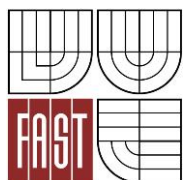




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VÝVOJ KOTEVNÍHO EXPANZNÍHO MATERIÁLU NA SILIKÁTOVÉ BÁZI S TEPELNOU ODOLNOSTÍ

DEVELOPMENT OF THE ANCHOR EXPANSION SILICATE BASED MATERIAL WITH THERMAL
RESISTANCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE JIŘÍ MÜLLER
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA
SUPERVISOR

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jiří Müller
Název	Vývoj kotevního expanzního materiálu na silikátové bázi s tepelnou odolností
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2015
Datum odevzdání bakalářské práce	27. 5. 2016
V Brně dne 30. 11. 2015	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

- [1] BILČÍK, J., DOHNÁLEK, J.: Sanace betonových konstrukcí. Jaga group, Bratislava, 2003. ISBN 80-88905-24-9.
- [2] Technické návody silikátových kotvicích hmot od renomovaných producentů.
- [3] DROCHYTKA, R., EMMONS, P. H., JEŘÁBEK, J.: Sanace a údržba betonu v ilustracích. Akademické nakladatelství Brno, 1999. ISBN 80-7204-106-1.
- [4] DROCHYTKA, R., DOHNÁLEK, J., BYDŽOVSKÝ, J.: Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí III. Sdružení pro sanace betonových konstrukcí. ISBN 978-80-260-2210-7
- [5] Další vědecké a odborné publikace, normy a předpisy zabývající se polymerními zálivkovými systémy a sanací betonových konstrukcí

Zásady pro vypracování

Na základě teoretických poznatků získaných z odborné domácí a zahraniční literatury bude navržen nový silikátový kotevní expanzní materiál pro lepení kotev zejména do betonů o pevnosti v tlaku min. 50 N.mm⁻². Cílem je co nejefektivněji navrhnout materiál vynikající poměrem pevností a zejména kontrolovanou expanzí odpovídající pevnostem okolního betonu. Tato práce zabývající se aktuální problematikou v praxi je součástí projektu vědy a výzkumu.

1. Souhrnně zpracujte doposud získané poznatky z oblasti silikátových i nesilikátových kotvicích hmot především s expanzní schopností. Vypracujte rešerši stávajících kotvicích hmot, které jsou určeny zejména pro betony o pevnosti v tlaku min. 50 N.mm⁻² a dále do prostředí o zvýšené teplotě až kolem 200°C a jsou používány v ČR a v zahraničí.
2. Dále proveďte identifikace možností prostředí s využitelností výše uvedených hmot.
3. Definujte požadavky na silikátové kotvicí hmoty pro betony o pevnosti v tlaku min. 50 N.mm⁻² a dále do prostředí se zvýšenou teplotou. Popište a zhodnoťte současné legislativní postupy hodnocení vlastností těchto kotvicích hmot. Navrhněte optimální metodiku zkoušení pro ověření vhodnosti vstupních surovin pro tyto materiály, dále definujte optimální zkušební postup pro laboratorní ověření zkušebních vzorků a pro poloprovozní ověření vyvinutých expanzních kotevních materiálů.
4. Navrhněte složení nových silikátových expanzních kotvicích materiálů efektivně využitelných pro betony o pevnosti v tlaku min. 50 N.mm⁻² a současně v prostředí o zvýšených teplotách až kolem 200°C (např. energetický průmysl). Proveďte volbu vhodných vstupních surovin, případně včetně druhotných surovin, v případě potřeby navrhněte vhodné postupy předúpravy vstupních surovin.
5. Proveďte návrh vlastních receptur vyvinutého materiálu včetně návrhu jejich aplikace, úpravy povrchu podkladu a způsobu zpracování.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na výzkum a vývoj expanzní kotevní hmoty na silikátové bázi s vysokou teplotní odolností. Zkušenosti z praxe ukazují, že právě kritickou vlastností jsou objemové změny kotevních hmot (smršťování), přičemž může dojít k naprostému kolapsu zatíženého spoje.

Cílem práce je provedení sumarizace dostupných produktů na trhu stanovení metodiky samotného vývoje kotevní hmoty, jejího zkoušení, návrh složení a následné otestování vybraných parametrů navržených kotevních hmot. Vybrané vlastnosti přímo souvisí s expanzí a tepelnou odolností.

Klíčová slova

kotevní hmota, expanze, objemové změny, silikátová kotva, chemická kotva, tepelná odolnost, expanzní kotevní hmota

Abstract

The research conducted focused on studying the development of expansive, silicate based-anchor materials that were resistant to high temperatures. The results showed that shrinking is a critical property as volume can change (mainly cause shrinkage) the anchoring materials. This can ultimately lead to a collapse of a loaded connection.

The aim of the study was to summarizing products on the market, to develop the development of anchor matters alone and methodology for testing. Selected were directly related to expansion and thermal resistance.

Keywords

anchoring grout, expansion, volume changes, silicate grout, chemical anchor, heat resistance, expansive anchoring grout

Bibliografická citace VŠKP

Jiří Müller *Vývoj kotevního expanzního materiálu na silikátové bázi s tepelnou odolností.* Brno, 2016. 86 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Prohlášení:

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

V Brně dne 25.5.2016

.....

podpis autora

Jiří Müller

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyslovil obrovské díky **prof. Ing. Rostislavu Drochytkovi, CSc., MBA** jakožto vedoucímu této bakalářské práce, především za cenné rady, vedení a odbornou pomoc při vypracování této bakalářské práce.

Poděkování patří zvláště **Ing. Tomášovi Melicharovi, Ph.D.** a **Ing. Ámosovi Dufkovi, Ph.D.** za pomoc, ochotu, strávený čas a odborné rady, které dopomohli ke zdárnému dokončení této práce, za což jsem jim velice vděčný.

Mimo to zde bych rád zmínil všechny pracovníky ústavu THD, kteří mi byli nápomocni při realizování experimentů v laboratoři.

Bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS

Obsah

1. ÚVOD	10
2. CÍL PRÁCE.....	11
3. TEORETICKÁ ČÁST.....	12
3.1. Kotevní a upevňovací technika.....	12
3.1.1. Rozdělení kotevních systémů	12
3.1.2. Druhy podkladních materiálů	19
3.1.3. Provádění zálivkových kotev	20
3.1.4. Normy, předpisy a směrnice pro kotvení	21
3.2. Principy expanze silikátů	22
3.2.1. Ettringit.....	23
3.2.2. Hořčnaté rozpínání	25
3.2.3. Vápenné rozpínání.....	26
3.2.4. Expanzní cementy.....	27
3.2.5. Bentonit.....	29
3.3. Vliv zvýšených teplot na chování silikátových kompozitů	30
3.3.1. Dilatační změny	30
3.3.2. Změny mikrostruktury	32
3.3.3. Vliv vysokých teplot na stabilitu kotvícího systému	32
4. METODIKA PRÁCE.....	35
4.1. Etapa I – Silikátové kotvící hmoty dostupné v ČR i ve světě	35
4.2. Etapa II – Návrh postupu testování	35
4.3. Etapa III – Návrh složení receptur	35
4.4. Etapa IV – Experimentální ověření navržených hmot	36
5. PRAKTICKÁ ČÁST.....	37
5.1. Silikátové kotvící hmoty dostupné v ČR i ve světě	37
5.1.1. Chemické a cementové kotvící hmoty	37
5.1.2. Přehled kotvících hmot dostupných na českém trhu i světovém trhu.....	38
5.1.3. Možnosti použití vyvíjené hmoty	40
5.2. Zhodnocení nabídky kotvících hmot a porovnání s vyvíjenou hmotou	41
5.3. Návrh namáhání a postupu zkoušení kotevních spojů.....	41
5.3.1. Možné způsoby namáhání.....	42
5.3.2. Teplotní namáhání.....	43
5.4. Vlastnosti zálivkových hmot a jejich zkoušení.....	44

5.5.	Vlastnosti a zkoušení čerstvých směsí.....	44
5.6.	Vlastnosti a zkoušení ztvrdlých směsí	48
5.7.	Trvanlivost a její zkoušení.....	56
5.8.	Návrh testování	57
5.9.	Návrh vhodných surovinových směsí	58
5.9.1.	Pojivo	59
5.9.2.	Expanzní přísady	60
5.9.3.	Ostatní přísady a příměsi.....	62
5.9.4.	Rozptýlená výztuž	62
5.9.5.	Kamenivo	63
5.9.6.	Konkrétní návrhy ověřovacích receptur	63
5.10.	Experimentální část	65
5.10.1.	Objemové hmotnosti.....	65
5.10.2.	Výsledky tlakových zkoušek	66
5.10.3.	Výsledky zkoušky v tlaku za ohybu	67
5.10.4.	Výsledky zkoušek hydrostatickým vážením.....	69
5.10.5.	Diskuze výsledků.....	70
6.	ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ	73
7.	SEZNAMY	75
7.1.	Seznam použitých zdrojů.....	75
7.2.	Seznam obrázků	82
7.3.	Seznam tabulek	83
7.4.	Seznam grafů	84
7.5.	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	85

1. ÚVOD

Kotvení vždy bylo důležitou součástí stavebnictví, a to až už máme na mysli kotvení prefabrikovaných dílců, dočasných konstrukcí, anebo vybavení a zařízení budov. V posledních letech se vedle klasického mechanického kotvení dostaly do popředí též kotvy zálivkové. Tyto kotvy mají řadu výhod a díky snadnému použití a rychlému vytvrzení jsou rozšířeny i mezi neodbornými uživateli a lze jimi kotvit téměř do všech materiálů. Samozřejmě žádný materiál nemá pouze výhody, proto je třeba dbát na zvolení správného druhu kotvy, která bude vyhovovat jak podkladnímu materiálu, tak podmínkám, kterým bude vystavena. Jako nejuniverzálnější z těchto kotev se zdají být zálivkové kotvy založené na organické pojivové bázi. Problémy ovšem nastávají při použití v provozech se zvýšenou teplotou, kdy dochází ke snižování pevnosti spoje nebo případnému vyhoření samotného pojiva a uvolnění spoje. Mimo jiné tyto látky mohou být těkavé a jsou z pravidla toxické, což je z ekologického hlediska, které hraje celosvětově významnou roli mimo jiné i ve stavebnictví, nepřijatelné.

Jako vhodnou alternativa se jeví rychletuhnoucí anorganická pojiva na bázi cementových matric či alkalicky aktivovaných látek. Tyto látky jsou chemicky stálé, tepelně odolné, výrazně levnější a netoxické. Jednou z nevýhod těchto materiálů může být pomalejší tuhnutí ve srovnání s monomery pryskyřic. To se dá částečně nahradit pomocí urychlovačů tuhnutí, proteplování a použití částic s velkou reaktivitou.

S ohledem na mezeru na trhu stavebních hmot je předkládaná práce zaměřena na výzkum a zejména vývoj nového kotevního expanzního materiálu, a to především do průmyslových provozů s extrémním namáháním. Pozornost je věnována zejména dosaženým vysokým pevnostem materiálu, rychlému vytvrdnutí a odolnosti vůči teplotním změnám.

2. CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce je navržení nových silikátových materiálu s expanzními vlastnostmi pro betony o minimální pevnosti v tlaku 50 N.mm^{-2} . Tento materiál by měl být odolný vůči opakovanému vystavování teplotě o hodnotě až 200°C . Uvedených teplot je dosahováno například při výrobě mnoha plastových produktů, při výrobě α a β sádry, v průmyslových pecích určených pro sušení laků, v komorových průchozích pecích určených pro výpal plastových nástřiků, u linek na ohřev chemických materiálů v sudech, u pecí určených k umělému stárnutí Al slitin apod.

Prvním stěžejním bodem je specifikace problematiky kotvení, podkladních materiálů a blíže analyzovat expanzní jevy silikátových materiálů, které lze využít u navrhované hmoty.

Záměrem následující části této práce je vypracování přehledu dostupných materiálů na trhu v ČR i zahraničí včetně jejich zhodnocení z hlediska deklarovaných parametrů pro dosažení řízené expanze v kombinaci s tepelnou odolností.

Podstatný dílčí cíl také představuje návrh metodiky vývoje expanzních kotevních hmot pro nepříznivé expoziční podmínky, což zahrnuje zejména selekci vhodného souboru testů vč. posloupnosti jejich provedení a dále návrh složení receptur.

Rovněž je třeba klást důraz na experimentální ověření vybraných vlastností navržených hmot.

3. TEORETICKÁ ČÁST

3.1. Kotevní a upevňovací technika

Kotvení bylo vždy důležitým nedílnou součástí stavební praxe, kdy pomocí kotvícího systému vzniká pevné spojení mezi podkladním materiálem a upevňovaným prvkem. Zmíněný systém je dle zvoleného typu tvořen určitými kotvícími prvky. Kotvení je velmi obsáhlou problematikou a je ovlivněno mnoha faktory jako je například materiál podkladu, jenž může být přírodní, uměle vyrobený, pevný sypký atd. Dalším faktorem je zatížení přenášené do podkladu, kdy hlavní vliv má jeho velikost a také charakter zatížení (statický či dynamický). Jako neposlední faktor lze jmenovat např. prostředí, v kterém jsou kotvící prvky umístěné, a zejména jeho agresivita k těmto prvkům. [1]

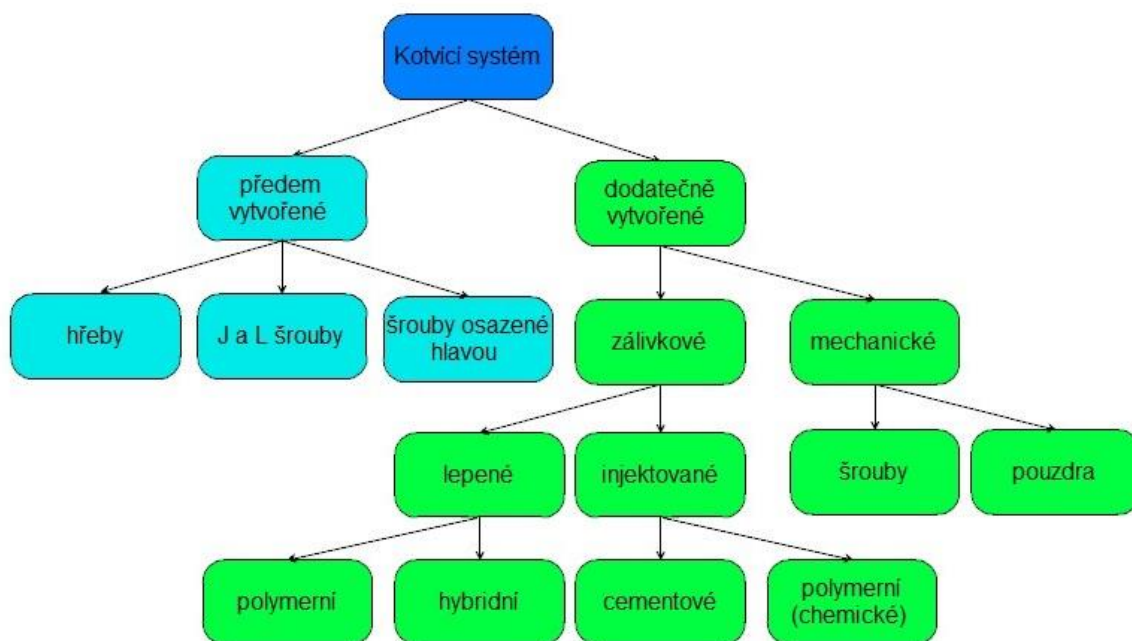
Kotevní technika v sobě zahrnuje oblasti stavební mechaniky, dynamiky, stavebních hmot, nauky o materiálech, stavební tepelné techniky, stavební chemie, strojírenství a dalších oborů.

3.1.1. Rozdělení kotevních systémů

V reakci na stále se zvyšující požadavky na kotvení rozmanitých konstrukcí jsou stále vyvíjeny nové kotvící prvky, materiály i celé systémy, které vyhovují stanoveným požadavkům.

Z historického hlediska bylo vyvinuto několik osvědčených kotvících systémů, které se v základě dělí na dvě kategorie: předem vytvořené a dodatečně vytvořené.

Obrázek 1 shrnuje typy kotev, které je možné použít pro jednotlivé kategorie:



Obrázek 1 - Rozdělení kotvicích systémů pro kotvení šroubů [2]

Předem vytvořené kotvy

Předem vytvořené kotvy jsou instalovány přímo do bednění před samotným odléváním betonu.

Typicky se skládají z hřebů nebo ocelových svorníků osazených hlavou, přičemž zatížení je přenášeno zejména právě přes hlavu. Tento systém byl podroben řadě testů a z jejich výsledků byly vytvořeny jednotlivé modely popisující jejich chování. Použitím těchto modelů lze poměrně přesně určit jejich únosnost, nevýhodou ovšem zůstává předem určená pozice kotevních prvků, která ne vždy může vyhovovat dané situaci. [2]

Dodatečně vytvořené

Dodatečně vytvořené kotvy na rozdíl od předem vytvořených poskytují flexibilitu a s ohledem na statickou funkci prvků je možné je aplikovat prakticky kdekoliv. Proto se tento způsob kotvení stal běžně používaným a většina kotev je vytvořena právě tímto systémem.

Dodatečně vytvářené kotvicí systémy zahrnují jak mechanické (kotvicí pouzdra a kotvicí šrouby, tak i zálivkové (lepené i injektované) kotvy. Mechanické kotvy jsou zajištěny proti vytržení expanzí ocelového prvku. Vnější část tohoto prvku je přetvářena zašroubováním nebo vtlačáním vnitřního ocelového trnu nebo šroubu.

Zatížení u těchto typů kotev je přenášeno pomocí tření, které vzniká mezi otvorem a přetvořenou částí mechanické kotvy. Způsob instalace je obdobný u obou kotev s tím rozdílem, že kotvící pouzdra jsou vložena do otvoru a následně se deformují zašroubováním vrutu, u kotvícího šroubu je deformovatelná část již jeho součástí a k vložení dojde společně se šroubem.

Na druhé straně mezi zálivkové dodatečně vytvořené kotvy patří jak lepené, tak injektované kotvící systémy. Tyto systémy se skládají z ocelového prvku a kotvící zálivky. Přenášení síly je zajištěno adhezí i třením, které vzniká mezi otvorem a expandujícím materiálem. Předkládaná bakalářská práce je v souladu se zadáním zaměřena především na zálivkové kotvící systémy s řízenou expanzí, které budou podrobněji rozebrány níže. [2]

Mechanické kotvy

Mechanické kotvy se osazují stejně jako zálivkové do předvrtaného otvoru, který je osazen mechanicky rozevratelným šroubem nebo pouzdrem. Při šroubování vrutů se těleso hmoždinky nebo kotvy rozšiřuje a vyvoluje tření nebo mechanický zámek, který pak brání jejímu vytažení. Mezi další mechanické kotvy, patří také ty, které se upevňují do základního materiálu vstřelováním. [1]

Kotevní pouzdra

Kotevní pouzdra, také nazývané hmoždinky, existují v mnoha variantách - mění tvar i materiál hmoždinek, vhodnost použité pro různé materiály a zatížení, různorodé jsou i jejich ceny. Nejpoužívanější a nejjednodušší hmoždinky jsou podélně rozříznuty a mají na sobě zářezy, které usnadňují vtlačení do předvrtaného otvoru. Pootočení a vypadnutí hmoždinky z díry při práci nad hlavou brání dva kontra jazýčky. [21]

Kotevní šrouby

Obdobně jakou hmoždinek je i zde možné najít na trhu spoustu druhů. V závislosti na použití se mění jejich tvar, tloušťka, materiál, délka atd. Na trhu jsou dostupné i tzv. samořezné šrouby, které se šroubují přímo do podkladního materiálu a nevyžadují předvrtání otvoru. [21]

Vstřelovací systém kotvení

Při tomto způsobu upevňování je vstřelovacím zařízením udělena speciálnímu hřebu udělena taková kinetická rychlost, že projde do základního materiálu. Poté dochází k vyvození napětí mezi hřebem a základním materiálem. Únosnost spoje je závislá na pružnosti a tvárnosti dřiku hřebu. Důležité je, aby hřeb měl vyšší pevnost než základní materiál.

Výhodou vstřelovacích systémů kotvení je rychlost a vysoká produktivita práce. Nevýhodou je nemožnost použití při kotvení do křehkých, velmi pružných a měkkých materiálů. [20]

Zálivkové kotvy

Zálivkové kotvy se člení na lepené nebo injektované, podle typu báze na cementové nebo polymerní. [2]

U lepených kotev může být ocelová tyč osazená hlavou, bez hlavy nebo může být tvořena zakřiveným prutem výztuže. Tento ocelový prvek je vložen do předvrtaného otvoru, která je zpravidla o 10 a 25 % větší než je průměr ocelového prvku. Pro zajištění pevného spojení se využívá dvousložkového lepidlo.

Injektované kotvy jsou tvořeny ocelovými tyčemi s hlavou, bez hlavy, hřeby s hlavou, deformovanými ocelovými pruty, šrouby s/bez hlavy, hřeby s hlavou, hladkou nebo závitovou tyčí s maticí na konci. Injektované kotvy jsou vytvářeny v zatvrdlém betonu v předvrtaných dírách. Zpravidla ocelové prvky jsou vkládány do děr, které jsou o 50% až 200% větší než je průměr prvku. [2] [20]

Lepené kotvy

Doba vytvrzení lepených kotev je velmi krátká, a proto se používají tam, kde je vyžadována brzká únosnost spoje. Kotvicí hmoty u lepených kotev jsou tvořeny polymery (epoxidy, polyestery, vinylestery) nebo hybridními systémy. Cook [3] vysvětluje, že po smíchání pryskyřice a tvrdidla proběhne exotermická reakce, která vytvoří polymerní matici, jež váže ocelový prvek a podkladní materiál dohromady. Zatížení je poté přenášeno dvěma způsoby. Prvním je vnitřní mechanický zámek, druhým pak chemická vazba kotvicího materiálu s betonem.

Cook [3] navrhl předlohu lepených kotev a předpověděl jejich pevnost. Tato předloha byla vytvořena srovnáváním mezinárodní databáze testů konkrétních lepených kotev s několika odlišnými typy kotev.

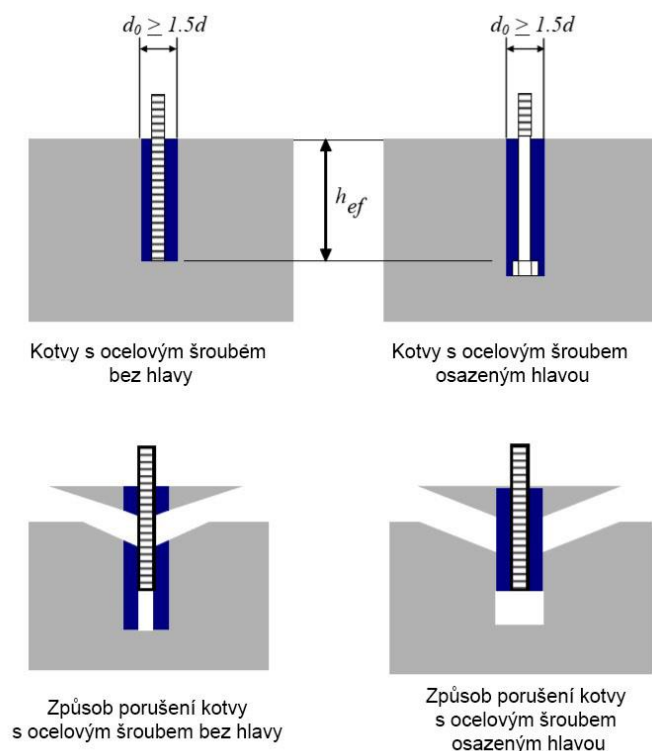
Injektované kotvy

Injektované kotvy mohou být jak na polymerní, tak cementové (resp. polymercementové) bázi. První typ je velice podobný kotvám lepeným, a to jak aplikací, tak i složením, protože obsahuje též pryskyřičné složky a tvrdidla. Na rozdíl od lepených kotev obsahuje i třetí složku, kterou je inertní plnivo (filler). Polymerní injektované kotvy mají velice krátkou dobu vytvrzení, a proto se mohou zatížit již během několika hodin od provedení.

Cementové, popř. polymercementové injektážní malty jsou většinou dodávány v podobě suchých směsí balených do pytlů. Voda do těchto směsí je přidávána až v okamžiku aplikace. Přesné množství vody specifikuje výrobce, a to v takovém množství, aby se dosáhlo požadované viskozity.

Cementové kotvy by měly být aplikovány pouze do čistých navlhčených otvorů, aby se předešlo zbytečné ztrátě vody z malty, což by mohlo vést k nechtěné ztrátě pevnosti. Z důvodu prevence je výrobcí těchto hmot doporučeno saturovat otvor vodou minimálně 24 hodin před samotnou aplikací.

U cementových injektážních kotev může být ocelový prvek osazený hlavou nebo může být použit bez hlavy. Přítomnost hlavy výrazně ovlivňuje přenos sil z ocelového prvku do kotvící malty a dále do podloží. Nicméně zatížení je přenášeno především vaznou silou mezi ocelovým prvkem, kotvící maltou a mechanickým vnitřním zámkem bez ohledu na přítomnost hlavy na konci ocelového prvku. [2]



Obrázek 2 - druhy porušení šroubových spojů [2]

Kornreich [22] i Zamora [23] tvrdí, že injektované kotvy, u kterých je použit ocelový prvek bez hlavy nebo matice, se porušují na rozhraní ocel/kotvící materiál nebo na rozhraní kotvící materiál/podklad, kdy porušení tvoří neporušený ocelový prvek, vytržená celá nebo část kotvícího materiálu a malý kužel tvořený podkladním materiálem. Kotvy osazené ocelovým prvkem s hlavou nebo s maticí přenášejí zatížení hlavně prostřednictvím hlavy. K porušení proto dochází buď v podkladním materiálu nebo na rozhraní kotvící materiál/podkladní materiál, kdy společně s ocelovým prvkem a kotevním materiálem je vytržen i kužel tvořený podkladním materiálem. V obou případech dochází vždy k vytržení kotevního materiálu, avšak v zásadě nedochází k jeho porušení.

Tabulka 1 - hodnocení vhodnosti použití kotevních prostředků [1]

Vhodnost použití kotevních prostředků						
Produkt	Dle požadavků na zatížení				Dle vhodnosti materiálů	
	Nízké	Střední	Vysoké	Extrémní	Dutý	Plný
Hřeb	1	3	3	3	3	1
Vrut	1	3	3	3	3	1
Natloukací hmoždinka	1	1	3	3	3	1
Plastová hmoždinka s vrutem	1	1	3	3	2	1
Ocelová plášťová kotva	1	1	3	3	1	1
Turbo šroub	1	1	3	3	2	1
Šroubová kotva	1	1	1		3	1
Pevnostní ocelová kotva	1	1	1	1	3	1
Chemická kotva	1	1	1	1	1	1
1 - vhodný 2 - omezeně vhodný 3 - nevhodný						

3.1.2. Druhy podkladních materiálů

Jak již bylo zmíněno výše, dodatečně kotvy lze použít do všech druhů stavebních materiálů kromě sypkých materiálů. Podmínkou je výběr správného typu kotvy pro daný podkladní materiál.

V dalším textu je uveden přehled jednotlivých materiálů a vhodných typů kotev.

Dřevo

Zálivkové kotvení do dřeva nebylo ještě do nedávna příliš realizováno, nyní se s oblibou využívá kotev na bázi epoxidové pryskyřice. Tento typ je využíván hlavně ve stavebnictví a v domácnostech. Pomocí těchto kotev jsou upevňovány zejména zesilovací prvky na novostavbách a při rekonstrukcích, zábradlí, balustrády atd.

Kámen

Kamenný podklad se vyznačuje hutností a vysokou pevností v tlaku a lze využít všechny dostupné kotevní materiály. Některé kamenné prvky mohou být křehké, proto je důležité dbát na opatrnost zejména při provádění kotvení a kontrolovat expanzi kotvícího prvku.

Pórobeton

U pórobetonu lze využít všechny zálivkové kotevní systémy, pro určité vysokopevnostní tvárnice nebo tvárnice s vysokými tepelně izolačními vlastnostmi se vyrábějí speciální kotevní hmoty. Například výrobce tvárnice Ytong doporučuje použití konkrétní kotvy, které byly výrobcem řádně otestovány.

Pro kotvení do pórobetonu existuje i řada mechanických kotevních prvků, v poslední době se na trhu objevily i speciální hmoždinky určené pro pórobetony.

Keramické cihly, tvarovky

Do plných cihel je možné použít jakoukoliv zálivkovou kotvu, také se hojně využívá ostatních mechanických kotevních prvků. V současné době jsou plné pálené cihly nahrazovány dutinovými keramickými střepy, které vyžadují jinou technologii. Zde se používá síťové pouzdro, přičemž se jedná o hustě perforovanou trubičku, která má za úkol zamezit stékání hmoty po stěnách střepu.

Poté dochází k vytvoření tzv. tvarového zámku bránícího proti vytažení kotvy. Únosnost kotvy je značně závislá na kvalitě konstrukčního materiálu a vhodné kombinace všech tří kotevních prvků (síťové pouzdro, injektážní hmota a ocelový kotevní prvek).

Beton, železobeton

Beton je nejpoužívanější konstrukční materiál, díky tomu se jedná i o nejčastěji používaný podklad pro kotvení.

Ke kotvení do betonu se stále často využívá ocelových kotvicích prvků. Vzhledem k hutnosti betonu není použití zálivkových kotev nikterak omezeno a je voleno hlavně na vysoce namáhané spoje. Kotvení do betonu je řízeno normami a veškeré kotevní prvky musí tyto normy splňovat. [24]

Co se týče speciálních druhů betonů (například vysokopevnostní, vodotěsné, žáruvzdorné, samozhutnitelné), je kotvení do těchto betonů specifitější než kotvení do konstrukcí z betonu běžných pevností, protože u těchto spojů jsou požadovány určité speciální vlastnosti. Kotvení se také liší případ od případu, kdy dochází k jednotlivým změnám jak v technologii vytváření spojů (u zálivkových a mechanických), tak ve změně samotného složení kotvy, aby systém a celý spoj vyhověl konkrétním požadavkům.

3.1.3. Provádění zálivkových kotev

Jednotlivé procesy aplikace zálivkové kotev jsou velice podobné a postupy se neustále zjednodušují. Uvedené produkty se dodávají v tzv. kartuších, kdy k mísení reaktivních složek dochází při vytlačování směsi kartuše pomocí tmelící pistole v trysce, která je opatřena závity. Tento jednoduchý aplikační systém je výsledkem snahy výrobců o zjednodušení a zefektivnění vytváření spojů. Jedinou výjimku tvoří chemické směsi na silikátové bázi, které se dodávají v pytlích ve formě suché práškové směsi a po smísení s vodou jsou připraveny k injektáži.

Postup:

- Vyvtání otvoru. Dle podkladového materiálu se musí zvolit správná technologie vrtání. Otvor by měl být větší o 4-5 mm než průměr ocelového kotvícího prvku.
- Vyčistění otvoru od nečistot v podobě prachu. Některé moderní chemické kotvící směsi se mohou aplikovat bez nutnosti čištění otvoru při zachování pevnosti garantované výrobcem.
- Stěny otvoru je nutné navlhčit, aby nedošlo k rychlému odvodu vody ze směsi do podkladového materiálu. Tím je zaručeno optimální množství vody pro vytvrzení chemické směsi. Nesmí ovšem dojít k přílišnému nasycení stěn vodou, aby nedocházelo k přesycení směsi vodou.
- Otvor je vyplněn kotvící směsí, ať už vytlačáním z kartuše nebo zalitím.
- Je vložen ocelový kotvící prvek, přes který je kotvený prvek pevně spojen s nosnou konstrukcí.
- Po vytvrzení se spoj otestuje na přídržnost a únosnost spoje.

Při aplikování kotvy je možné vlepit dodatečnou výztuž do spoje. [25]

3.1.4. Normy, předpisy a směrnice pro kotvení

Zásady, navrhování a provádění kotvení je řízeno příslušnými normami, které určují jednotlivé parametry jak pro kotvy, tak pro jejich zatížení.

Dimenzování spojů se řídí především normou ČSN P CEN/TS 1992-4-1. Ta mimo jiné obsahuje metody navrhování a definování nosných kotev

Předem vytvořené kotvy, které jsou vloženy do betonových prefabrikátů již během výroby, a určeny zejména pro zvedání a manipulaci s prvkem, jsou zahrnuty do CEN/TS 229 "Navrhování a použití úchytů pro zvedání a manipulaci s betonovými prefabrikáty".

Norma ČSN EN 1504-6 uvádí pokyny a doporučení pro výběr výrobků a systémů, které jsou vhodné pro určené použití. Tato evropská norma identifikuje klíčová místa v procesu oprav - hodnocení stavu konstrukce, identifikace příčin poškození, možnosti provedení ochrany a oprav, výběr možných principů ochrany

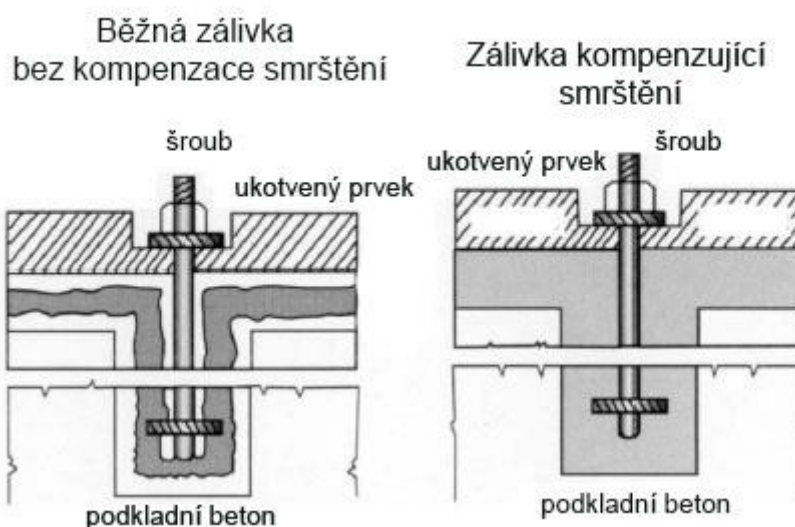
a oprav, výběr metod, definice vlastností výrobků a systémů, specifikace požadované údržby po provedené ochraně a opravě. Též obsahuje přílohu A (informativní), která uvádí pokyny a základní informace pro normovou zkoušku. [26]

Mezi další předpisy a směrnice, které se zabývají problematikou kotvení, je ETAG 001 Anchoring design methods a EOTA TR 029. VN 73 2615 z 1.7.1994.

Ostatní předpisy, které se zabývají specifickým kotvením (např. oken, střech atd.), zde vzhledem k zaměření práce nebudou uvedeny.

3.2. Principy expanze silikátů

Řada metod dosahování expanze v silikátových hmotách byla vyvinuta v důsledku snahy kompenzovat smrštění betonu, které vzniká v průběhu zrání materiálů obsahující cement. Při tomto procesu dochází k objemovým změnám, jako je například smrštění vysycháním, teplotní smrštění, hydratační smrštění, a objemovým změnám, které jsou způsobeny zatížením. Zvláště náchylné na smrštění jsou kotvící hmoty na cementové bázi v důsledku hydratačních reakcí a použití jemných frakcí. To může mít za následek celkovou ztrátu pevnosti spoje, vlivem porušení styčné plochy mezi kotevním a základním materiálem jako je znázorněno na obrázku č. 2.



Obrázek 3 - porovnání smrštivé a nesmrštivé zálivky [42]

Objemové změny silikátových hmot jsou relativně složitým jevem, jejichž vznik ovlivňuje řada faktorů. Velký vliv na smrštění má právě technologické zpracování směsi, avšak ne vždy lze zajistit optimální ošetřování. Proto byly objeveny způsoby, které spočívají v přidání příměsí, jež svými expanzními procesy smrštění potlačují nebo dokonce vyvodí ve směsi celé směsi expanzi. Expanzivní procesy používané k tomuto účelu mohou být založeny na tvorbě primárního ettringitu, expanzi volného CaO (vápenatého rozpínání), hořečnatého rozpínání nebo jejich vzájemné kombinaci. Mezi další metody, které se používají k vyvození expanze expanzních cementových materiálů, je použití bentonitových jíílů. [7]

Těchto rozpínavých procesů v cementových materiálech je možné využít u kotevních směsí, aby se zabránilo jak smrštění směsi, které může vést až k porušení vazeb mezi směsí a podkladním materiálem, tak i k drobné expanzi vyvolující trojosé napětí, a tím vyšší únosnost celého spoje.

3.2.1. Ettringit

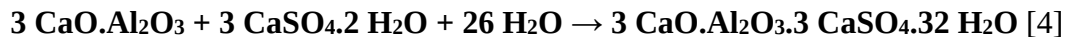
Ettringit je přírodní minerál, který byl objeven v Německu ve městě Ettringen, odkud také pochází jeho název. Chemický vzorec tohoto minerálu je $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ a tuhne v šesterečné soustavě, kdy vytváří hranolovité jehlicové krystaly.

Tento minerál se běžně vyskytuje v portlandském cementu jako výsledek reakce sádrovce, který se přidává do portlandského slínku kvůli zpomalení tuhnutí, úpravě nárůstu pevností a redukci smrštění.

Mimo sádrovce jsou sírany obsaženy i v příměsích přidávaných do cementu. Sírany i zde následně reagují s C_3A a vytvářejí tak ettringit během prvních pár hodin po zamíchání.

Tvorbu ettringitu v rané fázi tuhnutí betonu nazýváme primárním ettringitem. Většina síranů obsažených v čerstvě zamíchané směsi je spotřebována na produkci ettringitu právě během primární tvorby, kdy je směs ještě čerstvá a plastická. [5]

Vznik ettringitu hydratací C_3A lze popsat rovnicí:



Po spotřebování všech volných síranů se ettringit přeměňuje na monosulfát.



Sekundární tvorba ettringitu probíhá v pozdější fázi zrání cementové směsi, kdy směs již tvoří zatvrdlá struktura. Objemové změny vznikající tvorbou ettringitu způsobují napětí uvnitř směsi, což může vést k porušení struktury. Tato sekundární tvorba může být zapříčiněna mnoha faktory. Nejčastěji je způsobená přítomností síranů v pozdější fázi zrání, a to buď postupným uvolňováním přímo z cementů, příměsí, méně často pak z vody nebo kameniva. Síranů mohou pocházet i z transportních procesů z vnějšího okolí, které vnikají do struktur difuzí. Všechny přítomné sírany poté reagují za sekundární tvorby ettringitu.

Další možnost vzniku je u betonů zrajících za vyšších teplot, jelikož při těchto podmínkách vzniká monosulfát namísto ettringitu a následně dochází ke zpomalení tvorby v primární fázi. Vliv na stabilitu ettringitu má též pH směsi, protože ettringit je stabilní při pH 10,7 – 13,0. [6]

Účelné vytváření ettringitu

Výzkum a vývoj ettringitu vedl k myšlence využít rozpínavé vlastnosti ettringitu k prospěchu v různých oblastech jako je neexplozivní trhání skal, neexplozivní demolice a také zabránění smršťování betonu v rané fázi zrání. Tvorba ettringitu je také jednou z podstat cementových nesmršlivých sanačních a kotvicích hmot. Každá společnost, která nabízí na trhu nesmršlivé malty, si hlídá způsob vytváření množství ettringitu vnášeného do cementové matrice a považuje to za svoji konkurenční výhodu.

Zřejmě nejznámější a nejpoužívanější expanzní činidlo je založeno na kalcium-sulfo-aluminátu (C_4A_3S), ze kterého vzniká ettringit ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) [6]

Tepelná odolnost Ettringitu

F. Glasser [8] uvádí počátek degradace ettringitu ztrátou vody, kdy se objevuje metaettringit, již při teplotách nad $45^\circ C$ (při relativní vlhkosti 30 – 50%). Odlišné informace byly publikovány J. Newmanem [9], který termogravimetrickou analýzou určil teplotu rozkladu ettringitu v rozmezí 110 až $130^\circ C$

3.2.2. Hořčnaté rozpínání

Hořčnaté rozpínání je založeno na hydrataci MgO páleného při teplotě kolem $900^\circ C$, kde konečným produktem této reakce je $Mg(OH)_2$, které díky navázané vodě má větší objem, a to zhruba 2,2 násobně.

Na rozdíl od většiny používaných rozpínavých metod je hydratace MgO poměrně dlouhodobá záležitost, jelikož produkce $Mg(OH)_2$ začíná až po 7 dnech, a konec je udáván přibližně po 1000 dnech. Díky tomuto faktu se často používá při budování přehrad, kde celkový objem betonové konstrukce přehrady může chladnout několik měsíců až několik let a smrštění je potřeba kompenzovat postupně.

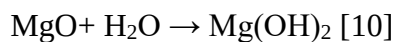
Dalším rozdílem oproti ostatním používaným metodám dosahování expanze je menší náročnost na přítomnost vody pro proběhnutí reakce. To přispívá k zamezení vysoušení betonu v době zrání. Proto se této skutečnosti využívá u vysokopevnostních betonů s nízkým vodním součinitelem a u betonů s nízkou permeabilitou.

Hořčnaté přísady, které byly vyvinuty, se dodávají v práškové podobě.

MgO je také obsaženo jako nežádoucí příměs ve slínku. Pokud je obsah vyšší než 2%, vyskytuje se ve formě periklasu. Tato forma se objevuje především u slínek pálených při nízkých teplotách (zejména u cementů vyráběných dříve, někdy okolo roku mého narození). V současné době, kdy jsou slínky vypalovány okolo teploty $1400 - 1500^\circ C$, je obsažené MgO považováno za inertní příměs slínku. Obsah MgO ve slínku se pohybuje okolo 1,5% a expanzní procesy se projevují

pouze při laboratorních testech v autoklávu (pomocí metody ASTM C151 Method for autoclave expansion of portland cement).

Expanze hydratací MgO je popsána následovně:



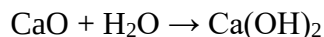
3.2.3. Vápenné rozpínání

Volné CaO, obdobně jako MgO, obsažené v cementu v krystalické formě a v určitém množství způsobují při vlastní hydrataci objemové změny. Zda k expanzi dojde a v jaké míře je závislé na více faktorech, jako je velikost krystalů, teplota výpalu slínku a rozpustnost v přítomnosti ostatních složek cementové směsi. Čím je vyšší teplota výpalu, tím je reaktivita CaO menší, protože struktura krystalů se stává hustší. Naopak čím jsou částice CaO jemnější, tím rychleji reagují po smíchání s vodou a jsou spotřebovány v době, kdy cementová směs je v plastickém stavu.

Laboratorní testy na cementech s nízkým obsahem MgO a obsahem volného (krystalického) CaO ukázaly, že tyto cementy značně expandují a způsobují trhliny. V současné době se s nežádoucí expanzí vlivem volného CaO neshledáváme díky lepšímu zpracování slínku a zkvalitnění výroby. V běžně dostupných cementech málokdy procento volného CaO přesahuje 1%.

Expanzní přísady, obsahující velké množství krystalického CaO, se používají v Japonsku ke kompenzaci smrštění betonů a pro výrobu nesmršlivých betonů.

Reakce, ke které dochází hydratací krystalického CaO, lze popsat touto rovnicí:



Použití tzv. mrtvě páleného CaO je vhodnější než MgO, protože jde o spolehlivější a kontrolovatelnější proces dosahování expanze. To je potvrzeno i produkcí malt s kompenzací smrštění, které jsou založeny právě na mrtvě páleném CaO.

Plné expanze se u hmot založených na mrtvě páleném CaO dosahuje už po 3 dnech - na rozdíl od hmot na bázi ettringitu, kdy je k dosažení expanze zapotřebí 7 dní. [13]

3.2.4. Expanzní cementy

Termín expanzivní cement označuje hydraulické cementy obsahující složku nebo složky, které při normálním procesu hydratace, zrání a tvrdnutí vykazují zvýšení objemu. Toho jevu se využívá při redukci smrštění betonu nebo k dosažení chemického předepínání betonu.

V principu se expanzní cementy vyrábějí dvěma metodami. První je výpal slínku, který již obsahuje expanzní složku, druhá metoda spočívá v smíchání expanzní složky s běžným cementem. [9]

Typy expanzních cementů:

Lossierův expanzní cement

Tento cement se skládá ze tří komponentů. První složkou je portlandský cement, který určuje mechanické vlastnosti výsledné směsi. Další složkou je kalciumsulfohlinitanový (CSA) slínek - ten plní funkci expanzního činidla a je produkován pálením směsi sádry, bauxitu a kříd. Posledním komponentem v Lossierově cementu je vysokopecní struska, jež má za úkol stabilizovat cement při hydrataci eliminováním přebytečného množství CSA, a zaručit správný průběh expanze. [11]

Mikhailův cement

U tohoto typu cementu je možné se setkat se dvěma druhy – nízko expanzní a vysoce expanzní.

Hlavní komponentou málo rozpínavého typu je cement, ke kterému se přidává sádra a hlinitanový hydrát. Tento typ se využívá zejména pro redukci smrštění betonu.

Vysoce expanzní cement je založen na portlandském cementu (60-70%) s přídavkem expanzní směsi sádry a hlinitanového cementu (30-40%). Tento druh je označován jako cement typu M. [11]

Kleinův cement

Je označován také jako cement typu K. Podobně jako Lossierův cement je vyráběn pálením směsi bauxitu, kříd a sádry přibližně 1330°C. Po vypálení vzniká

stabilně expandující CSA sloučenina. Využití cementu spočívá v kompenzaci smrštění betonu, kdy se přidává do betonové směsi v množství 10 - 15%. [11]

Cement typu S

Byl vyvinut Asociací portlandského cementu (PCA). Jeho podstata spočívá ve vysokém obsahu C_3A , který je i běžně dostupný v malém množství i v běžném portlandském cementu. [11]

Hydratace expanzních cementů

Reakce způsobená hydratací expanzních cementů zmíněných výše spočívá v tvorbě Ettringitu ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). Problematika ettringitu již byla diskutována v části 1.3.1. Tento minerál vzniká reakcí mezi C_3A a sírany za přítomnosti vody. Ettringit díky vysokému množství vázané vody zvyšuje svůj objem 8x. Horní hranice expanze cementových materiálů, aniž by došlo k jejich porušení, se udává hodnota 2%. Zhruba 60- 80% z celkové expanze proběhne během prvních 24-36 hodin. [11]

Expanze je ovlivněna mnoha činiteli. Některé z nich jsou kontrolovány výrobcí. Expanze se úměrně zvyšuje s vzrůstajícím se množstvím CSA, síranu vápenatého a hydratovaných hlinitanů přítomných v cementu, se zvyšujícím se množstvím expanzního činitele, s nižší jemností cementu, se zvyšováním vodního součinitele, zvyšující se teplotou a vlhkostí a snižujícím se časem míchání. [11]

Expanze cementů může být značně ovlivněna použitím přísad, ať už se jedná o příměsi provzdušňující, plastifikační, superplastifikační, zpomalující nebo urychlující. Nejlepším způsobem, jak zjistit vliv jednotlivých přísad, je vytvoření zkušebních vzorků a otestovat jednotlivé vlastnosti. Dle informací uvedených v [11] se tlaky vyvozené expanzí 0,1% přibližně pohybují kolem 680 kPa.

Hlinitanový cement

Hlinitanový cement je hydraulický stavební materiál, který se skládá pouze ze dvou komponentů, a to Al_2O_3 a CaO . Obsah každého z nich je okolo 40 %, ve zbylých 20% jsou zastoupeny další komponenty jako je SiO_2 , Fe_2O_3 + FeO (oboje okolo 10%), MgO , TiO_2 , SO_3 (cca 1%).

Primárními surovinami pro výrobu hlinitanového cementu jsou bauxit a vápenec. Na rozdíl od portlandských cementů s vysokým obsahem Al_2O_3 se hlinitanové cementy pálí na vyšší teploty (v elektrických pecích), chladí se pomalu a nepřidává se sádrovec jako zpomalovač tuhnutí. Velkým rozdílem jsou též hydratační produkty, kdy tvrdnutí hlinitanových cementů je způsobeno hydratací hlinitanů vápenatých (vápenné a hlinitanové oxidy) přítomných v cementu. [12]

3.2.5. Bentonit

Bentonit je reziduální nepřemístěná hornina s mohutnou sorpční schopností a bobtnáním až o 300%, vysoká je též u tohoto jílu plasticita. Bentonity vznikly zvětráním sopečných tufů a tufitů, andezitů, čedičů a dalších hornin zejména v alkalickém prostředí.

Chemické složení bentonitů je výrazně závislé na zvětralé mateční hornině, proto se nedá jednoznačně určit. Ale je možné rozdělit bentonity podle výměnného kationtu na silně bobtnavé (kde převládá kationt sodný) a méně bobtnavé (převládají draselné, vápenaté a hořečnaté).

Bobtnání vzniká při kontaktu jílu s vodou, kdy atomy kyslíku a vodíku obsažené v molekule vody tvoří dipól. Díky této skutečnosti se molekuly vody orientují kladnou stranou k zpravidla kladně nabitým částicím jílu. Takto orientované molekuly vody vytvářejí nový negativně nabitý povrch a váží na sebe další molekuly vody. Síla vzniklé vazby postupně slábne směrem od povrchu jílu.

Obdobně jsou hydratovány kationty, kdy adsorpcí molekul vody a kationů vzniká elektrická dvojvrstva. Tato hydratace adsorbovaných iontů je hlavní důvod bobtnání bentonitů. [27]

použití bentonitu ve stavebnictví

Bentonito/cementové suspenze, kdy zrna bentonitu jsou desetkrát až stokrát menší než zrna cementu a dostanou se tak do menších kapilár a pórů které utěsní. Z toho vyplývá lepší vodotěsnost a díky plasticitě jílu směs zachovává kontinuitu a nepropustnost i při objemových měnách těsněné konstrukce. Ovšem u takto aplikovaných hmot je velkou nevýhodou nízké konečné pevnosti. Tato nevýhoda lze částečně odstranit snížením obsahu vody ve směsi. [28]

3.3. Vliv zvýšených teplot na chování silikátových kompozitů

Silikátové kompozity se skládají ze základních složek, které se liší na základě vstupních surovin a typu kompozitu. Tyto vstupní suroviny mají odlišné vlastnosti, a tak na jednotlivé změny (mechanické, chemické, fyzikální) reagují odlišně. Výjimkou nejsou ani změny teplot, kdy dochází ke změně v chemické struktuře, mechanických a fyzikálních vlastností v závislosti na změně teploty. Maximální teploty, které budou směs zatěžovat, závisí na místě použití. Hodnoty těchto teplot se pohybují od 50°C až do cca 1350 °C při požárech.

Pro použití je nezbytné specifikování druhu teplotního namáhání, tj. zda bude materiál zatěžován nepřetržitě, cyklicky nebo pouze v neočekávaných případech jako je například požár. Další důležitou specifikací je stupeň degradace materiálu zatíženého danou teplotou, tzn. Specifikovat, o kolik je dovolený pokles mechanických vlastností, nebo dobu, po kterou má materiál odolat maximální teplotě, než dojde ke kompletnímu kolapsu konstrukce.

V rámci této práce budou popsány změny v mikrostruktuře silikátových kompozitů a změny mechanických vlastností do teploty 500°C.

3.3.1. Dilatační změny

Dilatační změny silikátových kompozitů jsou závislé zejména na tepelné roztažnosti použitého plniva, respektive kameniva. Přehled tepelných roztažností vybraných kameniv je v tabulce 2. Hodnoty této veličiny se mění s původem a rozdílným složením kameniva.

Tabulka 2- součinitele teplotní roztažnosti kameniv [30]

druh horniny	Součinitel teplotní roztahnosti [.10 ⁻⁶ K ⁻¹]	
	min.	max.
křemen	10,3	13,8
pískovec	7,5	10,4
chalcedon	13,8	14,2
opál	6,3	7,9

žula	9,2	9,8
granodiorit	3,6	4,3
diorit	6,7	7,4
Obsidian	4,5	4,8
andezit	6,2	7,8
čedič	4,4	6,9
dolomit	6,6	8,1

Pro srovnání lze uvést hodnotu součinitele tepelné roztažnosti oceli: $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Tepelná roztažnost cementového tmele je silně ovlivněna vlhkostí. Při nízkých vlhkostech je hodnota tepelné roztažnosti k $11,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, v opačném případě se může hodnota vyšplhat až k hodnotě $27 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Rozdílná roztažnost je způsobena především množstvím transportované vody z pórů v cementovém gelu do kapilár a následně pryč ze struktury při teplotních změnách. [29]

Obecně je považováno, že celková roztažnost je způsobena koeficienty roztažnosti jednotlivých složek cementového tmele (například pevnými částicemi, kapilární vodou a vodou v pórech). Voda obsažená v gelech cementového tmele se při zahřívání vytlačuje do kapilár, čímž přispívá k expanzi a při následném úniku vody kapilární, a tím i celkovému snižování vlhkosti v celém objemu dochází ke smršťování, které však v porovnání s objemem v nezahřátém stavu stále vykazuje expanzi. [17]

K obdobným výsledkům došli i I. Maruyama a A. Teramoto [18] ve své studii, v níž zkoumali tepelnou roztažnost cementového tmele během raného stárí.

Celková teplotní roztažnost silikátových kompozitů se obecně uvádí $1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Velikost celkového délkového přetvoření je dána vztahem

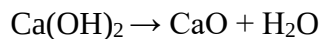
$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l$$

Pokud jsou teplotní roztažnosti jednotlivých složek výrazně odlišné, vznikají v cementové matici tahová a tlaková napětí. Přičemž porušení materiálů způsobují právě napětí tahová.

3.3.2. Změny mikrostruktury

V zatvrdlé cementové matrici dochází při zahřívání k určitým chemickým změnám. Při teplotách do 500°C dochází převážně k dehydrataci a dehydroxylaci jednotlivých minerálů, ze kterých je hmota utvořena, v návaznosti na ztrátu vody se snižují i pevnosti cementové matrice. Hodnoty teplot, při kterých dochází ke ztrátě vody, závisejí na energii, kterou je voda vázaná k cementové struktuře. Proto nejdříve odchází voda volná, poté voda v kapilárách, následována vodou obsaženou na povrchu jemných minerálů, a v posledním stádiu dochází k odstranění vázané vody v hydratačních produktech cementu.

Při zahřívání se nejdříve dochází ke ztrátě vody volné z pórů a kapilár (při teplotách (dále jen T) 20 - 100°C). Po vysušení vody volné dochází k dehydrataci ettringitu (80 – 150°C). Nad 200°C dochází ke ztrátě fyzikálně vázané vody vlivem zvýšeného vnitřního tlaku. Při 300°C se objevuje praskání křemičitého kameniva a během těchto všech fází může dojít k explozivnímu odprýskávání cementové matrice. Tento jev je zapříčiněn nahromaděním vodních par ve struktuře betonu, které nestíhají odejít opustit strukturu kapilárami a tlakem poruší matrici v tahu. Při dalším zahřívání přesahující 500°C dochází k rozkladu portlanditu dle následující chemické rovnice. [30]



To má za následek zvýšení obsahu CaO v struktuře. Při této teplotě dochází i k změně krystalické fáze v písku a kamenivu a celkové ztrátě pevností. Nutno dodat, že vlivem dehydratace a dehydroxylace dochází k podstatnému smrštění objemu cementového tmele, tato ztráta není a nemůže být kompenzována teplotní roztažností jednotlivých složek, proto zajištění objemové stálosti, případně expanze u kotvících materiálů odolné vysokým teplotám, je tak zásadní. [30]

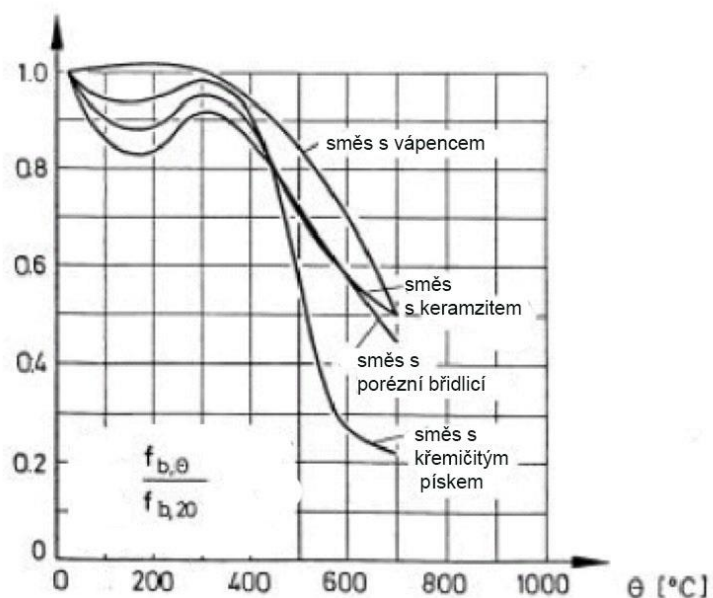
3.3.3. Vliv vysokých teplot na stabilitu kotvícího systému

Vazné pevnosti oceli a betonu se značně liší v závislosti na průměru, tvaru a vysoké teplotě. Dle závěrů Hertze [32] a Kasamiho a kol. lze usoudit, že pevnosti pro ocelové prvky kulatého průřezu se zvyšují při zahřívání do 100°C, ovšem při zahřátí na 200°C vazné pevnosti klesají až na 65% původní hodnoty, proto je lepší použít profilované ocelové prvky, u kterých poklesne vazná pevnost pouze na

85%. Z toho vyplývá, že profilované ocelové prvky mají větší únosnost při zvýšených teplotách.

Další testy provedené Diederichsem [31] ukazují závislost vazných pevností za zvyšující se teploty na drsnosti povrchu. Výsledky těchto testů jasně potvrzují vyšší pevnosti u ocelových prvků s hrubší texturou na povrchu. Pro profilované ocelové prvky je důležitým faktorem též vzdálenost vnějšího okraje profilu a dřívku ocelového prvku.

Dalším výzkumníkem v této oblasti byl Sager [14], který testoval vliv průměru na vazných pevnostech. Závěrem jeho studie bylo zjištění nepodstatného zvýšení pevností větších průměrů v důsledku větší stykové plochy mezi ocelí a kotvící hmotou.



Obrázek 4 - hodnoty vazných pevností různých druhů kámeniva v závislosti teplotě [14]

Za jeden z nejdůležitějších faktorů, který ovlivňuje vazné pevnosti mezi ocelí a kotvící hmotou, je považováno plnivo. Důvodem je výrazná závislost roztažnosti struktury cementového kompozitu na tepelné roztažnosti plniva. A platí, že čím nižší je rozdíl mezi tepelnou roztažností oceli a kotvící hmoty, tím menší pokles vazných pevností nastává. S touto teorií přišel Sager [14], který to doložil svými testy, kdy nejmenší pokles byl dosažen při použití vápence jako plniva.

4. METODIKA PRÁCE

4.1. Etapa I – Silikátové kotvící hmoty dostupné v ČR i ve světě

Záměrem této etapy je zmapovat dostupné silikátové kotvící materiály s expanzními nebo nesmršlivými vlastnostmi. Mezi další důležité faktory bude patřit teplotní odolnost a pevnostní charakteristiky silikátových kotevních materiálů. Zjištěné informace poslouží jako přehled především o hmotách vhodných do náročných provozů, které splňují požadavky na vysoké pevnosti podkladního betonu i cyklického teplotního namáhání.

Tato část také zahrnuje příklady použití vyvíjené hmoty v reálných provozech.

4.2. Etapa II – Návrh postupu testování

V druhé etapě budou specifikovány podmínky, za jakých bude materiál namáhán. Bude navržen postup při zkoušení kotevní hmoty v čerstvém stavu. Dále bude navržen vhodný postup k ověření expanze. V závěru etapy bude popsáno řešení navržené hmoty v ztvrdlém stavu a vlastnosti celého kotevního systému.

4.3. Etapa III – Návrh složení receptur

Ve třetí etapě budou popsány vstupní suroviny jednotlivých směsí a jejich vhodnost pro daný typ kotevního materiálu. Mimo jiné zde budou uvedeny vhodné předúpravy vstupních surovin. Dále budou navržena nová složení směsí na základě teoretických poznatků.

4.4. Etapa IV – Experimentální ověření navržených hmot

V závěrečné etapě dojde k experimentálnímu namíchání směsí navržených v předchozí etapě a přípravy zkušebních vzorků. Následně budou testovány vlastnosti čerstvých směsí, zejména reologických vlastností a expanze. V této etapě dojde k posouzení vhodnosti jednotlivých receptur, jejich úpravám případně k vyloučení nevhodných směsí.

5. PRAKTICKÁ ČÁST

5.1. Silikátové kotící hmoty dostupné v ČR i ve světě

Níže v této etapě jsou uvedeny záливkové kotevní systémy s expanzními a nesmršlivými vlastnostmi.

5.1.1. Chemické a cementové kotvící hmoty

Základní informace o problematice záливkového kotvení a příslušných materiálů byly uvedeny v předchozích kapitolách teoretické části bakalářské práce. Z tohoto důvodu zde jsou uváděny pouze výhody a nevýhody hmot na jednotlivých bázích.

V následujících odrážkách je uveden přehled nejběžněji používaných typů kotvících hmot, a to včetně jejich vybraných vlastností:

- Chemická kotva na bázi polyesteru - jde o dvousložkové polyesterové, snadno aplikovatelné, rychle tuhnoucí a vytvrditelné pryskyřice, které dosahují pevností přibližně 30 MPa. Aplikace kotvy není omezená druhem podkladního materiálu, ale pouze prostředím. Ve vnitřních prostorech je nezbytné použít bezstyrenové produkty, a to vzhledem k silnému zápachu. Teplotní odolnost produktů na této bázi je do + 80 °C. [45]
- Chemická kotva na bázi epoxidu – rovněž jde o vysokopevnostní, rychle tuhnoucí, dvousložkovou epoxidovou pryskyřici, která dosahuje pevností až 90 MPa. Tuto kotvu lze použít do všech podkladních materiálů. Teplotní odolnost je nižší než u polyesterové pryskyřice (pouze 65°C). Tímto typem lze kotvit ocelové svorníky větších průměrů - M 30 a výše. [46]
- Chemická kotva na bázi vinylesteru – jde o kotvu s vysokou chemickou odolností na dvousložkové pryskyřičné bázi. Pevnosti kotvy se pohybují kolem 50 MPa. Na trhu je možné koupit vinylesterové hmoty s příměsí cementu. U většiny výrobků je uvedena vysoká teplotní odolnost, přičemž

kotvy na této bázi odolávají pouze 80 °C, přestože se jedná o nehořlavou hmotu. Největší výhodou tak zůstává voděodolnost a možnost použití dané hmoty pod vodní hladinou. [45]

- Chemická kotva na bázi polyuretanu – v porovnání s výše uvedenými materiály se jedná o nízkopevnostní hmoty k lepení především dřeva a izolačních materiálů nebo k těsnění nízko únosných spojů. K výhodám patří rychlá vytvrditelnost, kdy potřebný čas se pohybuje do 5 minut od aplikace. Polyuretanové kotvy se vyznačují extrémní adhezí ke všem druhům materiálů. [14]
- Kotvicí hmoty cementové – pojivem je portlandský cement doplněný fillerem. Směsi se dodávají v suchých práškových směsích, které obsahují další látky zabraňující nebo kompenzující smrštění. Uvedené kotvy dosahují vysoké únosnosti a trvanlivosti, mimo kotvení se používají i pro injektování dodatečně předpjatých železobetonových konstrukcí. Značnou nevýhodou je pomalé tuhnutí v porovnání s výše uvedenými materiály.
- Kotvicí materiály na geopolymerní bázi – jedná se o aktivované metakaolíny či strusky, které se nejvíce podobají cementovým kotvicím hmotám, avšak s rozdílem vyšší tepelné odolnosti. V poslední době jsou geopolymerní kotvicí materiály podrobeny intenzivnímu výzkumu, a to je také důvod, proč jsou na trhu zastoupeny pouze jediným produktem PCI Geofug®.

5.1.2. Přehled kotvicích hmot dostupných na českém trhu i světovém trhu

Níže uvedená tabulka (viz. Tab. 3) uvádí přehled dostupných kotvicích hmot na silikátové bázi (dominantně zastoupeným pojivem je cement).

Tabulka 3 - seznam kotevních produktů na bázi cementů podle jednotlivých výrobců

produkty bez kompenzace smrštění		produkty s kompenzací smrštění	
výrobce	název produktu	výrobce	název produktu
Pagel	V50 C45	Pagel	E1
	V80 C45		E1SF
	V160 C45		V1/50
	V2S/20		V1/10
	V2S/50		V1/160
Fosroc	Conbextra GP3		V15/30
	Conbextra HES		V15/50
Redrock	Redgrout SR		V15/80
	Redgrout W		VT05
Mapei	Planigrout 830 SP		VT10
produkty dosahující expanze			
výrobce	název produktu	Five Star	Five Star® Grout
Sika	SikaGrout®-210		Fluid Grout 100
	SikaGrout®-212		Fluid Grout 100
	SikaGrout®-311		High Strength Grout
	SikaGrout®-314		HTR Grout
	SikaGrout®-318		Instant Grout
	Pagel		HF10
V1/30HF			Special Grout 550
V1/60HF			
Five Star	Special Grout 120	Fosroc	Conbextra BB92
	Special Grout 110*		Conbextra AT
	Special Grout 400		Conbextra AT+
			Conbextra BB
Fosroc	Conbextra HR *		Conbextra BB80
Baumit	Baumit FiLLBeton 2		Conbextra GP
Roko	Roko Liquid R		Conbextra GP2
	Roko Repcem		Conbextra GPI
produkty s kompenzací smrštění			Fosroc
výrobce	název produktu	Conbextra GV	
BASF	Masterflow 940	Conbextra UW	
	PCI Repaflow	Conbextra MF	
	Masterflow 885	Repol VS 10	
Redrock	Redgrout G	Murexin	Repol VM 30
	Redgrout XF		Repol VM 40
Profimat	Groutex 6000	MC Bauchemie	Emckekrete 70 F
Mapei	Planigrout® 755	Soudal	SOUDAHOLD
	Planigrout® 712	Quick Chem R	epaflow

5.1.3. Možnosti použití vyvíjené hmoty

Vyvíjená hmota bude specifická především tepelnou odolností a vysokou pevností, proto najde uplatnění především tam, kde jsou tyto vlastnosti vyžadovány. Mezi oblasti využití budou především patřit ty průmyslové, a to zejména provozy zabývající se zpracování plastů, potravinářský průmysl, v linkách na předúpravu surovin atd.

Kotvicí hmota bude moci být použita i v provozech jako je sklářství, cihlářství, zpracování a úpravy oceli. V těchto provozech se sice dosahuje teploty větší než 200°C, ovšem umístění spoje bývá většinou mimo nejexponovanější místo a dosahovaná teplota ve spoji nebývá nikdy tak vysoká. To bude ovšem nutné před praktickým použitím nutné doložit výpočtem, nebo praktickým měřením. Případně lze spoj chránit, tepelnou bariérou zajišťující maximální namáhání spoje teplotou 200°C.

Níže je uveden seznam několika možností použití vyvíjené kotevní hmoty, bez nutnosti ověřovat maximální teplotu ve spoji.

- ve výrobě mnoha plastových produktů
- ve výrobě α a β sádry
- v průmyslových pecích určených pro sušení laků
- v komorových průchozích pecích určených pro výpal plastových nástřiků
- u linek na ohřev chemických materiálů v sudech
- u pecí určených k umělému stárnutí Al slitin apod.
- v sušárnách na předúpravu surovin
- v karuselové peci pro ohřev elektronických komponentů
- u linek pro ohřev a chlazení plastových trub
- v nízkoteplotních pecí do 200°C pro vytvrzování, sušení, umělé stárnutí, ohřívání, tvarování
- v pásových pecích pro tepelné zpracování pružin, pájení, vytvrzování

5.2. Zhodnocení nabídky kotvicích hmot a porovnání s vyvíjenou hmotou

Po důkladném prozkoumání českého i zahraničního trhu bylo zjištěno, že většina dostupných kotvicích materiálů je nabízena jako nesmrštivé kotvící či zálivkové hmoty. V případě expanzních hmot se často jednalo o malty a zálivkové hmoty určené k demolici, kotvení izolačních materiálů (např. minerální vlny či pěnového polystyrenu) nebo ke stabilizaci zemin. Tyto hmoty nebyly primárně určeny pro extrémní zatížení.

Z kotevních materiálů označených jako expanzní a vysokopevností lze jmenovat SikaGrout®-210, SikaGrout®-314, Mapei MAPEFI. Z přípravků nabízených pouze v zahraničí lze uvést FLUECO 77 CABLE nebo PAC-IT – Expansive Dry Pack Grout. Parametry těchto produktů lze označit za dostačující pro průmyslové provozy, avšak výrobci neuvádějí hodnoty teplotní odolnosti. Jediným dostupným údajem jsou pouze informace o maximální a minimální teplotě při aplikaci výše zmíněných hmot.

Jedinými produkty na trhu, u kterých výrobci uvádějí konkrétní tepelnou odolnost, jsou výrobky firmy Pagel (PAGEL-BASALT-GROUT, PAGEL-STEEL FIBRE REINFORCED GROUT) a Don Construction Products (Flo-Grout HT), avšak ani jeden z uvedených materiálů nevykazuje expanzní chování.

Z výše uvedených poznatků lze konstatovat, že nově vyvíjená hmota vyplní prázdný prostor na trhu, a při porovnání se současnou nabídkou nebude mít konkurenci v oblasti expanzních kotevních hmot s odolností vůči vysokým teplotám.

5.3. Návrh namáhání a postupu zkoušení kotevních spojů

Tato část bakalářské práce je rozdělena do tří oblastí. V první jsou popsána možná zatížení kotevních spojů, druhá část specifikuje požadavky na kotvící materiály

v závislosti na zatížení. Třetí část se zabývá návrhem vhodného testování v rámci bakalářské práce.

5.3.1. Možné způsoby namáhání

Tato kapitola obsahuje možné způsoby namáhání, kterým exponovaný materiál může být při reálném prostředí vystaven. Níže uvedené poznatky budou sloužit především pro specifikaci konkrétních požadavků, které by měla kotevní hmota na konci vývoje splňovat.

Vstupní požadavky na kotevní spoj

Před samotnou volbou konkrétního kotevního spoje je nutné specifikovat tyto vstupní informace:

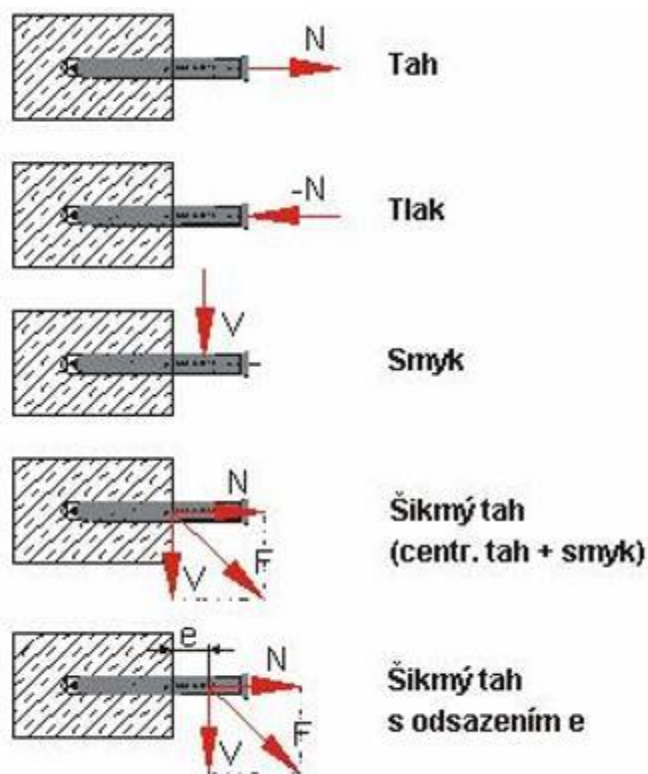
- předmět, jež se bude upevňovat
- podkladní materiál, do kterého se bude kotvit
- předpokládaná velikost zatížení a jeho směr
- charakter namáhání kotvy (statické nebo dynamické)
- počet kotev jejich vzdálenost
- vzdálenost od okraje stavebního materiálu
- vlivy působící na kotvu při montáži materiálu atd.

Velikost zatížení a jeho směr

Podle velikosti zatížení tahem (na jednu kotvu) lze rozdělit zatížení na:

- velká zatížení – 10 – 100 kN
- střední zatížení – 1 – 10 kN
- malá zatížení – do 1 kN

Výrobci kotevních produktů většinou udávají hodnotu zatížení, která je z pravidla 3x menší než hodnota, při které dochází k porušení kotevního spoje. Tato hodnota je zmenšena díky „Koeficientu bezpečnosti kotevního spoje“. Směr a poloha zatížení se uvádí vždy k ose kotevního spoje. [1]



Obrázek 5 - zatížení namáhající spoj [1]

Statické a dynamické namáhání kotev

Při dimenzování kotevního spoje je velmi důležité zohlednit charakter namáhání. To může být buď statické (krátkodobé nebo dlouhodobé) anebo dynamické (tlumené, střídavé nebo rázové).

Účinky dynamického namáhání nejsou vhodné pro kotevní materiály s malou krychelnou pevností. Uvedenému druhu namáhání nejlépe odolávají lepené a injektované kotvy. [1]

5.3.2. Teplotní namáhání

Vzhledem k určení kotevní hmoty bude docházet k výraznému cyklickému teplotnímu namáhání spoje. Mezi hlavní kritéria blíže specifikující teplotní namáhání je zejména maximální teplota, která byla s ohledem na reálné průmyslové provozování stanovena na 200°C. Druhým a také velice důležitým parametrem je výdrž na dané teplotě. Tato hodnota bude rozdílná pro jednotlivé provozování. Vzhledem k tomu, že hlavní předpokládané využití bude v sušárenských procesech v jednotlivých průmyslových provozech, může být spoj namáhán

v rámci desítek minut až po nepřetržitou dobu v případě použití v kontinuální sušárně.

5.4. Vlastnosti zálivkových hmot a jejich zkoušení

Vlastnosti kotevních hmot je poměrně široký pojem, přičemž je lze rozdělit na vlastnosti čerstvé směsi a zatvrdlé směsi. Mezi vlastnosti čerstvé směsi se řadí zejména konzistence, doba tuhnutí, citlivost ke vzniku bleedingu atd. Tyto vlastnosti přímo souvisejí především se zpracovatelností a dobou zpracovatelností, hodnoty vazebných pevností a v neposlední řadě také homogenita kotevní zálivky.

Mezi vlastnosti ztvrdlých kotevních hmot patří mimo jiné pevnosti v tlaku a tahu za ohybu, celkové objemové změny, tepelná odolnost, vazné pevnosti, trvanlivost vůči různým druhům prostředí, modul pružnosti, obsah nebezpečných látek atd.

Zkoušení většiny z těchto vlastností je řízeno normami a silně ovlivňují celkovou únosnost kotvy. Obecné požadavky na kotvení nejen silikátových kotvicích produktů určuje norma ČSN EN 1504 - 6.

5.5. Vlastnosti a zkoušení čerstvých směsí

Konzistence

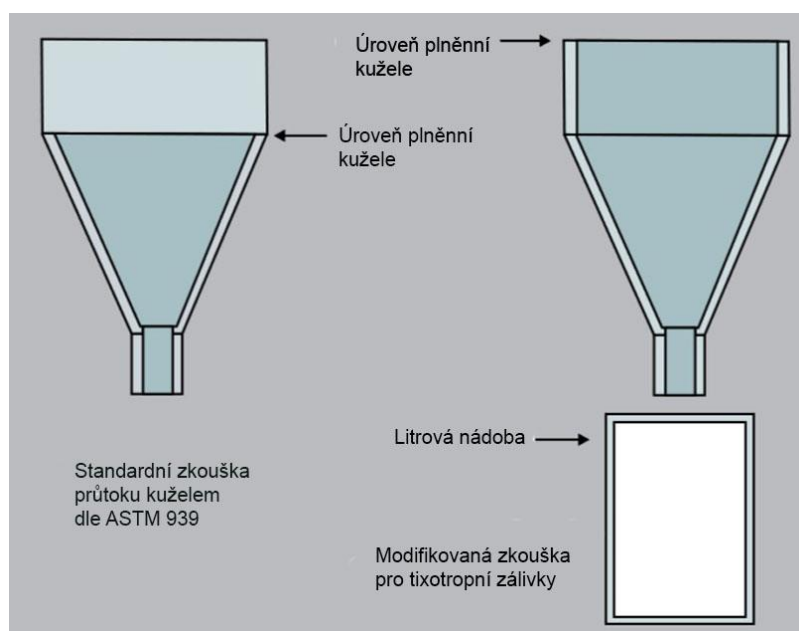
Konzistence také vyjadřuje schopnost směsi téci. Konzistence se u čerstvé směsi liší dle druhu použití, díky tomu se můžeme setkat s konzistencemi velmi tekutými až po velice tuhé tzv. trixotropní konzistence. Konzistence je zejména velice důležitá, co se týče vazebných pevností, kdy tekutější směsi mají lepší vazebnou pevnost než tuhé, protože dojde k vytvoření lepší vazby kotvicí směs/ocelový prvek.

Většina výrobců kotvicích hmot uvádí, že konzistence kotvicích hmot by měla být tekutá nebo „jako tmel“. Záleží zejména na způsobu ukládání a průměru otvoru v základním materiálu. U běžných produktů dostupných na trhu je zajištěna konzistence smícháním produktu s určitým množstvím vody stanovené výrobcem.

Stanovení konzistence

Existuje více způsobů stanovení konzistence čerstvé hmoty, zde je uvedeno několik nejjednodušších normových zkoušek.

Dle americké normy **ASTM C 939** se měří konzistence pomocí měření času, za který přesně dané množství směsi proteče kuželem (jak ukazuje obrázek 36). Změřený čas označujeme jako dobu výtoku a pohybuje se od 5 – 30 sekund, přičemž doba výtoku vody je 8 s. Tato metoda je vhodná pro směsi, které jsou více tekuté a doba výtoku nepřesáhne 35s. [36]



Obrázek 6 - schéma zkušebního zařízení na test konzistence dle ASTM pro standardní a modifikovanou zkoušku [36]

ČSN EN 1015-3 Stanovení konzistence čerstvé malty pomocí střešacího stolku je obdobou americké normy ASTM C 230. Tato metoda je vhodnější pro tuhé směsi a podstatou zkoušky je hodnota rozlití malty, která se získá změřením průměru rozlitého vzorku čerstvé malty po patnácti nárazech střešacího stolku. Dle americké normy se provede pět nárazů během 3 vteřin a poté se změří rozlití směsi, pokud je rozlití menší než 100% označuje se směr jako tuhá, 100-125% je směr označena za plastickou a jako tekuté pokud je hodnota rozlití větší než 125%. [36]

Pravděpodobně nejvhodnější normou ke stanovení konzistence je norma ČSN EN 13395-2, která popisuje postup stanovení tekutosti injektážních směsí nebo malt. Hodnota tekutosti se stanoví měřením rozlití stanoveného množství injektážní směsi nebo malty v definovaném kanálku během 30 sekund. Vzdálenost, do které se směs nebo malta rozlije za tuto dobu, je hodnotou tekutosti. Metoda je vhodná pro laboratorní i in situ zkoušky. Uvedena je příprava vzorku, jímž je čerstvá správková malta, provedení a vyhodnocení zkoušky. [48]

Zpracovatelnost a doba zpracovatelnosti.

Zpracovatelnost vyjadřuje jak snadno je možné směs umístit do předem vytvořeného otvoru, zpracovat popřípadě ztuhnout bez jakékoliv segregace nebo bleedingu. Bez dobré zpracovatelnosti může být složité a zdlouhavé s danou směsí pracovat, což vede k delší době vyváření případně k vytvoření nekvalitního spoje.

Doba, po kterou zůstane směs zpracovatelná se nazývá doba zpracovatelnosti, ta se liší dle druhu směsi. Všichni výrobci by měli udávat dobu zpracovatelnosti svých produktů, protože se jedná o důležitý údaj pro běžnou praxi a pracovníci by měli vzít na vědomí dobu zpracovatelnosti ještě předtím, než se směsí začnou pracovat.

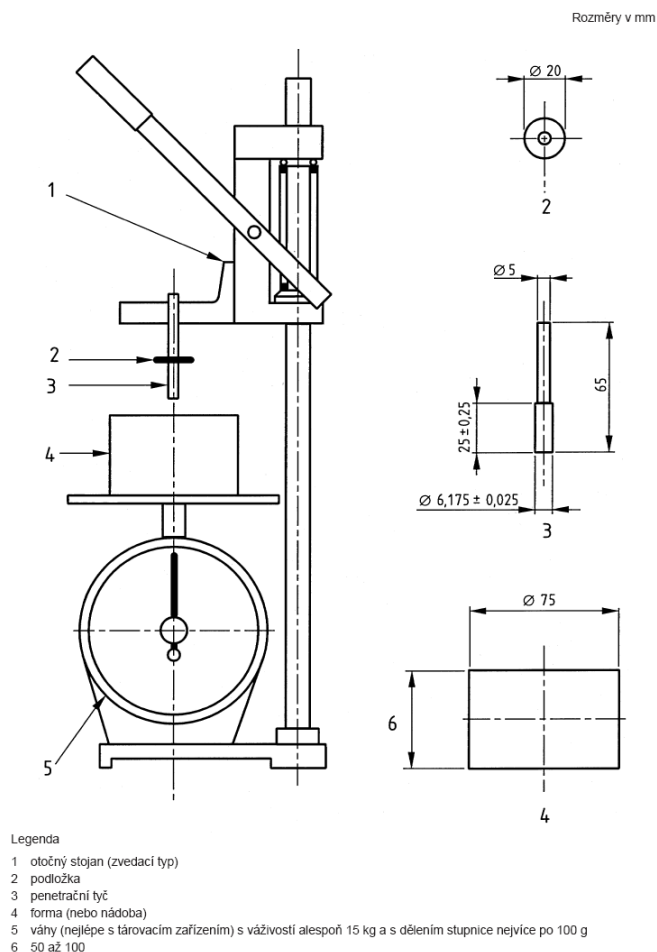
Doba zpracovatelnosti by měla umožnit přepravu, zpracování a umístění na finální místo v rozumné době. Při práci s kotevní směsí by se mělo vyvarovat přidávání dodatečného množství vody do směsi vedoucí k dosažení požadované konzistence, protože může dojít ke snížení konečných pevností, trvanlivosti a změně dalších vlastností. Směsi, které nebyly zpracovány dostatečně rychle během doby zpracovatelnosti by měly být vyřazeny.

Stanovení doby zpracovatelnosti

Stanovení doby tuhnutí dle normy ČSN EN 13 294 se používá především pro systémy pro opravy, zahrnující malty a betony včetně těch s přídavkem polymerů.

Podstatou této zkoušky je vložení čerstvého vzorku do nádoby a umístí se na váhu. Poté se do malty periodicky vtlačuje penetrační tyč do definované hloubky a odpor proti penetraci se určí z hmotnosti odečtené na stupnici vah. Odpor proti penetraci se zvyšuje v důsledku hydratace cementových složek malty. Doba tuhnutí se z naměřených výsledků stanovuje vynesáním odporu proti penetraci v

závislosti na čase. Norma definuje dobu tuhnutí jako časový úsek od ukončení míchání správkové zálivky, malty nebo betonu do doby, kdy se dosáhne penetrace $0,5 \text{ N.mm}^{-2}$ (počáteční) a $3,5 \text{ N.mm}^{-2}$ (konečná). [37]



Obrázek 7 - schéma zkušebního zařízení na stanovení doby tuhnutí dle ČSN EN 13 294 [39]

Schopnost zadržovat vodu a bleeding

Schopnost zadržovat vodu lze vyjádřit maximálním množstvím vody, které směs dokáže pojmout, aniž by došlo k rozměšování, bleedingu nebo sedimentaci. Zadržování vody se dá také zlepšit hlavně pomocí jemnozrnných přísad s vysokou povrchovou plochou jako je mikrosilika nebo vápenec. [36]

Bleeding neboli česky krvácení může být popsáno jako vytvoření vrstvy vody na povrchu čerstvého betonu, malty či jiné hmoty, způsobené sedimentací pevných

částic směsi za současného vypuzování vody. Nadměrné krvácení způsobuje vznik horní vrstvy s vysokým vodním součinitelem, což způsobuje pokles pevnosti, zvýšení pórovitosti a snížení trvanlivosti.

Po vytvrdnutí směsi dochází k objemovým změnám vlivem odparu vrstvy vody, která při krvácení vznikla. Tyto změny se nazývají plastické smrštění a zvláště u kotvících hmot je nutné se tomuto efektu vyvarovat, protože může narušit vazbu kotvící hmota/základní materiál.

Bleeding rate (poměrné smrštění) se úměrně zvedá s vodním součinitelem a s tlakem který je vyvíjen na hmotu.

Testování náchylnosti směsi ke vzniku bleedingu

Citlivost k vniku bleedingu směsi je možné testovat např. podle americké normy ASTM C232 Bleeding concrete, C243 (Bleeding of cement paste and mortar) a C940 Bleeding of freshly mixed grouts. ASTM C 941 water retentivity of Grout mixtures.

“Wick Induced Bleed Test“ (test vyvolání bleedingu knotem)

Test spočívá v ponoření knotu do 0,5 m vysokého válce zcela zaplněného kotvící směsí, přičemž se zaznamenává množství vody vzniklé bleedingem na povrchu směsi. Pokud po třech hodinách je naměřeno 0,0% bleedingové vody směs se hodnotí jako odolná vůči bleedingu. [36]

5.6. Vlastnosti a zkoušení ztvrdlých směsí

Pevnost

Ať už se jedná o pevnost v tlaku ohybu nebo tahu, je tato vlastnost vždy naprosto zásadní. Jejich hodnoty závisí především na požadavcích a místě použití. Pevnost cementových kotvících směsí je především dána množstvím, druhem cementu, množstvím záměsové vody a v neposlední řadě i stupněm hydratace směsi.

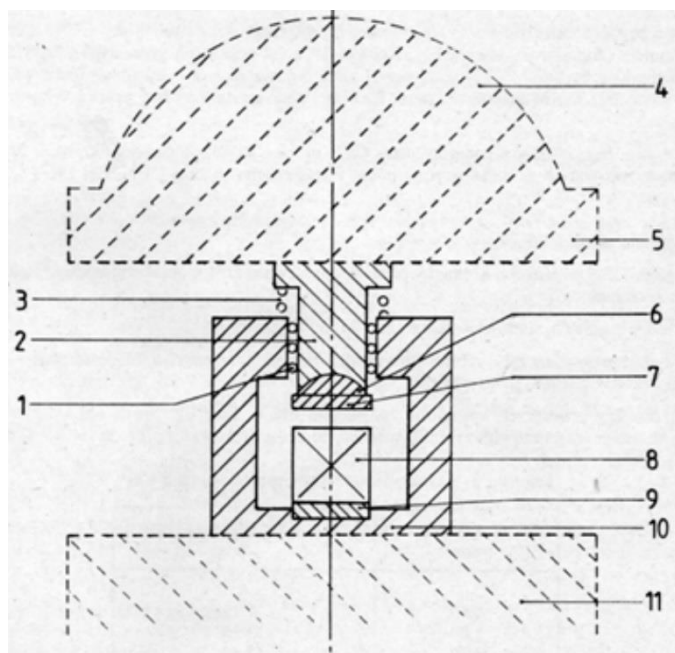
S tím také souvisí vodní součinitel, přičemž platí, že čím nižší vodní součinitel tím vyšší pevnosti výsledné směsi bude dosaženo. Při snížení vodního součinitele se dosahuje rychlejšího tuhnutí a rychlejšího nárůstu pevností a také se vyšších

hydratačních teplot. Zajištěním dostatečné vlhkosti se dopomůže k co nejmenšímu obsahu nezhydratovaných cementových částic a tím vyšších pevností. Vazné pevnosti nejsou až tak závislé na vodním součiniteli, ale spíše je ovlivňuje kvalita vazby na hranici kotvící materiál/ocelový prvek. Tekutější kotvící hmoty vytvářejí kvalitnější vazbu než tuhé. Testování kotvících hmot specifikuje blíže americká norma ASTM C 942 (Compressive Strength of Grouts). Pevností dosažených po 7 dnech by měly být alespoň 21 MPa a 35 MPa po 28 dnech. Přebytky vody nezpůsobuje pouze nižší pevnosti, ale zvyšuje pórovitost, snižuje trvanlivost kotvícího materiálu, zvyšuje plastické smrštění. [36]

Tlakové pevnosti se také testují dle normy ČSN EN 196-1, kde zkušebním tělesem je krychle o hraně 40 mm nebo alternativní těleso o rozměrech 40x40x160 mm, které je namáháno tlakem do porušení. [34]

Pevnost v tlaku se vyjádří dle následujícího vzorce:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} [\text{MPa}]$$



1. kuličkové ložisko
2. pohyblivá část
3. vratná pružina
4. kulové uložení zkušebního stroje
5. horní tlačená deska zkušebního stroje
6. kulové uložení přípravku
7. horní tlačená destička přípravku
8. zkušební těleso
9. dolní tlačená destička
10. spodní deska zkušebního lisu
- 11

Obrázek 8 - schéma zkušebního zařízení na zkoušení tlakových pevností zálivek [34]

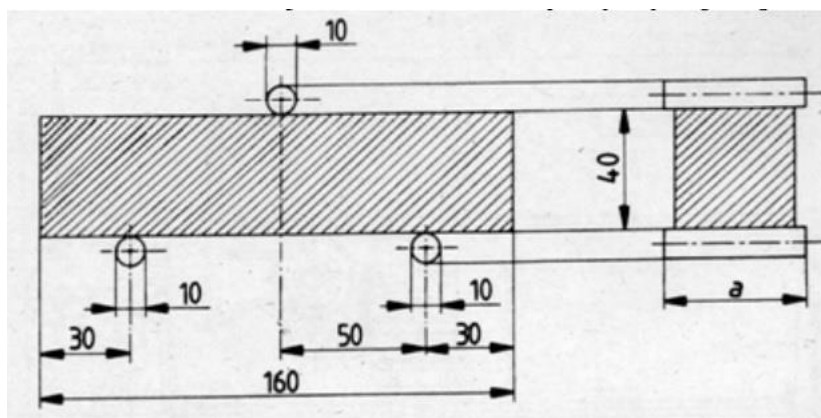
Vazné pevnosti jsou testovány dle normy ČSN EN 1542, měří se síla potřebná k odtržení zkušebního terče k betonovému bloku, zkušební místo je definováno provedením jádrového vrtu skrz povrch. Tato zkouška je určena především pro dvousložkové epoxidové kotvící hmoty. [35]

Pevnost v tahu za ohybu se stanovuje dle ČSN EN 196-1, buď čtyř nebo tří bodovým ohybem na tělesech o rozměrech 160x40x40 mm, se vzdáleností lomových podpěr 100 mm. Měří se maximální síla dosažená při porušení vzorku.

[34]

Pevnosti v tahu za ohybu se vypočítají dle následujícího vzorce:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} [MPa]$$



Obrázek 9 – Schéma zkoušky v tahu za ohybu zálivkových hmot

Nárůst hydratačního tepla

Zvýšení teploty směsi může být problém hlavně při vytváření kotev větších průměrů, kdy může dojít k termickému praskání. Vývoj hydratačního tepla závisí na jemnosti mletí cementu, množství a typu cementu, počáteční teplotě směsi, teplotě okolí a objemu a tloušťce směsi. K zamezení termického praskání je nutné dobře zvolit typ cementu, jeho množství, případně celou směs chladit, využít lze i

nízkého hydratačního tepla pucolánových materiálů nebo použít zpomalovač tuhnutí.

Expanze směsi a způsoby měření

Objemové změny je možné měřit několika metodami, tyto metody můžeme rozdělit podle několika kritérií. Prvním kritériem je stav napjatosti hmoty: [38]

- měření objemových změn ve volném stavu (objemovým změnám vlastního materiálu není bráněno žádnými vazbami a silami, kromě působení gravitační síly)
- měření objemových změn ve vázaném stavu dochází k postupnému spojení hydratující směsi s podkladem nebo jiným konstrukčním prvkem)
- měření objemových změn a deformací při aplikaci vnějšího zatížení

Dále je možné metody rozdělit dle stupně hydratace směsi

- měření v čerstvém stavu ihned po zhutnění
- měření po konci tuhnutí
- měření vyzrálého materiálu (po cca 28 dnech)

Rozdělení dle způsobu odečítání objemových změn

- kontaktně
- bezkontaktně

Měření volných objemových změn

Hydrostatické vážení

Tato metoda funguje na principu hydrostatického vztlaku, kdy je možné vypočítat z naměřených hodnot vážení na vzduchu a pod vodou objem vzorku. Opakováním těchto měření je možné získat objemové změny v daném čase. Pro praktické měření musí být vzorek již v ztvrdlém stavu nebo uzavřen v pružném pouzdře.

Nevýhodou této metody je možnost měření pouze menších vzorků a možnosti vzniku vzduchové bubliny při uzavírání vzorku do pouzdra, což velmi zásadně

ovlivňuje měření. Naopak výhodou je použití pružného pouzdra, protože nedochází k vysychání vzorku a k plastickému smrštění. [38]

Metoda vlnovce

Obdobně jako u hydrostatického vážení se u této metody používá nepropustného pružného pouzdra tzv. vlnovce. Ten je naplněn zkoušeným materiálem a umístěn do vody. Vlnovec díky své konstrukci umožňuje pohyb pouze v podélném směru. Tyto změny jsou pomocí táhel a pákového systému měřeny indukčním dilatometrem. Hmotnost vzorku ve vlnovci se pohybuje v závislosti na objemové hmotnosti od cca 600 g do 900 g. Tato metoda je vhodná zejména pro jemnozrnné malty a pasty. V průběhu používání uvedeného způsobu došlo k několika modifikacích, kdy se mění délka vlnovce, měření probíhá na vzduchu apod. [38]

Metoda kužele

Jedná se o bezkontaktní metodu, kdy vzorek je umístěn do dutého kužele, který je otočen základnou vzhůru. Na povrch vzorku se umístí terčík. Jeho vzdálenost je neustále snímána laserovým dálkoměrem. Ze změny výšky terčíků lze určit objemové změny hmoty.

Výhodou této metody je vhodnost pro většinu materiálů - způsob nejrealističtěji simuluje skutečné podmínky zrání stavebních hmot a umožňuje měření čerstvé směsi.

V této metodě je vzorek umístěn do speciální betonové formy, která má jedno čelo pohyblivé a horní povrch je volný. Na pohyblivém čele je umístěn hák, který se zakotví do měřeného vzorku při tuhnutí. Objemové změny vzorku jsou měřeny pomocí indukčního dilatometru, jenž snímá pohyb čela. Nejčastější rozměr vzorku je 100x100x400 mm.

Metoda má značné nevýhody, a těmi jsou například: ovlivnění výsledku vznikem tření mezi vzorkem a formou, nelze měřit objemové změny v čerstvé směsi, dochází k teplotním a vlhkostním změnám vzorku a případně vzniku autogenního smrštění. Nevýhoda výškové změny vzorku se dá eliminovat pomocí laserového čidla.

Tato metoda je vhodná zejména pro betonové směsi, které se smršťují během hydratace, a pro dlouhodobé sledování objemových změn. [38]

Pro informaci zde uvádím přehled dalších metod měření objemových změn, které ovšem v této práci nebudou popsány detailně:

- stanovení chemického smrštění podle Tazawy
- metoda měření kapilárního tlaku
- metoda rozlivu.

Měření vázaných objemových změn

Tyto metody byly vyvinuty kvůli potřebě měřit síly vzniklých smrštěním/expanzí materiálu při reálném použití. Uvedené způsoby stanovují změnu objemu nebo délky, vznik a velikost trhlin materiálu nebo je měřeno napětí, při kterém dojde k porušení materiálu. Slouží hlavně k posuzování chování armovaného betonu, chemicky předpjatého betonu nebo maltové směsi. [38]

Metoda korýtková

Korýtková metoda k měření vázaného smrštění spočívá v nalití čerstvé malty do korýtka, které má délku 1000 mm a zvrásněný povrch. Během jednoho týdne se hodnotí vznik trhlin vlivem vysychání směsi. [38]

Prstencová metoda

Zkušební zařízení je tvořeno dvěma prstenci, kde vnitřní prstenec (případně i vnější) je osazen tenzometry. Mezi prstence se nalije čerstvá směs a následně pomocí tenzometrů se snímá napětí v ocelových prstencích vzniklé tlakem smrštěním expanzí směsi.

Z této metody nejde určit objemovou změnu vzorku, ale lze určit vznik náchylnost k tvorbě trhlin a také velikost vnitřního napětí potřebného k jejich vytvoření. Mimo jiné lze stanovit hodnotu napětí vyvozeného expanzí a například u kotvicích materiálů určit, zda dojde nebo nedojde k porušení základního materiálu. Tato metoda je popsána americkou normou ASTM C1581. [38]

Mezi další metody vázaných expanzí patří:

- metoda smrštění bráněného výztužnou sítí
- metoda měření vázaného smrštění betonu při spolupůsobení s výztuží
- metoda smrštění bráněného výztužnou sítí

Zkoušení zálivkové hmoty tepelným namáháním

Odolnost vysokým teplotám vyvíjené hmoty bude testována na sadě zkušebních a porovnávacích těles 40x40x160 mm. U vzorků se změří rozměry a hmotnost. Poté dojde k cyklickému zatěžování v peci, a to maximální návrhovou teplotou, která je 200°C. Rychlost náběhu teploty bude 5°C/min. Po skončení zatěžování se vzorky opět zváží, změří a následně podrobí zkoušce v tahu za ohybu (tříbodovým ohybem) a zkoušce v tlaku.

Z naměřených hodnot se stanoví objemové změny, hmotností úbytek a porovná se sada tepelně zatížených a nezatížených vzorků. Pevnosti by neměly klesnout pod 80% pevnosti vzorku nezatěžovaného a celkově by měly udržet pevnost v tlaku nad 50 N.mm⁻².

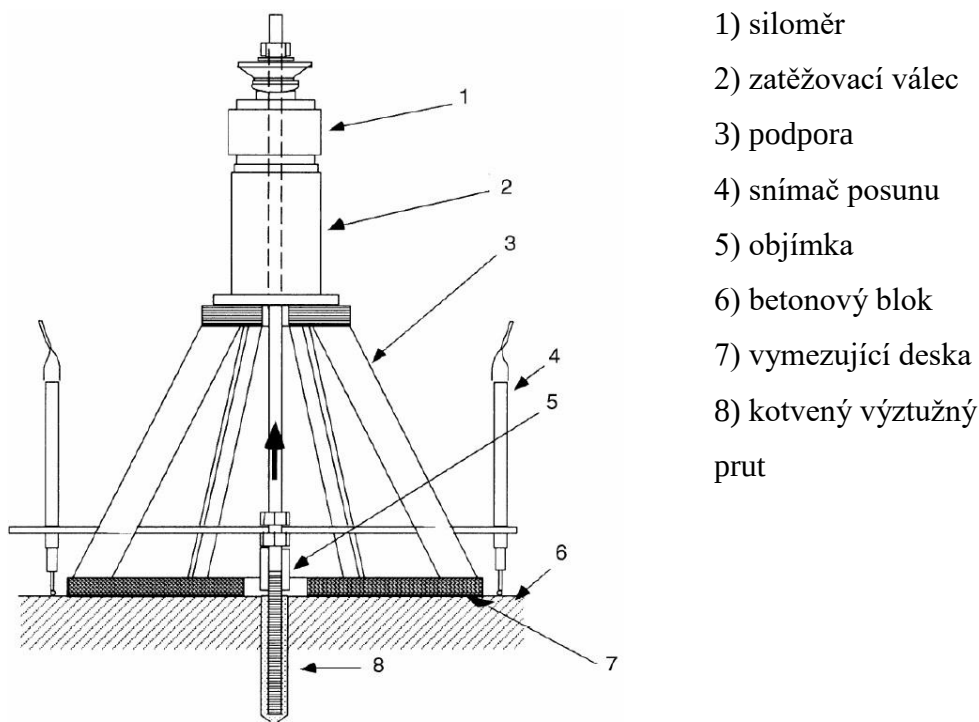
Zkoušení výrobků pro kotvení vytrhávací zkouškou dle ČSN EN 1881

Podstatou zkoušky je zatížení tahovou silou zakotvený výztužný prut v betonovém bloku. Typ betonu pro blok je dle EN 1766 C 40/45 (Vzhledem k vlastnostem podkladních betonů v reálném použití bude použit beton C 50/60). Zkouška se provádí na suchém nebo vlhkém betonu, přičemž se výrobek aplikuje v poloze svislé, vodorovné nebo „nad hlavou“, nebo ve všech směrech podle požadavků výrobce.

Minimální rozměry pro betonový blok jsou 400x400x250 mm nebo pro více zkoušek v násobcích rozměru 400 mm. Tato tělesa musí mít stáří alespoň 28 dní a po tuto dobu je nutné zajistit jejich ošetřování dle požadavků normy.

Den před samotnou aplikací kotvy se vyvrtají otvory o hloubce 150 ± 3 mm. Průměr je stanoven normou na 20 mm pro reaktivní pryskyřice a 30 mm pro hydraulické cementy, pokud není výrobcem uvedeno jinak. Následně se aplikuje kotva dle instrukcí výrobce. Následně se kotva nechá vytvrdnout nejméně na 24 h.

Při samotném zatěžování kotvy se ocelový prvek upne do zkušebního zařízení a zatěhuje se silou s rychlostí náběhu $1,6 \pm 0,1$ kN/s dokud nedojde k porušení. Během zatěžování se zaznamenává závislost posunu na zatížení a hodnota maximálního zatížení. [39]



Obrázek 10 - zkušební zařízení na vytrhávací zkoušku dle ČSN EN 1881 [39]

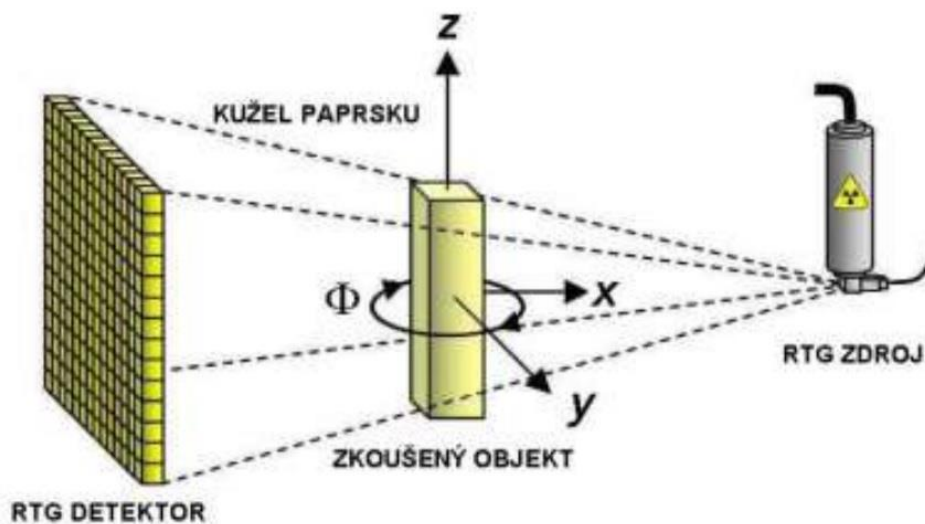
Modifikovaná metoda dle ČSN 1881 pro tepelné zatížení kotvy

Jako zkušební metoda simulující nejvěrohodněji reálné zatěžovací podmínky, bude použita modifikovaná metoda ČSN EN 1881, kde výztužný prut je zakotvený v betonovém bloku a zatíží se tahovou silou (podrobnější postup je obdobný a uveden výše). Ještě před samotným zatížením, bude povrch betonového bloku ohřát horkovzdušnou pistolí tak, aby teplota byla minimálně 200°C. S následnou výdrží na této teplotě po stanovenou dobu. Následně je změřena síla při posunu prutu ve směru působení síly. Nakonec dojde k porovnání naměřené síly při tepelné zátěži a bez tepelné zátěže.

Testování kvality spoje kotvící hmota/ocelový prvek pomocí počítačové tomografie

K jedné z mála metod ověření kvality vyplnění profilovaných kotvicích ocelových prvků zakotvených v otvoru patří počítačová tomografie. Jedná se o metodu, která umožňuje trojrozměrně stanovit vnitřní strukturu materiálu. Tato metoda využívá rentgenového záření k vytvoření trojrozměrného modelu kontrolovaného předmětu.

Podstatou zkoušky je umístění zkušebního vzorku do manipulátoru, který jím otáčí kolem své osy o 360° . Přičemž je vzorek postupně prozařován a na RTG detektoru jsou snímány virtuální řezy vzorku. Následně jsou tyto „řezy“ vyhodnoceny softwarem a je vytvořen počítačový 3D model zobrazující strukturu daného vzorku. Tento model je možné libovolně řezat a prozkoumávat jeho strukturu bez porušení samotného tělesa. Přibližné schéma je zobrazeno na obrázku 8. [40]



Obrázek 11 - schéma počítačové tomografie [40]

Jako vzorky pro tuto zkoušky se použijí jádrové vývrty kotevních hmot i s ocelovým prvkem o průměru 100 mm.

5.7. Trvanlivost a její zkoušení

Trvanlivost znamená schopnost zatvrdlé směsi odolávat provoznímu prostředí při zachování původních vlastností. U směsí vystavených působení sulfidů, by měl být použit sulfidům odolný cement v dostatečném množství. Pokud je naopak

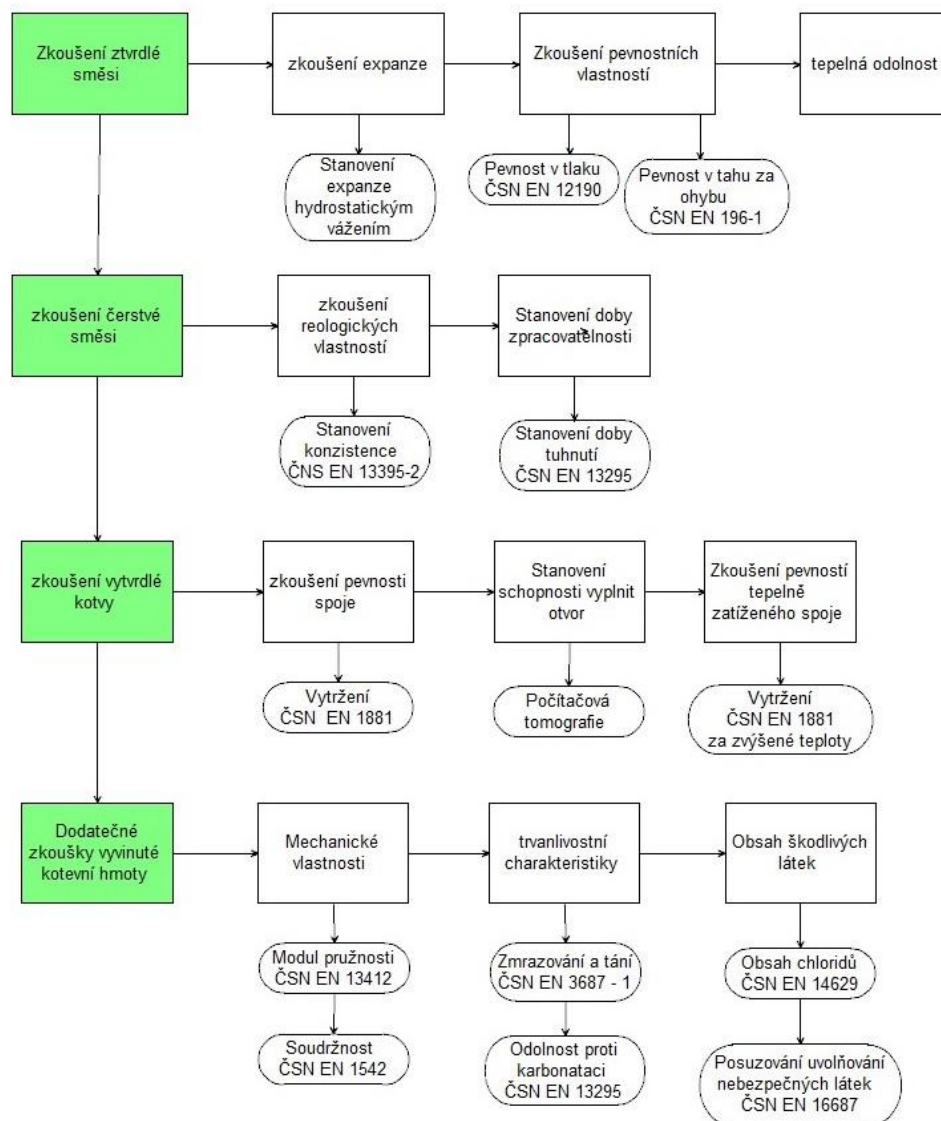
problém alkalicko křemičitá reakce, měl by být použit cement s nízkým obsahem alkálií a případně pucolánů jako příměsí, které snižují riziko této reakce. U kotvících směsí vystavených venkovnímu prostředí by měla být též řešena odolnost proti zmrazování a rozmrazování. Toto riziko se neuvažuje u vysoko pevnostních směsí, u kterých je mrazuvzdornost brána jako samozřejmost. U směsí nižších pevností je namístě zvážit provzdušnění. Mezi další posuzované vlastnosti spojené s trvanlivostí patří i odolnost proti karbonataci, která je úzce spojená s permeabilitou. Pokud je ovšem použit kovový kotvící prvek chráněný proti korozi jiným způsobem než pasivací kotvící hmotou není nutné tuto vlastnost posuzovat.

K hodnocení odolnosti vůči agresivním a znehodnocujícím procesům se používají následující normy: ČSN EN 13 687 – 1 Teplotní cyklování s ponořením rozmrazovacího solného roztoku, ČSN EN 13 295 – Stanovení odolnosti proti karbonataci, ČSN EN 1015-17 Stanovení obsahu ve vodě rozpustných chloridů v čerstvé maltě a ČSN EN 13 529 Stanovení odolnosti vůči chemickému napadení.

5.8. Návrh testování

V návrhu testování vyvíjené hmoty bude popsána metodika zkoušení, kdy vybrané metody jsou zvoleny na základě vhodnosti a průkaznosti metody. Výsledkem této části je návrh postupu testování s ohledem nejen na tuto práci, ale pro případný pozdější vývoj.

Diagram postupu testování, jak bude postupně probíhat v následném experimentálním výzkumu:



Obrázek 12 - schématické znázornění předpokládaného postupu experimentálních prací při vývoji nové kotevní hmoty na silikátové bázi a s řízenou expanzí

5.9. Návrh vhodných surovinových směsí

Při návrhu směsi bylo postupováno v několika krocích. Nejprve byla pozornost zaměřena na výběrází jednotlivých složek s ohledem na dosažení:

- Pevnosti v tlaku min. 50 N.mm^{-2}
- Řízené expanze, kdy nedojde k narušení okolního materiálu
- Stability při cyklickém teplotním zatížení o maximální hodnotě 200°C

Protože se výzkum zabývá hmotami na silikátové bázi, bylo vybráno několik druhů cementu. Pro každý typ matrice bylo nutné zvolit jiný postup návrhu směsi, s čímž souvisí i výběr vhodné expanzní složky tak, aby bylo docíleno řízené expanze. Dále bylo na základě provedeného průzkumu dostupných literárních zdrojů vybráno anorganické plnivo o maximální frakci do 1,5 mm, kde byla pozornost soustředěna především na skladbu zrnitosti z hlediska dosažení minimální pevnosti 50 N.mm^{-2} v kombinaci s vhodnou konzistencí, pro výplň subtilnějších otvorů bylo nutné zvážit i použití plastifikační přísady. Tato se rovněž může vlivem snížení vodního součinitele podílet na omezení smrštění daného kompozitu na cementové bázi, a tím i kontrolovatelnější dosahování expanze. V úvahu připadají také alternativní suroviny, které by mohly nahradit část některých primárních složek navržených směsí, například částečné nahrazení cementu nebo plniva. V současnosti se do popředí dostává nanotechnologie, a to i ve stavebnictví. Z tohoto důvodu stojí za zmínku možné využití nanovláken (CNT apod.), které se mohou uplatnit jako výztuž matrice, kdy jsou schopny se podílet i na vazbě jednotlivých hydratačních produktů.

Složení na cementové pojivové bázi vychází především ze složení správkových a zálivkových hmot se snahou navrhnout složení tak, aby výsledný materiál měl co největší tepelnou odolnost.

5.9.1. Pojivo

Jak již bylo zmíněno výše, pojivem budou cementy a jako vhodné se vzhledem k vaznosti a rychlému náběhu pevností jeví typy CEM I 42,5 R a CEM I 52,5 R. Rychlý nárůst pevností je důležitý zvláště s ohledem na co nejrychlejší zatížitelnost spoje po instalaci. Uvedené cementy dosahují během jednoho dne pevnosti 17 N.mm^{-2} v případě cementu CEM I 42,5 R, u typu CEM I 52,5 R hodnota pevnosti v tlaku dosahuje až 25 N.mm^{-2} (hodnoty jsou uvažovány pro stanovení pevnosti v tlaku cementu dle normy ČSN EN 196 – 1). Nevýhodou u cementu CEM I 52,5 R je větší jemnost mletí a nutnost použít více vody. To by mohlo mít negativní vliv na smrštění a celkovou expanzi směsi. Výrobce obou použitých typů cementů je společnost Českomoravský cement, a.s., výrobní závod Mokrá. Chemická složení jsou uvedena níže v tabulce 4.

Tabulka 4 - Chemické složení CEM I 52,5 R [43], Chemické složení CEM I 42,5 R [44] dle výsledků chemických rozborů poskytovaných výrobcem

chemické vlastnosti CEM I 52,5 R		průměrná hodnota	metoda	chemické vlastnosti CEM I 42,5R		průměrná hodnota	metoda
obsah	CaO	65%	EN 196-2, XRF	obsah	CaO	65%	EN 196-2, XRF
	SiO ₂	19%	EN 196-2, XRF		SiO ₂	19%	EN 196-2, XRF
	Al ₂ O ₃	5%	EN 196-2, XRF		Al ₂ O ₃	5%	EN 196-2, XRF
	Fe ₂ O ₃	3%	EN 196-2, XRF		Fe ₂ O ₃	3%	EN 196-2, XRF
	MgO	1%	EN 196-2, XRF		MgO	1%	EN 196-2, XRF
	SO ₃	3%	EN 196-2, XRF		SO ₃	3%	EN 196-2, XRF
	S ₂ -	0,05%	EN 196-2		S ₂ -	0,04%	EN 196-2
	Cl-	0,038%	EN 196-2, XRF		Cl-	0,038%	EN 196-2, XRF
	K ₂ O	0,80%	EN 196-2, XRF		K ₂ O	0,82%	EN 196-2, XRF
	Na ₂ O	0,12%	EN 196-2, XRF		Na ₂ O	0,12%	EN 196-2, XRF
Na ₂ O ekvivalent		0,60%	EN 196-2, XRF	Na ₂ O ekvivalent		0,66%	EN 196-2, XRF
nerozpustný zbytek		0,60%	EN 196-2	nerozpustný zbytek		0,70%	EN 196-2
ztráta žháním		3,00%	EN 196-3	ztráta žháním		3,10%	EN 196-3

5.9.2. Expanzní přísady

Pro uvažované hmoty lze využít jako potenciálně vhodné následující přísady zajišťující řízenou expanzi:

MgO – expanzní procesy se projevují pomaleji, kdy počátek expanzí, jak již bylo uvedeno v části 1.2.2, dochází po 7 dnech a konec po několika měsících až letech v závislosti na jemnosti mletí MgO. Tento proces se dále vyznačuje menší spotřebou vody k dosažení expanze v porovnání s vápenatou expanzí. Dávku této přísady lze uvažovat v rozmezí 5 – 10% z hmotnosti pojiva. [7]

CaO – oxid vápenatý je výrazně rychlejší v dosažení konečných objemových změn tzn. cca 72 hodin. To je dáno především rychlostí hydratace, která nastává

prakticky okamžitě po zamíchání záměsi. Tento proces je doprovázen vyšším hydratačním teplem uvolněným během prvotní fáze tuhnutí. Vápenného rozpínání je využíváno častěji, protože se považuje za kontrolovanější proces, než co se týče rozpínání hořčnatého. Množství CaO by se mělo pohybovat od 2%, horní hranice závisí na požadované procentuální hodnotě expanze. [7]

Bentonit – Bentonit jako takový je silně expanzní materiál, který výrazně váže vodu. Proto se používá pro těsnění spojů, kde prosakující voda nabobtnává tento jíl a dochází tak k ucpání netěsností. Směs cementu a bentonitu se používá zejména při stabilizaci zemin. Při smíchání cementu a bentonitu dochází k silné redukci expanze, to je také silně ovlivněno obsaženými ionty ve vodě. Dávkování pro zemní injektáže se pohybuje od 30% do 10% z dávky cementu. Pro kotevní hmoty zatím nebyl bentonit jako expanzní příměs použit, ale s ohledem na získané informace by se jako vhodné jevílo množství kolem 2%, které je označováno některými autory jako počáteční množství, které má vliv na vlastnosti směsi. Velkou nevýhodou je snížení konzistence a tekutosti směsi, protože bentonit začne vázat vodu okamžitě po zamíchání. [19]

CSA – u této příměsi byl použit produkt společnosti Denka Co, Ltd. s názvem Denka CSA #20, který funguje na bázi primární tvorby ettringitu během zrání cementové směsi. Celkové expanze jsou dosahovány po uplynutí 7 dnů, přičemž největší nevýhodou je ztráta chemicky vázané vody při teplotním zatěžování. Udávané ideální množství dle výrobce je 8 – 10%. Přísada je dle výrobce určena především pro nesmrštivé malty a chemicky předpjaté betonové prvky. [41]

Vzhledem k publikovaným výsledkům by bylo vhodné zvážit použití některých přísad omezujících smrštění společně s expanzními složkami uvedenými výše zejména v kombinaci s CaO. Za zmínku stojí přísady na bázi neo-pentyl glykolu nebo dalších podobných sloučenin (propylen-glykoly). Snížení smrštění je přisuzováno snížení povrchového napětí vody, a tím i poklesu tlaku. Tento tlak je vyvolán tvorbou vodních menisků v kapilárních pórech, jež nesou zodpovědnost za smrštění cementové pasty. [15] [16]

Množství vody pro jednotlivé záměsi je nutné volit v závislosti na požadované pevnosti. Ta je závislá na použitém typu cementu a vodním součiniteli. U typu CEM I 42,5 R je nutné se striktně pohybovat pod hodnotou vodního součinitele

0,5, aby bylo dosaženo pevnosti zatvrdlé směsi více než 50 N.mm^{-2} . U cementu CEM I 52,5 R je možné použít množství vody odpovídající vodnímu součiniteli 0,5, případně nižší, a to v závislosti na použité plastifikační přísadě. Použitím plastifikační přísady je dosaženo nižšího vodního součinitele, dalším benefitem je i následné omezení smrštění a snazší provedení expanze celé směsi.

Při volbě množství plastifikátoru a vody je nutné vzít v úvahu i požadovaný stupeň konzistence, který musí umožnit bezproblémovou aplikaci hmoty do předvrtaného otvoru osazeného ocelovou kotvou tak, aby došlo k co nejlepšímu styku základní/kotvící materiál a kotvící materiál/ocelový prvek. Při aplikaci kotvy „nad hlavou“ nesmí docházet k samovolnému vytékání hmoty z otvoru, což by znemožnilo její použití. Použití plastifikátoru ovšem může zpomalit tuhnutí, zvláště SP na bázi ligninosulfanů, které obsahují cukry. Proto je vhodnější použít polykarboxyláty nové generace, jejichž vlastnosti se snadno modifikují. Ke ztekucování směsi dochází tzv. sterickým odpuzováním, a proto nedochází ke zpomalení tuhnutí při případném předávkování.

5.9.3. Ostatní přísady a příměsi

Jako superplastifikační přísadu se jeví jako vhodné použít produkt společnosti Sika na bázi modifikovaného polykarboxylátu s obchodním názvem Viscocrete 225 P v práškové podobě. Daný superplastifikátor odpovídá požadavkům normy EN 934 – 2. Jeho dávkování se pohybuje do 0,5% z hmotnosti cementu.

Použití příměsí (jako je vysokoteplotní popílek, křemičité úlety, mikrosilika, struska, mikromletý vápenec atd.) se zvažuje zejména v pozdější fázi vývoje, kdy je již dosaženo stabilní expanze dané směsi a jde zejména o zlepšení některých určitých vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří zejména vodotěsnost, permeabilita, trvanlivost a vazné pevnosti.

5.9.4. Rozptýlená výztuž

Za zvážení stojí použití vláken, v úvahu připadají zejména polypropylenová, která snižují smrštění, jelikož zvyšují modul pružnosti čerstvé směsi. Pro zvýšení pevnosti v tahu, v tahu za ohybu lze použít vlákna skleněná. K podobnému účelu je možné využít i uhlíková nanovlákna, které se, obdobně jako celá nanotechnologie, prosazuje čím dál více. Výsledkem použití je hutnější struktura,

omezení vzniku trhlin, zvýšení pevností a dalších vlastností. Použití vláken sebou nese nepříjemnost v podobě nutnosti zvýšení vodního součinitele, který může vést k výraznějšímu smršťování, což však bude možné částečně regulovat vhodně stanovenou dávkou plastifikační přísady. Kromě toho také použití vláken zvyšuje celkovou cenu výsledné směsi.

5.9.5. Kamenivo

Kotevní hmota jako taková obsahuje přibližně 60% – 70% plniva, které značně ovlivňuje vlastnosti výsledného kompozitu. Při uvážení stávajících poznatků byly vybrány dva druhy kameniva – jemnozrnné vápencové a křemičité kamenivo. Křemičité kamenivo je častěji používané do malt a správkových materiálů více než vápencové. S ohledem na výsledky studií uvedených v kapitole 3.3.1 při tepelném namáhání cementových kompozitů se jeví jako vhodnější použití vápencového plniva, a to kvůli lepšímu spolupůsobení s ocelí. Na trhu je běžně dostupné například ve frakcích 0,0 – 0,2 mm, 0,2 - 0,5 mm, 0,5 – 1,0 mm. Tyto byly použity pro experimentální pokusy. Při návrhu optimálního zastoupení jednotlivých frakcí je nutné vzít v úvahu minimální mezerovitost, která zaručí co nejnižší smrštění, protože plnivo je inertní složkou výsledné směsi. K stanovení ideálního mísení plniva se jeví jako vhodná metoda návrhu dle Bolomeye, která oproti ostatním metodám (dle Fullera, EMPA I a EMPA II) dosahuje nejvyššího množství jemných částic.

Hlavními výhodami použití plniva jsou snížení ceny celkové směsi, protože se jedná o jednu z nejlevnějších složek, a fakt, že plnivo se chová jako inertní složka, takže snižuje smrštění směsi a tvoří hutnou kostru pevné matrice.

Ze získaných poznatků byly vytvořeny 4 návrhy směsí, používající rozdílné expanzní příměsi, což je také jediná rozdílná složka navržených kotvících hmot. Tento fakt umožňuje porovnání jednotlivých výsledků. Složení navržených směsí je uvedeno v tabulce.

5.9.6. Konkrétní návrhy ověřovacích receptur

Ze získaných poznatků byly vytvořeny 4 návrhy směsí, používající rozdílné expanzní příměsi, což je také jediná rozdílná složka navržených kotvících hmot

z důvodu možnosti porovnání jednotlivých výsledků. Složení navržených směsí je uvedeno v tabulce 6 a 7.

Tabulka 5 – Složení expanzních směsí a referenční směsi s cementem CEM I 42,5 R

návrh složení směsí					
složka	referenční	CaO	MgO	Denka	bentonit
vápenec 0 - 0,2 [kg.m ⁻³]	785				
vápenec 0,2 - 0,5 [kg.m ⁻³]	364				
vápenec 0,5 - 1,0 [kg.m ⁻³]	412				
Cement CEM I 42,5 R [kg.m ⁻³]	400				
voda [kg.m ⁻³]	211				
w/c [-]	0,38				
SP [kg.m ⁻³]	(0,5%) 1%				
expanzní přísada [kg.m ⁻³]	-	20 (5%)	28 (7%)	40 (10%)	8 (2%)

Tabulka 6 - Složení expanzních směsí a referenční směsi s cementem CEM I 52,5 R

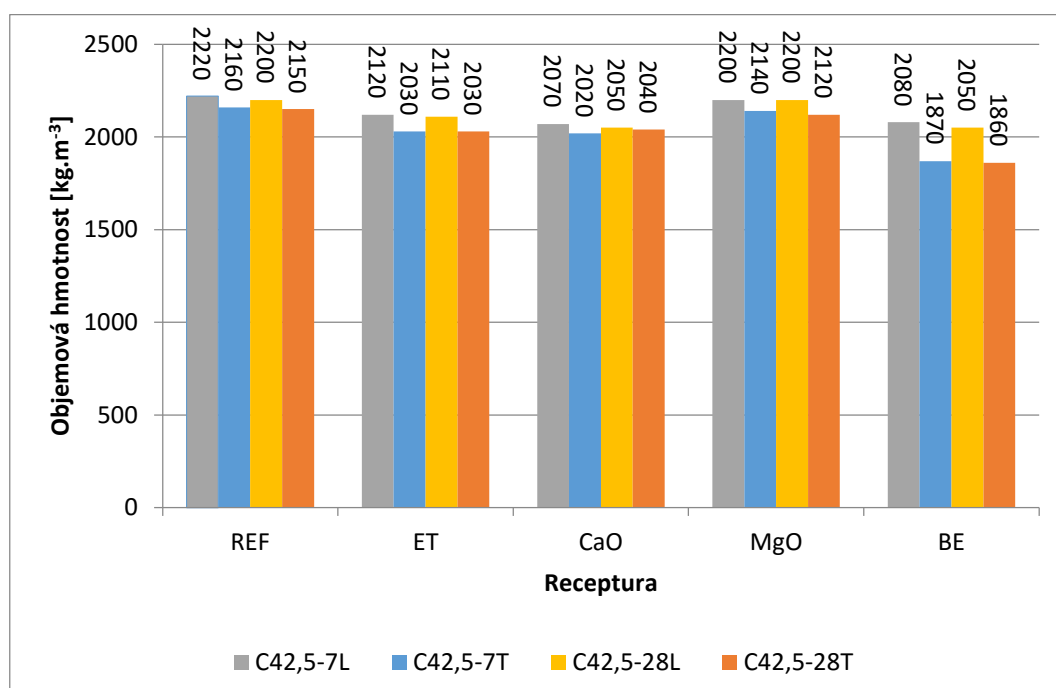
návrh složení směsí					
druh expanzní přísady	referenční	CaO	MgO	Denka	bentonit
vápenec 0 - 0,2 [kg.m ⁻³]	785				
vápenec 0,2 - 0,5 [kg.m ⁻³]	364				
vápenec 0,5 - 1,0 [kg.m ⁻³]	412				
Cement CEM I 52,5 R [kg.m ⁻³]	400				
voda [kg.m ⁻³]	250				
w/c [-]	0,45				
SP [kg.m ⁻³]	(0,5%) 1%				
expanzní přísada [kg.m ⁻³]	-	20 (5%)	28 (7%)	40 (10%)	8 (2%)

5.10. Experimentální část

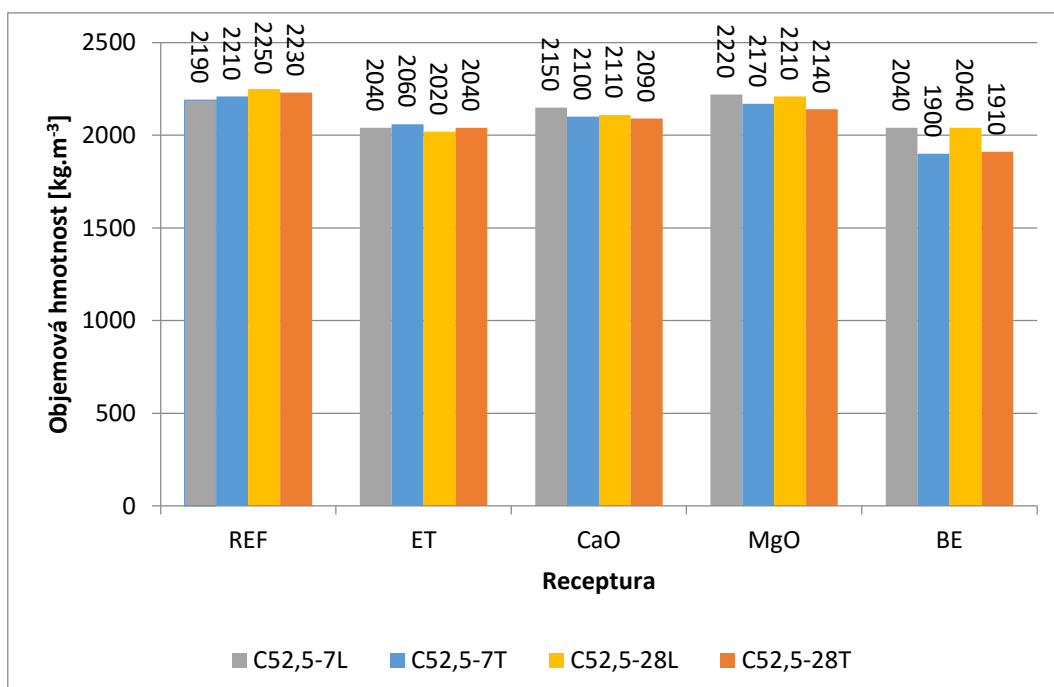
V této etapě bylo připraveno celkově 10 různých směsí dle navržených receptur v kapitole 5.6.6. a postupně byly zkoušeny na expanzi, pevnost v tlaku a v tahu po 7 a 28 dnech. Již při samotné přípravě čerstvých směsí bylo upraveno množství plastifikátoru na 1% (oproti původnímu doporučení výrobce) tak, aby bylo možné dosažení požadované konzistence umožňující aplikovat danou směs do vyvrtaného otvoru průměru 18 mm s osazenou závitovou tyčí průměru 8 mm. Níže jsou popsány jednotlivé výsledky měření, specifikace vzorků a poznatky zjištěné v průběhu měření.

5.10.1. Objemové hmotnosti

V grafu 7 a 8 jsou uvedeny naměřené hodnoty.



Graf 1 - hodnoty objemových hmotností směsí CEM I 42,5 R

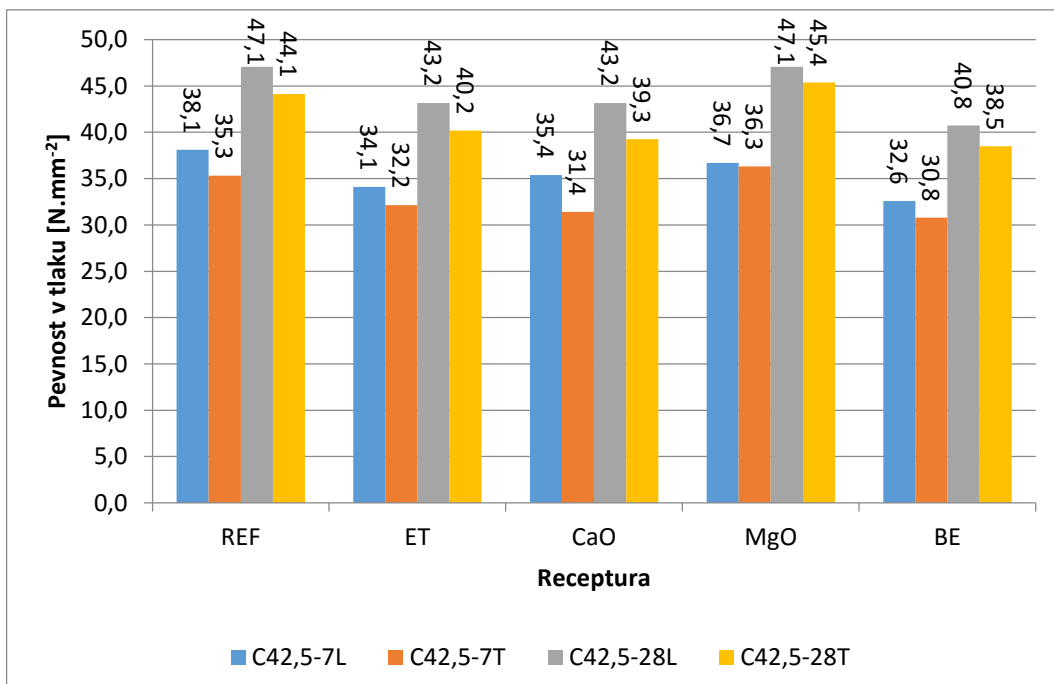


Graf 2 - hodnoty objemových hmotností směsí CEM I 52,5 R

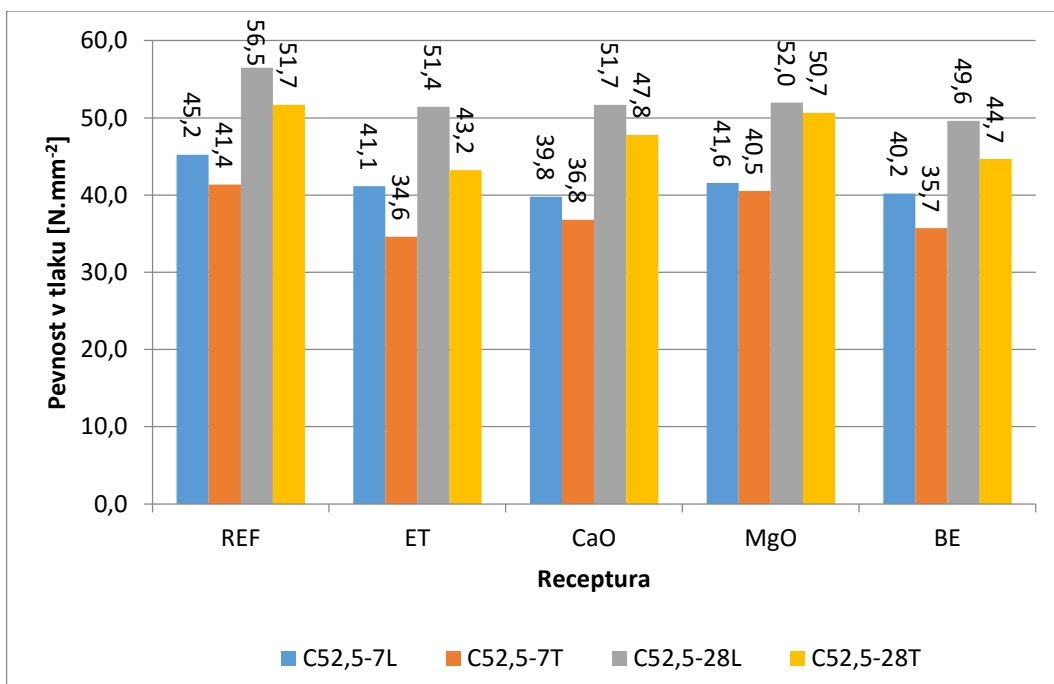
5.10.2. Výsledky tlakových zkoušek

Pevnosti byly stanovovány na dvou porovnávacích sadách. Tepelně zatížené sadě a nezatížené sadě.

Výsledky tlakových zkoušek jak tepelně zatížených tak tepelně nezatížených vzorků o stáří 7 a 28 dní jsou zobrazeny v následujících dvou grafech:



Graf 3 - Výsledky tlakových pevností směsí CEM I 42,5 R



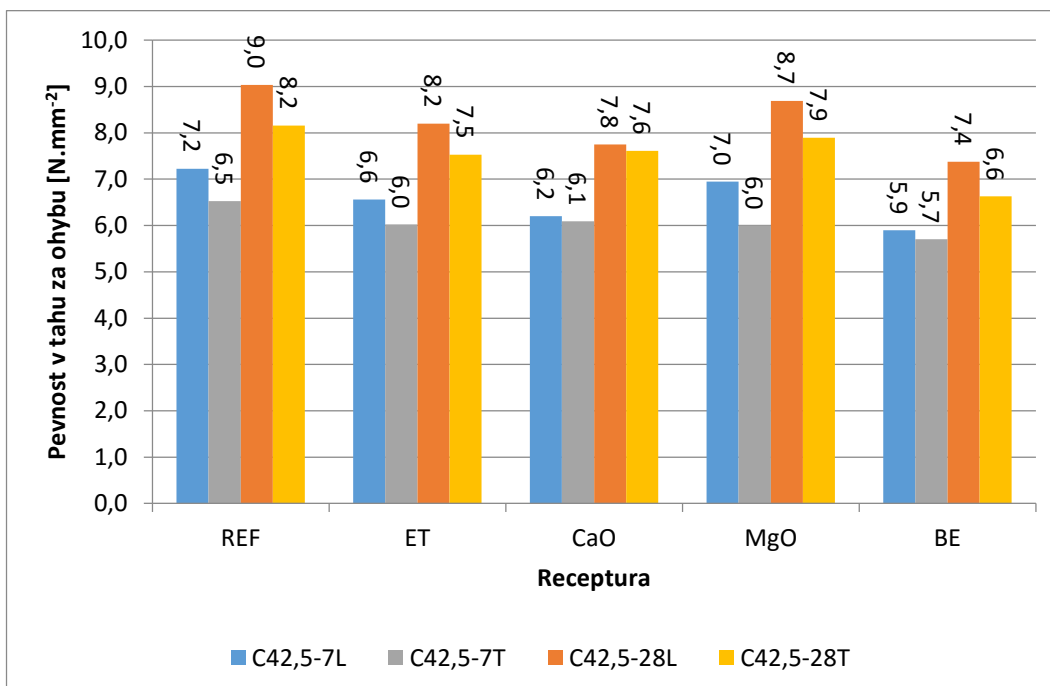
Graf 4 - Výsledky tlakových pevností směsí CEM I 52,5 R

5.10.3. Výsledky zkoušky v tahu za ohybu

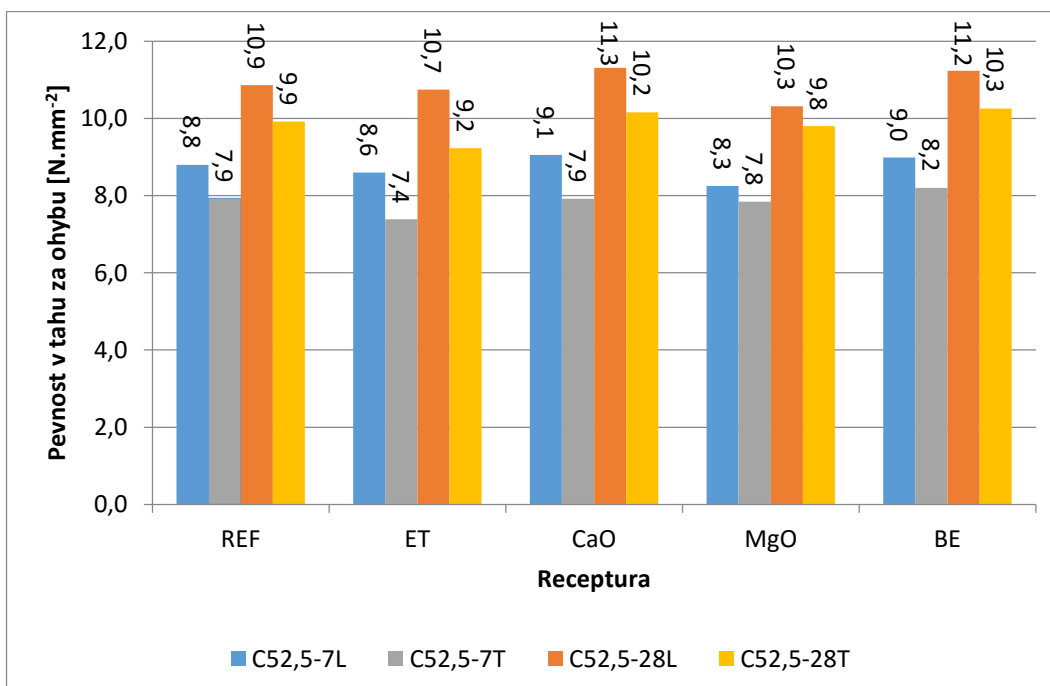
Zkouška v tahu za ohybu byla provedena dle normy ČSN EN 196-1 na trácích o rozměrech 40x40x160. Obdobně jako při zkoušce v tlaku, byly použity 2 sady

trámců. Přičemž jedna sada se před zkoušením tepelně zatížila a druhá, nezatížená, byla použita jako srovnávací.

Výsledky zkoušek v tahu za ohybu u tepelně zatížených tak tepelně nezatížených vzorků o stáří 7 a 28 dní jsou zobrazeny v následujících dvou grafech.



Graf 5 - Výsledky pevností v tahu za ohybu směsí CEM I 42,5 R



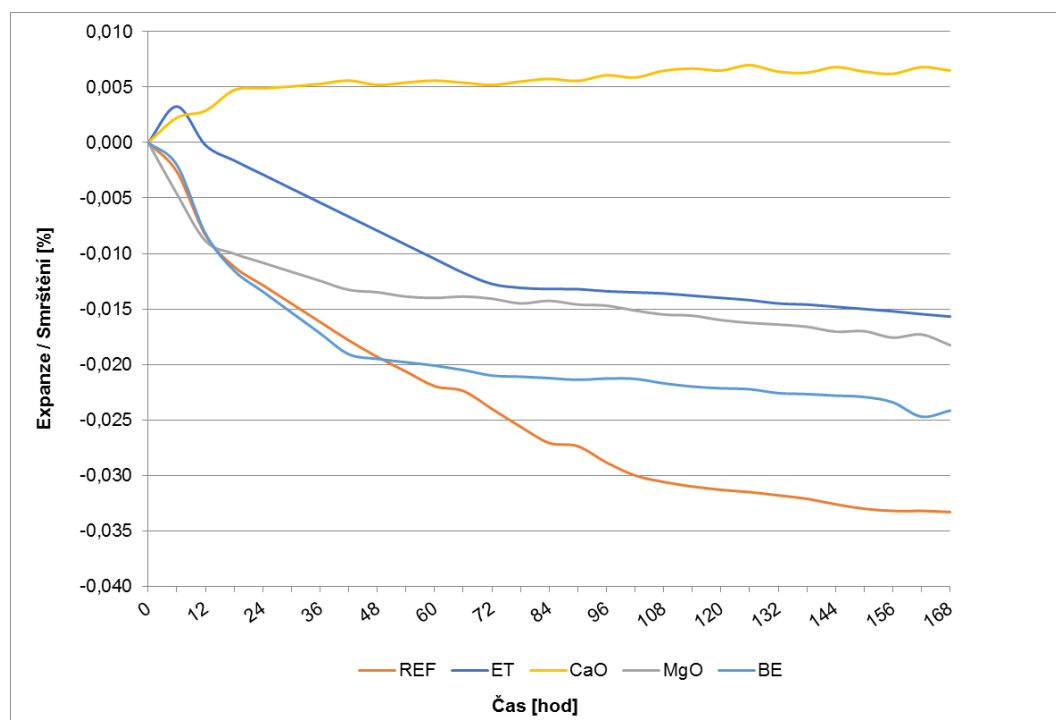
Graf 6 - Výsledky pevností v tahu za ohybu směsí CEM I 52,5 R

5.10.4. Výsledky zkoušek hydrostatickým vážením

Celkově bylo vyrobeno 10 vzorků (od každé receptury jeden vzorek) a váženy každých 5 minut po dobu 7 dní. Po dokončení týdenního měření byly vzorky uschovány k měření dlouhodobých objemových změn.

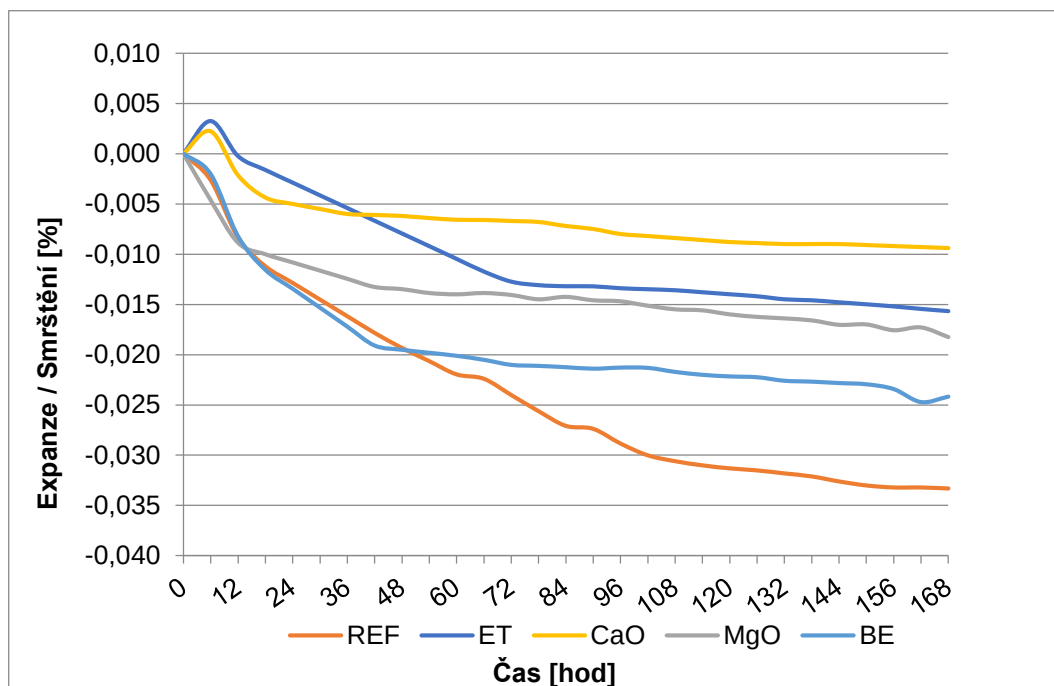
Pro měření expanzí (a celkových objemových změn) byla zvolena nepřímá metoda zjišťování objemových změn pomocí hydrostatického vážení.

Výsledky expanzí směsí na bázi cementu CEM I 42,5 R



Graf 7 - výsledky expanzí měřené hydrostatickým vážením směsí CEM I 42,5 R

Výsledky expanzí směsí na bázi cementu CEM I 52,5 R



Graf 8 - výsledky expanzí měřené hydrostatickým vážením směsí CEM I 52,5 R

5.10.5. Diskuze výsledků

Objemové hmotnosti

Naměřená objemová hmotnost se kromě 3 vzorků po tepelné zátěži snížila. To je pravděpodobně způsobeno rozdílnou vlhkostí obou vzorků a tři vzorky tvořící výjimku jsou zřejmě spjaty s nepřesnostmi stanovovací metody. Nejvyšších hodnot dosáhly vzorky referenčních směsí a nejnižší naopak směsi obsahující bentonit.

Z použitých expanzních směsí jediné MgO nemělo vliv, když vykázal obdobnou objemovou hmotnost jako referenční vzorek. Ostatní expanzní příměsi snižovaly dosažené objemové hmotnosti, nejvíce pak bentonit. V jeho případě došlo i k největšímu poklesu objemové hmotnosti po teplotní expozici.

Pevnost v tlaku a tahu za ohybu

Výsledky tlakových pevností a pevností v tahu za ohybu jednoznačně ukázaly, že přidáním jakékoliv expanzní přísady se negativně ovlivňují pevnosti. Nejzásadnější vliv na pevnost měl bentonit, který i přes minimální množství

způsobil největší pokles. Jako příměs nejméně ovlivňující pevnost se jevil oxid hořečnatý. Pevnosti 50 N.mm^{-2} po 28 dnech nebylo vůbec dosaženo u záměsí CEM I 42,5 R. Pro dosažení hranice 50 N.mm^{-2} by tedy bylo nutné modifikovat složení buď pomocí plastifikační přísady, příp. zvýšením množství cementu či jiných podpůrných příměsí (např. mikrosilika), což ovšem nemusí být z ekonomického hlediska výhodné. U záměsí CEM I 52,5 R dosáhly všechny receptury, kromě bentonitu požadovaných pevností po 28 dnech.

Tepelné zatěžování mělo za následek snížení pevností zhruba o 5% až 10%. V případě záměsí CEM I 42,5 R dosáhly směsi obdobného poklesu pevností kromě směsí s obsahem CaO, která vykazala nejnižší pokles pevností i v případě záměsí CEM I 52,5 R a tudíž se jeví i jako nejlepší z hlediska tepelné odolnosti. Nejhorších výsledků dosáhly záměsí s obsahem ettringitu a referenční záměs.

Při testování pevností vzorků po tepelné zátěži byl zjištěn pokles pevností o 5% až 10%, Největší pokles byl zjištěn v případě ettringitu, což je pravděpodobně spojeno s jeho tepelným rozkladem nad 80°C .

Expanze

U záměsí CEM I 42,5 R bylo dosaženo u směsí s obsahem MgO a ettringitu počátečních expanzí, kdy během 12 hodin od zamíchání dosáhly maxima a dále následováno pozvolným smršťováním. Nejlepších hodnot expanze se dosáhlo v případě CaO a to +0,005% vůči počátečnímu objemu po 7 dnech. Nejnižší hodnotu vykazala záměs referenční a receptura obsahující bentonit, když smrštění dosáhlo hodnoty: -0,038% a -0,032% po sedmi dnech a nebyla prokázána sebemenší expanze. Smrštění u MgO bylo po 7 dnech -0,028% a u ettringitu -0,020%.

Obdobných průběhů jako v předchozím případě se dosáhlo u záměsí s CEM I 52,5 R - v případě použití CaO, bentonitu a vzniku ettringitu. Naopak MgO v tomto případě nevykázalo ani počáteční expanzi a smršťovalo se po celou dobu měření, z čehož lze usoudit, že MgO se chová jinak v závislosti na zvoleném pojivu. Nejlepší hodnoty expanze po sedmi dnech bylo dosaženo opět v případě CaO (+0,006%). Smrštění po 7 dnech bylo u bentonitu -0,024% a u MgO -0,017%. Celková smrštění u všech čtyřech záměsí (MgO, Ettringit, bentonit a referenční)

bylo naměřeno nižší celkové procentuální smrštění než v předchozím případě a to i přes vyšší vodní součinitel.

Při porovnání směsí, ve kterých byl použit cement CEM I 52,5 R bylo dosaženo celkově nižších hodnot smrštění, kromě CaO, a to i přes použití vyššího vodního součinitele.

Přesto, že se expanzí v celém sledovaném časovém období vyznačovala pouze jedna směs (CaO), je v případě ostatních expanzních příměsí pozitivním zjištěním, že bylo dosaženo menší smrštivosti než v případě srovnávacích směsí bez jakékoliv příměsi. Dalším zjištěným faktem je rozdílné chování MgO v závislosti na pevnosti cementu.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout složení silikátové kotevní hmoty s vysokou tepelnou odolností, vykazující expanzní procesy. Primární použití této hmoty je především pro kotvení průmyslových velkorozměrných zařízení do vysokopevnostních podlah. Tato hmota má být na konci vývoje konkurenceschopná vůči ostatním výrobkům na trhu.

V rámci průzkumu z hlediska současných produktů dostupných nejen na českém trhu bylo zjištěno, že na trhu jsou k dispozici kotevní hmoty, které jsou buď pouze odolné buď vysokým teplotám a-nebo vykazují jen řízenou expanzi, bez výrobcem deklarované tepelné odolnosti. V tomto směru se jeví vývoj expanzní silikátové kotevní hmoty odolné vysokým teplotám jako opodstatněný s budoucím reálným komerčním využitím.

Při vývoji došlo k návrhu dvou receptur, u kterých se aplikovaly čtyři různé expanzní přísady (CaO, MgO, Denka SRA, Bentonit). Vývoj zahrnuje jak návrh směsí, tak testování. Všechny tyto výstupy, byly navrženy dle předešlého studia výsledků a poznatků publikovaných ostatními výzkumníky, což bylo také součástí této práce.

Při návrhu metodiky vývoje bylo podstatné zohlednění dosavadních zjištění o dostupných hmotách na trhu – jejich vlastnostech a účelu využití. Na základě těchto zjištění byly vybrány jednotlivé metody pro ověření všech podstatných parametrů expanzních hmot. Dále byly vybrány potenciálně vhodné složky, kde byl důraz kladen na jejich volbu zohledňující požadované parametry finální hmoty, tj. cílená expanze, pevnost v tlaku min. 50 N.mm^{-2} a odolnost teplotám do 200°C . Zvláštní pozornost byla věnována především druhu a množství pojiva a expanzních přísad. Konkrétně se jednalo o CaO, MgO, bentonit a expanzní přísadu Denka CSA v případě expanzních přísad a pojiva CEM I 42,5 R a CEM I 52,5 R. Při návrhu postupu testování byly brány v úvahu nejen normativní zkoušky, jejich vhodnost a příslušné modifikace, které především spočívaly v zohlednění tepelného namáhání během zatížení spoje. V poslední fázi etapy praktické části byly experimentálně ověřeny vybrané parametry několika

navržených receptur. Konkrétně se jednalo o objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu a poslední testovanou vlastností byla vlastní expanze směsí. Vyjma expanzí byl u ostatních parametrů sledován také vliv namáhání zvýšenou teplotou.

Z výsledků uvedených v této práci je zřejmé, že jediná směs, která splnila pevnostní požadavky a vykázala expanzi v cementové směsi je CEM I 52,5 R s CaO. V ostatních případech se nepodařilo dosáhnout celkové expanze hmoty a u receptur obsahujících CEM I 42,5 R ani požadované pevnosti. Dle získaných poznatků ohledně navržených kotvicích hmot, se doporučuje pro další vývoj vyloučit z testování expanzní přísadu na bázi bentonitu, jelikož prokázala nejnižší expanzi a nejvíce snížila konečné pevnosti a to pouze při množství 2% z hmotnosti cementu. Pro další testování se jeví jako vhodné směsi s CaO, CSA a MgO, jelikož se dosáhlo požadovaných pevností. A předpokládá se, že především u MgO z důvodu jeho hrubozrnné formy dojde k expanzi až v pozdějších stádiích hydratace. Jako nejslibnější se zatím jeví CaO, se kterým se dosáhlo patřičné pevnosti (v případě pojiva CEM I 52,5 R) i požadované expanze. Přísada na tvorbu ettringitu se jeví jako jedna z vhodných expanzních příměsí, ovšem bude nutné podrobněji otestovat jeho tepelnou odolnost v dalším stádiu vývoje. Jelikož se dosáhlo expanze pouze u jedné záměsi, doporučuje se použít kombinaci přísady omezující smrštění a expanzní přísady (případně jejich kombinaci) pro snadnější dosažení řízené expanze.

Pro další testování bude též vyloučeno pojivo CEM I 42,5 R, protože neposkytuje dostatečnou vaznost pro dosažení požadované pevnosti. Za zmínku stojí ještě zvážení změny plastifikační přísady, která se jevila jako ne zcela vhodná pro naše účely protože, docházelo k ztekucení až při částečném zatuhnutí směsi, i proto muselo být použité vyšší množství superplastifikační přísady než je doporučeno výrobcem. Výsledkem byl následný bleeding čerstvé směsi a problémy s aplikací hmoty.

Na základ výše uvedeného lze konstatovat, že zkoumaná problematika vývoje expanzních kotevních hmot na silikátové bázi s odolností vůči zmíněným teplotám a minimální pevnosti 50 N.mm⁻² skrývá značný prostor pro navazující výzkum a při jeho úspěšném vyřešení také poměrně vysoký potenciál pro uplatnění vyvinuté hmoty na trhu stavebních hmot.

6. SEZNAMY

6.1. Seznam použitých zdrojů

- [1] MAREČEK, J., Kubenková K., Šindel M., Čmiel F. *Pozemní stavitelství III*, Část 3: Kotvení stavebních konstrukcí. Ostrava 2006. [online]. [cit. 24. 5. 2016]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/ps3/3.html>
- [2] BURTZ, J. L., *Behavior and design of grouted anchors loaded in tension Including edge and group effects and qualification of Engineered grout products*. Gainesville, 2003. Diplomová práce. University of Florida. Školitel Dr. Ronald A. Cook.
- [3] COOK, R. A., KONZ, R. C., *Factors influencing bond strength of adhesive anchors*. ACI Structural Journal, 2001, 98.1: 76-86.
- [4] SKŘEČEK, Miroslav. *Tvorba AFt fází při hydrataci směsného cementu s fluidním popínkem*. Brno, 2014. 57 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.
- [5] THOMAS, M. D. A., *Delayed Ettringite Formation in Concrete — Recent Developments and Future Directions*, Department of Civil Engineering, University of Toronto, August 31, 1998, 40 pp.
- [6] JIRÁSEK, J., VAVRO, M., *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3
- [7] COLLEPARDI, M., *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7. Dostupné také z: <http://kramerus.mzk.cz/search/handle/uuid:530adc30-a14a-11e4-a808-005056827e52>

- [8] ZHOU, Q., GLASSER, F. P., *Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120°C*, Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 9, September 2001, Pages 1333-1339, ISSN 0008-8846
- [9] NEWMAN, J., Ban Seng Choo. *Advanced concrete technology*. [Online-Ausg.]. Oxford, England: Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 9780750656863.
- [10] LAMOND, J. F., PIELERT, J. H., EDITORS. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. [Rev. ed.]. Philadelphia, PA: ASTM, 2006. ISBN 9780803155206.
- [11] POPOVICS, S., *Concrete materials: properties, specifications, and testing*. 2nd ed. Park Ridge, N.J.: Noyes Publications, c1992. ISBN 0815513089.
- [12] DUDA, W. H., *Cement-data-book: zweisprachig*. Wiesbaden: Bauverlag, 1984.
- [13] KLIEGER, P., Lamond, J. F., *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials, 2011.
- [14] SAGER, H. et al., *Hochtemperatur-Verbundverhalten von Beton- und Spannstählen*, Sonderforschungsbereich 148, Arbeitsbericht 1978 - 1980, Teil II, B 51 - 53, Technical University of Braunschweig, 1980
- [15] BERKE, N. S., LI, L., HICKS, M. C., BAL, J.: *Improving Concrete Performance with Shrinkage-Reducing Admixtures*, Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. Berlin 2003

- [16] ČERVENKA, Jiří., *Vliv přísad redukujících smrštění na reologické vlastnosti vysokopevnostního betonu*. Brno, 2013. 74 stran, 15 stran příloh. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Daněk, Ph.D.
- [17] RADJY, F., SELLEVOLD, E. J., HANSEN, K. K., *Isosteric vapor pressure – temperature data for water sorption in hardened cement paste*. Enthalpy, entropy and sorption isotherms at different temperatures. Techn. Univ. of Denmark, Lyngby. 2003. Available at <http://www.byg.dtu.dk/publicering/rapporter/R-057.pdf>.
- [18] MARUYAMA, I., TERAMOTO, A. *Impact of time-dependant thermal expansion coefficient on the early-age volume changes in cement pastes*. Cement and Concrete Research. 41 (2011). Hong Kong: Elsevier. ISSN 0008-8846.
- [19] DEVRIM, A., BARIŞ E., *Usability of sand-bentonite-cement mixture in the construction of impermeable layer*. Scientific Research and Essays Vol. 6(21), pp. 4492-4503, 30. Pamukkale University, Denizli. September, 2011, ISSN 1992-2248
- [20] WAPRO, s r.o. Kovové kotvicí systémy, profilové lišty a drobný přípevňovací materiál [online], [cit. 24.4.2016] dostupné z: http://www.wapro.cz/DataStorage/File/Katalogy/Katalog%202015/03_kovov%C3%A9%20kotv%C3%ADc%C3%AD%20syst%C3%A9my.pdf
- [21] Koelner CZ, s.r.o. *Obecné a rámové systémy kotvení* [online], [cit. 24.4.2016] Dostupné z: http://www.koelner.cz/catal_pdf/obecne.pdf
- [22] KORNREICH, B. (2001), *Grouted and Adhesive Anchor Tests: Chemrex Products 1090, Thoroc 10-60, 648 CP+, 928*, Masters Report, University of Florida, Gainesville, Florida.

- [23] ZAMORA, N. A. (1998), *Behavior and Design of Headed and Unheaded Grouted Anchors Loaded in Tension*, Masters Report, University of Florida, Gainesville, Florida.
- [24] HRUBÝ, M., 2011. *Chemická kotva funguje v jakémkoliv materiálu*. Konstrukce. Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství. [online]. Praha. 24. 11. 2011, ISSN 18038433. [cit. 24.5.2016]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/chemicka-kotvafunguje-v-jakemkoliv-stavebnim-materialu/>
- [25] EMMONS, P. H., DROCHYTKA, R., JEŘÁBEK, Z., *Sanace a údržba betonu v ilustracích*, Část 3: Opravy povrchů, Oddíl 2: Požadavky na materiál, str. 162. CERM Akademické nakladatelství s.r.o Brno, leden 1999
- [26] ČSN EN 1504-9 *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 9: Obecné zásady pro používání výrobků a systémů*. Praha: Český normalizační institut, 2005
- [27] KOCIÁNOVÁ, M., *Technologie sanace sypaných hrází s využitím vhodných typů odpadů*. Brno, 2013. s. 79. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.
- [28] HEJL, M. *Pojiva na bázi slévárenských jíelů a jejich vlastnosti*. Brno: Vysoké učení technické v brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 33 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.
- [29] LAMOND, J. F., *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials*. ASTM International, 2006.
- [30] JOHNSON, W. H., PARSONS, Willard H. *Thermal expansion of concrete aggregate materials*. US Government Printing Office, 1944.

- [31] HELA, R., BODNÁROVÁ, L., *New generation cement concretes: ideas, design, technology and applications 2 : LLP - Erasmus 8203-0519/IP/Košice 03/REN. 2nd, enl. and updated ed.* Brno: Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 2009. ISBN 978-80-214-3887-3. Dostupné také z: <http://kramerus.mzk.cz/search/handle/uuid:6d04e510-0599-11e4-9789-005056827e52>
- [32] Hertz, Kristian Dahl. Bond between concrete and deformed bars exposed to high temperatures, Lyngby: Institute of Building Design, Technical University of Denmark, DK-2800. 1980. dostupné z
- [33] KASAMI, H.; OKUNO, T.; YAMANE, S. *Properties of concrete exposed to sustained elevated temperature*. In: *Structural mechanics in reactor technology*. 1975.
- [34] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti*, Praha: Český normalizační institut, 1993
- [35] ČSN EN 1542. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou*, Praha: Český normalizační institut, 2000
- [36] KOSMATKA, S. H., *Cementitious grouts and grouting*. Skokie, Ill.: Portland Cement Association, c1990. ISBN 089312088X.
- [37] ČSN EN 13294. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení doby tuhnutí*. Praha: Český normalizační institut, 2003
- [38] NOVÁČEK, Jaroslav. *Studium objemových změn pojivových silikátových směsí*. Brno, 2013. 169 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc..
- [39] ČSN EN 1881. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Zkoušení výrobků pro kotvení vytrhávací zkouškou*. Praha: Český normalizační institut, 2007

[40] BÍLEK, P.; HOBST, L.; ZIKMUND, T. *Využití počítačové tomografie pro kontrolu homogenity drátkobetonu*. In: Sborník příspěvků ExFoS - Expert Forensic Science XXIII. mezinárodní vědecká konference soudního inženýrství. V Brně: Vysoké učení technické, Ústav soudního inženýrství, 2014, s. 37 -34. ISBN 978-80-214-4852-0

[41] Newchem. Expanzní přísada Denska CSA. *Technický list*. [online]. [cit. 24.5.2016] Dostupné z: <http://catalogue.newchem.org/Uploads/635757512495162498TDS%20Denka%20CSA.pdf>

[42] AUTOR NEUVEDEN. Calderys.co.in [online]. [cit. 24.5.2016]. Dostupný na: <http://www.calderys.co.in/images/shrink.jpg>

[43] Českomoravský cement a.s.. CEM I 52,5 R. *Technický list*. [online]. [cit. 24.5.2016]. Dostupný na: http://www.heidelbergcement.cz/system/files_force/assets/document/produktovylistportlandskycementcemi525r.pdf?download=1

[44] Českomoravský cement a.s.. CEM I 42,5 R. *Technický list*. [online]. [cit. 24.5.2016]. Dostupný na: http://www.heidelbergcement.cz/system/files_force/assets/document/produktovylistportlandskycementcemi425r.pdf?download=1

[45] HPM TEC, s.r.o. Chemické kotvy. *Technický list*. [online]. [cit. 24.5.2016]. Dostupné z: <http://www.atos.cz/pdf/Chemicke%20kotvy.pdf>

[46] HARRISON, Don, 2000. Epoxy grout. *The Grouting Handbook*. [online]. Elsevier. Pages 69 – 84. [cit. 25. 1. 2015]. ISBN: 978-0-88415-887-5. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: doi:10.1016/B978-088415887-5/50004-7

[47] Fischer – CZ. Chemická hmoždinka. *Technický list*. [online]. [24.5.2016]. Dostupné z: <http://www.naradionline.cz/zbozi/chemicka-hmozdinka-fischer-fill-fix-25ml.html>

[48] ČNS EN 13395-2. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení zpracovatelnosti - Část 2: Zkouška tekutosti injektážních směsí nebo malt*. Praha: Český normalizační institut, 2003

6.2. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rozdělení kotvicích systémů pro kotvení šroubů [2].....	13
Obrázek 2 - druhy porušení šroubových spojů [2]	17
Obrázek 3 - porovnání smrštivé a nesmrštivé zálivky [42]	22
<i>Obrázek 4 - hodnoty vazných pevností různých druhů kameniva v závislosti teplotě</i> <i>[14]</i>	<i>33</i>
Obrázek 5 - zatížení namáhající spoj [1]	43
Obrázek 6 - schéma zkušebního zařízení na test konzistence dle ASTM pro standardní a modifikovanou zkoušku [36].....	45
Obrázek 7 - schéma zkušebního zařízení na stanovení doby tuhnutí dle ČSN EN 13 294 [39].....	47
Obrázek 8 - schéma zkušebního zařízení na zkoušení tlakových pevností zálivek [34].....	49
Obrázek 9 – Schéma zkoušky v tahu za ohybu zálivkových hmot.....	50
Obrázek 10 - zkušební zařízení na vytrhávací zkoušku dle ČSN EN 1881 [39]	55
Obrázek 11 - schéma počítačové tomografie [40]	56
<i>Obrázek 12 - schématické znázornění předpokládaného postupu experimentálních</i> <i>prací při vývoji nové kotevní hmoty na silikátové bázi a s řízenou expanzí</i>	<i>58</i>

6.3. Seznam tabulek

Tabulka 1 - hodnocení vhodnosti použití kotevních prostředků [1]	18
Tabulka 2- součinitele teplotní roztažnosti kameniv [30].....	30
Tabulka 3 - seznam kotevních produktů na bázi cementů podle jednotlivých výrobců	39
Tabulka 4 - <i>Chemické složení CEM I 52,5 R [43], Chemické složení CEM I 42,5 R [44] dle výsledků chemických rozborů poskytovaných výrobcem</i>	60
Tabulka 5 – Složení expanzních směsí a referenční směsi s cementem CEM I 42,5 R.....	64
Tabulka 6 - Složení expanzních směsí a referenční směsi s cementem CEM I 52,5 R.....	64

6.4. Seznam grafů

Graf 7 - hodnoty objemových hmotností směsí CEM I 42,5 R.....	65
Graf 8 - hodnoty objemových hmotností směsí CEM I 52,5 R.....	66
Graf 3 - Výsledky tlakových pevností směsí CEM I 42,5 R	67
Graf 4 - Výsledky tlakových pevností směsí CEM I 52,5 R	67
Graf 5 - Výsledky pevností v tahu za ohybu směsí CEM I 42,5 R	68
Graf 6 - Výsledky pevností v tahu za ohybu směsí CEM I 52,5 R	68
Graf 1 - výsledky expanzí měřené hydrostatickým vážením směsí CEM I 42,5 R.....	69
Graf 2 - výsledky expanzí měřené hydrostatickým vážením směsí CEM I 52,5 R.....	70

6.5. Seznam použitých zkratek a symbolů

V	Objem směsi [m^3]
m_1	hmotnost vzorku váženého na vzduchu [kg]
m_2	hmotnost vzorku váženého hydrostaticky [kg]
ρ	objemová hmotnost vody při 25°C [kg.m^{-3}]
$\% \Delta V$	procentuální objemová změna [%]
V_1	objem vzorku ihned po namíchání [m^3]
V_i	objem vzorku v době i [m^3]
R_f	pevnost v tahu za ohybu [N.mm^{-2}]
F_f	nejvyšší zatížení při porušení [N]
l	vzdálenost lomových podpěr [mm]
b	délka boční strany průřezu trámečku [mm]
R_c	pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]
F_c	nejvyšší zatížení při porušení [N]
C_3A	trikalcium aluminát
C_4A_3S	tetracalcium trialuminát sulfát
CSA	kalciumsulfo aluminát
m	hmotnost vzorku [kg.m^{-3}]
α	součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]
w/c	vodní součinitel
SP	superplastifikační přísada
ΔT	rozdíl teplot [$^{\circ}\text{C}$]
Δl	rozdíl délek vzorku [m]

Ref	referenční záměs
ET	záměs obsahující expanzní příměs Denka SRA
CaO	záměs obsahující CaO (pouze pokud je označení uvedeno v grafech)
MgO	záměs obsahující MgO (pouze pokud je označení uvedeno v grafech)
BE	záměs obsahující bentonit
C 52,5 – 7 L	vzorky staré 7 dní s cementem CEM I 52,5 R, které byly ošetřovány v laboratorním prostředí
C 52,5 – 7 T	vzorky staré 7 dní s cementem CEM I 52,5 R, které byly ošetřovány v laboratorním prostředí a následně tepelně zatíženy
C 52,5 – 28 L	vzorky staré 28 dní s cementem CEM I 52,5 R, které byly ošetřovány v laboratorním prostředí
C 52,5 – 28 T	vzorky staré 28 dní s cementem CEM I 52,5 R, které byly ošetřovány v laboratorním prostředí a následně tepelně zatíženy
C 42,5 – 7 L	vzorky staré 7 dní s cementem CEM I 42,5 R, které byly ošetřovány v laboratorním prostředí
C 42,5 – 7 T	vzorky staré 7 dní s cementem CEM I 42,5 R, které byly ošetřovány v laboratorním prostředí a následně tepelně zatíženy
C 42,5 – 28 L	vzorky staré 28 dní s cementem CEM I 42,5 R, které byly ošetřovány v laboratorním prostředí
C 42,5 – 28 T	vzorky staré 28 dní s cementem CEM I 42,5 R, které byly ošetřovány v laboratorním prostředí a následně tepelně zatíženy
h_{ef}	hloubky vyvrtané díry
d_0	průměr vyvrtaného otvoru
d	průměr šroubu