšně k nádobě svorkami. Hlavní ventil pro přívod vzduchu se uzavře a otevřou se boční ventily nádoby. Přístroj se plní pomocí stříčky vodou tak dlouho, dokud nevytéká z druhého ventilu. V dalším kroku se pomocí paličky lehce poklepe na přístroj, aby došlo k odstranění vzduchových bublin. Dále se do vzduchové komory pumpuje vzduch, dokud ručička tlakoměru neukazuje počáteční hodnotu tlaku a vzduch se ponechá několik sekund stlačený. Nastaví se ručička tlakoměru na počáteční hodnotu a uzavřou se boční ventily. Dále se otevře hlavní ventil a ostře se poklepe na boční stěny nádoby. Za lehkého poklepávání na tlakoměr se odečte hodnota tlaku na tlakoměru, která odpovídá objemu obsaženého vzduchu v čerstvé betonové směsi v %. Před demontáží víka je nutné otevřít boční ventily, aby se uvolnil tlak.

Výsledky zkoušky jsou vyhodnoceny v kapitole 3.1.6.

#### **2.4.8 Měření pevností v závislosti na množství reologické vody**

Kromě vlastností čerstvého betonu byly zjišťovány také mechanické vlastnosti ztvrdlé směsi, při jejichž výrobě docházelo k úpravě množství vstupních surovin, v tomto případě záměsové vody. Vliv množství reologické vody v čerstvém POPbetonu byl ověřen v navrženém experimentu, který měl za úkol

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

objasnit závislost pevnostních charakteristik POPbetonu na vodním součiniteli bez ohledu na hledisko zpracovatelnosti. Úkolem vody v navržených betonech je transport aktivátorů k úletovému popílku (pozn.: princip aktivace „přes roztok“) a dále zajištění požadované plasticity čerstvého betonu. Její množství však zásadním způsobem mění parametry aktivačního roztoku (pozn.: jeho pH i koncentraci) viz Šulc [6].

Úkolem experimentu bylo prokázání vlivu vody na průběh zpracovatelnosti směsí a jejich výsledné pevnostní charakteristiky. Návrh směsi byl proveden pro množství 400 kg popílku na m<sup>3</sup> betonu. Ostatní suroviny pro výrobu směsi byly beze změny a také nebyl použit regulátor tvrdnutí.

Ověřovanou vlastností byla pevnost v tlaku zkušebních vzorků o rozměrech 10 x 10 x 10 cm.

Pro zkoušení pevností v tlaku (závislost na objemu vody) byly použity směsi o stejném složení jako u zkoušek zpracovatelnosti čerstvé směsi, tzn., vodní součinitel v betonu byl měněn v rozmezí od 0,286 do 0,426.

Pro jednotlivé vodní součinitele byly zaznamenány výsledky pevností v tlaku v kapitole 3.1.7.

#### **2.4.9 Měření pevností v závislosti na množství provzdušňovací přísady**

V dalším variantním měření pevností v tlaku ztvrdlého betonu byla úprava množství provzdušňovací přísady a zafixování množství reologické vody. Pro tento experiment byly použity směsi o stejném složení jako u zkoušek vzduchu v čerstvém betonu, tzn. série s konstantním množstvím reologické vody odpovídající vodnímu součiniteli 0,406.

Pro jednotlivé množství provzdušňovací přísady byly u kostek zaznamenány výsledky pevností v tlaku, které vyhodnocuje kapitola 3.1.8.

#### **2.4.10 Objemová hmotnost v závislosti na množství provzdušňovací přísady**

Během jednotlivých měření a zkoušek byly vyhodnoceny různé parametry a vlastnosti zkoumané směsi a vzorků, ze získaných dat byla zpracována rozdílná vyhodnocení. V tomto konkrétním případě byla řešena závislost objemové hmotnosti vzorků na množství provzdušňovací přísady a množství vzduchu v čerstvém betonu.

Metoda vyhodnocení spočívala v přepočítání na procenta, kde 100 % je objemová hmotnost čerstvé směsi bez příměsi.

Vyhodnocení a výsledky jsou uvedeny v kapitole 3.1.9.

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

### 2.4.11 CHRL a spacing factor v POPbetonu

Pro ověření odolnosti proti CHRL u řešení betonové směsi byla provedena zkouška odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, tzn. v drobné úpravě na popílkový beton v souladu normami ČSN 73 1326 (Metoda A) [54] a dle ČSN 73 1326 Změna Z1 [55].

Pro tuto zkoušku bylo mírně upraveno složení záměsi POPbetonu, které ukazuje Tabulka 7 a množství provzdušňovací přísady ukazuje Tabulka 8.

Tabulka 7 Složení záměsi POPbetonu

Popílek [kg]	Kamenivo [kg]	Vodní sklo [kg]	NaOH [kg]	Voda [l]	Superplastifikátor [kg]	w
4	16,78	1,24	0,29	0,48	0,08	0,41283

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 8 Množství provzdušňovací přísady v záměsích

Množství provzdušňovací přísady v záměsích [kg]						
0	0,012	0,024	0,04	0,048	0,06	0,072

Zdroj: Vlastní zpracování

Chemické složení popílku použitého v programu POPbeton je v tabulce (Tabulka 9) a celkové poměry v kompozici jsou v následující tabulce (Tabulka 10).

Tabulka 9 Chemické složení popílku

Složení popílku Opatovice [%]			
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO
0,5285	0,3184	0,00359	0,0176

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 10 Celkové poměry v kompozici

SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> / Na <sub>2</sub> O	CaO / SiO <sub>2</sub>
1,9967	6,5767	0,0277

Zdroj: Vlastní zpracování

### Zkouška odolnosti proti CHRL

Zjednodušený průběh provedené zkoušky proti CHRL je následující. Po 180 dnech byly vzorky změřeny a zváženy. Následně byly uloženy do mrazícího zařízení s 3 % roztokem NaCl a podrobeny cyklům zmrazování v souladu s normou ČSN 73 1326 / Z1 (metodou A). Vyrobené vzorky byly vystaveny celkem 100 zmrazovacím cyklům. Každých 25 cyklů byly vzorky ze zařízení vyjmuty a bylo měřeno množství odpadu po jednotlivé sérii cyklů. Závěrem byly vzorky znovu zhodnoceny po vizuální stránce.

Pro zkoušku proti CHRL byla použita tělesa o rozměrech 100 x 100 x 100 mm.

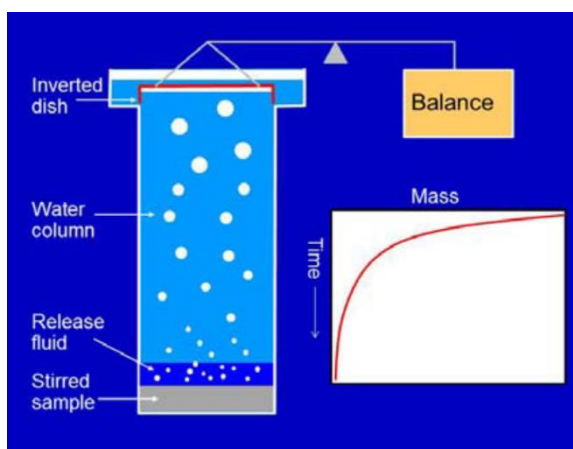
Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

V průběhu míchání je do betonu vneseno určité množství vzduchu. Toto množství závisí na typu míchačky, objemu míchaného betonu, konzistencí betonu a době míchání.

Kromě zkoušky odolnosti proti CHRL byla také provedena zkouška spacing factor, tzn. stanovení charakteristiky vzduchových pórů – součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů „L“, která byla provedena pomocí přístroje DBT - Air Void Analyzer. Tato metoda je schopna poskytnout relativně přesné a včasné informace o spacing factoru a specifickém povrchu vzduchových pórů. Zkouška musí být prováděna na čerstvém betonu ihned po zamíchání.

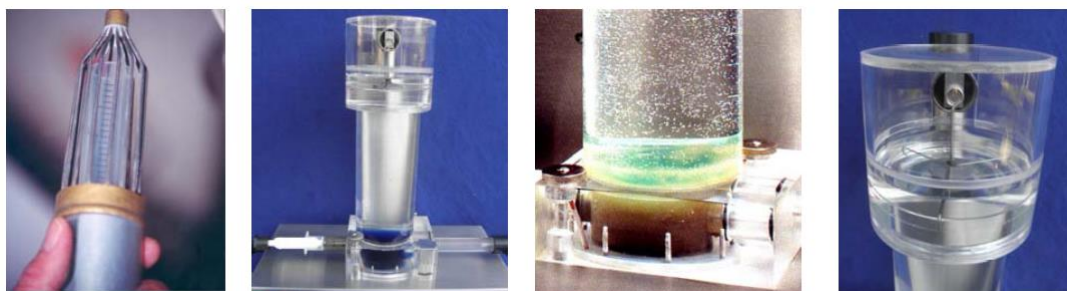
### Zkouška - spacing factor

Princip metody byly převzat z instrukcí k AVA [102] je, že vzduchové bublinky ze vzorku betonu, který byl získán ze směsi v čerstvém stavu speciálním odběrným nástrojem vzorku, jsou unášeny do modré kapaliny specifických vlastností. Schéma přístroje zobrazuje Obrázek 16, jeho části a příslušenství jsou na obrázku (Obrázek 17). Vzhledem k tomu, že kapalina má správnou viskozitu a hydrofilní charakter, předpokládá se, že si bublinky vzduchu zachovají stejnou velikost jako vzduchové póry v betonu. Nad modrou kapalinou je sloupec vody ( $H_2O$ ), jehož prostřednictvím stoupají bubliny vzhůru. V souladu se Stokesovým zákonem větší bubliny stoupají rychleji než menší. Uvolněné bubliny vzduchu stoupají vzhůru a kumulují se pod ponořenou Petriho miskou. Dno misky je vzhůru a ta je připojena k citlivým snímačům, které zaznamenávají prostřednictvím nárazů vzduchu do Petriho misky počet a velikost bublin. Narážející vzduchové bubliny působí na misku vztlak, takže dochází ke snižování hmotnosti misky. Zdánlivá hmotnost misky je zaznamenávána jako funkce času. Program v přístroji vypočte pomocí algoritmu na základě zaznamenané zdánlivé hmotnosti misky distribuci a velikost vzduchových pórů v betonu.



Obrázek 16 Schéma přístroje - AVA

#### Provedené experimenty a stav řešeného úkolu



Obrázek 17 Fotografie přístroje a příslušenství AVA

Zjednodušený průběh provedené zkoušky spacing factor byly převzaty z manuálu k AVA [101] a je následující. Vzorek zkoušené betonové směsi je získán přes vibrační drátěnou klec. Čerstvý beton vstupuje do klece, která zabráňuje vstupu částic větších než 6 mm. Odběr vzorku je proveden pomocí injekční stříkačky. Odebraný vzorek je vsťříknut do zkušebního válce s Petriho miskou. Vzorek směsi je mírně míchán po dobu 30 vteřin magnetickým míchadlem a vzduchové póry se uvolňují do roztoku. Vzduch je ze zkoušeného betonu oddělován v dávkách, které jsou závislé na velikosti pórů. Bubliny jsou shromažďovány na dně obrácené misky a působí na misku vztlakovou silou, takže ji nadlehčují. Přístroj zaznamenává změnu hmotnosti v časové závislosti. Měření je prováděno po dobu přibližně 25 minut. Software zpracuje následně graf distribuce velikosti bublin a histogram různých velikostí bublin.

S ohledem na potřebu ověření vlastností betonové směsi a snahu o její využití pro betony s odolností proti povětrnostním vlivům je potřeba zjistit požadavky na standardní cementové betony, které jsou běžně zpracovávány a jsou na ně kladeny speciální požadavky. Např. v TKP 18 [44] je konstatováno, že min. obsah vzduchu v čerstvém betonu pro stupeň vlivu prostředí XF4 se zrnitostí kameniva do 16 mm je 4,5 %. Pro zvýšení odolnosti proti působení CHRL se obecně doporučuje kolem 5 až 6 % vzduchu v čerstvém betonu [44].

Výsledky jsou prezentovány a vyhodnoceny v kapitole 3.1.10.

#### 2.4.12 Vyhodnocení měření (provzdušňovací přísada)

Během předchozích měření a zkoušek byly vyhodnoceny další parametry a vlastnosti zkoumané směsi a vzorků, ze získaných dat byla zpracována další vyhodnocení. V tomto konkrétním případě byly řešeny následující parametry a jejich případné závislosti: množství provzdušňovací přísady, množství vzduchu, odpady pro jednotlivých cyklech a pevnosti v tlaku.

Metoda vyhodnocení spočívala v sumarizaci získaných výsledků a jejich porovnání s obdobnými výsledky na cementových betonech a vyslovení případných závislostí jednotlivých vlastností mezi sebou.

Vyhodnocení a výsledky jsou uvedeny v kapitole 3.1.11.

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

## 2.5 Referenční směs pro vibrolisovaný prvek - provedená měření a experimenty

### 2.5.1 Výchozí receptura vibrolisovaného prvku pro návrh alkalicky aktivovaného materiálu

Před realizací přesného návrhu pro aplikaci do lisovací formy, lisování a provedení vibrace bylo nutné provést detailní analýzu převzaté receptury poskytnuté jedním z výrobců. Na tuto recepturu byly navrženy a následně provedeny zkoušky k zjištění mechanických vlastností, reologických vlastností, mechanických vlastností v závislosti na množství reologické vody a v závislosti na množství provzdušňovací přísady a obsahu vzduchu v čerstvé směsi.

Referenční receptura pro zkušební vzorky je popsána v tabulce (Tabulka 11).

Tabulka 11 Složení referenční záměsi pro vibrolisované prvky

Složení referenční záměsi pro vibrolisované prvky					
Kamenivo [kg]	Cement [kg]	Popílek [kg]	Voda [l]	Superplastifikátor [l]	w
87,20%	4,25%	4,25%	4,25%	0,04%	0,50

Zdroj: Vlastní zpracování

S ohledem na strukturu, konzistenci a budoucí zpracovatelnost této referenční směsi do používaných kostek o rozměru 100 mm a vibrování bylo nutné do směsi přidat větší množství záměsové vody o 47 %, tzn. na 6,25 %, oproti převzaté referenční receptuře. Je nutno poznamenat, že převzatá receptura byla standardně používána ve vibrolisu, z tohoto důvodu její konzistence byla velmi suchá.

Během probíhajícího výzkumu nebylo možné použít pro výrobu směsi vibrolis, viz teoretická část (kapitola 1.8.2), takže bylo nutné přizpůsobit návrh a výzkum disponibilním laboratorním možnostem, např. použití náhradních řešení zpracování, úprava receptury apod.

Referenční receptura pro zkušební vzorky je popsána v tabulce (Tabulka 12).

Tabulka 12 Složení upravené referenční záměsi pro vibrolisované prvky

Složení upravené referenční záměsi pro vibrolisované prvky					
Kamenivo [kg]	Cement [kg]	Popílek [kg]	Voda [l]	Superplastifikátor [l]	w
85,38%	4,16%	4,16%	6,25%	0,04%	0,75

Zdroj: Vlastní zpracování

Tato upravená receptura byla v dalším výzkumu použita jako referenční.

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

## 2.5.2 Výroba vzorků referenční směsi pro vibrolisované prvky

Na základě provedené rešerše a poskytnuté receptury byly provedeny na referenční směsi základní mechanické a reologické zkoušky. Na rozdíl od výchozích alkalicky aktivovaných směsí nedocházelo k temperování vzorků, takže výchozí teplota zpracování betonové směsi byla 20 °C.

Pro porovnávací zkoušky byl použit popílek z teplárny a elektrárny v Opatovicích jako částečná náhrada standardního pojiva, cementu CEM II. Jako plnivo bylo použito kamenivo ze dvou frakcí (0/4 Dobříň, 4/8 Zbraslav).

Navážené a připravené složky byly zpracovány dle následujícího postupu za průběžného míchání v míchačce RUBY MIX 50 I s upraveným míchadlem. Prvním bodem bylo smíchání různých frakcí kameniva a přidání smáčecí vody. Po promíchání byl přidán cement a popílek. Do kvalitně promíchané směsi byla postupně přidána dávka plastifikátoru. Takto vytvořená záměs byla plněna do forem (kostek 100/100/100 mm) a vibrována po dobu 2 min.

Postup přípravy vzorků byly podobný jako u výroby nevibrolisovaných směsí:

1. Dávkování kameniva do míchačky.
2. Dávka technologické vody.
3. Dávkování cementu a popílku a příměsí do míchačky.
4. Míchání v míchačce.
5. Dávka technologické vody na konzistenci.
6. Míchání v míchačce celkově po dobu max. 6 minut.
7. Plnění forem.
8. Vibrování směsi ve formách po dobu 2 min.

## 2.5.3 Měření pevnosti referenční betonové směsi

Při stanovení hlavních ověřovacích vlastností bylo postupováno obdobně jako u nevibrolisovaných směsí, tzn., byla ověřována pevnost v tlaku zkušebních vzorků, pro možnost porovnání byly vždy použity tělesa o rozměrech 100 x 100 x 100 mm.

Před stanovení pevnosti v tlaku bylo nutné ověřit geometrii zkušebního tělesa. Dojde-li k nestandardnímu porušení při provádění zkoušky, je nutné ze zkoušky tento vzorek vyloučit. Při provádění každé zkoušky byl zpracován záznam – protokol, který obsahoval její výsledky.



Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

Předpoklady pro úspěšné provedení zkoušky jsou následující: zkoumané vzorky musely být suché, zkontrolované z hlediska rozměrů a geometrie, následně správné umístění a řádně orientované mezi dvě ocelové desky na lisu (zkušební stroj). Došlo k drobným odchylkám od podmínek příslušné české normy na zkoušení ztvrdlého betonu, jelikož vzorky ani stářím ani rozměrem neodpovídali požadavků této normy. Vývoj pevnosti u kostek je uveden v kapitole 3.2.1.

#### **2.5.4 Zpracovatelnost čerstvé referenční směsi**

Následující zkoumanou vlastností referenční betonové směsi bylo popsání charakteristiky čerstvé betonové směsi - zpracovatelnost.

Pro zjištění konzistence čerstvé směsi byly provedeny měření a zkoušky v souladu s příslušnou normou ČSN EN 12350-2 [27] a ČSN EN 12350-5 [28]: 1) sednutí kužele (Abrams) a 2) rozlití (Graf).

Pro provedená měření byla použita betonová směs, při které byla stanovena jako referenční pro budoucí využití ve vibrolisovaných směsích.

Pro zkoušení zpracovatelnosti čerstvého betonu byl upravován vodní součinitel (poměr mezi množstvím záměsové vody a pojivem) ve směsi v rozmezí od 0,25 do 1,00.

Postup provádění zkoušek zpracovatelnosti byly totožný jako u stanovení výchozích charakteristik v kapitole 2.4.6.

Výsledky zkoušek jsou uvedeny v kapitole 3.2.2.

#### **2.5.5 Měření obsahu vzduchu v čerstvé referenční směsi**

Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu bylo zkoušeno dle ČSN EN 12350-7: Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody [30].

Pro zkoušení obsahu vzduchu v čerstvé referenční směsi byly navrženy série s konstantním množstvím reologické vody odpovídající vodnímu součiniteli 0,75, byly vytvořeny 4 pokusné série a nebyla přidána provzdušňovací přísada.

Postup provádění zkoušek obsahu vzduchu v čerstvém betonu byl totožný jako u stanovení výchozích charakteristik v kapitole 2.4.7.

Výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 3.2.3.

#### **2.5.6 Měření pevností referenční směsi v závislosti na množství reologické vody**

Kromě vlastností čerstvého betonu byly zjišťovány také mechanické vlastnosti ztvrdlé referenční směsi. Pro ověření závislosti bylo měněno množství

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

záměsově vody, konkrétně byl upravován vodní součinitel v betonu v rozmezí od 0,25 do 1,0.

Cílem experimentu bylo zjistit, jak variace kvantity vody ovlivňuje průběh zpracovatelnosti směsí a jejich výsledné pevnosti v tlaku. Návrh směsi vycházel z upravené receptury kromě záměsově/technologické vody byly ostatní suroviny beze změny.

Vývoj pevností v tlaku u kostek v závislosti na množství reologické vody jsou uvedeny v kapitole 3.2.4.

### **2.5.7 Objemová hmotnost referenční směsi v závislosti na množství provzdušňovací přísady**

Dalším bodem ověřování vlastností betonové směsi mělo být ověření změny objemové hmotnosti v závislosti na množství provzdušňovací přísady. V důsledku toho, že do referenční směsi nebyla přidávána provzdušňovací přísada, nebyl průzkum proveden.

### **2.5.8 Vyhodnocení měření (referenční směs)**

Předchozí měření a zkoušky byly vyhodnoceny a popsaly vlastnosti zkoumané směsi a vzorků, z takto získaných dat byla zpracována další vyhodnocení. U referenční směsi byly hodnoceny tyto parametry a jejich možné závislosti: množství vzduchu, vodní součinitel a pevnosti v tlaku.

Metodologicky bylo vyhodnocení provedeno sumarizací obdržených výsledků a vyslovení případných závislostí jednotlivých vlastností mezi sebou.

Vyhodnocení a výsledky jsou uvedeny v kapitole 3.2.6.

## **2.6 Navržená směs pro vibrolisovaný prvek - provedená měření a experimenty**

### **2.6.1 Navržená receptura alkalicky aktivovaného materiálu**

Pro přesný návrh pro aplikaci do lisovací formy, lisování a provedení vibrace bylo nutné provést detailní analýzu převzaté receptury poskytnutí jedním z výrobců. Na základě provedených zkoušek alkalicky aktivovaných materiálů v první části výzkumu a poskytnuté receptury byla navržena receptura pro vibrolisované prvky. Pro tuto recepturu byly provedeny zkoušky mechanických vlastností, reologických vlastností, vyhodnocení mechanických vlastností v závislosti na množství reologické vody a v závislosti na množství provzdušňovací přísady a obsahu vzduchu v čerstvé směsi.

Navržená receptura pro zkušební vzorky je popsána v tabulce (Tabulka 13).

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

*Tabulka 13 Složení záměsi pro vibrolisované prvky*

Složení záměsi pro vibrolisované prvky							
Popílek [kg]	Cement [kg]	Kamenivo [kg]	Vodní sklo [kg]	NaOH [kg]	Voda [l]	Superplastifikátor [kg]	w
15,30%	1,96%	85,26%	5,42%	1,27%	1,57%	0,35%	0,376

*Zdroj: Vlastní zpracování*

Při předchozích zkouškách a pokusech bylo s ohledem na laboratorní podmínky a další vlastnosti navržené směsi, konkrétně strukturu, konzistenci, budoucí zpracovatelnost do používaných kostek o rozměru 10 cm a vibrování bylo nutné ve směsi počítat s větším množstvím záměsové a vzniklé vody.

Při následujícím výzkumu nebylo možné provést optimalizaci pro použití v konkrétním výrobním zařízení – vibrolisu, jak je uvedeno v teoretické části v kapitole 1.8.2. Návrh směsi a provedený výzkum byly přizpůsoben laboratorním možnostem.

### 2.6.2 Výroba vzorků směsi pro vibrolisované prvky

Na základě provedené rešerše a poskytnuté receptury byly provedeny na navržené směsi základní mechanické a reologické zkoušky. Na rozdíl od výchozích alkalicky aktivovaných směsí nedocházelo k temperování vzorků, takže výchozí teplota zpracování betonové směsi byla 20 °C.

Pro porovnávací zkoušky byl opětovně použit popílek z teplárny v Opatovicích, který plnil funkci částečné náhrady standardního pojiva - cementu CEM II. Plnivem pro tuto betonovou směs bylo kamenivo ze dvou frakcí (0/4 Dobříň, 4/8 Zbraslav). Aktivátorem popílků bylo vodní sklo sodné a hydroxid sodný. Vytvořená záměs byla plněna do forem a vibrována po dobu 2 min. Měření pevností bylo prováděno na tělesech 100 x 100 x 100 mm v hydraulickém lisu.

Technologický postup výroby navržené směsi korespondoval s předchozím provedeným výzkumem a výroba v laboratorních podmínkách probíhala smícháním navážených a připravených složek v míchačce RUBY MIX 50 I s upraveným míchadlem za průběžného míchání. Prvním bodem bylo smíchání různých frakcí kameniva a přidání smáčecí vody. Po promíchání byl přidán cement, popílek a následně všechny suché složky (hydroxid). Následným bodem bylo přidání vodního skla. Do kvalitně promíchané směsi byla postupně přidána dávka plastifikátoru. Takto vytvořená záměs byla plněna do forem (kostek 100/100/100 mm) a vibrována po dobu 2 min.

Výroba vzorků probíhala podobně jako u výroby nevibrolisovaných a referenčních směsí:

1. Dávkování kameniva do míchačky.
2. Dávka technologické vody.
3. Dávkování cementu a popílků a příměsí do míchačky.

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

4. Míchání v míchačce.
5. Dávka technologické vody na konzistenci.
6. Míchání v míchačce celkově po dobu max. 6 minut.
7. Plnění forem.
8. Vibrování směsi ve formách po dobu 2 min.

### **2.6.3 Měření pevnosti směsi pro vibrolisované prvky**

Hlavní ověřovanou vlastností navržené směsi byla pevnost v tlaku, toto ověření probíhalo na zkušebních vzorcích o definovaných rozměrech, které byly během celého výzkumu neměněny, konkrétně 100 x 100 x 100 cm.

Předpokladem pro provádění zkoušek byly tyto parametry: zkoumané vzorky musely být suché a musela u nich být provedena kontrola rozměrů a geometrie. Následně byly řádně umístěny a správně orientovány mezi dvěma ocelovými deskami zkušebního lisu. Průběh zkoušky nekorespondoval plně s požadavky příslušné normy na zkoušení ztvrdlého betonu, neboť ani stářím ani rozměrem neodpovídaly požadavků této normy.

Postup dokončení přípravy vzorků betonové směsi byl po zamíchání, uložení do forem a vibrování pro vyrobené vzorky následující. Vzorky byly ponechány ve formě po dobu 7 dní při teplotě 20 °C a následně odformovány. Dalším krokem bylo uložení vzorků ke skladování či okamžité měření.

Výsledky pevnosti v tlaku u kostek jsou uvedeny v kapitole 3.3.1.

### **2.6.4 Zpracovatelnost čerstvé směsi pro vibrolisované prvky**

Další zkoumanou vlastností betonové směsi bylo popsání charakteristiky čerstvé směsi, přesněji zpracovatelnost čerstvého betonu.

Aby bylo možné stanovit konzistence čerstvé směsi, byly provedeny následující zkoušky v souladu s příslušnými normami ČSN EN 12350-2 [27] a ČSN EN 12350-5 [28]: 1) sednutí kužele (Abrams) a 2) rozlití (Graf).

Pro provedené zkoušky byla použita betonová směs navržená v kapitole 2.6.1 pro využití ve vibrolisovaných směsích.

Pro zkoušení zpracovatelnosti čerstvého betonu byl upravován vodní součinitel (poměr mezi množstvím záměsové vody a pojivem) ve směsi v rozmezí od 0,25 do 1,00.

Postup provádění zkoušek zpracovatelnosti byly totožný jako u stanovení výchozích charakteristik v kapitole 2.4.6.

Výsledky zkoušek jsou uvedeny v kapitole 3.3.2.

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu

### **2.6.5 Měření obsahu vzduchu v čerstvé směsi pro vibrolisované prvky**

Zkouška dle ČSN EN 12350-7: Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody [30] byla použita pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu.

Pro provedení této zkoušky byly navrženy série s konstantním množstvím reologické vody odpovídající vodnímu součiniteli 0,376, bylo vytvořeno 7 pokusných sérií a bylo přidáno různé množství provzdušňovací přísady.

Postup provádění zkoušek obsahu vzduchu v čerstvém betonu byl totožný jako u stanovení výchozích charakteristik v kapitole 2.4.7.

Cílem bylo popsání výchozích charakteristik čerstvé směsi, které mohou ovlivnit vybrané vlastnosti finálního vzorku.

Výsledky zkoušky jsou uvedeny v kapitole 3.3.3.

### **2.6.6 Měření pevností směsi pro vibrolisované prvky v závislosti na množství reologické vody**

Kromě vlastností čerstvého betonu (zpracovatelnost a obsah vzduchu) byly prověřeny další mechanické vlastnosti ztvrdlé směsi, kdy při výrobě bylo upraveno množství vstupních surovin, konkrétně záměsové vody.

Vliv množství reologické vody v čerstvém betonu byl ověřen v navrženém experimentu, který měl za úkol zjistit možnou závislost pevnostních charakteristik navržené směsi pro vibrolisované prvky na vodním součiniteli bez ohledu na hledisko zpracovatelnosti. U zkoumaných POPbetonových směsí bylo zjištěno, že množství vody zásadním způsobem mění parametry aktivačního roztoku (pozn.: jeho pH i koncentraci) viz Šulc [6].

Úkolem pokusu bylo prokázat, jak úprava množství vody v záměsi ovlivňuje výsledné pevnostní charakteristiky vzorků. Návrh směsi byl dle navržené receptury, kromě množství záměsové/technologické vody byly ostatní suroviny beze změny.

Výsledky pevností v tlaku u kostek v závislosti na množství reologické vody jsou uvedeny v kapitole 3.3.4.

### **2.6.7 Měření pevností směsi pro vibrolisované prvky v závislosti na množství provzdušňovací přísady**

Dalším měřením bylo opětovné ověření mechanických vlastností - pevností v tlaku ztvrdlého betonu, v tomto případě docházelo k úpravě množství provzdušňovací přísady, ale množství reologické vody bylo fixní. V tomto pokusu byla použita směs o stejném složení jako u zkoušek množství vzduchu v čerstvém

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu  
betonu, konkrétně série s konstantním množstvím reologické vody odpovídající  
vodnímu součiniteli 0,376.

Pro jednotlivé množství provzdušňovací přísady byly zaznamenány  
následující výsledky pevností v tlaku v kapitole 3.3.5.

### **2.6.8 Vyhodnocení měření (směsi pro vibrolisované prvky)**

V průběhu předchozích měření a zkoušek byly získány další parametry  
a vlastnosti zkoumané směsi pro vibrolisované prvky a ze získaných dat byla  
provedena další vyhodnocení. Pro navrženou směs byly řešeny tyto parametry  
a jejich možné závislosti: množství provzdušňovací přísady, množství vzduchu  
a pevnosti v tlaku.

Vyhodnocení bylo provedeno metodou, která spočívala v sumarizaci  
získaných výsledků a jejich porovnání s obdobnými výsledky na cementových  
betonech a vyslovení případných závislostí jednotlivých vlastností mezi sebou.

Cílem vyhodnocení je sumarizace výsledků vlastností získaných při  
provedených zkouškách a výzkumu, jejich porovnání s obdobnými výsledky nebo  
závěry z obdobných výzkumů.

Vyhodnocení a výsledky jsou uvedeny v kapitole 3.3.6.

## **2.7 Laboratorní podmínky - výroba směsí, vybavení a měření**

V laboratorních podmínkách byla vyráběna zkušební směs v upravené  
míchačce RUBY MIX 50l. U této míchačky bylo nutné pro optimální promíchání  
připravované betonové směsi upravit míchadlo. Velikost dávky do míchačky byla  
redukována tak, aby bylo vyrobeno potřebné množství vzorků a byla zajištěna  
maximální doba výroby betonové směsi, jak je patrné na následujícím obrázku  
(Obrázek 18). Při výrobě bylo nutné zaručit stabilitu míchačky. Konzistenci čerstvé  
směsi ukazuje následující fotografie (Obrázek 19).

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu



*Obrázek 18 Výroba betonové směsi v míchačce  
Zdroj: archiv autora.*



*Obrázek 19 Čerstvá směs betonu po namíchání  
Zdroj: archiv autora.*

Zpracovaná směs byla dokončení zamíchání pomocí zednické lžice přesunována do forem, v každé z nich byl prostor pro 3 vzorky viz následující fotografie (Obrázek 20).



Provedené experimenty a stav řešeného úkolu



Obrázek 20 Formy na betonovou směs  
Zdroj: archiv autora.

Po vytvrdnutí následovalo odformování vzorků, u kterých byly v souladu s postupem dle příslušné normy měřeny rozměry a geometrie (viz Obrázek 21), následovalo vážení na certifikované váze (viz Obrázek 22).



Obrázek 21 Měření rozměrů a geometrie vzorků  
Zdroj: archiv autora.



Provedené experimenty a stav řešeného úkolu



Obrázek 22 Vážení vorků na váze  
Zdroj: archiv autora.

Všechny zkoušky stanovení pevnosti v tlaku probíhaly na ověřeném lisu. Následující fotografie ukazují stav vzorků před zkouškou (Obrázek 23) a po zkoušce (Obrázek 24).



Obrázek 23 Vzorek umístění v lisu před zkouškou pevnosti v tlaku  
Zdroj: archiv autora.

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu



Obrázek 24 Vzorek po pevnostní zkoušce v tlaku  
Zdroj: archiv autora.

Kromě mechanických zkoušek probíhaly také zkoušky zpracovatelnosti čerstvé směsi, ukázka ze zkoušky sednutí kužele je na následující fotografii (Obrázek 25).



Obrázek 25 Zahájení měření výšky kužele při zkoušce zpracovatelnosti  
Zdroj: archiv autora.

Jak již bylo uvedeno v teoretické části, během výzkumu nebyl zajištěn vibrolis. Toto bylo způsobeno finančními problémy a také prostorovými možnostmi laboratoře. Jak ukazuje následující fotografie (Obrázek 26), laboratorní podmínky byly z hlediska prostoru velmi omezené.

Provedené experimenty a stav řešeného úkolu



Obrázek 26 Náhled do laboratoře

Zdroj: archiv autora.

Postup výroby betonové směsi vycházel předchozích výzkumů a ověření, které vycházeli z Šulce a kol. [95], Škváry a kol. [96, 97, 98] a ověřili možnost alkalické aktivace a výroby geopolymerních materiálů. Pro výrobu směsí na bázi POPbetonu byl použit standardizovaný výrobní postup, který je pro tyto betony dlouhodobě využíván.

### 3 Výsledky a diskuze

V předchozích kapitolách byly popsány zkoušky a měření, které byly na zkoumaných betonových směsích prováděny. Většina provedených zkoušek probíhala v laboratoři na Ústavu skla a keramiky VŠCHT v Praze, která je společně využívána také pracovníky a studenty – doktorandy z katedry technologie staveb fakulty stavební ČVUT v Praze při společném výzkumu.

Základní prováděnou zkouškou na všech sériích bylo měření pevnosti v tlaku. Všechna tělesa byla před prováděním destruktivních zkoušek řádně zvážena s přesností  $\pm 0,01$  g. Dále byly u všech těles změřeny jejich rozměry s přesností  $\pm 0,5$  mm. Zkoušky v tlaku byly prováděny přístrojem Werkstoffprüfmaschinen, Leipzig, výrobní číslo: 267/56/17 (viz Obrázek 27). Použitá váha byla od výrobce Lab System Praha, s rozsahem 0 – 30 kg (viz Obrázek 28). Rozměry byly měřeny posuvným měřítkem s přesností 0,5 mm.



Obrázek 27 Lis Werkstoffprüfmaschinen, Leipzig  
Zdroj: archiv autora.





Obrázek 28 Váha Lab System Praha  
Zdroj: archiv autora.

### **3.1 Provedená měření a experimenty na nevíbrolisovaných směsích**

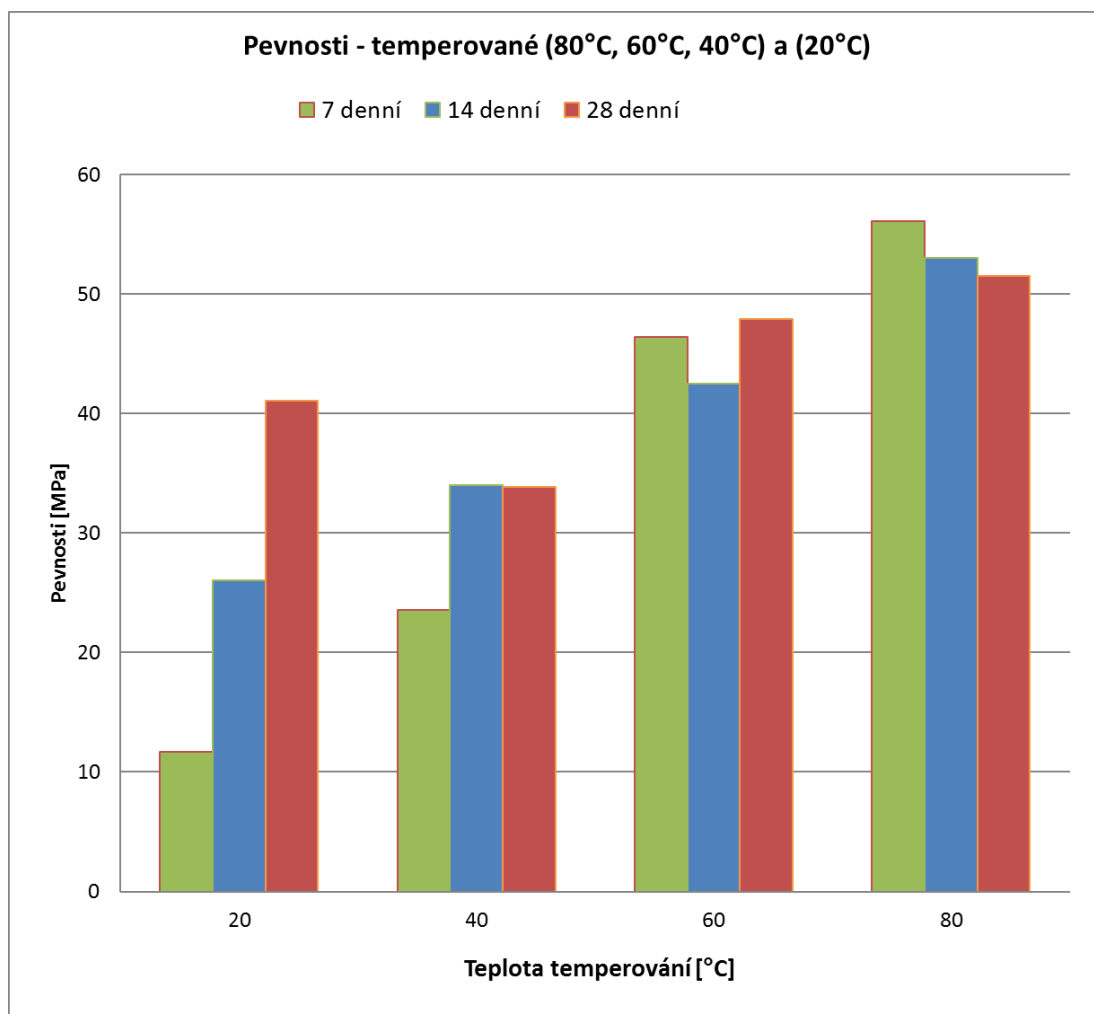
#### **3.1.1 Měření pevnosti betonové směsi**

Prvotní ověřovanou vlastností byla pevnost v tlaku ztvrdlých betonů. Pro POPbetonové vzorky bylo rozlišováno, za jakých podmínek probíhalo ošetření čerstvého betonu po uložení do forem, tzn., zda došlo ke zrání betonu za normálních teplot či za zvýšených. V případě temperovaných i netemperovaných vzorků bylo měření prováděno po 7, 14 a 28 dnech zrání. Měření pevností v tlaku bylo prováděno na tělesech hraně 10 cm v hydraulickém lisu.

Kostky před měřením pevnosti v tlaku byly vždy zváženy, změřeny a byla u nich zkontrolována rovinnost povrchů.

Vzorky temperované na 80 °C měly po skončení temperování cca 80 % hodnotu konečné pevnosti, po 28 dnech zrání dosahovaly již hodnoty konstantní pevnosti v tlaku. U ostatních vzorků temperovaných na nižší teplotu byly po skončení temperování hodnoty konečné pevnosti nižší, tzn. mezi cca 60 – 80 %. Vzorky připravené „za studena“ (dále netemperované) byly zkoušeny ve stejném intervalu zrání jako temperované. Takto připravené vzorky měly po 28 dnech zrání přibližně 60 % finální pevnosti. Po 90 dnech zrání by bylo možné předpokládat dosažení pevnosti konstantních hodnot a dalo by se hovořit o pevnosti konečné.

Pro jednotlivé teploty temperování byly zaznamenány následující výsledky pevností v tlaku. Vývoj pevnosti v tlaku u kostek v závislosti na teplotě ukazuje následující graf (Graf 1).



Graf 1 Pevnosti v závislosti na teplotě temperování

Zdroj: Vlastní zpracování

Jako optimální se ukázalo temperování těles při teplotách 60° a 80°C, kdy bylo dosaženo vysokých počátečních pevností v tlaku přes 40 MPa. U vzorků za studena byla hodnota přes 40 MPa dosažena až po 28 dnech zrání. U vzorku temperovaných na 40 °C se projevila nepřesnost měření či vada zkoušených kostek, neboť pevnost po 28 dnech zrání byla dokonce nižší než po 14 dnech zrání.

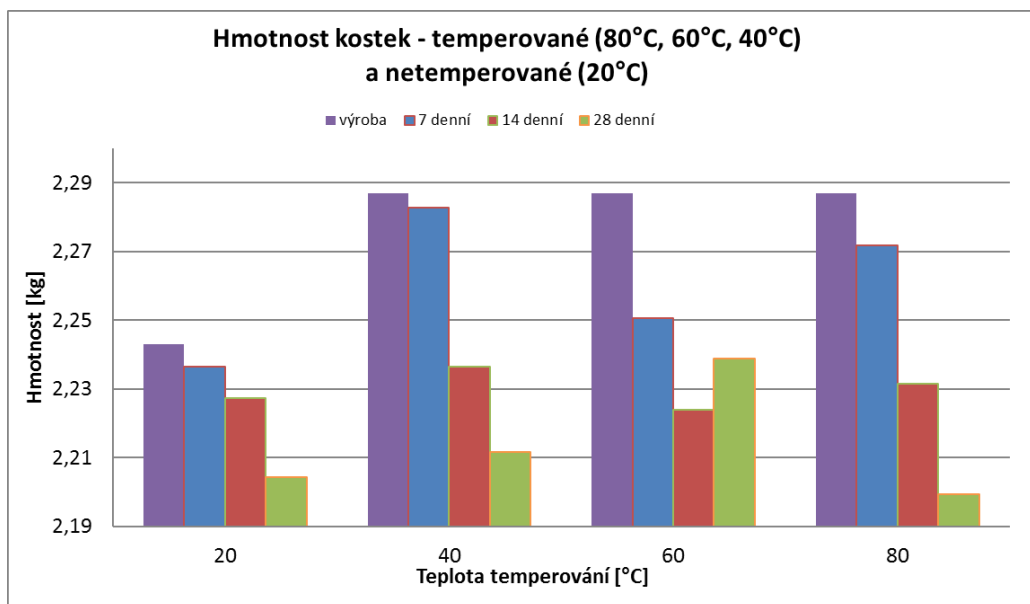
Dosažené pevnosti po 28 dnech zrání překročily mez 40 MPa. Lze předpokládat, že v delším časovém horizontu dojde k navýšení pevnosti k 50 MPa, kterých dosahují tělesa temperovaná na 80 °C. S ohledem na náročný navazující výzkum nebylo provedeno ověřování dlouhodobých pevností v tlaku těchto vzorků či receptur. Drobné snížení pevnosti u těchto vzorků může být způsobeno odchylkou měření.

### 3.1.2 Měření změn hmotnosti

Při měření mechanických vlastností vyrobených vzorků betonů byla pravidelně prováděna měření hmotnosti, z tohoto důvodu bylo možné kontrolovat možný úbytek hmotnosti kostek během temperování. Vyhodnocení bylo

provedeno rozdílem hmotností kostek v čerstvém stavu a následně při zkouškách pevnosti v tlaku.

Pro jednotlivé teploty temperování byly zaznamenány následující výsledky změn hmotnosti. Vývoj hmotnosti u kostek v závislosti na teplotě ukazuje následující graf (Graf 2).

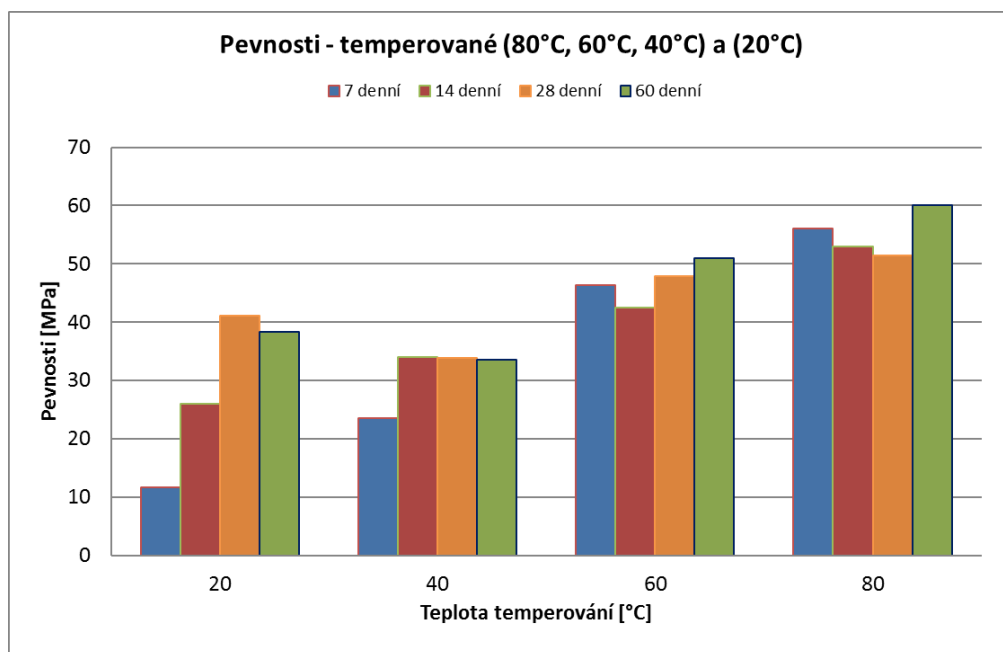


Graf 2 Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě temperování  
Zdroj: Vlastní zpracování

U zkoušených těles došlo ke snižování hmotnosti během doby zrání. Toto snižování bylo pravděpodobně zapříčiněno vysycháním těles. U těles za studena byl tento efekt pozvolný. U kostek temperovaných došlo ke skokovému snížení hmotnosti mezi 7. a 14. dnem zrání. Drobné výkyvy předpokládatelných výsledků byly dány odchylkami v měření.

### 3.1.3 Vliv teploty na průběh alkalické aktivace

Při tomto experimentu byla měřena pevnost v tlaku pro různé vzorky, které byly připraveny jak temperováním (80 °C, 60 °C a 40 °C po dobu 24 hod.), tak jako netemperované (při 20 °C „za studena“). Na vzorcích byla měřena tlaková pevnost krátkodobá i dlouhodobá, po 7, 14, 28 a 60 dnech zrání. Vliv teploty na průběh alkalické aktivace POPbetonu je znázorněn na grafu (Graf 3).



Graf 3 Pevnosti v závislosti na teplotě temperování

Zdroj: Vlastní zpracování

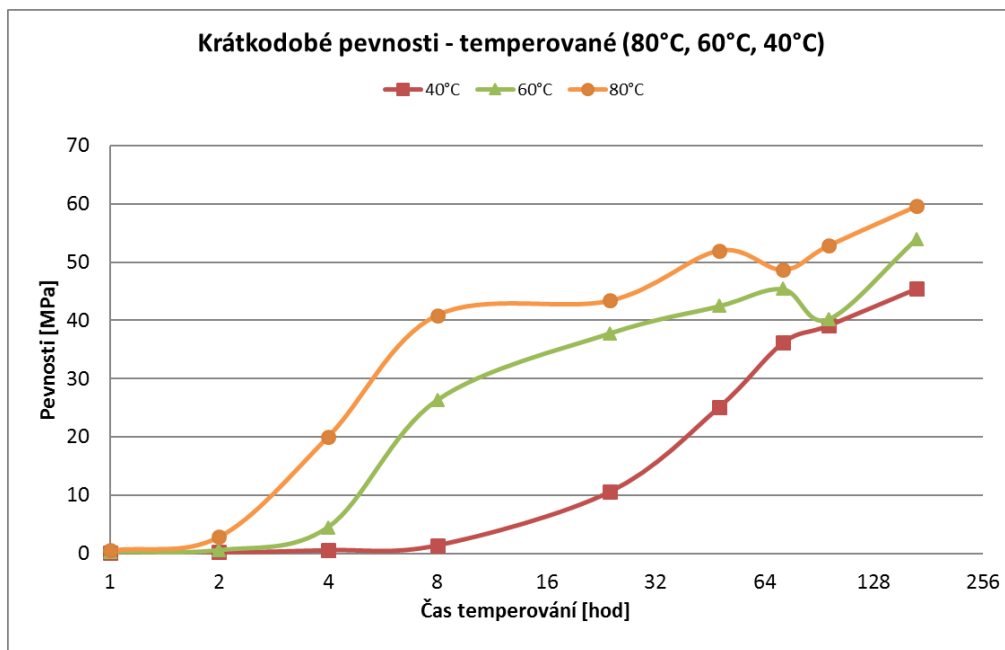
Temperováním těles při teplotách 60 °C a 80 °C bylo dosaženo vysokých počátečních pevností přes 40 MPa. U vzorků za studena byla hodnota přes 40 MPa dosažena až po 28 dnech. U vzorků temperovaných na 40 °C byla zjištěna nepřesnost měření či vada zkoušených kostek, neboť pevnost po 28 dnech byla dokonce nižší než po 14 dnech.

Z výsledků měření je patrné, že pevnosti v tlaku překročily po 28 dnech mez 35/40 MPa. Bylo by možné předpokládat, že v delším časovém horizontu by došlo k navýšení pevnosti hodnot blížících se 50 MPa, která dosahovala tělesa temperovaná na 80 °C.

### 3.1.4 Vliv doby temperování na průběh alkalické aktivace

Další variantou byla příprava vzorků temperováním po různě dlouhou dobu. Doby temperování byly 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72, 96 hodin a 7 dní. Na vzorcích byla okamžitě po skončení temperování a odformování zkušebních těles měřena tlaková pevnost. Hodnoty pevností zkušebních vzorků v závislosti na době temperování pro různé teploty jsou ukázány v grafu (Graf 4), vodorovná osa je v logaritmickém měřítku.





Graf 4 Krátkodobé pevnosti v závislosti na teplotě temperování  
Zdroj: Vlastní zpracování

Temperováním těles při teplotách 60 °C a 80 °C po 48 hodinách bylo dosaženo vysokých počátečních pevností přes 40 MPa .

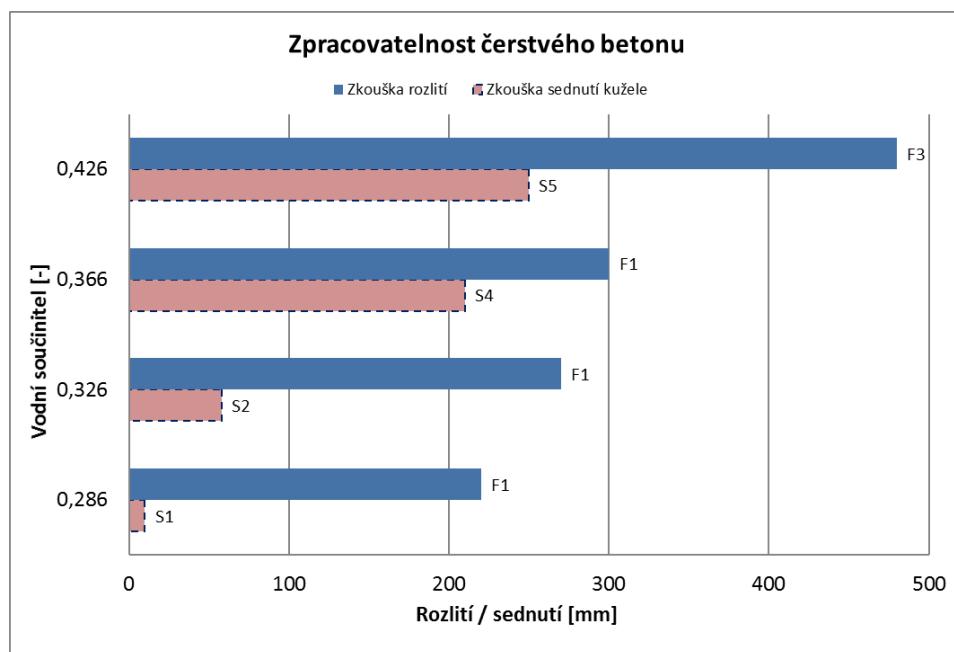
### 3.1.5 Zpracovatelnost čerstvého POPbetonu

V této části výzkumu byly popsány vlastnosti čerstvé POPbetonové směsi, zvláště zpracovatelnost směsi.

Po provedených zkouškách a měření lze konstatovat, že směsi s vyšším vodním součinitelem (VS) byly lépe zpracovatelné. U nízkých VS byla směs velmi lepivá a provádění zkoušky bylo náročné. Směs s nejvyšším VS byla tekutá.

Při zkoušce byly zaznamenány hodnoty sednutí kužele a rozlítí a v souladu s příslušnou normou ČSN byly vyhodnoceny konzistence čerstvého POPbetonu. Při zkoušce sednutí kužele byly stanoveny hodnoty S1 až S5 dle poklesu betonového kužele a při zkoušce rozlítí byly provedena klasifikace konzistence dle hodnot F1 až F6.

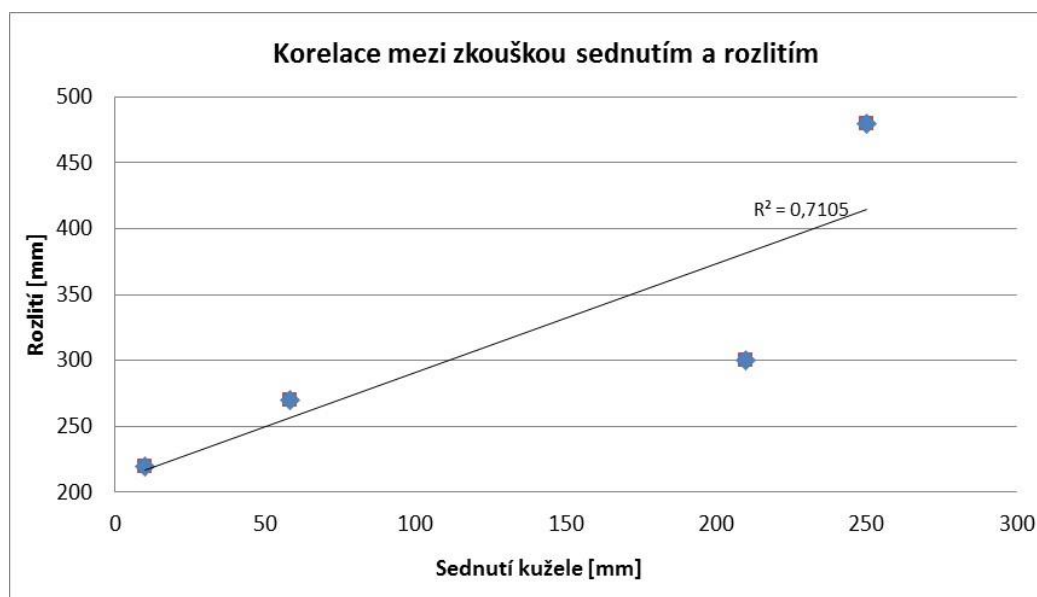
Výsledky obou zkoušek včetně klasifikace konzistence jsou vyznačeny v grafu (Graf 5).



Graf 5 Zpracovatelnost čerstvého betonu  
Zdroj: Vlastní zpracování

S rostoucím vodním součinitelem se zvyšoval stupeň sednutí a rozlití. Je však zřejmé, že nárůsty stupňů nejsou úplně stejné u obou rozdílných zkoušek.

Z naměřených hodnot konzistencí dle různých metod měření byla sestavena závislost rozlití na sednutí u čerstvého betonu, konkrétně korelaci rozlití a sednutí ukazuje Graf 6.



Graf 6 Korelace mezi zkouškou sednutím a rozlitím  
Zdroj: Vlastní zpracování

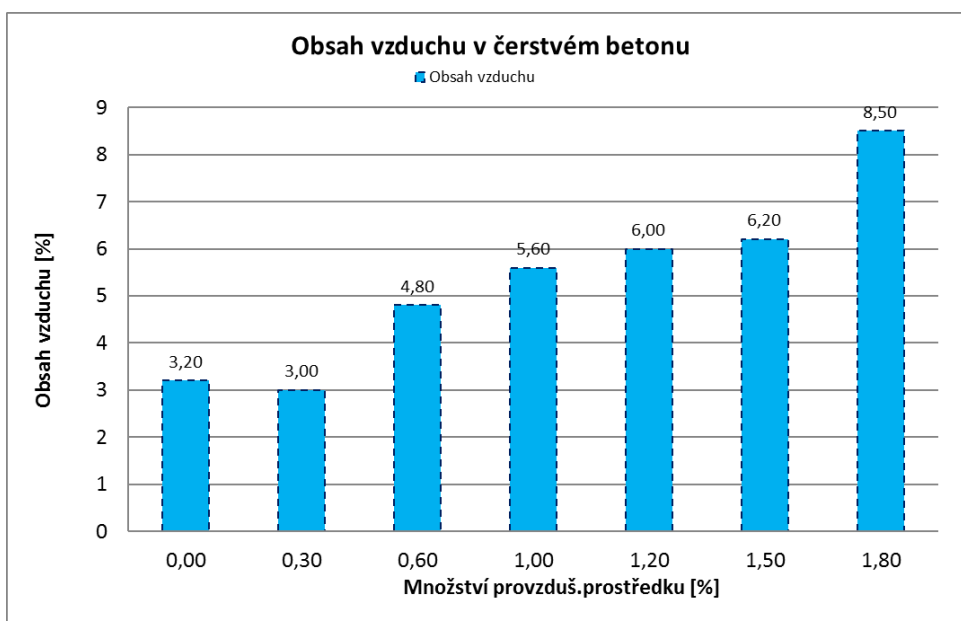
Hodnota koeficientu korelace mezi sednutím kužele a rozlitím kužele byla 0,843. Výsledek korelace byl vysoký, takže bylo možné konstatovat, že zde

existovala funkční závislost. Oproti Drimlovi [99], kde mu u standardních betonů vycházel koeficient korelace 0,767, byla závislost u POPbetonu výraznější.

### 3.1.6 Měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Pro zkoušení obsahu vzduchu v čerstvém POPbetonu byly navrženy série s konstantním množstvím reologické vody odpovídající vodnímu součiniteli 0,406. V řešených a navržených směsích docházelo k variaci množství provzdušňovací přísady v rozmezí 0,00 – 2,00 %.

Výsledky zkoušky jsou vyznačeny v následujícím grafu (Graf 7):



Graf 7 Obsah vzduchu v čerstvém betonu

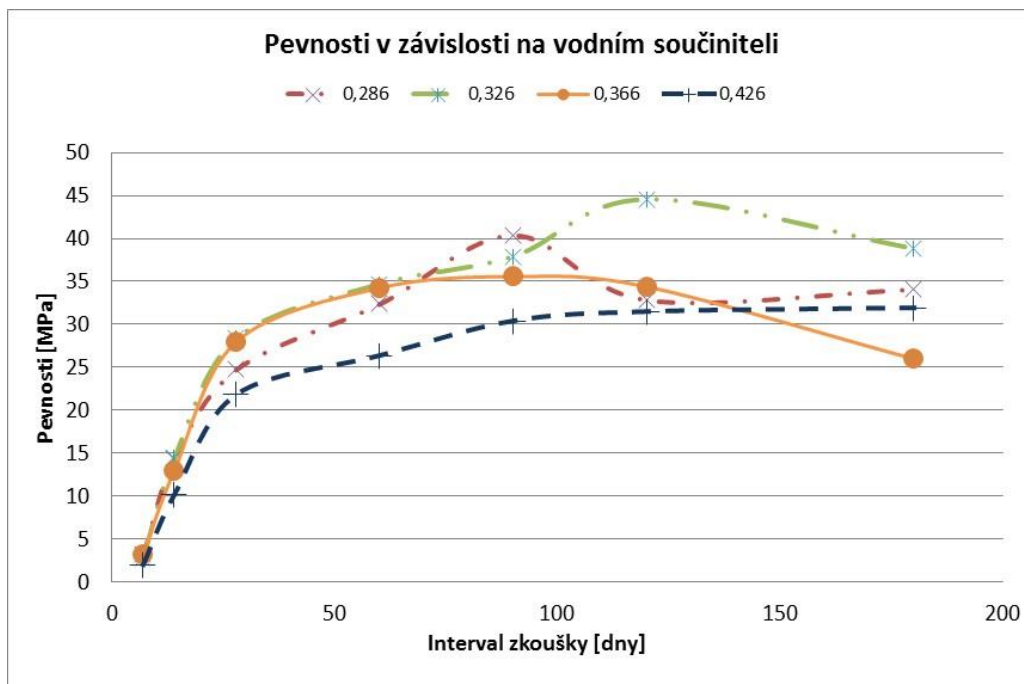
Zdroj: Vlastní zpracování

S rostoucím množstvím provzdušňovacího prostředku se zvyšoval obsah vzduchu. Bylo však zřejmé, že nárůst procenta provzdušnění čerstvého POPbetonu nebyl jednoznačně lineární. U množství provzdušňovací přísady 0,3 % byly zaznamenána anomálie, které lze přičítat chybě měření či vadě při výrobě.

### 3.1.7 Měření pevností v závislosti na množství reologické vody

Měření pevností v tlaku bylo prováděno po 7, 14, 28, 60, 90, 120 a 180 dnech zrání.

Pro jednotlivé vodní součinitele byly zaznamenány následující výsledky pevností v tlaku v závislosti na množství reologické vody, detailně to ukazuje následující graf (Graf 8).



Graf 8 Pevnosti v závislosti na vodním součiniteli  
Zdroj: Vlastní zpracování

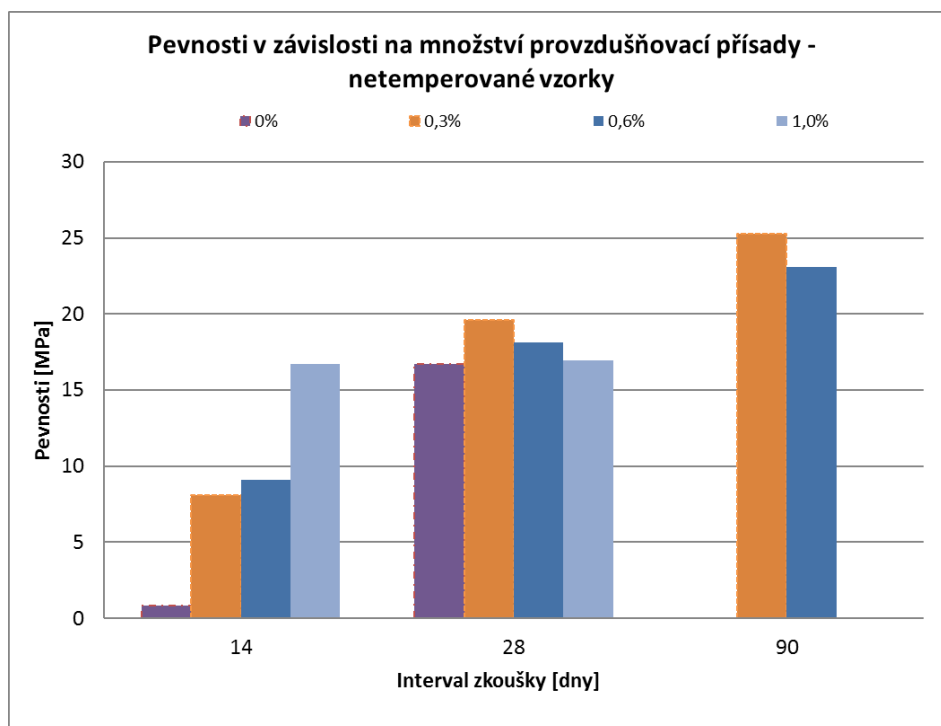
Vývoj pevností v tlaku pro jednotlivé vodní součinitele ukazoval zřejmý fakt, že se zvyšujícím se vodním součinitelem docházelo ke snižování pevností. Rozdíly pevností po 180 dnech zrání se pohybovaly kolem 5 MPa. Drobné rozdíly pevností u některých vzorků však mohou být způsobeny odchylkou měření.

Se zvyšujícím se stupněm sednutí např. z S1 na S2 (u VS z 0,286 na 0,326) byl zaznamenán pokles pevností o 6,5 % a z S2 na S4 (u VS z 0,326 na 0,366) pokles o 6 %.

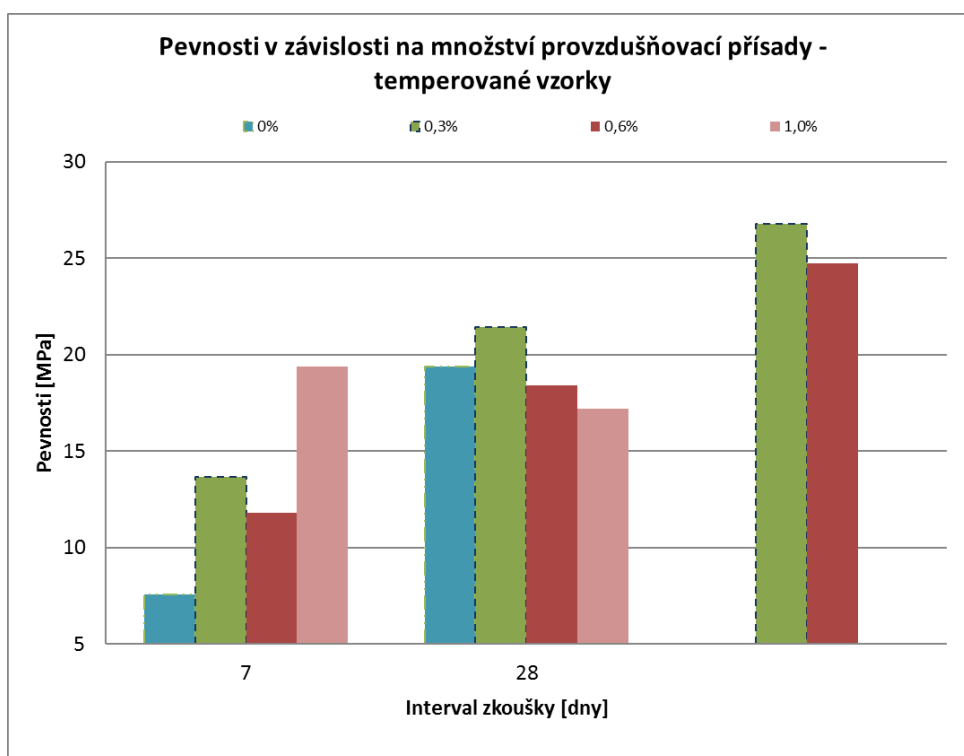
### 3.1.8 Měření pevností v závislosti na množství provzdušňovací přísady

Pro zkoušení pevností v tlaku (závislost na množství provzdušňovací přísady) byly použity směsi o stejném složení jako u zkoušek vzduchu v čerstvém betonu. Vodní součinitel u směsí byl 0,406.

Měření pevnosti bylo prováděno po 14, 28 a 90 dnech zrání. Zkouška po 60 dnech zrání byla záměrně vynechána, aby bylo možné získat dlouhodobější data. Pro jednotlivé množství provzdušňovací přísady byly zaznamenány následující výsledky pevností v tlaku, detailně to ukazují grafy (Graf 9 a Graf 10).



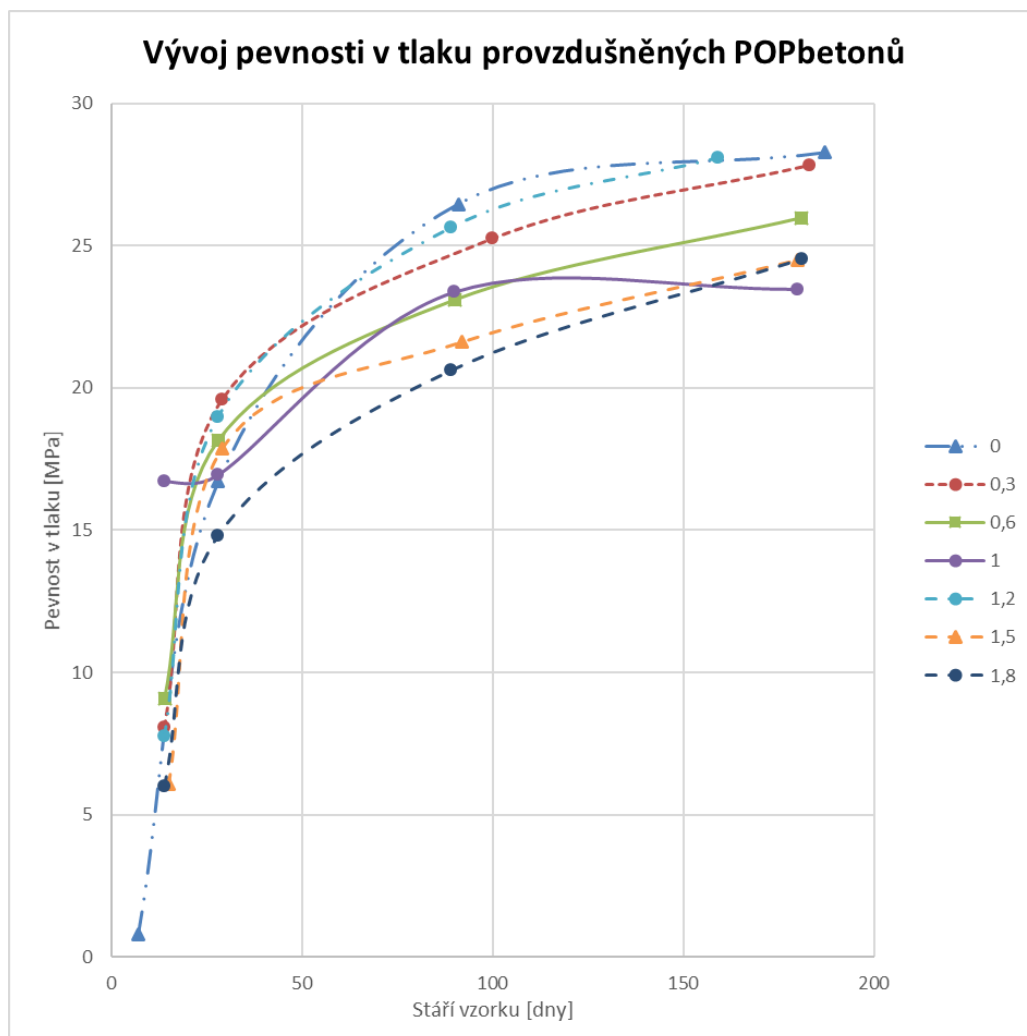
Graf 9 Pevnosti v závislosti na množství provzdušňovací přísady – netemperované vzorky  
Zdroj: Vlastní zpracování



Graf 10 Pevnosti v závislosti na množství provzdušňovací přísady – temperované vzorky  
Zdroj: Vlastní zpracování

Nárůst pevností v tlaku pro temperované i netemperované vzorky je pozvolný. U temperovaných vzorků byly pevnosti v tlaku přibližně o 10 % vyšší než u vzorků netemperovaných.

Bylo zjištěno, že 1 % vzduchu snižuje pevnost POPbetonu o zhruba 3-4 %, což odpovídá současným znalostem o cementových betonech [44]. V grafu (Graf 11) je patrný pozvolný náběh pevností.



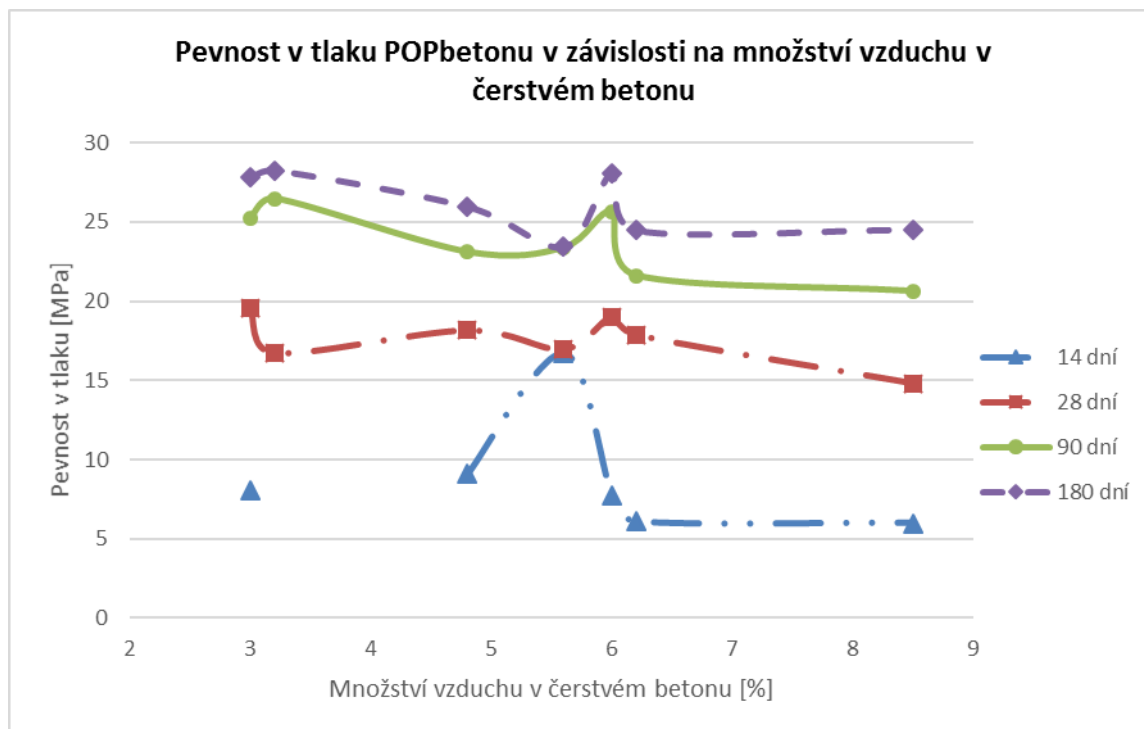
Graf 11 Vývoj pevnosti v tlaku provzdušněných POPbetonů

Zdroj: Vlastní zpracování

V souladu s výsledky z grafu (Graf 11), lze konstatovat, že konečné pevnosti bylo dosaženo po cca 120 dnech zrání a pohybovala se okolo 25 MPa.

Výsledky závislosti pevností v tlaku v závislosti na množství vzduchu v čerstvém betonu jsou uvedeny v grafu (Graf 12).

Z grafu (Graf 12) je dobře patrné, že krychelná pevnost klesá s rostoucím množstvím vzduchu v různých časových dekádách různě. Nejvýraznější pokles nastává s množstvím kolem 6 % vzduchu, tato hodnota je přibližně 3 – 5 MPa.



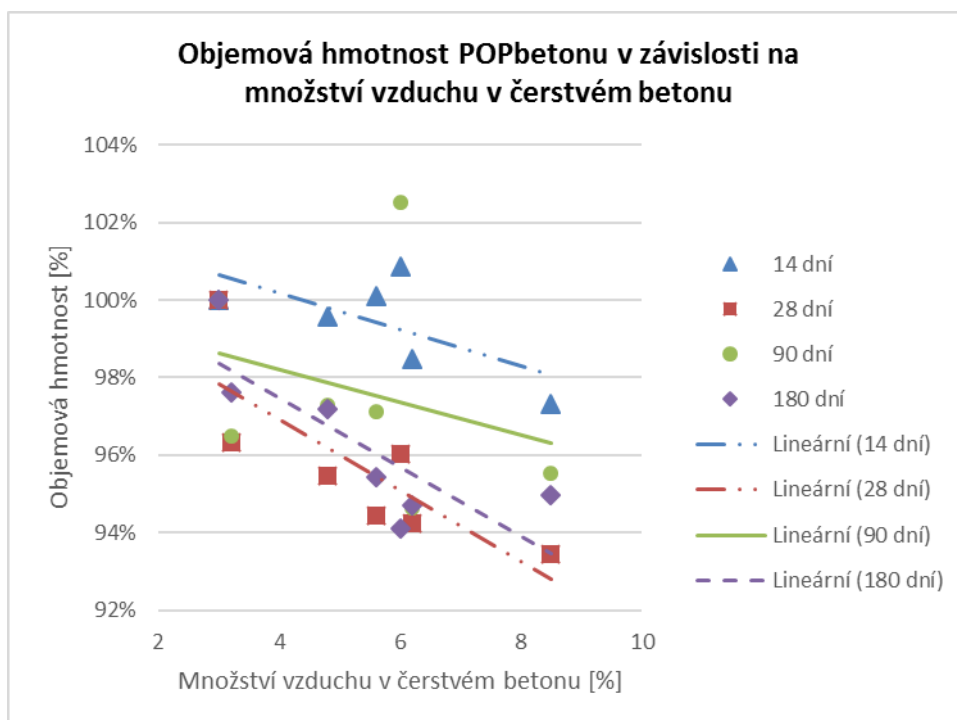
Graf 12 Pevnost v tlaku POPbetonu v závislosti na množství vzduchu v čerstvém betonu

Zdroj: Vlastní zpracování

### 3.1.9 Objemová hmotnost v závislosti na množství provzdušňovací přísady

Byla vyhodnocena objemová hmotnost vzorků v závislosti na množství provzdušňovací přísady a množství vzduchu v čerstvém betonu. Bylo provedeno přepočítání na procenta, kde 100 % je objemová hmotnost čerstvé směsi bez příměsí. U vzorků s množstvím provzdušňovací přísady kolem 1,2 %, respektive vzduchu kolem 6 % byla zaznamenána anomálie. Toto mohlo být způsobeno pravděpodobně chybou měření.

Z grafu (Graf 13) je patrné, že s nárůstem objemu vzduchu v čerstvém betonu klesá objemová hmotnost čerstvého betonu. Tato závislost je přibližně lineární.



Graf 13 Objemová hmotnost POPbetonu v závislosti na množství  
Zdroj: Vlastní zpracování

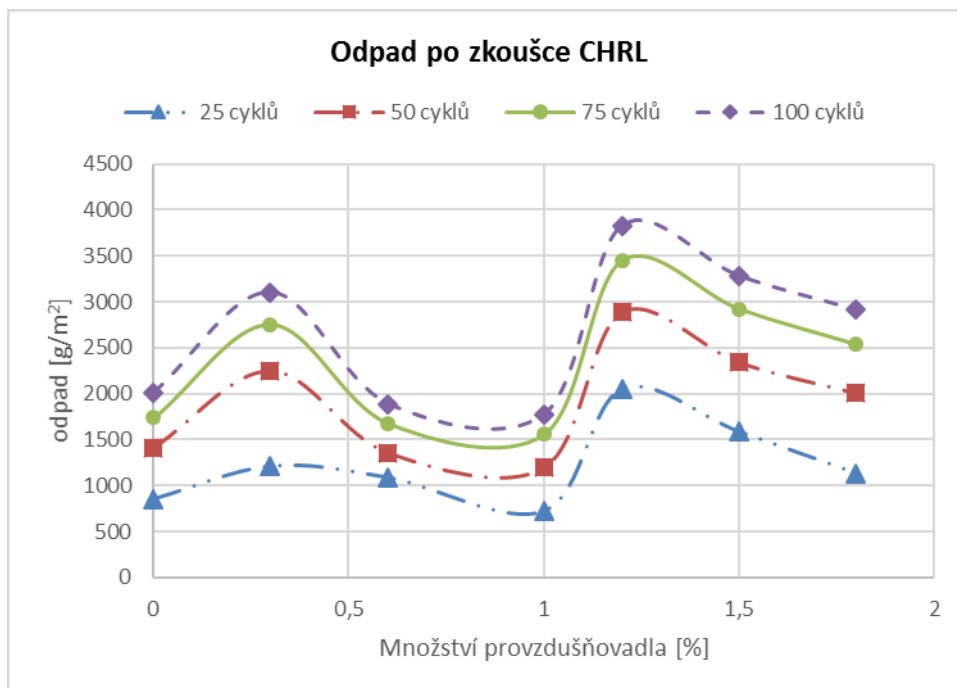
### 3.1.10 CHRL a spacing factor v POPbetonu

Pro zkoušení POPbetonu byly navrženy série s konstantním množstvím reologické vody. Celkový vodní součinitel (poměr mezi množstvím vody a množstvím popílku) byl 0,4128, pokud se započítají „pevné“ části vodního skla a NaOH, pak byl 0,3393.

Zkoušky odolnosti proti CHRL a ověření spacing factor byly prováděny v souladu s příslušnou normou ČSN.

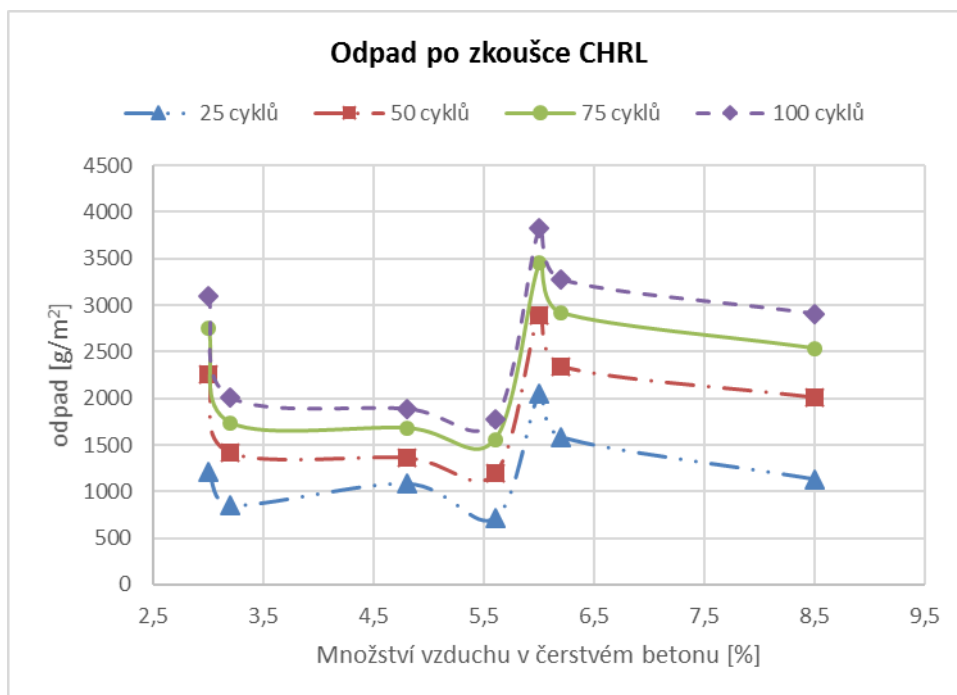
V následujících grafech (Graf 14 a Graf 15) je dobře patrný vliv množství provzdušnění na celkový odpad po zkoušce CHRL po jednotlivých cyklech. Nejúčinněji se projevila provzdušňující přísada v množství 1 % na množství popílku v POPbetonu a při tomto množství byl obsah vzduchu v čerstvém betonu 5,6 %. Zkouška CHRL byla prováděna min po 180 dnech zrání vzorku.





Graf 14 Odpad po zkoušce CHRL

Zdroj: Vlastní zpracování



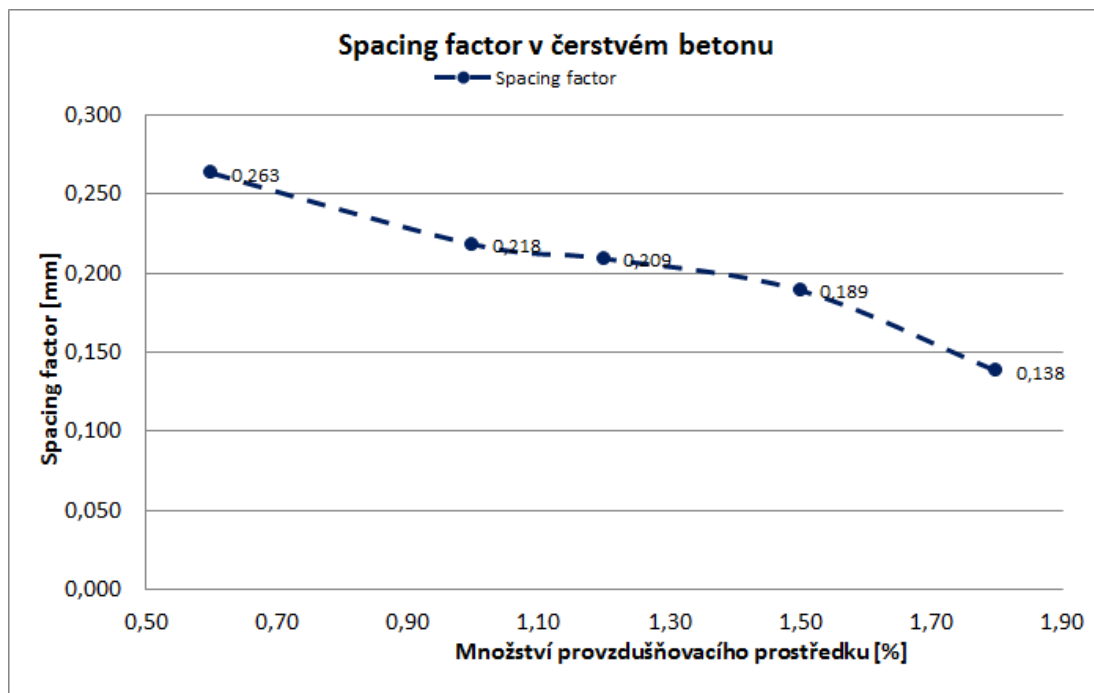
Graf 15 Odpad po zkoušce CHRL

Zdroj: Vlastní zpracování

Po provedení zkoušky na zjištění obsahu vzduchu byla na vzorcích popílkového betonu stanovena charakteristika vzduchových pórů – součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů „L“ - spacing factor. Výsledky zkoušky

byly začleněny v následujícím grafu (Graf 16). Princip metody byl převzat z instrukcí k AVA [102] a manuálu AVA [101].

Obecně lze konstatovat, že pro betony odolné proti zmrazovacím cyklům byla optimální hodnota charakteristiky spacing factor menší než 0,20 mm [100].



Graf 16 Spacing factor v čerstvém betonu  
Zdroj: Vlastní zpracování

Ačkoliv množství zkoušených vzorků nebylo velké, lze konstatovat následující závěry. S rostoucím množstvím provzdušňovacího prostředku se snižoval spacing factor. Bylo však zřejmé, že redukce velikosti charakteristiky vzduchových pórů u POPbetonu nebyla zcela lineární.

### 3.1.11 Vyhodnocení měření (provzdušňovací přísada)

Vyhodnocení výsledných hodnot pro jednotlivé řešené parametry zobrazuje tabulka níže (Tabulka 14).

*Tabulka 14 Souhrnné výsledky – nevibrolisovaná směs*

Množství provzdušňovací přísady v záměsích [kg]	0	0,012	0,024	0,04	0,048	0,06	0,072
Množství vzduchu [%]	3,2	3	4,8	5,6	6	6,2	8,5
Odpad po 25 cyklech	0,94%	0,65%	0,88%	0,78%	2,48%	2,12%	1,53%
Odpad po 50 cyklech	1,56%	1,21%	1,10%	1,30%	3,49%	3,14%	2,71%
Odpad po 75 cyklech	1,92%	1,48%	1,36%	1,70%	4,16%	3,91%	3,43%
Odpad po 100 cyklech	2,22%	1,67%	1,53%	1,93%	4,61%	4,39%	3,94%
Pevnosti po 28 dnech [MPa]	16,72	19,59	18,14	16,94	18,98	17,87	14,80
Pevnosti po 90 dnech [MPa]	26,46	25,26	23,09	23,37	25,63	21,62	20,61

*Zdroj: Vlastní zpracování*

Hmotnostní ztráta po zkoušce CHRL u vzorků POPbetonu pro odpovídající betony C25 (Huai-Shuai a Ting-Hua [53]) po 50 cyklech byla 2,64 % a po 100 cyklech byla 3,65 % při obsahu vzduchu 5,6 – 6,2 %. Tyto výsledky byly výrazně horší oproti výsledkům u Huai-Shuai a Ting-Hua [53] při provzdušnění 5,5 - 6,5 %, kdy výsledky byly 0,5 % po 50 cyklech a 1,5 % po 100 cyklech. Výsledky pro POPbeton byly podobné jako výsledky Hong-Qiang et al. [49]. Hong-Qiang et al. [49] zjistil, že odpady u neprovzdušněných betonů C30 dosahovaly hodnot 3,74 % po 125 cyklech.

Kvantita provzdušňovací přísady v záměsi POPbetonu měla pozitivní vliv na obsah vzduchu a charakteristiku vzduchových pórů. Nutno podotknout, že oproti doporučenému dávkování do cementových betonů bylo množství provzdušňovací přísady vysoké.

Množství odpadu bylo vysoké. Toto bylo dáno jednak malou pevností betonu v tlaku kolem 25 MPa na krychlích (o hraně 10 cm) a dále poměrně vysokým množstvím vody v kompozici. Tím byla dána i značná porozita materiálu.

Byl prokázán vliv provzdušnění POPbetonu na výsledky zkoušky CHRL. Optimální hodnota provzdušnění pro POPbeton pro minimální odpad při zkoušce CHRL byla přibližně 5,6 %. Vliv působení provzdušňovací přísady na alkalicky aktivované betony byl prokázán také při zkoušce spacing factor, kdy došlo ke stanovení charakteristiky vzduchových pórů. Výsledky vykazovaly pozitivní hodnoty.

### **3.2 Provedená měření a experimenty referenční směs pro vibrolisovaný prvek**

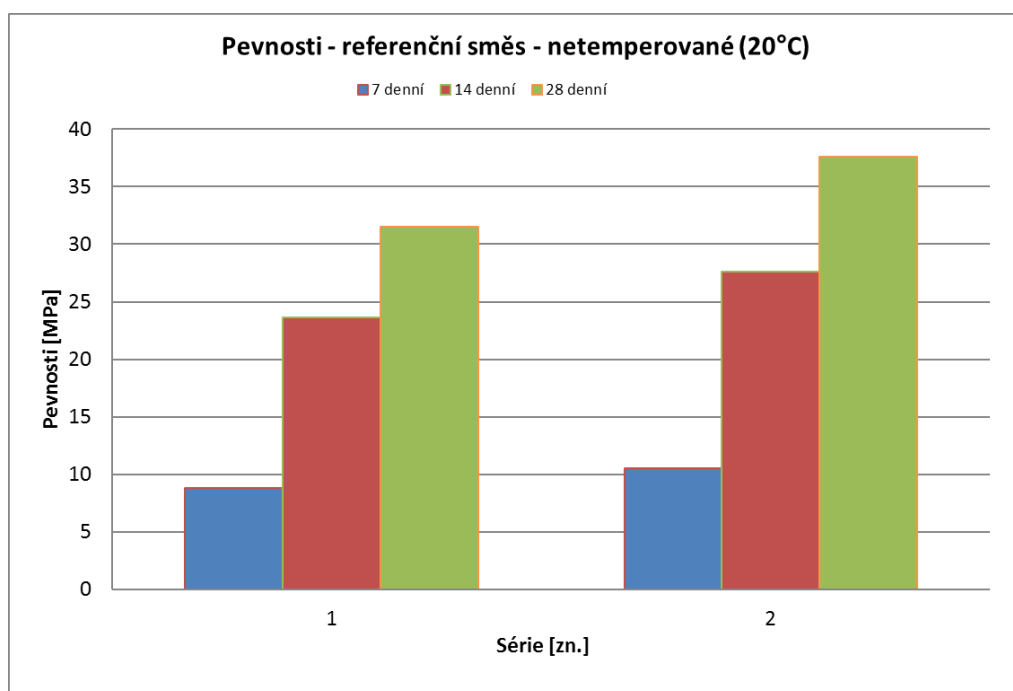
#### **3.2.1 Měření pevnosti referenční betonové směsi**

Mezi prvními ověřovanými vlastnostmi referenčních betonů byla pevnost v tlaku zkušebních vzorků. Byly použity prvky o stejných rozměrech jako u ostatních

zkušek, tzn. krychle o rozměrech 100 x 100 x 100 mm. Měření bylo prováděno po 7, 14 a 28 dnech zrání v hydraulickém lisu. Kostky před měřením pevnosti „v tlaku“ byly zváženy a změřeny a byla u nich zkontrolována rovinnost povrchů.

Takto připravené vzorky měly po 28 dnech zrání přibližně 60 % pevnost. Předpokládá se, že vzorky o 90 dnech zrání by mohly dosáhnout konstantních hodnot pevnosti v tlaku a dalo by se hovořit o pevnosti konečné.

Pro dvě série vzorků kostek byly zaznamenány následující výsledky pevností v tlaku, jak ukazuje přiložený graf (Graf 17).



Graf 17 Pevnosti referenční vibrolisované směsi  
Zdroj: Vlastní zpracování

Výsledky referenční směsi potvrdily, že tělesa dosáhla hodnoty kolem 28 MPa pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání.

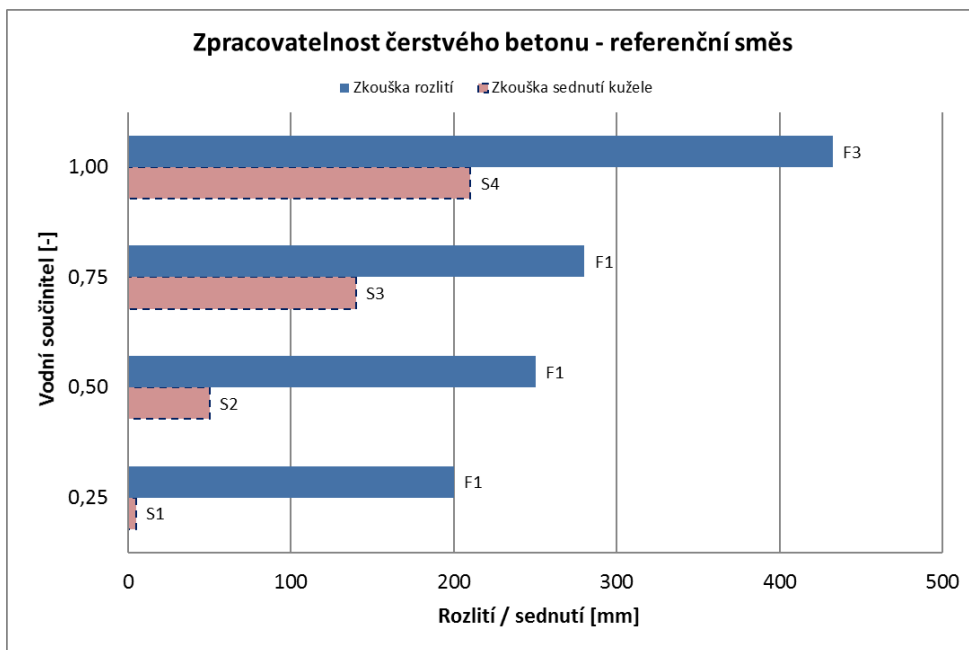
Dosažené pevnosti po 28 dnech zrání nepřekročily v průměru mez 35 MPa. Lze předpokládat, že v delším časovém horizontu by došlo k navýšení pevnosti k max. 35 MPa.

### 3.2.2 Zpracovatelnost čerstvé referenční směsi

V této části výzkumu byly popsány vlastnosti čerstvé referenční betonové směsi, zvláště zpracovatelnost směsi. Konzistence čerstvé směsi byla zkoušena v souladu s platnými normami ČSN.

Směsi se zvyšujícím se vodním součinitel (VS) byly lépe zpracovatelné. U směsí s nízkým VS byla směs velmi hutná (skoro se separovala) a provádění zkoušky bylo náročné. Směs s nejvyšším VS byla tekutá.

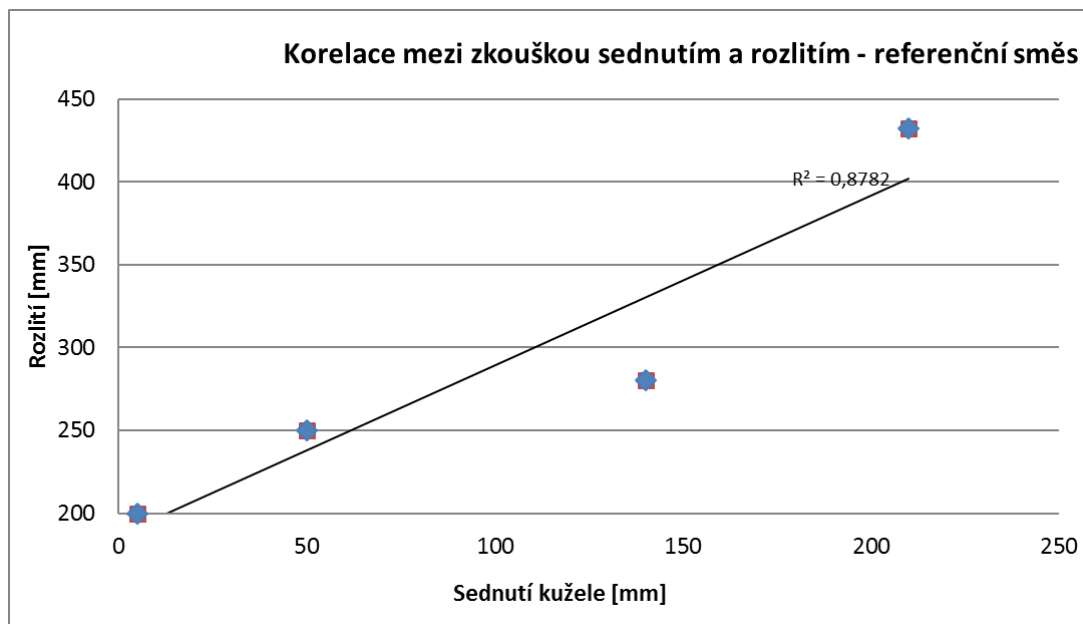
Výsledky obou zkušek jsou vyznačeny v grafu níže (Graf 18).



Graf 18 Zpracovatelnost čerstvého betonu - referenční směs  
Zdroj: Vlastní zpracování

S rostoucím vodním součinitelem se zvyšoval stupeň sednutí a rozlití. Je však zřejmé, že nárůsty stupňů nebyly úplně stejné u obou rozdílných zkoušek. Byla zkoumána závislost těchto parametrů mezi sebou, tzn. závislost rozlití na sednutí u čerstvého betonu.

Korelace rozlití na sednutí ukazuje další graf (Graf 19).



Graf 19 Korelace mezi zkouškou sednutím a rozlitím - referenční směs  
Zdroj: Vlastní zpracování

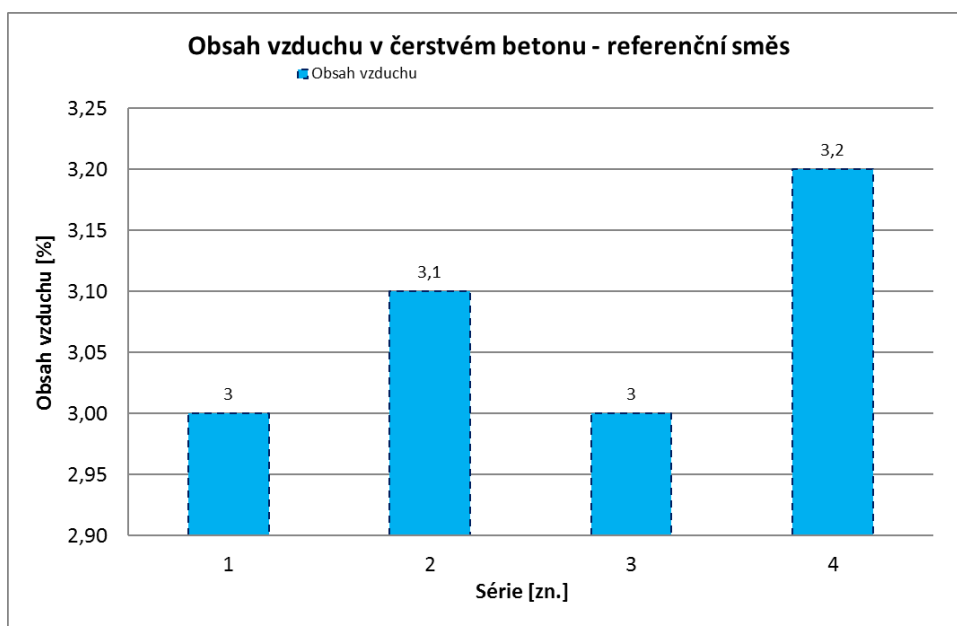
Hodnota koeficientu korelace mezi sednutím kužele a rozlitím kužele byla zjištěna 0,937. Výsledek korelace byl vysoký, takže bylo možné konstatovat, že zde existovala funkční závislost. Závislost u referenční směsi je výraznější oproti

Drimlovi [99], u kterého vycházeli koeficient u standardních betonů korelace kolem 0,767.

### 3.2.3 Měření obsahu vzduchu v čerstvé referenční směsi

Na vzorcích referenčního betonu byl měřen obsah vzduchu v souladu s platnou normou ČSN, konkrétně s normou ČSN EN 12350-7.

Výsledky zkoušky jsou vyznačeny v následujícím grafu (Graf 20)



Graf 20 Obsah vzduchu v čerstvém betonu - referenční směs

Zdroj: Vlastní zpracování

Obsah vzduchu u referenční směsi byl přibližně kolem 3 %.

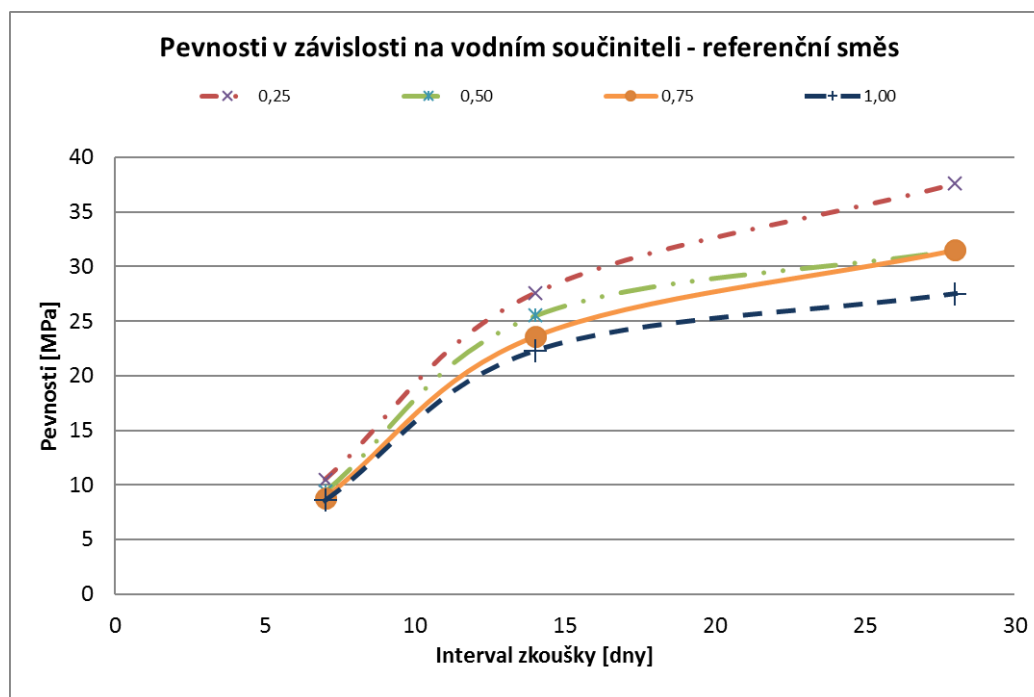
### 3.2.4 Měření pevností referenční směsi v závislosti na množství reologické vody

Pro zjištění možné závislosti pevnosti v tlaku na objemu vody byly použity směsi o stejném složení jako u zkoušek zpracovatelnosti čerstvé směsi.

Měření pevnosti bylo prováděno po 7, 14 a 28 dnech zrání.

Byla také provedena porovnání s předchozími výsledky vlastností čerstvého betonu získanými při zkouškách zpracovatelnosti a stanoveny závěry ohledně jejich pevnostních charakteristik.

Pro jednotlivé vodní součinitele byly zaznamenány následující výsledky pevností v tlaku, jak je zobrazeno následujícím grafu (Graf 21).



Graf 21 Pevnosti v závislosti na vodním součiniteli - referenční směs

Zdroj: Vlastní zpracování

Vývoj pevností v tlaku pro jednotlivé vodní součinitele ukázal zřejmý fakt, že se zvyšujícím se vodním součinitelem docházelo ke snižování pevností. Rozdíly pevností po 28 dnech se pohybovaly kolem 2 MPa. Drobné rozdíly pevností u některých vzorků byly způsobeny odchylkou měření.

Se zvyšujícím se stupněm sednutí např. z S1 na S2 (u VS z 0,25 na 0,50) byl zaznamenán pokles pevností o 11 % a z S2 na S3 (u VS z 0,50 na 0,75) pokles o 5 %.

### 3.2.5 Objemová hmotnost referenční směsi v závislosti na množství provzdušňovací přísady

Tento parametr nebyl dále zkoumán z důvodu, že do směsi nebyla dodávána provzdušňovací přísada.

### 3.2.6 Vyhodnocení měření (referenční směs)

Výše uvedené měření a zkoušky byly vyhodnoceny a byly popsány vlastnosti zkoumané směsi a vzorků. Z takto získaných dat byla zpracována další vyhodnocení. Výsledné hodnoty pro jednotlivé parametry zobrazuje tabulka (Tabulka 15).

*Tabulka 15 Souhrnné výsledky – referenční směs*

Množství provzdušňovací přísady v záměsích [kg]	0	0	0	0
Vodní součinitel w	0,25	0,5	0,75	1
Množství vzduchu (%)	3	3,1	3	3,2
Pevnosti po 14 dnech [MPa]	27,60	25,50	23,60	22,30
Pevnosti po 28 dnech [MPa]	37,60	31,50	31,50	27,50

*Zdroj: Vlastní zpracování*

Vliv provzdušňovací přísady v referenční záměsi nebyl zaznamenán, neboť nebyla do směsi přidána, rozdíly byly dány drobnými výrobními odchylkami při míchání směsi. Obsah vzduchu byl přibližně konstantní.

Závěr z vyhodnocení je, že pevnosti jsou přibližně stejné.

### **3.3 Provedená měření a experimenty na vibrolisovaných směsích**

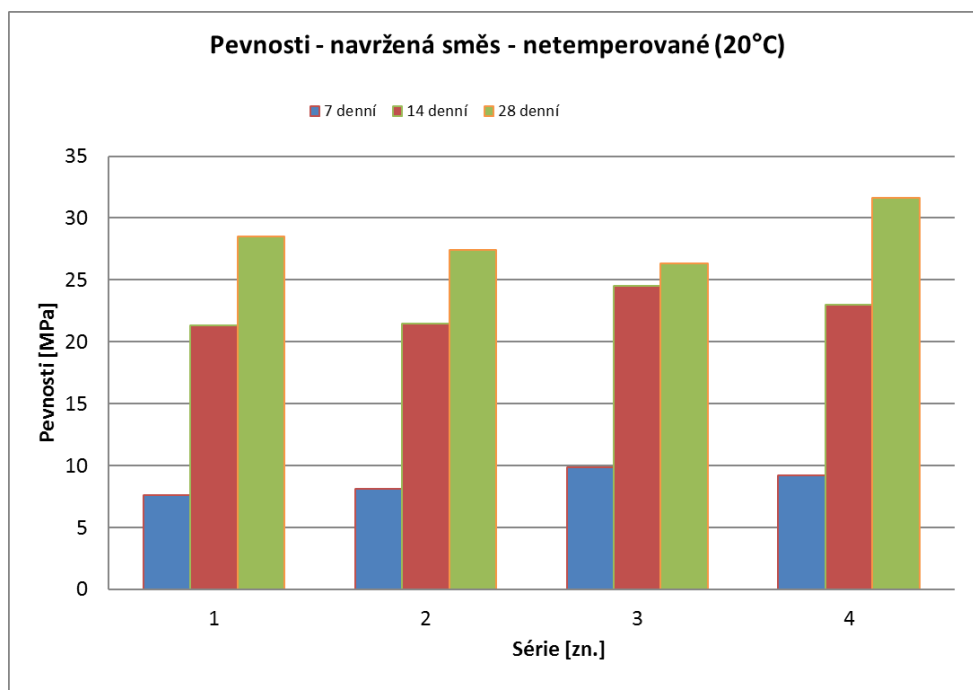
#### **3.3.1 Měření pevnosti směsi pro vibrolisované prvky**

Prvotní ověřovanou vlastností u nově navržené směsi byla pevnost v tlaku ztvrdlých betonů. V případě navržených vzorků bylo měření prováděno po 7, 14 a 28 dnech zrání. Měření pevností v tlaku bylo prováděno na tělesech o hraně 100 mm v hydraulickém lisu. Kostky před provedením měření pevnosti „v tlaku“ byly zváženy a změřeny a byla u nich zkontrolována rovinnost povrchů. Z potřebné síly (kN) pro destrukci betonové kostky a zatěžované plochy (mm<sup>2</sup>) byly spočítány hodnoty pevností (MPa).

Připravené vzorky měly po 28 dnech zrání pouze 60 % pevnost. Následně při delším časovém úseku zrání by bylo možné předpokládat dosažení konstantních hodnot pevnosti v tlaku a dá se hovořit o pevnosti konečné.

Pro jednotlivé vzorky byly zaznamenány následující výsledky pevností v tlaku, které jsou reprezentovány v následujícím grafu (Graf 22).





Graf 22 Pevnosti navržené vibrolisované směsi

Zdroj: Vlastní zpracování

Výsledky navržené směsi deklarují, že dosažené hodnoty byly kolem 28 MPa po 28 dnech zrání. Pro ověření vlastností byly zpracovány a změřeny čtyři vzorky ztuhlé či čerstvé směsi.

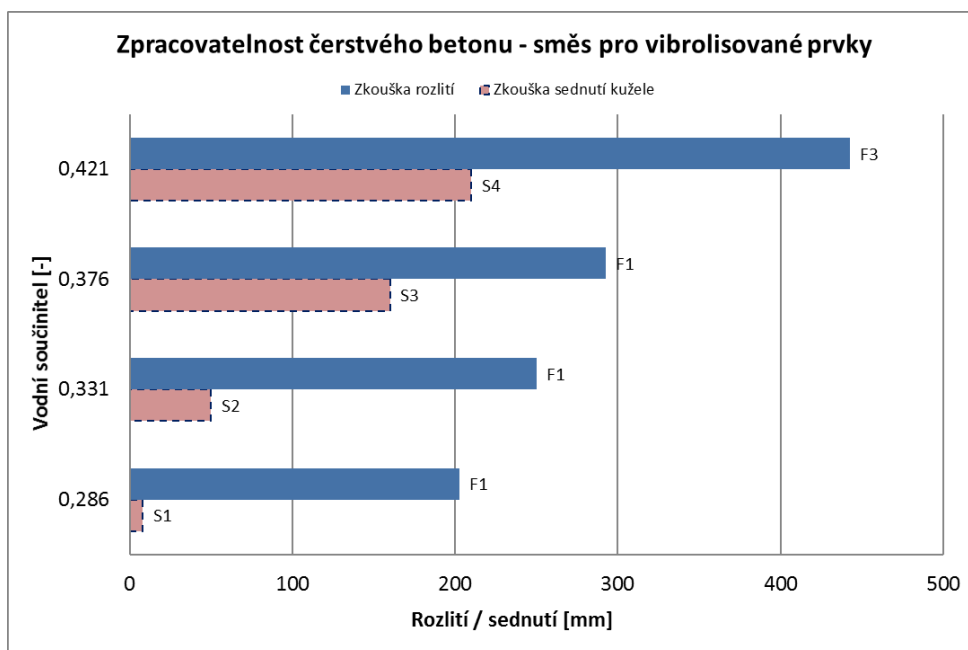
Dosažené pevnosti po 28 dnech zrání skoro nepřekročily mez 30 MPa. Lze předpokládat, že v delším časovém horizontu dojde k navýšení pevnosti k max. 33 MPa.

### 3.3.2 Zpracovatelnost čerstvé směsi pro vibrolisové prvky

Jednou z důležitých charakteristik betonové směsi je její zpracovatelnost.

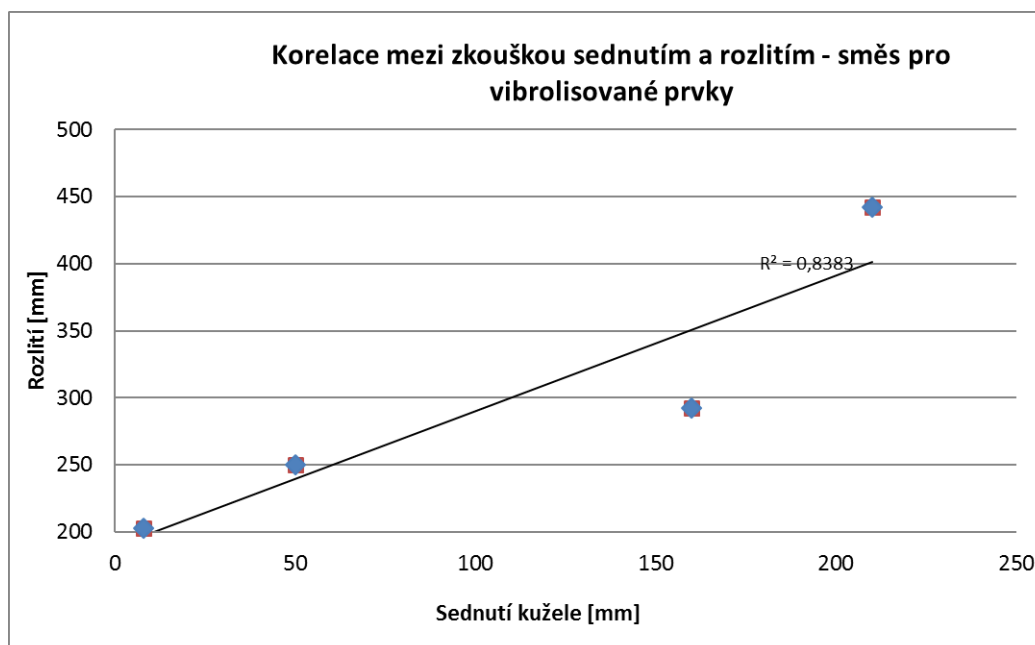
Během prováděných zkoušek bylo zjištěno, že směsi s vyšším vodním součinitelem (VS) byly lépe zpracovatelné. Směsi s nízkým VS byly velmi hutné, toto mělo vliv i na vyšší náročnost provádění zkoušky. Směs s nejvyšším VS byla tekutá.

Byly provedeny zkoušky sednutí kužele a rozlití, jejich výsledky jsou uvedeny v grafu (Graf 23).



Graf 23 Zpracovatelnost čerstvého betonu – směsi pro vibrolisované prvky  
Zdroj: Vlastní zpracování

Stupeň sednutí či rozlítí se zvyšuje s rostoucím vodním součinitelem. Dle získaných výsledků lze konstatovat, že nárůsty stupňů nejsou rovnoměrné u obou rozdílných zkoušek. Z naměřených hodnot konzistencí byla posuzována možná závislost rozlítí na sednutí u čerstvé betonové směsi. Výsledky korelace rozlítí na sednutí ukazuje Graf 24.



Graf 24 Korelace mezi zkouškou sednutím a rozlítím - směsi pro vibrolisované prvky  
Zdroj: Vlastní zpracování

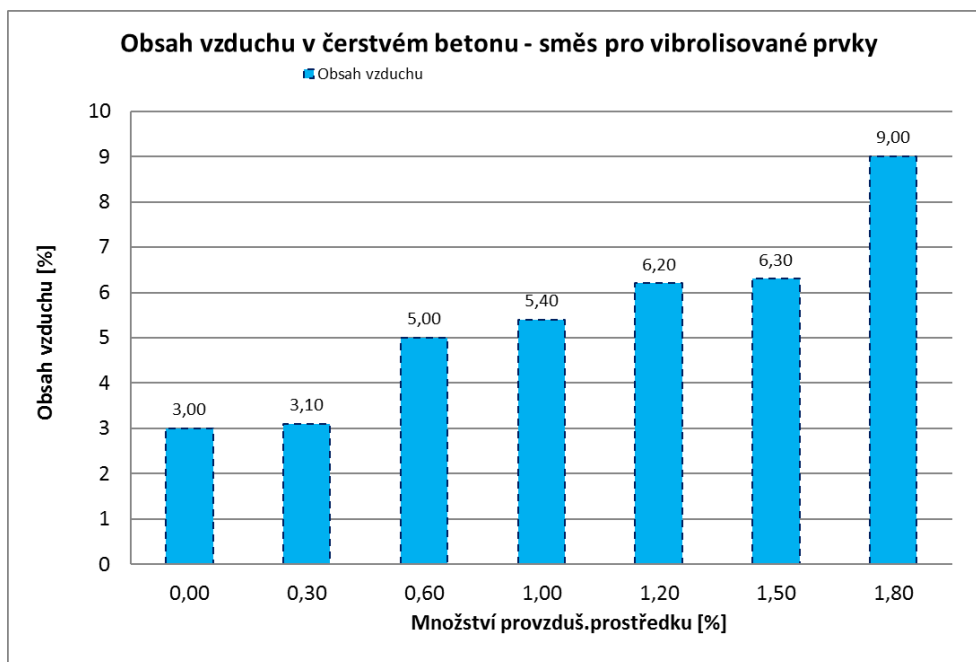
Hodnota koeficientu korelace mezi sednutím kužele a rozlítím kužele byla určena na hodnotě 0,916. Takový výsledek korelace je vysoký a předpokládá u této vlastnosti funkční závislost. V porovnání s klasickými cementovými betony, je

závislost u navržené směsi výraznější, např. Driml [99] uvádí, že u standardních betonů vychází koeficient korelace 0,767.

### 3.3.3 Měření obsahu vzduchu v čerstvé směsi pro vibrolisované prvky

Pro získání výsledků bylo postupováno v souladu s ČSN EN 12350-7.

Souhrn získaných výsledků je v následujícím grafu (Graf 25).



Graf 25 Obsah vzduchu v čerstvém betonu – směsi pro vibrolisové prvky  
Zdroj: Vlastní zpracování

Na základě získaných výsledků lze formulovat tyto závěry, tzn. vyšší obsah vzduchu je docílen se zvyšující se dávkou provzdušňovacího prostředku. Tento nárůst procenta provzdušnění čerstvé směsi není lineární.

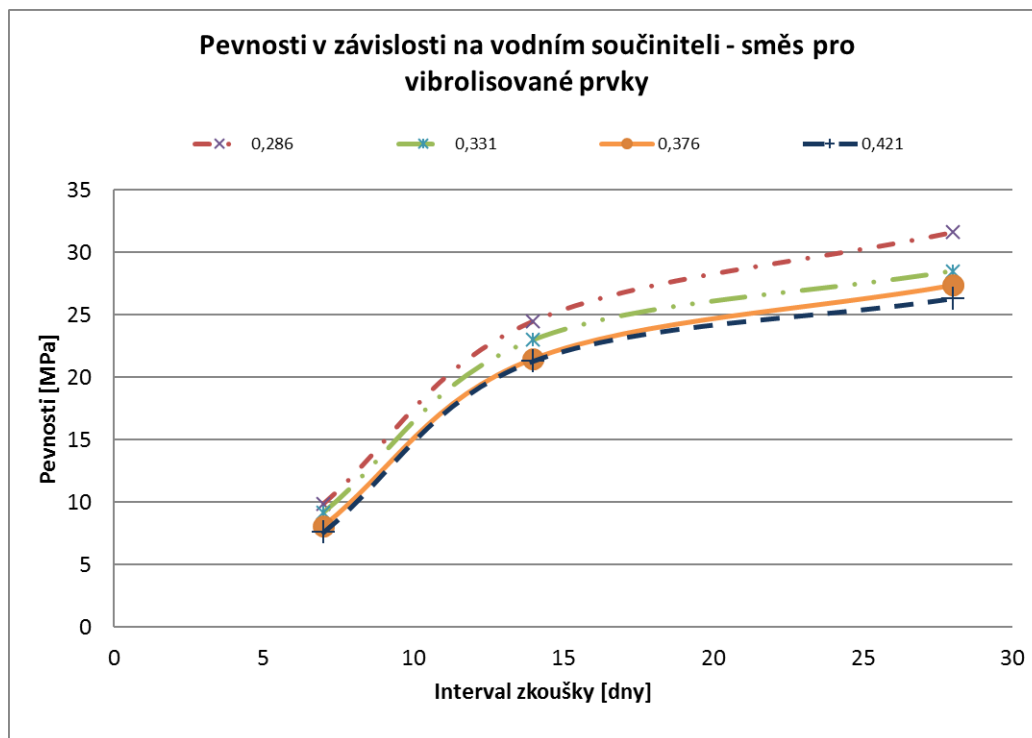
### 3.3.4 Měření pevností směsi pro vibrolisované prvky v závislosti na množství reologické vody

Dalším experimentem bylo stanovení možné závislosti mezi množstvím reologické vody a hlavní mechanickou charakteristikou betonu, konkrétně pevnosti v tlaku. Použitá směs měla stejné složení jako u zkoušek zpracovatelnosti čerstvé směsi, tzn. vodní součinitel v betonu byl měněn v rozmezí od 0,286 do 0,421.

Měření pevnosti bylo prováděno po 7, 14 a 28 dnech zrání.

Kromě získaných výsledků pevností došlo k porovnání s předchozími výsledky zpracovatelnosti čerstvé směsi získanými a vysloveny závěry ohledně jejich pevnostních charakteristik.

Byly změřeny hodnoty krychelné tlakové pevnosti pro navržené vodní součinitele a výsledky jsou uvedeny v následujícím grafu (Graf 26).



Graf 26 Pevnosti v závislosti na vodním součiniteli – směsi pro vibrolisované prvky  
Zdroj: Vlastní zpracování

Ze získaných výsledků lze odhalit následující zjištění, kterým byly ověřeny předpokládané závěry. Snižování pevnosti v tlaku se projevilo u směsí se zvyšujícím se vodním součinitelem. Rozdíly změřených pevností v tlaku po 28 dnech zrání se pohybovaly kolem 2 MPa. Nepatrné rozdíly ve výsledcích pevností u některých vzorků mohly být způsobeny neshodou měření.

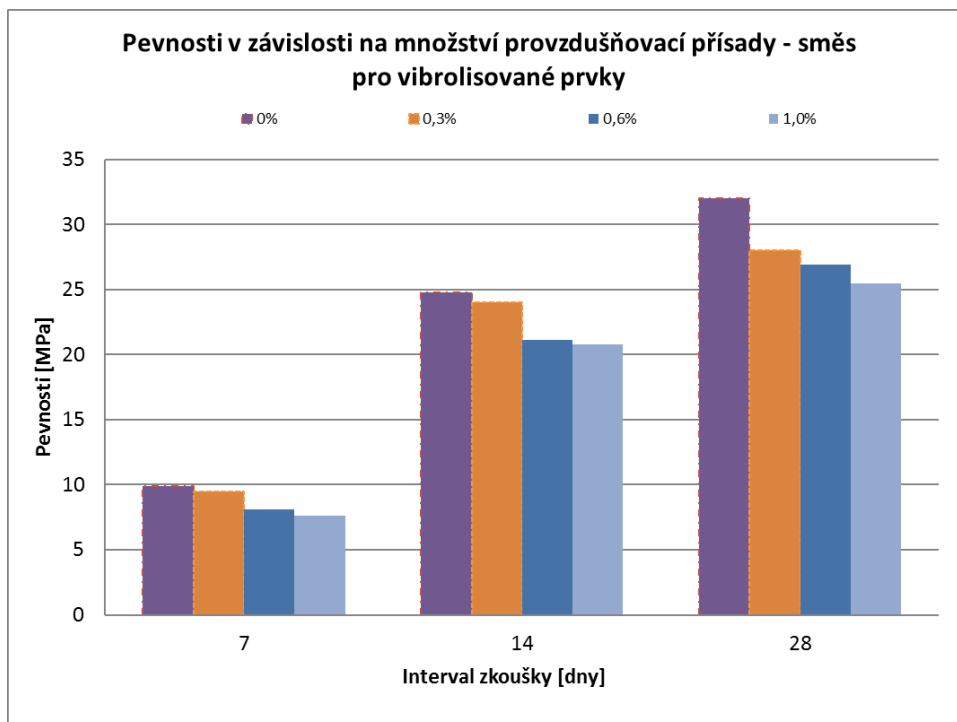
S ohledem na předchozí výsledky zpracovatelnosti bylo zjištěno, že dochází-li k nárůstu stupně sednutí např. z S1 na S2 (u VS z 0,286 na 0,331), by zaznamenán pokles pevností přibližně o 8 % a z S2 na S4 (u VS z 0,331 na 0,376) pokles o 7 %.

### 3.3.5 Měření pevností směsi pro vibrolisované prvky v závislosti na množství provzdušňovací přísady

V návaznosti na předchozí zkoušky navržené betonové směsi byly zjišťovány případné závislosti charakteristiky pevnosti tlaku na množství provzdušňovací přísady.

Měření pevnosti bylo prováděno po 7, 14 a 28 dnech. Z časových a personálních důvodů nebyly provedeny zkoušky s vyšším intervalem zrání betonu, ačkoliv lze předpokládat, že by tyto výsledky lépe ověřily či vyvrátily získané výsledky. Výsledky mechanických vlastností byly provedeny pouze u směsí s množstvím provzdušňovací přísady do hodnoty 1 %.

Pro jednotlivé množství provzdušňovací přísady byly zaznamenány následující výsledky pevností v tlaku uvedené v grafu (Graf 27).

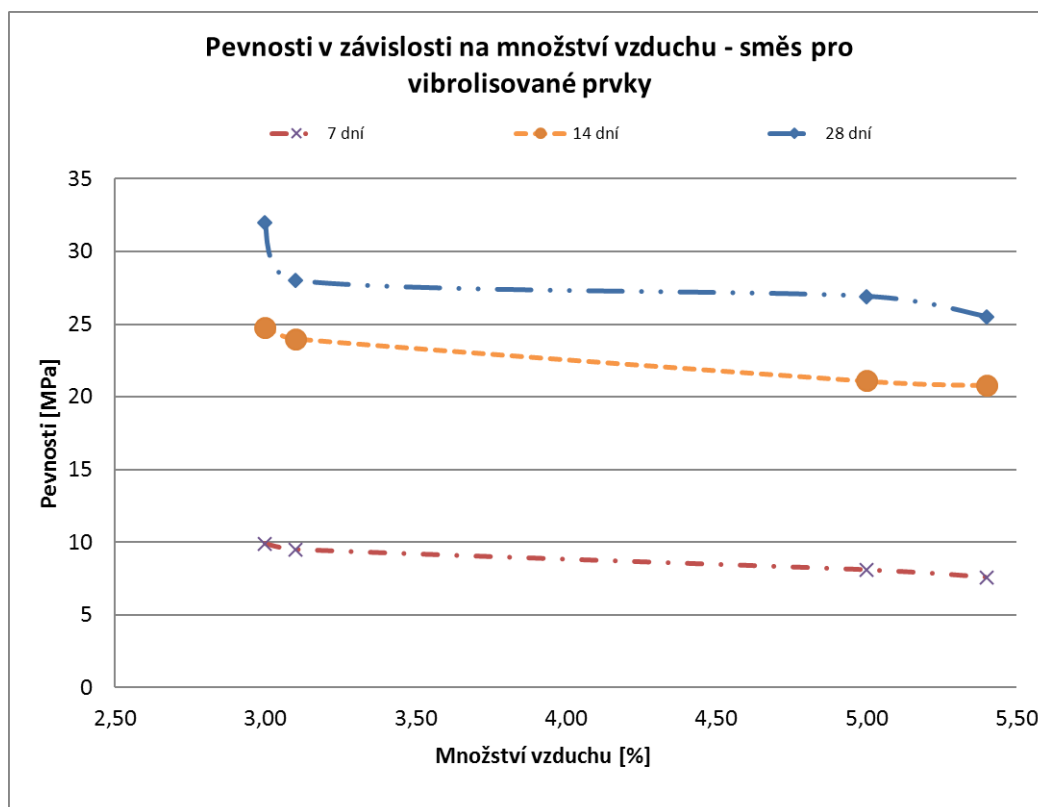


Graf 27 Pevnosti v závislosti na množství provzdušňovací přísady – směsi pro vibrolisované prvky

Zdroj: Vlastní zpracování

Nárůst pevností v tlaku u vzorků mezi 14 a 28 dny byl pozvolný.

Následně byl zpracován graf závislosti pevnosti v tlaku u kostek na množství vzduchu v čerstvém betonu, výsledky jsou zobrazeny v grafu (Graf 28).



Graf 28 Pevnosti v závislosti na množství vzduchu – směsi pro vibrolisované prvky

Zdroj: Vlastní zpracování

Bylo zjištěno, že zvýšení o 2 % vzduchu snižovalo pevnost směsi o zhruba 16 %, toto odpovídalo současným znalostem o cementových betonech viz TKP [44]. V grafu (Graf 28) je patrný pozvolný náběh pevností. U nevibrolisované směsi byly zjištěny výrazné oscilace pevností v tlaku u směsi s obsahem vzduchu kolem 6 %, tento výsledek však u směsi pro vibrolisované prvky zaznamenán nebyl. Konečné pevnosti v tlaku v době 90 či 180 dnů nebyly naměřeny, lze vyslovit domněnku, že se budou pohybovat okolo 27 MPa.

Z grafu (Graf 28) je dobře patrné, že krychlená pevnost klesala s rostoucím množstvím vzduchu v různých časových dekádách různě. Drobný pokles nastal s množstvím kolem 5 % vzduchu, zde by bylo možné usuzovat, že při vyšších množstvích vzduchu např. kolem 6 či 7 % by mohl nastat stejný scénář jako u nevibrolisovaných směsí POPbetonu.

### 3.3.6 Vyhodnocení měření (směsi pro vibrolisované prvky)

V poslední kapitole experimentální části bylo provedeno vyhodnocení dat z provedených měření a zkoušek, které popisovaly vlastnosti zkoumané směsi a vzorků. Sumarizaci výsledků pro jednotlivé parametry zobrazuje tabulka (Tabulka 16).

Tabulka 16 Souhrnné výsledky – směsi pro vibrolisované prvky

Množství provzdušňovací přísady v záměsích [%]	0	0,3	0,6	1	1,2	1,5	1,8
Množství vzduchu (%)	3	3,1	5	5,4	6,2	6,3	9
Pevnosti po 7 dnech [MPa]	9,90	9,50	8,10	7,60	-	-	-
Pevnosti po 14 dnech [MPa]	24,80	24,00	21,10	20,80	-	-	-
Pevnosti po 28 dnech [MPa]	32,00	28,00	26,90	25,50	-	-	-

Zdroj: Vlastní zpracování

Množství provzdušňovací přísady v záměsi mělo pozitivní vliv na obsah vzduchu, s drobným zvýšením množství provzdušňovací přísady rostlo i množství vzduchu. Množství vzduchu u vzorků se pohybovalo kolem 5 – 6 % pro množství přísady 0,6 – 1,5 % a následně skokově vzrostlo. Tento jev by bylo potřeba ověřit na větším množství záměsí a vzorků, aby bylo vyloučeno, zda se nejedná o anomálii u provedených měření. Větší množství měření nebylo provedeno z časových a kapacitních důvodů.

Pevnosti v tlaku u směsi s obsahem vzduchu v rozmezí 3 – 5,5 % byly přibližně stejné v rozmezí 25 – 32 MPa.

Je nutno uvést, že oproti cementovým betonům bylo doporučené dávkování provzdušňovací přísady vysoké, u cementových betonů je aplikována nižší kvantita.

Malá pevnost betonu v tlaku kolem max. 27 MPa na krychlích (o hraně 100 mm) byla dána poměrně vysokým množstvím vody v kompozici. Tím byla dána i značná porozita materiálu. Pokles pevnosti pro zvýšení množství vzduchu o 2 % byl přibližně 16 %.

Z personálních a časových příčin a celkového zdržení prováděného výzkumu z důvodu nutnosti úprav návrhu směsi pro laboratorní podmínky nebyly provedeny další ověřovací experimenty a měření. Pro ověření pozitivního či negativního vlivu provzdušnění na navrženou směs by bylo nutné provést zkoušku CHRL a zkoušku spacing factor (charakteristika vzduchových pórů). V návaznosti na tyto výsledky by bylo možné formulovat závěry o optimální hodnotě provzdušnění na minimální odpad při zkoušce CHRL a na výsledky zkoušky spacing factor. Tyto zkoušky nebyly nakonec provedeny.

Získané výsledky ověřily mechanické a reologické vlastnosti a vlastnosti provzdušněné směsi u navržené alkalicky aktivované směsi. Byly prokázány podobné výsledky, které byly zjištěny u Uygunoğlu a kol. [103]. Jejich výsledky byly srovnatelné a potvrzovaly, že krychelná pevnost klesala se rostoucí náhradou cementového pojiva u betonových směsích. Jejich další výsledek o snižující se objemové hmotnosti betonu nebyl ověřován. S ohledem na neprovedení zkoušek odolnosti proti CHRL nebylo možné ověřit ani vyvrátit tvrzení Uygunoğlu a kol.

[103], že s rostoucí náhradou cementového pojiva se zvyšovala nasákavost a porozita materiálu.

Provedená měření a jejich výsledky ověřily, že navržená směs má podobné vlastnosti jako referenční betonová cementová směs s drobným zhoršením vlastností. S ohledem na to lze proklamovat, že tato směs je předběžně použitelná pro návrh vibrolisovaných materiálů. Je nutné optimalizovat směs na konkrétní technologii výrobků vibrolisovaných prvků. Kromě této optimalizace je nutné provést dlouhodobá měření mechanických a dalších vlastností s ohledem na požadavky norem pro jednotlivé vibrolisované výrobky.



## Závěr

Cíle, které byly pro tuto disertační práci stanoveny, tvořily zároveň osnovu jednotlivých kapitol této práce. Hlavním cílem bylo zjistit takové vlastnosti, které umožňují především uplatnění alkalicky aktivovaných materiálů ve vibrolisovaných prvcích. S ohledem na to bylo nutné zjistit některé vybrané fyzikálně mechanické a reologické vlastnosti POPbetonu, referenční směsi a navržené směsi pro vibrolisované prvky. K dosažení tohoto cíle bylo potřeba nejprve splnit některé dílčí cíle.

Byla provedena rešerše a přehled literatury a odborných publikací, zabývajících se tvorbou alumosilikátových polymerů se zaměřením zejména na alkalicky aktivované popílků a byl zpracován přehled jejich vlastností, dále literatury týkající se vibrolisovaných výrobků, jejich výroby, vlastností, druhů a požadavků na ně. V dohledaných materiálech bylo jen minimum informací a nebyly dohledány žádné relevantní podklady o použití alkalicky aktivovaných hnědouhelných popílků jako pojiva ve vibrolisovaných prvcích. Také nikde v české ani zahraniční literatuře nebyl dohledán popis vlivu přísad a příměsí na alkalicky aktivované vibrolisované materiály.

Hlavní částí disertační práce je experimentální část, kde byly postupně stanoveny vybrané základní a charakteristické mechanické vlastnosti samotného materiálu, postupy přípravy, reologické vlastnosti, charakteristika vzduchových pórů a odolnost základní směsi POPbeton proti CHRL.

Na souboru příměsí byl ukázán jejich vliv na mechanické vlastnosti betonové směsi, na množství vzduchu a provzdušnění a byly vyhodnoceny vlivy provzdušňovací příměsí na výsledné fyzikálně mechanické parametry navržených směsí. Tyto mechanické charakteristiky (pevnosti v tlaku) se pohybovaly u provzdušněných POPbetonů v horizontu 15 – 19 MPa po 28 dnech zrání a 20 až 26 MPa po 90 dnech.

Podle variace množství záměsové vody byly prověřeny reologické vlastnosti různých směsí s ohledem na jejich zpracovatelnost. Pro standardní záměs byly hodnoty zpracovatelnosti (zkouška sednutí kužele) v rozmezí konzistence S4 – S5.

Na základě zjištěných výsledků byly zanalyzovány parametry a využitelnost alkalicky aktivovaných materiálů ve vibrolisovaných prvcích. Byla vyrobena referenční čistě betonová směs z převzaté receptury pro konkrétní vibrolisovaný prvek a navržená receptura na bázi alkalicky aktivovaného materiálu POPbeton. Pro obě směsi byl proveden velký rozsah měření a zkoušek, ze kterých bylo možné popsat mechanické vlastnosti a zpracovatelnost materiálu. Byl popsán vliv záměsové vody na zpracovatelnost produktu a na mechanické vlastnosti,

množství vzduchu v čerstvé směsi, vliv provzdušnění a množství provzdušňovací přísady na mechanické vlastnosti materiálu.

Bylo vyrobeno několik referenčních betonových sérií a směsí na bázi alkalicky aktivovaného materiálu dle receptury pro vibrolisované prvky, na kterých byl zkoušen vliv provzdušňovacích příměsí a reologické vlastnosti směsi. Také na souboru vzorků byla provedena studie fyzikálně mechanických vlastností těchto betonů, včetně jejich zpracovatelnosti a množství vzduchu. Rozsah výzkumu a návrh směsi byl ovlivněn nemožností provádět poloprovozní ani provozní zkoušky na konkrétní výrobní technologii vibrolisu. Důvodem byl strach oslovených výrobců ze zanesení jejich přístrojů experimentální směsí a také nemožnost získání dostatečných finančních prostředků pro nákup alespoň malého vibrolisu. Výsledné pevnosti v tlaku u referenční směsi oscilovaly v horizontu 22 – 27 MPa po 14 dnech zrání a 27 – 37 MPa po 28 dnech. Obsah vzduchu u těchto betonů bez přidané provzdušňovací přísady byl kolem 3 %. Ve směsi pro vibrolisované prvky byly zjištěny parametry pevnosti v tlaku v rozmezí 7 – 10 MPa (7 denní), 20 – 25 MPa (14 denní) a 25 – 32 MPa po 28 dnech zrání. Navržená směs vykazovala obsah vzduchu kolem 5,5 % při dávce provzdušňovací přísady přibližně 1 %.

Detailní výsledky jsou shrnuty v jednotlivých podkapitolách experimentální části v sekci výsledků a vyhodnocení.

Cíle vymezené v úvodu této práce tak byly splněny. Disertační práce přinesla přehled chování alkalicky aktivovaných materiálů na bázi hnědouhelného úletového popílku, zjištění jejich limitních hodnot pro reologické vlastnosti a vliv provzdušnění na mechanické vlastnosti a odolnost proti vnějším vlivům (CHRL). Dále přinesla zjištění ohledně chování navržené směsi pro použití ve vibrolisovaných prvcích a porovnání s referenční betonovou směsí. Rozsah zkoušek nutných pro ověření chování POPbetonu, referenční betonové a navržené popílkové směsi byl dostačující k popsání vlivu a působení všech hlavních fyzikálně mechanických a reologických vlastnosti betonů s pojivem z alkalicky aktivovaného úletového popílku. Jednotlivé experimenty směřovaly k návrhu betonové směsi pro vibrolisované prvky, kde byl jako hlavní pojivo použit alkalicky aktivovaný úletový hnědouhelný popílek české produkce s drobnou příměsí cementu. Bohužel z důvodu vyšší moci nebylo možné provést praktické zkoušky ve výrobním prostředí a na tyto podmínky optimalizovat navrženou směs. Provedená měření jsou podkladem pro pokračování ve výzkumu a návrh optimalizace směsi včetně provedení dlouhodobých měření a zkoušek. V této práci jsou uvedeny poznatky, které vznikly v průběhu relativně dlouhé doby (pozn.: od roku 2011 do roku 2016), včetně některých dlouhodobých měření. Tyto výsledky jsou originální a nikde v dohledané literatuře nebyly dosud podobné výsledky publikovány.

**Přínos pro vědu** spočívá v komplexnosti a rozsahu provedených zkoušek, ze kterých bylo možné popsat vývoj a průběh aktivace úletového popílku a materiálu POPbeton. Na základě zjištěných výsledků byly zanalyzovány parametry a využitelnost alkalicky aktivovaných materiálů pro použití ve vibrolisovaných prvcích. Byla vyrobena referenční čistě betonová směs z převzaté receptury pro konkrétní vibrolisovaný prvek a navržena receptura na bázi alkalicky aktivovaného materiálu POPbeton. Pro obě směsi byl proveden velký rozsah měření a zkoušek, ze kterých bylo možné popsat mechanické vlastnosti a zpracovatelnost materiálu. V současnosti je veškeré úsilí upřeno k nalezení nových aplikací, kde by bylo možné v největší míře uplatnit specifické vlastnosti materiálů z alkalicky aktivovaných úletových popílků. Tématem dnešní doby je také snaha o co největší využití druhotné nebo odpadní suroviny, které je v České republice nadbytek, a částečně či úplně s ní nahradit některé výrazně energeticky náročné výrobky např. cement.

**Pedagogický přínos** této doktorské práce spočívá v kontinuálním zapojení studentů doktorského, magisterského a bakalářského studia do řešení dalších aplikací betonů na bázi alkalicky aktivovaných materiálů a ostatních materiálů s touto matricí. Na tuto práci a některé výsledky, které jsou v ní zveřejněny, navazuje další aktivní vývoj stavebních materiálů, který je realizován formou individuálních projektů či v rámci závěrečných akademických (diplomových nebo bakalářských) prací. Výsledky tohoto výzkumu jsou představovány studentům stavební fakulty během výuky vybraných povinných nebo volitelných předmětů studijního oboru Příprava, realizace a provoz staveb a také studijního oboru Materiálové inženýrství, které jsou akreditovanými obory na Fakultě stavební, ČVUT v Praze.

**Přínosem pro praxi** je popis základních fyzikálně mechanických a reologických vlastností betonové směsi vyrobené z úletového popílku, ověření výrobních postupů, prokázání charakteristik odolnosti proti CHRL a její zpracovatelnosti. Tyto předpoklady byly ověřeny při zkušební výrobě čerstvého POPbetonu, referenční směsi a navrhované směsi. Byly zhotoveny experimentální výrobky - prvky zámkové dlažby. Tyto poloprovozní zkoušky v laboratorních podmínkách dávají předpoklad k využití navržené směsi po optimalizaci na konkrétní výrobní technologii vibrolisu pro úspěšné použití ve vibrolisovaných prvcích, jako jsou prvky ztraceného bednění, zámkové dlažby či některé jiné nenosné prefabrikované prvky.

#### Doporučení

Další vývoj by měl být zaměřen především na aplikaci POPbetonu a materiálů s alkalicky aktivovanou matricí ve specifických stavebních výrobcích. S ohledem na předchozí zjištění Minaříkové [3] lze uvažovat o využití tohoto materiálu jako významně odolného proti agresivnímu kyselému i zásaditému prostředí. Pokračující vývoj by měl směřovat k optimalizaci směsi a výrobě

Závěr

prefabrikovaných nebo zdících prvků zdravotnických potrubí (kanalizací, odvodů znečištěné či dešťové vody) a kusových prvků pro podlahy v agresivních provozech.

Bude nezbytné orientovat se na vývoj materiálů vyráběných při nízkém obsahu záměsové vody s různými druhy plniva.

## Zdroje a použitá literatura

- [1] ČSN 72 2071 (722071) *Popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení* [online]. 2003 [cit. 24. 2. 2013]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>
- [2] ČSN 72 2080 (722080) *Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení* [online]. 2003 [cit. 24. 2. 2013]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>
- [3] MINAŘÍKOVÁ M *Fixace těžkých kovů v matrici geopolymery*, disertační práce, Praha, 2005. Disertace. VŠCHT v Praze, Fakulta chemické technologie. Vedoucí práce Škvára, František.
- [4] ŠKVÁRA F. - PAWLASOVÁ S. - KOPECKÝ L. - BITTNER Z. - MYŠKOVÁ L. - ALBEROVSKÁ L.: *High-temperature properties of fly ash-based geopolymers*, Proceedings International Conference „Non-traditional cements and concretes“, Brno 2008, s.741-750
- [5] ŠKVÁRA, F. - KOPECKÝ L. - ŠMILAUER V. - BITTNER, Z. *Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash*. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168, 711-720. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.02.089. Epub 2009.
- [6] ŠULC, Rostislav. *Vliv přísad a příměsí na hodnoty fyzikálně mechanických a chemických vlastností POPbetonu*, disertační práce, Praha, 2012. Disertace. ČVUT v Praze, Stavební fakulta. Vedoucí práce Svoboda, Pavel.
- [7] Škvára, F.: *Corrosion of low porosity materials prepared with the use of alkali activated gypsum-free Portland cement*, In *Proceedings 2nd International Conference: "Alkaline cements and concretes"*, Kijev 1999, pp. 44-50.
- [8] GLUCHOVSKIJ V. D.: *Gruntosilikaty*, Strojizdat, Kijev 1959.
- [9] DAVIDOVITS J.: *Egyptian made-made stone statues in 200 B.C.*, In *Proceedings „Geopolymer 99“*, St.Quentin 1999, pp. 321-348.
- [10] KRIVENKO P.V.: In *Proceedings 1st Conference "Slagalkaline cements and concrete"*, ed. Kiew 1978.
- [11] KRIVENKO P.V.: In *Proceedings 1st International Conference: "Alkaline cements and concretes"*, ed. Vipol Stock Comp., Kiew 1994.
- [12] KRIVENKO P.V. - KOVALCHUK G.Yu.: *Fly Ash Based Zeolite Cements, Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*,

In Proceedings of International conference "Challenges of Concrete Construction". Scotland, UK 2002, pp. 123-132.

[13] KRIVENKO P.V.: *Role of alkalis in cement stone structure formation*, In Journal Building Materials and Products, Vol 5, 2003, pp. 13-15.

[14] SHI C. - KRIVENKO P. - ROY D.: *Alkali-Activated Cements and Concretes*, In Alkali-Activated Cements and Concretes. Taylor & Francis, London and New York 2006, p. 370.

[15] STRNAD, Tomáš. *Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi alkalicky aktivovaného popílku*, disertační práce k získání akademického titulu Ph.D., Praha, 2010. Disertace. ČVUT v Praze, Stavební fakulta. Vedoucí práce Svoboda, Pavel.

[16] HARDJITO D. - WALLAH S.E. – SUMAJOUW D.M.J. - RANGAN, B.V.: *On the development of fly ash-based geopolymer concrete*. In ACI Materials Journal, Vol. 101, 2004, pp. 467 – 472.

[17] WALLAH S.E. - HARDJITO D. - SUMAJOUW D.M.J. - RANGAN B.V.: *Geopolymer concrete: a key for better long-term performance and durability*. In Proc. ICFRC Inter. Conf. on Fiber Composites, High performance Concrete and Smart Materials, Chennai, India 2004, pp. 527 – 539.

[18] VAN JAARSVELD J.G.S. - VAN DEVENTER J.S.J.: *Effect of the metal alkali activator on the properties of fly ash-based polymers*. In Industrial Engineering Chemistry Research, Vol. 38, 1999, pp. 3932 – 3941.

[19] XU H. - VAN DEVENTER J.S.J.: *The geopolymerisation of aluminosilicate minerals*. In International Journal of Mineral Processes, Vol. 59, 2000, pp. 247 – 266.

[20] PHAIR J.W. - VAN DEVENTER J.S.J.: *Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers*. In Minerals Engineering, Vol. 14, No. 3, 2001, pp. 289 – 304.

[21] PALOMO A. - GRUTZECK M.W. - BLANCO M.T.: *Alkali-Activated fly ashes-a cement for the future*. In Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, pp. 1323 – 1329.

[22] KRIVEN W.M. - GORDON M. - BELL J.L.: *Geopolymers: nanoparticulate, nanoporous ceramics made under ambient conditions*. In Microscopy and Microanalysis '04, (Proc. 62nd Annual Meeting of Microscopy Society of America), Vol. 10, 2004.

[23] ZHANG Y.S. - SUN W. - LI, Z.J.: *Hydration process of potassium polysialate (K-PSDS) geopolymer cement*. In Advances in Cement Research, Vol. 17, 2005, pp. 23 – 28.

- [24] DOLEŽAL J.: *Vysokohodnotné betony a mikrobetony vyráběné z „Modifikovaných rychlovazných vysokopevnostních cementů“*. Praha 1982, p. 79.
- [25] *Slovník pojmů* [online]. 2011 [cit. 20.10.2012]. Dostupné na eBeton: <http://www.ebeton.cz/pojmy>
- [26] ČSN EN 12350-1 *Zkoušení čerstvého betonu: část 1 Odběr vzorků* [online]. 2012 [cit. 15. 2. 2012]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>
- [27] ČSN EN 12350-2 *Stanovení konzistence - Zkouška sednutím kužele* [online]. 2012 [cit. 15. 2. 2012]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>
- [28] ČSN EN 12350-5 *Stanovení konzistence - Zkouška rozlitím* [online]. 2012 [cit. 15. 2. 2012]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>
- [29] ČSN EN 12350-7 *Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu* [online]. 2012 [cit. 15. 2. 2012]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>
- [30] ČSN EN 12350-6 *Stanovení obsahu vzduchu v čerstvého betonu - Tlakoměrná metoda* [online]. 2012 [cit. 15. 2. 2012]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>
- [31] ANDINI S. - CIOFFI R. - COLANGELO F. - GRIECO T. - MONTAGNARD F. - SANTORO L.: *Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer – based products*. In *Waste management*, Vol. 28, 2008, pp. 416 – 423.
- [32] Grant GAČR, č. 103/05/2314 *Mechanické a inženýrské vlastnosti geopolymerních materiálů na bázi alkalicky aktivovaných popílků*, část C- Zdůvodnění návrhu. 2005 [cit. 15. 2. 2012]. Dostupné na <https://gacr.cz/seznam-podporenych-projektu/>
- [33] ŠULC R. - SVOBODA P. - STRNAD T. - ŠKVÁRA F.: *Betony na bázi alumosilikátových polymerů*, In: *BETON-technologie, konstrukce, sanace*, roč. 11, č. 2, 2011, pp. 69-75.
- [34] HARDJITO D. - RANGAN B. V.: *Development and Properties of Low-calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete*, In *Research Report GC 1*, Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth 2005, p. 103.
- [35] ŠULC R. – SVOBODA P. – DOLEŽAL J. – ŠKVÁRA F. – DVOŘÁČEK K. – BEKSA M. – MYŠKOVÁ L. – KOPECKÝ L.: *Beton bez cementu s názvem POPbeton, Výzkumný ústav stavebních hmot*, In *X. Konference – Ekologie, nové stavební hmoty a výrobky, Materiály příznivé pro životní prostředí*, Telč, 2006, pp. 121-125.

[36] ŠULC R. – SVOBODA P.: *Activation of fly ash binder in POPbeton® without heating*, In XIth International Conference of Research Institute of Building Materials – Ecology and new building materials and products, Telč, 2007, pp. 116-119.

[37] ŠULC R. - SVOBODA P.: *Vliv alkalických aktivátorů na geopolymerní malty*, In Juniorstav 2008 - 10. Odborná konference doktorského studia, VUT v Brně, Fakulta stavební. Brno, 2008, pp. 318-329.

[38] ŠULC R. - SVOBODA P.: *Influence of Processing of Mixtures and Adjustment of Fly-Ash on Characteristics of POPbeton*, In Ecology and New Buildings Materials and Products - Proceedings of the 12th International Conference. Brno, 2008, pp. 171-174.

[39] ŠKVÁRA F. - BOHUNĚK J. - MARKOVÁ J.: *Alkali activated fly-ash*, In Proceedings. 14. Congress IBAUSIL, Weimar 2000, s. 1-0523 / 1-0533.

[40] HARDJITO D. - RANGAN, B. V.: *Development and Properties of Low-calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete*, In Research Report GC 1, Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth 2005, p. 103.

[41] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A - PALOMO A. - CRIADO M.: *Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators*. In Material Constructions, 2006; pp. 51-65

[42] DUXSON P. - PROVIS J. L. - LUKEY G. C. - VAN DEVENTER J. S. J.: *The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of Green Concrete*. In Cement and Concrete Research, 37(12), 2007, pp. 1590-1597.

[43] COLLEPARDI M.: *Moderní beton*, 1. Vydání, Informační centrum ČKAIT, s.r.o., Praha, 2009, p. 344.

[44] Kapitola 18 *Beton pro konstrukce*, in: Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací, Ministerstvo dopravy odbor pozemních komunikací, Praha, 2005.

[45] MOLERO M. - APARICIO S. - AL-ASSADI G. – CASATI M. J. – HERNÁNDEZ M. G. - ANAYA J. J.: *Evaluation of freeze-thaw damage in concrete by ultrasonic imaging*, vol. 52, In NDT & E International, 2012, pp. 86 - 94.

[46] SAHIN R. – TASDEMIR M. A. - GUEL R. - CELIK C.: *Optimization study and damage evaluation in concrete mixtures exposed to slow freeze-thaw cycles*, vol. 19, no. 7, In Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, pp. 609 - 615.

[47] ATKINS C.: *Physical deterioration mechanisms*, in: T. Telford, M. Soutsos, Eds., In Concrete Durability: A Practical Guide to the Design of Durable Concrete Structures, London, 2010.



[48] PENG G. F. - MA Q. - HU H. M. - GAO R. - YAO Q. F. - LIU Y. F.: *The effects of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50-60MPa grade concrete*, vol. 21, no. 5, In *Construction and Building Materials*, 2007, pp. 1034–1039.

[49] HONG-QIANG C. - LEI-SHUN Z. - PING-XIAN L.: *The influence of freeze-thaw to concrete strength*, vol. 21, no. 2, In *Henan Science*, 2003, pp. 214 - 216.

[50] LI-KUN Q.: *Study on the strength and deformation of concrete under multiaxial stress after high-temperature of freeze-thaw cycling*, Dalian University of Technology, Liaoning, China, 2003.

[51] SUN W. - ZHANG Y. M. - YAN H. D. - MU R.: *Damage and damage resistance of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw cycles*, vol. 29, no. 9, In *Cement and Concrete Research*, 1999, pp. 1519 - 1523.

[52] COHEN MD. - ZHOU Y. - DOLCH W. L.: *Non-air-entrained high-strength concrete-is it frost resistant?*, vol. 89, no. 4, In *ACIMaterials Journal*, 1992, pp. 406 - 415.

[53] HUAI-SHUAI S. - TING-HUA Y.: *Freeze-Thaw Durability of Air-Entrained Concrete*, In *The Scientific World Journal*, 2013, pp. 1- 6.

[54] ČSN 73 1326 *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek* [online]. 2013 [cit. 14. 2. 2013]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>

[55] ČSN 73 1326 *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek Změna : Z1* [online]. 2013 [cit. 14. 2. 2013]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>

[56] HELA R. *Intenzifikace zhutňování betonových směsí*. Brno, 2002. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

[57] ŘÍHA J.: *Závěrečná zpráva DÚ – 04, HÚ základního výzkumu III – 2 – 3, E – 02*. Brno, VUT 1985, 109 s.

[58] ŘÍHA J.: *K otázce modelování procesu zhutňování BS*. Sborník Vědecké konference stavební fakulty SVŠT. Bratislava, 1988, s. 13–18.

[59] FIFIELD J. *A Look at The Development of Concrete Segmental Paving* [online]. 2012 [cit. 11. 5. 2014]. Dostupné na <https://www.soci.org/-/media/Files/Conference-Downloads/2011/A-look-at-the-development-of-concrete-interlocking-paving-Feb-2011/PavingPresentation.ashx?la=en>

[60] *History of pavers* [online]. 2011 [cit. 11. 5. 2014]. Dostupné na <http://www.gopavers.com/history-of-pavers/>

- [61] ČSN EN 73 2400 *Provádění a kontrola betonových konstrukcí* [online]. 2009 [cit. 3. 1. 2018]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/gdpr.aspx>
- [62] *Vše o betonových výrobcích* [online]. 2013 [cit. 14. 5. 2013]. Dostupné na mct - beton a betonové výrobky: <http://www.mct.cz/inpage/o-betonu-a-betonovych-vyrobcich/>
- [63] SYNÁČ V. *Modelování a dynamická analýza formy na hutnění betonové směsi vibrolisu*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Aplikovaných Věd. Vedoucí práce Byrtus, Miroslav.
- [64] STANĚK P.: *Hodnocení přenosu vibrací na betonovou směs u vibrolisů Colorbeton a Henke*, diplomová práce, TU Liberec, Fakulta strojní, 1997
- [65] MRKVICA L. *Vliv povrchových úprav drobného betonového zboží na užité vlastnosti povrchu*. Brno, 2016. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ. Vedoucí práce Hela, Rudolf.
- [66] HELA R. *Technologie stavebních dílců*, skriptum, Brno: CERM s.r.o., 2005.
- [67] MELUZÍN O. - ŘÍHA J. *Technologické systémy*. 2., přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1990. ISBN 80-214-0134-6.
- [68] *Stránky společnosti Masa - group* [online]. Germany: Masa [cit. 10. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.masa-group.com/images/stories/info-material/concreteblock-production-en.pdf>
- [69] *Stránky společnosti Longinottigroup* [online]. Italy: Longinotti [cit. 12. 2. 2016]. Dostupné z: <http://www.longinottigroup.it/en/tile-technology/machines-andplants/hydraulic-presses/double-layer-presses/k1206ds/>
- [70] ČSN EN 1339:2004 *Betonové dlažební desky – Požadavky a zkušební metody* [online]. 2004 [cit. 3. 1. 2018]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/gdpr.aspx>
- [71] ČSN EN 1340:2004 *Betonové obrubníky – Požadavky a zkušební metody* [online]. 2004 [cit. 3. 1. 2018]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/gdpr.aspx>
- [72] ČSN EN 15258:2008 *Betonové prefabrikáty – Prvky opěrných stěn* [online]. 2008 [cit. 3. 1. 2018]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/gdpr.aspx>
- [73] ČSN 731326/Z1 *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek* [online]. 2003 [cit. 14. 2. 2013]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>

[74] ČSN EN 771-3:2011 *Specifikace zdících prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem* [online]. 2011 [cit. 23. 12. 2016]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/gdpr.aspx>

[75] *Vyhláška 307/2002 Sb. ve znění Vyhl. č. 499/2005 Sb.* [online]. 2002 [cit. 14. 2. 2013]. Dostupné na Zákony pro lidi.cz: <https://zakonyprolidi.cz/cs/>

[76] ČSN EN 15435:2009 *Betonové prefabrikáty - Bednicí tvárnice z obyčejného a lehkého betonu - Vlastnosti výrobku* [online]. 2009 [cit. 3. 1. 2018]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/gdpr.aspx>

[77] ČSN EN 1917:2004 *Vstupní a revizní šachty z prostého betonu, drátkobetonu a železobetonu* [online]. 2004 [cit. 3. 1. 2018]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/gdpr.aspx>

[78] ČSN EN 12839:2012 *Betonové prefabrikáty – Prvky pro ploty* [online]. 2012 [cit. 3. 1. 2018]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/gdpr.aspx>

[79] ČSN EN 13369 (723001) *Společná ustanovení pro betonové prefabrikáty* [online]. 2013 [cit. 3. 1. 2018]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/gdpr.aspx>

[80] ŠULC R. – SVOBODA P.: *Alkalická aktivace mletého úletového popílku*. In XIII. Konference – Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky, Telč: VUSTAH, 2009, pp. 315 - 318.

[81] ŠULC R. – SVOBODA P.: *Activation of fly ash binder in POPbeton without heating*. In XI. Konference – Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky, Telč: VUSTAH, 2007, pp. 116 - 119.

[82] VÁCHAL T. – SVOBODA P.: *Vliv teploty a času temperování na geopolymerní reakci u popbetonů*. In XVI. Mezinárodní konference – Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky, Telč: VUSTAH, 2012, pp. 79 – 82.

[83] HEMMINGGS, R. T. – BERRY, E. E.: *On the Glass in Coal Fly Ashes: Recent Advances*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 113, 1998. Materials Research Society, Ontario, Canada 1998, s. 3-38.

[84] ŠLOSAR, J.: *Alkalická aktivace latentně hydraulických látek*, diplomová práce VŠCHT v Praze, Praha 2001, 124 s.

[85] ČEZ, *Uhelné elektrárny skupiny ČEZ*, informační materiál skupiny ČEZ, ČEZ, a.s., Praha 2010 [online]. 2010 [cit. 14. 8. 2011]. Dostupné na Skupina ČEZ: <https://www.cez.cz/>

[86] ČSN EN 206-1 *Beton-Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda* [online]. 2001 [cit. 14. 2. 2013]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>

[87] ČSN EN 450-1 *Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody* [online]. 2013 [cit. 14. 6. 2013]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>

[88] ČSN EN 13263-2+A1 (722095) *Křemičitý úlet do betonu - Část 2: Hodnocení shody* [online]. 2009 [cit. 14. 2. 2013]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>

[89] ČSN EN 15167-1 (722090) *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody* [online]. 2007 [cit. 14. 2. 2013]. Dostupné na ČSN online (placený přístup): <https://csnonline.unmz.cz/default.aspx>

[90] ŽAMBERSKÝ J. *Ekonomika výroby geopolymerního betonu*, disertační práce, Praha, 2008. Disertace. Fakulta stavební ČVUT v Praze. Vedoucí práce Svoboda, Pavel.

[91] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A - PALOMO A. - CRIADO M.: *Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators*. Material Constructions 2006; 56:51-65

[92] ŠULC, R. - SVOBODA, P.: *Vliv alkalických aktivátorů na geopolymerní malty*, Juniorstav 2008 - 10. Odborná konference doktorského studia, VUT v Brně, Fakulta stavební. Brno 2008, s. 318-329.

[93] Spolana a.s., *Hydroxid sodný – materiálový list*, 2002 [cit. 4. 5. 2013]. Dostupné na <http://www.spolana.cz/node/39>

[94] SVOBODA P. - ŠULC R. - DOLEŽAL J. - ŠKVÁRA F. - DVOŘÁČEK K. - LUCUK M. – KOPECKÝ L. – MYŠKOVÁ L. – PAWLASOVÁ S. – BEKSA M.: *Beton bez cementu s názvem POPbeton*, In *X. Konference – Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky*, Telč: VUSTAH, 2006, pp. 121-125.

[95] ŠULC R. - STRNAD T. - ŠKVÁRA F. - SVOBODA P. - KOPECKÝ L. - ŠMILAUER V. - MYŠKOVÁ L. - BITTNAR Z. *Betony na bázi aluminosilikátových polymerů*. Beton TKS, 2011, 69-75.

[96] ŠKVÁRA, F. - JÍLEK T. KOPECKÝ L. *Geopolymer materials based on fly ash*. Ceramics-Silikáty, 2005, 49, 195-204.

[97] ŠKVÁRA, F. - KOPECKÝ L. - NĚMEČEK J. - BITTNAR Z. *Microstructure of geopolymer materials based on fly ash*. Ceramics-Silikáty, 2006, 50, 208-215.

[98] ŠKVÁRA F. et al. *Aluminosilicate polymers - influence of elevated temperatures, efflorescence*. Ceramics-Silikáty, 2009, 53, 276-282.

[99] DRIML M. *Possibility of determination of rheological properties of fresh concrete by penetration needle*. Brno: Bachelor's thesis, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Technology of Building Materials and Components, 2012, pp. 46 - 47.

[100] AASHTO AVA TIG, Hardened Concrete Spacing Factor, *internal paper presented in TIG meeting*, Topeka, Kansas, USA, 2003.

[101] *Instruction and Maintenance Manual for Air Void Analyzer, AVA - 3000*: For assessment of the Air Void Structures in fresh, plastic concrete. Denmark, 2014.

[102] AVA - *German Instruments* [online]. [cit. 14. 7. 2016]. Dostupné z: <http://germann.org/products-by-application/air-void-system-parameters/ava>

[103] UYGUNOĞLU T., BEKIR TOPCU I., GENCEL O., BROSTOW W., *The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs)*, In: *Construction and Building Materials*, Volume 30, 2012, Pages 180-187, ISSN 0950-0618 [cit. 14. 7. 2016]. Dostupné: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.020>.

## Ostatní zdroje

*Geopolymer.eu - anorganický alumosilikátový polymer (POPbeton)* [online]. 2011 [cit. 12. 10. 2011]. Dostupné na [Geopolymer.eu: http://www.geopolymer.eu/](http://www.geopolymer.eu/)

## Seznam příloh

### Obrázky

Obrázek 1 Výroba POPbetonu .....	16
Obrázek 2 Schéma vibračního lisu na betonovou směs .....	27
Obrázek 3 Pohled na formu upnutou ve vibrolisu .....	28
Obrázek 4 Pohled na vibrační (zelené) a dorazové (černé) lišty vibrolisu ...	28
Obrázek 5 Pohled na uspořádání silentbloků v rámu vibrolisu .....	29
Obrázek 6 Pohled na zhutněné betonové výrobky umístěné na podložce ..	29
Obrázek 7 Vliv menší budící síly na odlehnutí formy od stolu .....	32
Obrázek 8 Vliv větší budící síly na odlehnutí formy od stolu .....	32
Obrázek 9 Kmity stolu a formy pro frekvence větší než 50Hz .....	33
Obrázek 10 Kmity stolu a formy pro frekvence rovné 50Hz .....	33
Obrázek 11 Pohyb míchané směsi v míchačkách .....	35
Obrázek 12 Graf průběhu zhutňování a změny mezerovitosti.....	36
Obrázek 13 Schéma způsobu výroby betonové dlažby na stacionárním vibrolisu.....	37
Obrázek 14 Schéma stacionárního vibrolisu.....	38
Obrázek 15 Způsob vytváření teracových dlaždic na karuselovém lisu .....	39
Obrázek 16 Schéma přístroje - AVA.....	57
Obrázek 17 Fotografie přístroje a příslušenství AVA .....	58
Obrázek 18 Výroba betonové směsi v míchačce .....	67
Obrázek 19 Čerstvá směs betonu po namíchání .....	67
Obrázek 20 Formy na betonovou směs.....	68
Obrázek 21 Měření rozměrů a geometrie vzorků.....	68
Obrázek 22 Vážení vorků na váze.....	69
Obrázek 23 Vzorek umístění v lisu před zkouškou pevnosti v tlaku.....	69
Obrázek 24 Vzorek po pevnostní zkoušce v tlaku .....	70
Obrázek 25 Zahájení měření výšky kužele při zkoušce zpracovatelnosti....	70
Obrázek 26 Náhled do laboratoře.....	71
Obrázek 27 Lis Werkstoffprüfmaschinen, Leipzig .....	72
Obrázek 28 Váha Lab System Praha .....	73

## **Grafy**

Graf 1 Pevnosti v závislosti na teplotě temperování .....	74
Graf 2 Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě temperování .....	75
Graf 3 Pevnosti v závislosti na teplotě temperování .....	76
Graf 4 Krátkodobé pevnosti v závislosti na teplotě temperování .....	77
Graf 5 Zpracovatelnost čerstvého betonu .....	78
Graf 6 Korelace mezi zkouškou sednutím a rozlitem .....	78
Graf 7 Obsah vzduchu v čerstvém betonu .....	79
Graf 8 Pevnosti v závislosti na vodním součiniteli.....	80
Graf 9 Pevnosti v závislosti na množství provzdušňovací přísady – netemperované vzorky .....	81
Graf 10 Pevnosti v závislosti na množství provzdušňovací přísady – temperované vzorky .....	81
Graf 11 Vývoj pevnosti v tlaku provzdušněných POPbetonů .....	82
Graf 12 Pevnost v tlaku POPbetonu v závislosti na množství vzduchu v čerstvém betonu.....	83
Graf 13 Objemová hmotnost POPbetonu v závislosti na množství .....	84
Graf 14 Odpad po zkoušce CHRL .....	85
Graf 15 Odpad po zkoušce CHRL .....	85
Graf 16 Spacing factor v čerstvém betonu.....	86
Graf 17 Pevnosti referenčních vibrolisované směsi .....	88
Graf 18 Zpracovatelnost čerstvého betonu - referenční směs.....	89
Graf 19 Korelace mezi zkouškou sednutím a rozlitem - referenční směs.....	89
Graf 20 Obsah vzduchu v čerstvém betonu - referenční směs .....	90
Graf 21 Pevnosti v závislosti na vodním součiniteli - referenční směs .....	91
Graf 22 Pevnosti navržené vibrolisované směsi .....	93
Graf 23 Zpracovatelnost čerstvého betonu – směsi pro vibrolisové prvky...	94
Graf 24 Korelace mezi zkouškou sednutím a rozlitem - směsi pro vibrolisové prvky .....	94
Graf 25 Obsah vzduchu v čerstvém betonu – směsi pro vibrolisové prvky..	95
Graf 26 Pevnosti v závislosti na vodním součiniteli – směsi pro vibrolisové prvky .....	96

Graf 27 Pevnosti v závislosti na množství provzdušňovací přísady – směsi pro vibrolisové prvky ..... 97

Graf 28 Pevnosti v závislosti na množství vzduchu – směsi pro vibrolisové prvky ..... 98

### **Tabulky**

Tabulka 1 Chemické složení popílku ..... 46

Tabulka 2 Celkové poměry v kompozici..... 47

Tabulka 3 Objemové hmotnosti použitého kameniva 0 - 4..... 50

Tabulka 4 Objemové hmotnosti použitého kameniva 4 - 8..... 50

Tabulka 5 Objemové hmotnosti použitého kameniva 8 - 16..... 50

Tabulka 6 Složení záměsi POPbetonu ..... 51

Tabulka 7 Složení záměsi POPbetonu ..... 56

Tabulka 8 Množství provzdušňovací přísady v záměsích ..... 56

Tabulka 9 Chemické složení popílku ..... 56

Tabulka 10 Celkové poměry v kompozici..... 56

Tabulka 11 Složení referenční záměsi pro vibrolisované prvky..... 59

Tabulka 12 Složení upravené referenční záměsi pro vibrolisované prvky ... 59

Tabulka 13 Složení záměsi pro vibrolisované prvky ..... 63

Tabulka 14 Souhrnné výsledky – nevibrolisovaná směs..... 87

Tabulka 15 Souhrnné výsledky – referenční směs ..... 92

Tabulka 16 Souhrnné výsledky – směsi pro vibrolisované prvky ..... 99