

**UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

**VYUŽITÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH BETONŮ
U MALÝCH MOSTNÍCH OBJEKTŮ,
VČETNĚ POUŽITÍ U MALÝCH
INTEGROVANÝCH MOSTŮ**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Pardubice, 2012

Ing. Lenka Tišlerová

**UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA
KATEDRA DOPRAVNÍHO STAVITELSTVÍ**

**VYUŽITÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH BETONŮ
U MALÝCH MOSTNÍCH OBJEKTŮ,
VČETNĚ POUŽITÍ U MALÝCH
INTEGROVANÝCH MOSTŮ**

DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: Ing. Lenka Tišlerová

ŠKOLITEL: Doc. Ing. Jiří Pokorný, CSc.

Pardubice, 2012

Prohlášení autora:

Předkládaná disertační práce byla vypracována v prvním čtvrtletí roku 2012. Samotný výzkum probíhal z velké části v roce 2011 na závodě ŽPSV a.s. v Byňově u Nových Hradů.

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracovala samostatně s vyznačením všech použitých pramenů a spoluautorství.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Pardubice, 17.8.2012

Ing. Lenka Tišlerová

Poděkování:

Na tomto místě bych velice ráda poděkovala celé Katedře dopravního stavitelství na Dopravní fakultě Jana Pernera v Pardubicích - jmenovitě pak především vedoucímu katedry panu Prof. Ing. Vladimíru Doleželovi, CSc. a mému školiteli Doc. Ing. Jiřímu Pokornému, CSc. za podporu, motivaci a cenné rady nejen v době mého denního magisterského studia, ale i po dobu dálkového doktorského studia.

Dále děkuji řediteli výrobního závodu ŽPSV a.s. v Byňově u Nových Hradů, Martinu Říhovi, za možnost na tomto závodě provádět výzkumnou činnost a všem zaměstnancům za velice příjemné přátelské prostředí a výborné pracovní podmínky. Jmenovitě mé velké poděkování patří panu Ing. Vlastimilu Bílkovi, PhD. za osobní přístup a přínos cenných odborných zkušeností, které měly zásadní vliv na vývoj samotné disertační práce. Díky jeho poskytnuté pomoci, neutuchajícímu nadšení pro probíhající výzkum a stále optimistickému naladění, mi bylo velikou ctí po jeho boku pracovat a získávat cenné zkušenosti z jeho praxe. Velice si pana Ing. Vlastimila Bílka vážím a děkuji za veškerou dosavadní spolupráci.

Neméně významné poděkování také náleží i Prof. Ing. Luboši Pazderovi, CSc. a Mgr. Liborovi Topolářovi, PhD., kteří prováděly zkoušky akustické emise a výsledky mi následně poskytly. Velice si vážím jejich profesního i osobního přístupu.

V neposlední řadě patří mé veliké poděkování mému manželovi Ing. Zdeňku Tišlerovi za maximální podporu v mém studiu při velkém pracovním vytížení v zaměstnání a zároveň za neocenitelnou technickou pomoc při betonážích. Jeho podpora a pomoc mi byly velikou oporou. Děkuji.

Abstrakt:

Cílem této disertační práce je souhrn obecných dostupných informací o malých a integrovaných mostech, se zaměřením na možnost využití nových alkalicky aktivovaných materiálů, pro tyto mosty.

Experimentální část je zaměřena na porovnání vlastností alkalicky aktivovaných samozhutnitelných struskových betonů s klasickými samozhutnitelnými betony na malých laboratorních vzorcích a na trámech rozměrů 200 x 300 x 3000 mm.

Klíčová slova:

Integrované mosty, Alkalicky aktivované materiály, Pojivo, Beton

Summary:

The aim of this work is to present and summarize general available information about little and integrated bridges, and it is focused on an option of using new alkali-activated materials for these bridges.

The practical part deals with the comparison of qualities of alkali-activated self-compacted slag concrete and common self-compacted concrete on small laboratory samples and beams in size of 200 x 300 x 3000 mm.

Key words:

Integral bridge, Alkali activated materials, Binder, Concrete

OBSAH

<u>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</u>	<u>8</u>
<u>1. ÚVOD.....</u>	<u>9</u>
<u>2. ALKALICKY AKTIVOVANÉ MATERIÁLY.....</u>	<u>12</u>
<u>2.1 Úvod</u>	<u>12</u>
<u>2.2 Historie</u>	<u>13</u>
<u>2.3 Alkalická aktivace.....</u>	<u>17</u>
2.3.1 Geopolymer a nebo alkalicky aktivovaný materiál?.....	17
2.3.2 Princip	17
2.3.3 Struktura.....	19
<u>2.4 Alkalicky aktivovatelné materiály - suroviny.....</u>	<u>20</u>
2.4.1 Slínkové materiály.....	20
2.4.2 Vysokopevní struska.....	20
2.4.3 Ocelářenská struska.....	21
2.4.4 Elektrářenské popílky.....	22
2.4.5 Pálené jíly – lupek, metakaolin.....	23
<u>2.5 Alkalické aktivátory.....</u>	<u>24</u>
2.5.1 Uhlčitany - soda a potaš.....	24
2.5.2 Vodní sklo.....	24
2.5.3 Hydroxidy.....	25
<u>2.6 Bližší popis alkalicky aktivovaných materiálů.....</u>	<u>25</u>
2.6.1 Alkalicky aktivované slínkové materiály	25
2.6.2 Alkalicky aktivovaná struska.....	26
2.6.3 Alkalicky aktivovaný popílek.....	28
2.6.4 Alkalicky aktivovaný metakaolin.....	32
<u>2.7 Přehled vlastností alkalicky aktivovaných materiálů.....</u>	<u>33</u>
2.7.1 Smrštění	33
2.7.2 Pevnost	35
2.7.3 Chemická odolnost.....	36
2.7.4 Výkvěty.....	38
2.7.5 Karbonatace.....	40
2.7.6 Stabilita ocelové výztuže.....	41
2.7.7 Mrazuvzdornost.....	42

2.7.8	Tepelná odolnost.....	42
2.7.9	Alkalicko-křemičitá reakce	44
2.7.10	Ekologie	48
2.7.11	Shrnutí	49
2.8	Praktické aplikace a použití alkalicky aktivovaných materiálů.....	50
3.	MALÉ MOSTNÍ OBJEKTY.....	57
3.1	Současný stav v mostním stavitelství	57
3.2	Obecný popis pojmu malý mostní objekt	58
3.3	Malé mosty a povodně	60
4.	INTEGROVANÉ MOSTY.....	63
4.1	Obecný popis pojmu integrovaný most	63
4.2	Rozdíly tradičních a integrovaných mostů	64
4.2.1	Konstrukční uspořádání integrovaných mostů.....	64
4.2.2	Statické působení integrovaných mostů.....	66
4.2.3	Návrh integrovaných mostů.....	68
4.3	Typy integrovaných mostů.....	69
4.4	Dělení integrovaných mostů dle spodní stavby.....	70
4.4.1	Mosty s opěrami plné výšky.....	70
4.4.2	Mosty založené na násypu.....	71
4.5	Výhody integrovaných mostů.....	73
5.	CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	76
6.	PRAKTICKÁ ČÁST - PŘÍPRAVA FOREM, SPECIFIKACE POUŽITÝCH MATERIÁLŮ, POPIS PRŮBĚHU BETONÁŽÍ.....	79
6.1	Příprava forem.....	79
6.2	Specifikace vstupních surovin.....	81
6.3	Složení směsí, navázání jednotlivých komponentů, příprava na betonáž.....	85
6.4	Průběh betonáže.....	87
6.5	Odformování.....	91
6.6	Zkoušky.....	95

7. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ - ZKOUŠKY JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ, POROVNÁNÍ JEJICH VLASTNOSTÍ A VÝROBNÍCH NÁKLADŮ	97
7.1 Zkoušky prováděné na doprovodných vzorcích.....	97
7.1.1 Pevnost v tlaku - krychle o hraně 150 mm.....	97
7.1.2 Pevnost v tahu za ohybu - trámce 100 x 100 x 400 mm.....	99
7.1.3 Lomová houževnatost a lomová energie - trámce 80 x 80 x 480 mm.....	101
7.1.4 Pevnost v tlaku na zlomcích.....	102
7.1.5 Moduly pružnosti.....	103
7.2 Zkoušky prováděné na trámech.....	104
7.2.1 Ohybové zkoušky na trámech.....	106
7.2.2 Zkouška pomocí akustické emise.....	117
7.2.3 Měření teploty vybetonovaných trámů.....	124
7.3 Simulace v programu scia esa.....	128
7.4 Simulace v programu OOFEM.....	134
7.5 Zkoušky xrd a xrf.....	136
7.6 Výkvěty.....	138
7.7 Ekonomické zhodnocení.....	139
7.8 Nábrus alkalicky aktivovaného betonu s drátky dramix.....	141
8. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	142
9. ZÁVĚR.....	144
LITERATURA.....	147
PUBLIKACE AUTORKY.....	151
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	152
SEZNAM TABULEK.....	159
SEZNAM GRAFŮ.....	160
PŘÍLOHA A.....	162
PŘÍLOHA B.....	164
PŘÍLOHA C.....	166
PŘÍLOHA D.....	168

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Vysvětlivky jednotlivých složek fází:

- **A** ... Al_2O_3
- **C** ... CaO
- **H** ... H_2O
- **K** ... K_2O
- **M** ... MgO
- **N** ... Na_2O
- **S** ... SiO_2

Jednotlivé fáze:

- **C-A-H** ... vedlejší fáze v betonech na bázi portlandského cementu a alkalicky aktivované strusky
- **C-A-S-H** ... hlavní fáze v betonech na bázi alkalicky aktivované strusky
- **C-S-H** ... hlavní fáze v betonech na bázi portlandského cementu
- **N-A-S-H** ... hlavní fáze v betonech na bázi alkalicky aktivovaného popílku (sodný aktivátor)
- **(N, K)-A-S-H** ... hlavní fáze v betonech na bázi alkalicky aktivovaného popílku (směsný sodnodraselný aktivátor)
- **(N, K, C, M)-A-S-H** ... směsná fáze v betonech na bázi alkalicky aktivované strusky (směsný sodnodraselný aktivátor)

Ostatní zkratky:

- **PC** ... portlandský cement
- **BS cement** ... bezsádrovcový cement
- **NMR** ... nukleární magnetická rezonance
- **XRD**... rentgenová difrakční analýza
- **XRF**... rentgenová fluorescenční analýza

1. ÚVOD

V dávných dobách a po mnohá staletí byly mostní konstrukce budovány z dostupných přírodních materiálů, které mělo lidstvo k dispozici. Jednalo se především o využití dřeva a kmenů stromů jako stavebního materiálu pro první lávky. Případná potřebná lana se splétala z přírodních vláken. Dalšími stavebními materiály byly kameny a cihly pro výstavbu například klenbových přemostění a klenutých konstrukcí obecně – např. akvadukty.

Veškeré stavby byly založeny především na předávání zkušeností z generace na generaci, bez jakýkoliv výpočtů, se zdokonalováním staveb podle citu stavitelů.

S postupem času a s vývojem společnosti byly zakládány vzdělávací instituce, následně vysoké školy, zaměřené na jednotlivé obory. Zaznamenávaly se poznatky z praxe a byla tvořena teorie s ohledem na používané materiály.

Samotné dřevo, kameny a cihly byly stále více nahrazovány betonem a ocelí. Železo jako konstrukční materiál pro mosty měl největší uplatnění s výrobou litiny v 17. století. Na počátku 19. století byl objeven portlandský cement a postupem času byly navrženy stavby z prostého betonu. Nevýhoda prostého betonu – malá pevnost v tahu – byla řešena doplněním ocelové výztuže a vznikem tzv. železového betonu (roku 1867). Díky principu vyztužování betonu, našel beton nová uplatnění a to nejen ve stavitelství.

Dalším stupněm vývoje betonových staveb bylo nalezení technologie, kde příkladem může být předpjatý beton. S vývojem materiálů a technologií souviselo také běžné používání doplňujících funkčních částí mostů jimiž jsou např. ložiska a mostní závěry.

V současné době je snaha minimalizace nákladů jak při realizaci, tak následném provozu. Konstrukční systémy eliminují zakomponování mostních závěrů a ložisek a vývoj samotných materiálů je neméně zajímavou cestou.

Z nových materiálů však nelze hned stavět velká díla – v tomto případě velké mosty. Proto je předkládaná disertační práce zaměřena na oblast malých mostních objektů a malých integrovaných mostů, které jsou konstrukcemi bez možného užití ložisek a mostních závěrů, v souvislosti s možností využití nových materiálů - konkrétně alkalicky aktivovaných betonů.

Alkalicky aktivované materiály jsou moderními, atraktivními materiály nejen v zahraničí, ale i u nás. Jejich velké využití je zejména v inženýrském stavitelství, kde mají potenciál prozatím alespoň z části nahradit materiály na bázi portlandského cementu.

Tato práce se zaměřuje především na možnost využití těchto materiálů ve stavitelství dopravním. Možnost aplikace těchto materiálů byla zkoumána experimentálním měřením v laboratorním a poloprovozní měřítku. Hlavním přínosem byla možnost vyhotovení velkých stavebních prvků. Předchozím rešeršním průzkumem bylo zjištěno, že v České republice nebyly v těchto rozměrech a se zamýšleným experimentálním vyhodnocením dosud žádné zkoušky provedeny. Snahou bylo provést co nejvíce posouzení v návaznosti na aplikaci a zavedení do praxe.

Členění a obsah práce je ve zkratce následující:

- **1. Úvod:** V úvodu je krátce popsána historie a vývoj staveb s ohledem na materiály a naznačena myšlenka a ubírající se směr této práce cestou malých mostních objektů, malých integrovaných mostů a nových alkalicky aktivovaných betonů.
- **2. Alkalicky aktivované materiály:** Následuje seznámení s alkalicky aktivovanými materiály. Jsou popsány základní vlastnosti, uplatnění, výroba, výhody a nevýhody. Tyto materiály jsou nyní často středem zájmu výzkumu, využívají a zkoumají se různě připravené směsi spolu s plnivou (kamenivem a výztuží) ve snaze nalézt kombinaci s co nejlepšími vlastnostmi pro různé typy staveb.
- **3. Malé mostní objekty:** V této části je popsán obecně současný stav v mostním stavitelství. Jsou zmíněné dva softwarové systémy evidence mostů a popsán obecně pojem malý most. Je naznačen velký počet malých mostů, jejich stav ovlivněný povodněmi a nutnost oprav, na které by bylo možné využít nové zkoumané materiály.
- **4. Integrované mosty:** V této části je popsán pojem „integrovaný most“. Jsou uvedeny základní rozdíly mezi tradičními a integrovanými mosty.

Následně jsou shrnuty typy integrovaných mostů podle uspořádání spodní stavby, uspořádání nosné konstrukce, výhody a nevýhody těchto mostů. Celkově je tato kapitola zaměřena na obecný popis, jelikož již byly zpracovány podrobnější práce na toto téma a cílem této práce je především užší pohled na samotné materiály pro možnost použití u malých integrovaných mostů.

- **5. Cíl disertační práce:** V této kapitole je uveden hlavní cíl práce s popisem posouzení, vyhodnocení a analýzou alkalicky aktivovaných materiálů pro účely inženýrského dopravního stavitelství. Analýza je provedena pomocí experimentálního měření vybraných vzorků alkalicky aktivovaného materiálu zvoleného složení.
- **6. Praktická část - příprava forem, specifikace použitých materiálů, popis průběhu betonáže:** V této kapitole jsou představeny a naznačeny postupy, které vedou ke splnění cílů disertační práce. Je zde popsána příprava vzorků, uvedená specifikace použitých materiálů pro následné zkoušky, které byly provedeny. Je popsán průběh betonáže, realizované trámy a jejich odformování.
- **7. Experimentální měření - zkoušky jednotlivých uvedených materiálů a porovnání jejich vlastností:** V této kapitole jsou popsány jednotlivé zkoušky. Jsou zde sepsány a vyhodnoceny jednotlivé výsledky z reálného měření a následně i nasimulované výsledky pomocí počítačového programu SCIA ESA a OOFEM. Dále pak i porovnání nákladů na klasický beton a alkalicky aktivovaný beton.
- **8. Diskuze výsledků:** Reálné zhodnocení dosažených výsledků v návaznosti na posouzení, zda má tento výzkum přínos pro praktické využití.
- **9. Závěr:** V závěru jsou shrnuty dosažené výsledky disertační práce a popsána možnost využití nových materiálů pro malé mostní objekty a malé integrované mosty.

2. ALKALICKY AKTIVOVANÉ MATERIÁLY

2.1 Úvod

Beton patří k významným a velmi rozšířeným stavebním materiálům. Jeho celosvětová roční spotřeba je zhruba 8,8 miliard tun. Toto množství díky rozvoji infrastruktury v západních a zejména v rozvojových zemích se bude i nadále zvyšovat. Tradičním pojivem pro jeho výrobu byl až doposud portlandský nebo směsný cement, jehož výroba má velmi negativní vliv na životní prostředí. Toto univerzální pojivo je poměrně levné a široce rozšířené, ale má i řadu nedostatků.

Nejzávažnějšími nedostatky jsou:

- vysoká energetická náročnost jeho výroby
- malá odolnost proti působení agresivních látek
- nestálost za vyšších teplot
- vysoké emise CO₂ při jeho výrobě

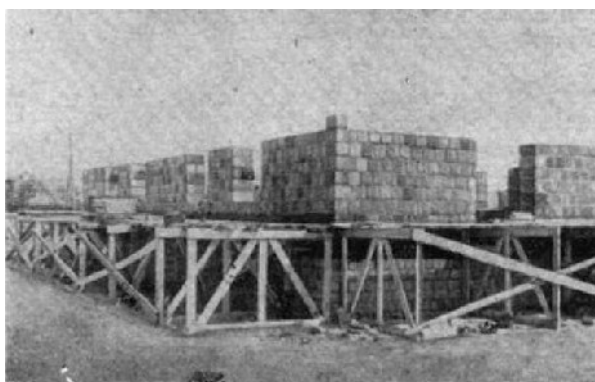
Proto se v posledních letech objevuje snaha vyrábět materiály, které jednak splňují přísné požadavky na co nejhospodárnější produkci, ale také nepředstavují přílišnou zátěž pro životní prostředí. S ohledem na snižování emisí skleníkových plynů je třeba využívat i odpadní suroviny z průmyslových a energetických výrob, jako jsou strusky a elektrárenské popílky. Přídavkem těchto surovin dochází k úspoře cementu resp. surovin pro jeho výrobu, ale i snížení ceny oproti primárním surovinám. Toto je ale pouze jedna z alternativ využití těchto odpadních látek. Druhou a v posledních letech i stále zajímavější a prozkoumávanější variantou, je využití odpadních alumosilikátových látek pro výrobu bezslínkových pojiv za použití alkalické aktivace.

Takto získané materiály v mnoha ohledech předčí klasické cementové betony. Výsledné materiály mají velmi dobré užitné vlastnosti, jako jsou vysoké pevnosti, odolnost proti působení agresivních látek a odolnost při vysokých teplotách. Jedná se tedy o materiály s velkým potenciálem a širokým rozsahem použití. Tyto materiály v nejbližší době plně nenahradí tradiční pojiva, jako je portlandský cement resp. beton na bázi portlandského cementu, ale jejich zařazení do výroby může přispět k omezení

negativních vlivů stavební výroby na životní prostředí a rozšířit škálu vlastností běžných anorganických pojiv [1].

2.2 HISTORIE

První použití geopolymerních resp. alkalicky aktivovaných systémů se datuje již do období před naším letopočtem. V této době byly na stavby, betonové výrobky a umělecké předměty používány směsi vápna, přírodního sopečného popela a popela ze spálených dřevin a trav, které obsahují vysoký podíl alkalických složek. Na dlouhou dobu byla tato pojiva „zapomenuta“ a nebo využívána jen v minimální míře. K oživení jejich výroby a opětovnému zájmu o ně došlo až ve 20.století. Jedním z průkopníků výzkumu byl na Ukrajině prof. Glukhovskij, který také zkoumal pojiva používaná na starých římských a egyptských stavbách. Zajistil také průmyslové využití těchto látek na Ukrajině a v Rusku již od roku 1964 (výzkum probíhá již od roku 1958). Zavedl termíny gruntosilikát a gruntocement, kterými označoval alkalicky aktivované jemně mleté alumosilikátové suroviny vznikající jako odpad při průmyslové výrobě. Na jeho výzkumy v současné době navázal prof. Krivenko, který se výzkumům alkalicky aktivovaných materiálů věnuje v současné době [2].



Obr. 1 – Stavba z „gruntosilikátových“ bloků (1958) [3]




*Obr. 2 – Ukrajina 1990 – domy ze strusko - popílkového
alkalicky aktivovaného betonu [3]*

Další významnou osobností z této oblasti je prof. Davidovits působící ve výzkumném ústavu Geopolymer Institute ve Francii. Na konci 70. let patentoval výsledky výzkumu alkalické aktivace metakaolinu. Zavedl pro tento nový druh pojiva s polymerní strukturou název geopolymer. Vyslovil i odvážnou hypotézu o stavbě egyptských pyramid z prefabrikovaných bloků, které měly být vytvořeny „betonářskou technologií“ ze směsi vápencového písku s hydroxidem vápenatým, uhličitánem sodným a vodou. Tato teorie nebyla do současné doby potvrzena.

Od roku 1983 se ve Finsku používá struskoalkalické pojivo obsahující vysokopecní strusku, aktivátor a superplastifikátor, označované jako F-cement [1].

V USA byl po roce 1980 vyvinut alkalicky aktivovaný slínkový cement, který dosahuje po krátké době velmi vysokých pevností a je tak využíván především na opravy letištních drah a silnic.

V České republice probíhá výzkum alkalicky aktivovaných alumosilikátů již od 80. let minulého století. Z tohoto období pochází i jeden z prvních patentů.

ČESKOSLOVENSKÁ SOCIALISTICKÁ REPUBLIKA (19)	POPIS VYNÁLEZU K AUTORSKÉMU OSVĚDČENÍ	254525
		(12) (81)
	(22) Přihlášeno 07 04 86 (23) BV 2489-86.S	(81) Inv. čl. C 04 B 7/14, C 04 B 7/147
ÚŘAD PRO VYNÁLEZY A OBJEVY	(40) Zveřejněno 14 05 87 (45) Vyčáno 15 09 88	
(75) Autor vynálezu	BRANDŠPETER JIŘÍ doc. ing. CSc., VAŘILEK RUDOLF ing., CROUŠEK ROMAN ing., KCHNEL BOON, NEMO	
	(54) Strukoalkalická betonová směs	

Obr. 3 – Čs. Patent 254525

Prvním vysokoškolským pracovištěm, které se touto tematikou zabývá již od roku 1973 je výzkumný tým VŠCHT v Praze, Ústav skla a keramiky pod vedením doc. F. Škváry, který úzce spolupracuje s týmem z ČVUT Praha, Katedrou technologie staveb. Výsledkem jejich práce bylo v roce 2003 patentování alkalicky aktivovaného bezcementového popílkového betonu pod názvem POPbeton® [4].

Historie společné práce Ústavu skla a keramiky FCH VŠCHT v Praze a Fakulty stavební ČVUT v Praze:

- 1973 ... první experimenty s alkalicky aktivovaným cementem
- 1974 - 1978 ... studium systému mletý slínek portlandského cementu - anionaktivní tenzid - alkalická hydrolyzovatelná sůl a voda
- 1980 - 1984 ... stavební hmoty na bázi speciálního rychletvrdnoucího BS cementu
- 1985 ... nalezena schopnost tvrdnutí BS cementu až do teplot $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, schopnost BS cementu odolávat teplotám až do $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 1985 ... dosaženo pevnosti 245 MPa v tlaku u BS cementu (tehdy předpokládaná maximálně dosažitelná pevnost cementu)

- 1989 ... zkušební průmyslové aplikace stavebních hmot na bázi speciálního BS cementu, připraven beton s pevností 100 MPa
- 1992 - 1995 ... experimenty s alkalickou aktivací odpadních metalurgických strusek
- 1997 ... experimenty s alkalickou aktivací odpadních popílků
- 1999 ... dosaženo pevnosti v tlaku 168 MPa u alkalicky aktivovaných systémů popílek + struska
- 2000 ... příprava hmot na bázi alumosilikátových polymerů
 - z popílkových a struskových surovin
- 2001 ... příprava prvních stavebních hmot na bázi alumosilikátových polymerů
- 2002 ... připraven první POPbeton[®] s pevností v tlaku přes 60 MPa

Současnost:

- výzkum materiálových vlastností alumosilikátových polymerů na bázi odpadních popílků, tepelně aktivovaných kaolinitických látek a odpadních strusek
- optimalizace technologie POPbetonu[®]
- studium materiálových vlastností POPbetonu[®]

V nynější době se vzhledem k potenciálu těchto nových materiálů výzkumem zabývá mnoho týmů, ať již vysokoškolských a nebo ze soukromých firem. Mimo VŠCHT a ČVUT Praha jsou to například týmy z VUT Brno, Univerzity Pardubice, VŠB Ostrava, VÚANChu Ústí nad Labem, ŽPSV Brno, atd.

2.3 ALKALICKÁ AKTIVACE

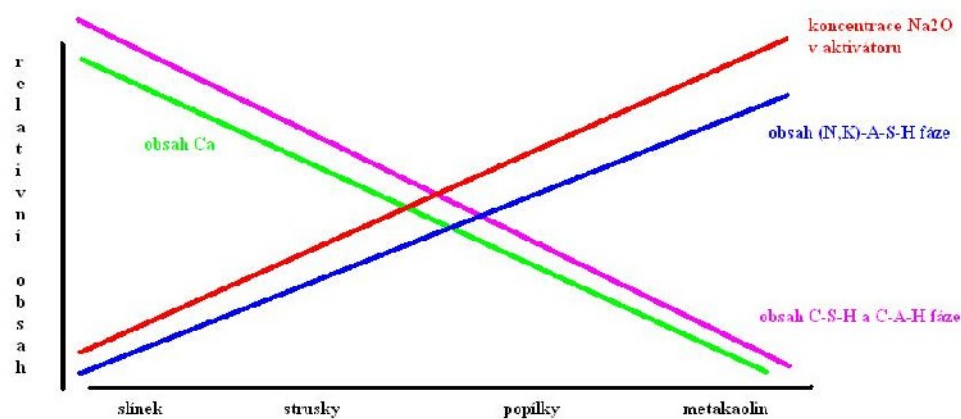
2.3.1 *Geopolymer a nebo alkalicky aktivovaný materiál?*

Název geopolymer poprvé použil prof. Davidovits (1976). Podle jeho definice je možné geopolymery označit pouze materiál, který vzniká anorganickou polykondenzací tzv. geopolymeračních v důsledku alkalické aktivace aluminosilikátových látek. V NMR spektru ^{27}Al musí mít pík při 55 ppm, hliník smí být jen a pouze v koordinaci 4 a materiál nesmí obsahovat vápník. Pokud nejsou splněny všechny tyto podmínky nesmějí být látky nazývány geopolymery, nýbrž jen pouze alkalicky aktivované látky. Této definici vyhovují tedy pouze materiály získané alkalickou aktivací metakaolinu a částečně materiály získané aktivací popílků s velmi nízkým obsahem vápníku [5].

2.3.2 *Princip*

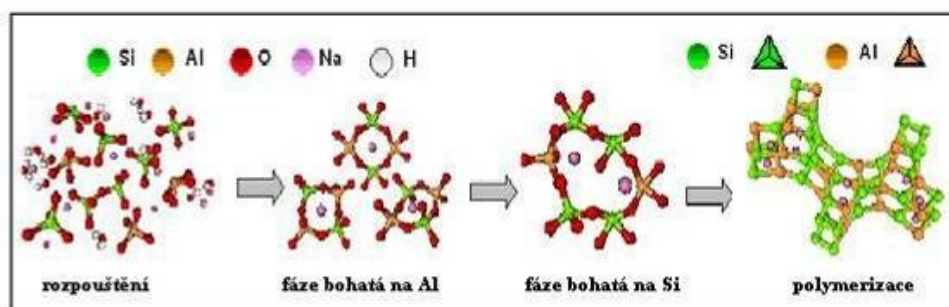
Působením alkalických látek - aktivátorů na aluminosilikátové látky (slínek, struska, popílek, metakaolin atd.) při vysokém pH (nad 13) vzniká gel s 3D strukturou. V první fázi dochází v důsledku silně zásaditého prostředí k rozrušení vazeb Si-O-Si a tím vlastně k hydrolyze skelné fáze aluminosilikátové látky za vytvoření silanolátové skupiny.

Dále dochází k neutralizaci této skupiny pomocí alkalického aktivátoru a tak vedle fází C-S-H a C-A-H vznikají i nové fáze obecného vzorce (N, K, C, M)-A-S-H. Která fáze převážně v materiálu vznikne je závislé na použité vstupní surovině a použitém aktivátoru. Při alkalické aktivaci není produktem reakce portlandit jako je tomu při hydrataci cementu [2].



Obr. 4 – Systém alkalicky aktivovaných materiálů [3]

Od slínku k metakaolinu je nutný vyšší obsah Na_2O (K_2O) v alkalickém aktivátoru a nutnost silnější aktivace (od uhličitanu ke směsím hydroxidu a křemičitanu) [3].



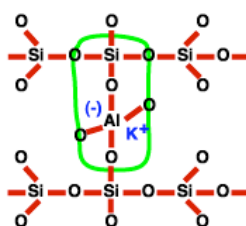
Obr. 5 – Schema alkalické aktivace, vznik N-A-S-H gelu

Produkt	Druh cementu		
	Portlandský cement	Alkalicky aktivovaný struskový cement	Alkalicky aktivovaný popílkový cement
Hlavní	C-S-H	C-A-S-H	N-A-S-H
Vedlejší	portlandit	hydrotalcit, C-A-H	zeolit, N-C-A-H

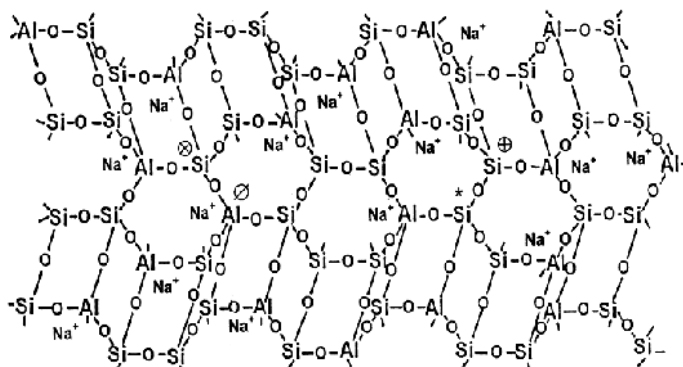
Tab. 1 – Druh reakčních produktů u jednotlivých pojiv

2.3.3 Struktura

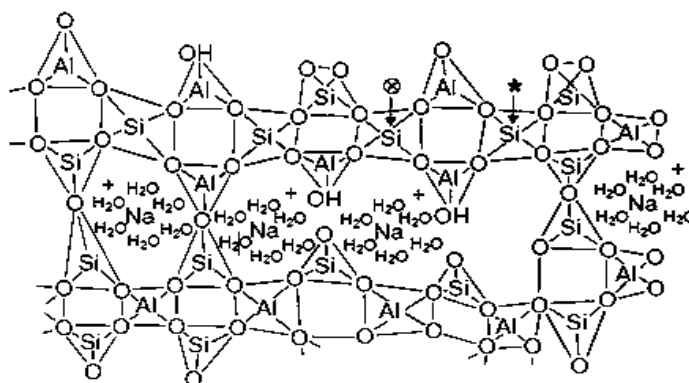
Podle charakteru surovin a podmínek alkalické aktivace mohou vznikat produkty krystalické i amorfní. V určitých podmínkách (přítomnost většího množství vody, hydrotermální podmínky) může docházet ke krystalizaci a vznikají struktury podobné zeolitům. Při nedostatku vody vznikají produkty amorfní a semikrystalické. Síťovité útvary jsou složeny z tetraedrů SiO_4 a AlO_4 vzájemně spojených kyslíkovými můstky.



Obr. 6 – Základní struktura alkalicky aktivovaného polymeru [3]



Obr. 7 – Struktura geopolymery podle prof. Davidovitse [3]



Obr. 8 – Struktura geopolymery navržená prof. Barbosou [3]

Ze struktury je zřejmé, že alkálie nejsou v polymeru pevně vázány, což je i příčina tvorby výkvětů na alkalicky aktivovaných materiálech.

2.4 ALKALICKY AKTIVOVATELNÉ MATERIÁLY - SUROVINY

Pro alkalickou aktivaci je vhodná řada surovin a to jak přírodních (lupky, metakaolin) tak zejména odpadních z energetických a metalurgických provozů (popílky, strusky). K jejich použití je ovšem třeba zajistit dostatečnou kvalitu a především stálost jejich složení, což je obvykle velmi problematické. Možností je i použití dodatečné úpravy odpadních produktů. Toto řešení ale vyžaduje další náklady a úpravy technologií. K alkalické aktivaci se obvykle využívají různé směsi materiálů např. struska + popílek, popílek + metakaolin atd.

2.4.1 Slínkové materiály

Mletý slínek je základní složkou portlandských cementů. Vyrábí se nejčastěji pálením surovin (vápenné jíly a slíny) v rotačních pecích, kde je nutno dosáhnout vysokých teplot až 1450 °C. Tento proces je tedy velice energeticky náročný a představuje i velkou ekologickou zátěž (emise CO₂, NO_x, prach ...). Při výrobě jedné tuny cementu unikne do ovzduší téměř jedna tuna CO₂.

Tyto suroviny se využívají k alkalické aktivaci jen v minimální míře a používají se zejména jako speciální betony pro náročné aplikace (např. beton Pyrament® při opravách letištních drah).

2.4.2 Vysokopecní struska

Granulovaná vysokopecní struska je látka, vznikající rychlým ochlazením strusky, která odpadá jako vedlejší produkt při výrobě surového železa ve vysoké peci. Při produkci 1 tuny železa vzniká 0,6 tun strusky. Chemické složení strusky je velmi proměnlivé, obecně ji tvoří 30 – 50 % CaO, 28 – 40 % SiO₂, 8 – 24 % Al₂O₃ a 1 – 18 % MgO. Z mineralogického hlediska struska obsahuje až čtyřicet minerálů, zejména křemičitanů, hlinitokřemičitanů, hlinitanů a železitanů. Je-li tavenina strusky

rychle zchlazena vodou, zabrání se její krystalizaci, takže se stabilizuje její sklovitý charakter. Zásadním kritériem pro hodnocení kvality strusky je modul zásaditosti M_z :

$$M_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

Je-li $M_z < 1$ jedná se o strusky kyselé, při $M_z > 1$ se jedná o strusky zásadité.

Struska je tvořena převážně skelnou fází s malým podílem krystalických látek [2].

2.4.3 Ocelářská struska

Při výrobě oceli se v Evropě ročně vyprodukuje zhruba 12 miliónů tun ocelářských strusek. Větší část se dále průmyslově využívá. Chemické složení ocelářských strusek ovlivňuje řada parametrů, především složení vsázky a použitá technologie. Ocelářské strusky lze podle způsobu vzniku a chemického složení rozdělit do dvou skupin:

- První skupinou jsou strusky, které se tvoří při zušlechťování oceli v pánvové ocelářské peci, tandemové peci a v peci s elektrickým obloukem. Objem strusky tvoří přibližně 14 % objemu produkce oceli a je také závislý na typu pece. Charakteristickým rysem těchto strusek je vysoký obsah oxidů železa a CaO.
- Druhou skupinou jsou strusky z kyslíkových konvertorů. Objem strusky zaujímá přibližně 1 – 3 % produkce oceli z konvertoru. Tyto strusky jsou charakteristické nízkým obsahem oxidů železa a vysokým obsahem CaO.

Pro další využití je rozhodující jejich fázové složení. V ocelářských struskách jsou přítomny jak samotné oxidy, tak i stabilní křemičitany, hlinitany, ferity a další minerály. Strusky bohaté na vápník obsahují i určité množství alitu, belitu a volného CaO jejichž přítomnost zajišťuje hydraulické vlastnosti ocelářských strusek. Podíl skelné fáze je stejně jako u vysokopečních strusek určen kromě chemického složení i rychlostí chlazení struskové taveniny [2].

2.4.4 Elektrárenské popílky

Elektrárenské popílky jsou odpadní produkty po spalování uhlí zejména při výrobě elektrické energie a tepla v tepelných elektrárnách. Podle použité technologie spalování se dělí na úletové popílky a fluidní popílky.

Vysokoteplotní úletové popílky

Vznikají při spalování paliva při teplotách cca 1400 až 1600°C. Popílek je zachytáván z proudu kouřových plynů pomocí elektrostatických odlučovačů. Z větší části obsahují skelnou fázi a dále pak β - křemen a mulit. V České republice se vyprodukuje ročně okolo 10 mil. tun popílku [6].

Vlastnosti a chemické složení popílků se velmi liší a jsou závislé nejenom na způsobu těžby uhlí a na těžební lokalitě, ale především na způsobu spalování a nebo případném přídavku ještě dalšího paliva do spalovacího procesu.

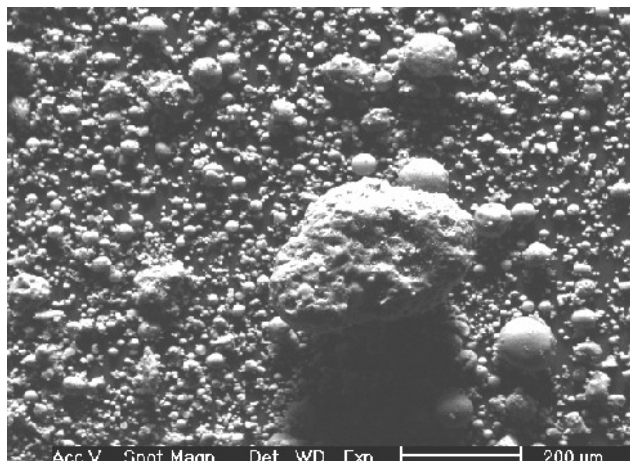
Popílky se rozdělují do tříd :

- třída F – popílky, které mají kyselý charakter, obsahují velmi málo CaO a jsou charakteristické svou reaktivností pouze v alkalickém prostředí
- třída C – popílky, které mají alkalický charakter, obsahují velké množství CaO (až 30 %) a jsou reaktivní už i při samotném míchání s vodou [6]

Další využití popílků:

- průmysl stavebních hmot
- výroba cementu, pórobetonu, lehčeného betonu,...
- využití pro přípravu umělého kameniva
- výroba stabilizátu – vhodný pro revitalizaci krajín
- výplň prostorů ve vytěžených dolech
- rekultivace terénu a odkališť
- komunální stavebnictví – výroba asfaltových a betonových koberců

- zemědělství – prostředek na odkyselení půd, nosič herbicidů
- hutnictví – termoizolační desky
- hornictví – bezcementové pojivo



Obr. 9 – Popílek ze spalování hnědého uhlí [7]

Fluidní popílky

Některé z elektráren a tepláren používají technologii fluidního spalování za atmosférického tlaku. Mleté palivo s přísadou vápence příp. dolomitu se spaluje ve fluidní vrstvě při teplotě 850 °C. V průběhu spalování se z paliva uvolňovaný SO₂ váže na přidávaný vápenec. Vzniká pevný odpad, který je směsí popela, nezreagovaného vápence, volného tzv. měkce páleného vápna, síranu vápenatého, siřičitanu vápenatého a nespáleného paliva. Fluidní popílky mají nízký obsah skelné fáze a vzhledem k nestálosti složení nemají v současné době využití. Použití pro alkalickou aktivaci je komplikované a vzhledem ke svému složení nejsou pro toto použití příliš vhodné.

2.4.5 Pálené jíly – lupek, metakaolin

Jedná se o vysoce reaktivní metastabilní jíly, které jsou získávány tepelnou úpravou (kalcinací) kaolinu a kaolinitických jílu při teplotách 650 – 800 °C. Reaktivita je závislá nejen na kalcinační teplotě, ale také na době kalcinace a druhu vstupní

suroviny. Alkalickou aktivací těchto materiálů vznikají „pravé“ geopolymery, ale vzhledem k jejich vysoké ceně není použití příliš rozšířené a je omezené jen na speciální aplikace. Často se používají jako přísady ovlivňující průběh a vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů na bázi strusek a popílků [8].

2.5 ALKALICKÉ AKTIVÁTORY

Jako aktivátory se nejčastěji používají alkalické křemičitany, hydroxidy nebo uhličitany, ale u některých surovin lze použít i síran sodný, hlinitan sodný, síran hlinito-draselný atd. Nejčastěji je při alkalické aktivaci využíváno směsí z více druhů aktivátorů ve formě roztoků.

2.5.1 Uhličitany - soda a potaš

Soda (potaš) se v současné době vyrábí především pomocí Solvayovy metody, kde základní surovinou je chlorid sodný (draselný), který se následně sytí oxidem uhličitým a amoniakem. Jde o krystalické látky jejichž rozpustěním ve vodě vznikne silně alkalický roztok použitelný pro alkalickou aktivaci slínku případně strusky [5].

2.5.2 Vodní sklo

Vodní sklo je zakalená viskózní kapalina křemičitanu alkalického kovu, bez zápachu, s pH mezi 11 – 13, o koncentraci obvykle 34 – 38 %. Barva je ovlivněna složením výchozí suroviny a může být nažedlá, nazelenalá až namodralá. Složení vodního skla bývá nejčastěji charakterizováno (křemičitým) silikátovým modulem M_s :

$$M_s = \frac{SiO_2}{M_2O} \quad M = Li, Na \text{ nebo } K$$

Vyrábí se ze sodnokřemičité frity (draselnokřemičité frity), která se připraví tavením křemenného písku se sodou, případně potaší ve vanové peci při teplotách 1 300 – 1 400 °C. Rozpouštěním frity ve vodě za vyššího tlaku a teploty vzniká roztok vodního skla [5].

2.5.3 Hydroxidy

Dříve se hydroxid sodný (draselný) vyráběl tzv. kaustifikačním procesem z vodného roztoku uhličitanu sodného (draselného) působením mírného nadbytku hydroxidu vápenatého, přidávaného ve formě suspenze hašeného vápna. Vznikal velmi málo rozpustný uhličitan vápenatý, který se oddělil sedimentací, případně filtrací. Odpařením vody ze zbývajících roztoku se získal surový hydroxid sodný (draselný).

V současné době se veškerý hydroxid sodný (draselný) vyrábí elektrolytickým rozkladem roztoku chloridu sodného (draselného) [5].

2.6 BLIŽŠÍ POPIS ALKALICKY AKTIVOVANÝCH MATERIÁLŮ

2.6.1 Alkalicky aktivované slínkové materiály

Přestože tyto materiály obecně nejsou příliš rozšířeny a jejich využití je omezeno pouze pro speciální aplikace (žárovbetony, opravy dálnic, letištních drah atd.) nalezly nezastupitelnou úlohu v průmyslu a stavebnictví.

V České republice se dlouholetým výzkumem a vývojem alkalicky aktivovaných bezsádrovcových cementů tzv. BS cementů věnovalo pracoviště Ústavu skla a keramiky na VŠCHT v Praze. Tyto materiály jsou vyrobeny z velmi jemně mletého slínku příp. s přísádkem strusky s vyšším měrným povrchem a aktivace je prováděna roztoky uhličitanů. Uvedené materiály jsou rychletuhnoucí a rychle tvrdnoucí a dosahují vysokých pevností přes 100 MPa. Jejich přednostmi jsou vysoká odolnost vůči agresivnímu prostředí, tuhnutí i při záporných teplotách, žáruvzdornost [3].

Obdobné druhy cementů byly vyvinuty i v zahraničí např. ve Finsku (tzv. F cement) a v USA cement s označením Pyrament®.

Pyrament® byl vyvinut v 80. letech 20. století a dosáhl největších úspěchů a největšího využití. Jedná se o portlandský cement s vysokým měrným povrchem s přísádkem popílku, metakaolinu a mleté strusky. Aktivace se provádí roztokem uhličitanů.

Tento cement vykazuje velmi vysoké počáteční pevnosti, z tohoto důvodu je proto hojně používán ženijními vojsky armády USA. Toto je důležité zejména při opravách přistávacích ploch např. AFB Charleston - Jižní Karolíně a nebo při nutnosti jejich rychlé výstavby např. blesková výstavba přistávacích ploch při válce v Perském zálivu.

Pevnost v tlaku je po 2 hodinách více než 13 MPa, po 4 hodinách 17 MPa, po 24 hodinách téměř 40 MPa a po 28 dnech kolem 80 MPa.



Obr. 10 – Pyrament – použití a aplikace

Tento typ betonu má také vynikající mrazuvzdornost (více než 300 zmrazovacích cyklů), malé smrštění a vysokou chemickou odolnost [9].

2.6.2 Alkalicky aktivovaná struska

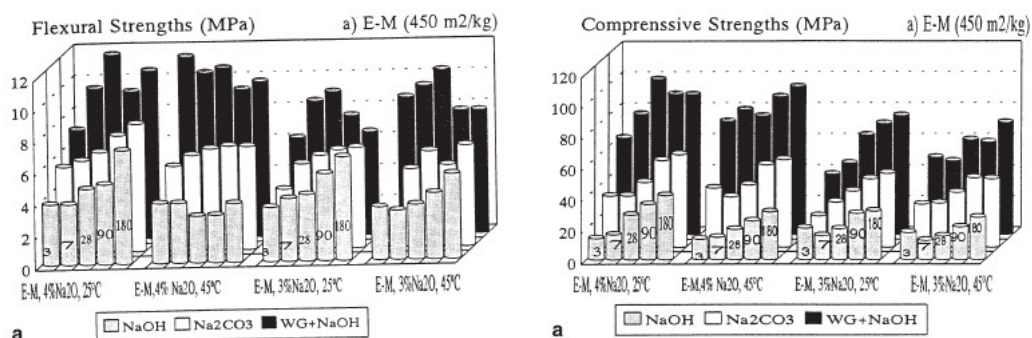
Nejvhodnější a nejlépe prostudovanou variantou alkalicky aktivovaných materiálů je aktivace vysokopecní granulované strusky. Výzkumu tohoto druhu materiálu se v České republice věnuje zejména VUT Brno ve spolupráci s ŽPSV a.s. Brno. V zahraničí je to tým pod vedením prof. Krivenka z Ukrajiny, případně tým pod vedením A. Fernández-Jiméneze ve Španělsku. Tento druh materiálu se využívá ve stavebnictví již od 60. let 20. století a to zejména v Rusku a Ukrajině, kde je z těchto materiálů postaveno několik objektů [3].

Vysokopecní granulovaná struska je charakterizována poměrem sklovité a krystalické fáze a chemickým a mineralogickým složením. Pro výrobu pojiv

se používá struska rychle chlazená, tedy převážně amorfního charakteru. Při aktivaci strusek v silně zásaditém prostředí není třeba dodržet přísné požadavky týkající se obsahu sklovité fáze a chemického složení, tak jako je tomu ve směsných cementech. Pro aktivaci strusky bylo již v 18. století použito vzdušné vápno, které reaguje stejně jako hydroxid vápenatý vznikající hydratací cementu.

V současné době se nejčastěji používají roztoky křemičitanů, uhličitanů nebo hydroxidů alkalických kovů (nejčastěji sodíku a draslíku). Alkalicky aktivované strusky vytvářejí vysokopevnostní materiály, jejichž pevnost je závislá na druhu strusky, jejím složení a měrném povrchu, na použitém aktivátoru a na způsobu uložení materiálu při vytváření pevné struktury [10].

Tyto materiály vykazují poměrně vysoké pevnosti (v tlaku po 28 dnech i více než 60 MPa). Hlavním hydratačním produktem aktivace je C-S-H gel. Minoritní složkou jsou fáze obecného vzorce (N, K, C, M)-A-S-H.



Obr. 11 – Porovnání vlivu množství alkalického aktivátoru a vlivu teploty při aktivaci strusky – pevnost v tahu (vlevo) a pevnost v tlaku (vpravo) [11]

Kombinací vhodných příměsí (popílek, metakaolin, vápenec) a vhodného složení aktivátoru, lze zajistit příznivý vývoj počátečních pevností, což je pro použití v betonářské praxi důležité. Oproti betonům z portlandských cementů vykazují tyto materiály poněkud vyšší smrštění, které obvykle vede ke vzniku mikroskopických trhlinek [12].

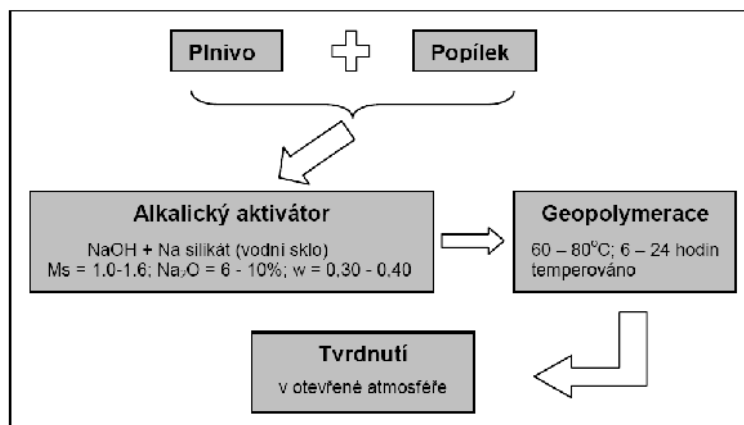
2.6.3 Alkalicky aktivovaný popílek

Výzkum využití úletových popílků z velkých topenišť probíhá od roku 2003 na Ústavu skla a keramiky VŠCHT Praha ve spolupráci s Katedrou technologie staveb ČVUT FS v Praze. Na základě alkalické aktivace úletového popílku byl vytvořen nový materiál, ve kterém je jako pojivo použit aktivovaný úletový popílek. Tento materiál dostal příhodný název POPbeton®.

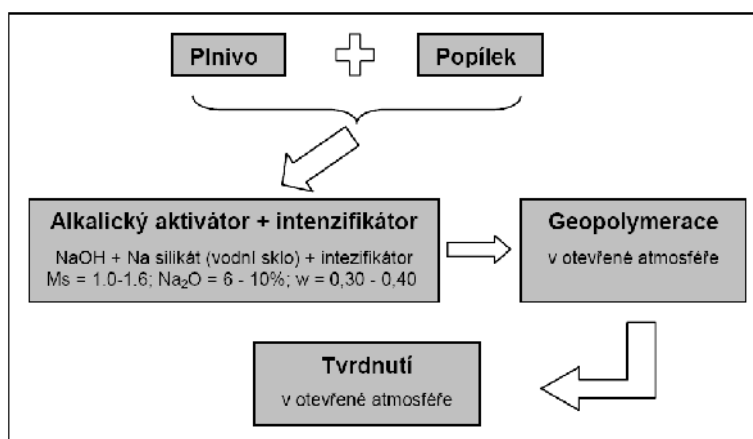
Hlavní výhodou tohoto materiálu je využívání odpadní suroviny a tím snižování ekologické zátěže životního prostředí. K procesu alkalické aktivace je třeba využít silných zásad a tak je jako aktivátor použita směs roztoků vodního skla a hydroxidů. Pro urychlení procesu tvrdnutí vzorků je třeba technologicky náročné temperování, což je pro stavební průmysl finančně náročné a nebo zcela neproveditelné. Proto byl vypracován postup alkalické aktivace za použití intenzifikátorů tuhnutí, kdy již temperování není potřebné.

Vývoj pevnosti těchto materiálů je pozvolný a probíhá až do stého dne stáří (pevnost v tlaku po 28 dnech dosahuje 40 - 60 MPa). Vhodné přísady pro navození počátečních pevností jsou zejména struska, cement, vápno a vápenec. Z hlediska konečných pevností se osvědčil přídavek mikrosiliky a metakaolinu [4].

Materiály syntetizované alkalickou aktivací hnědouhelného popílku jsou amorfní, porézní a obsahují jako dominantní fázi typu (N, K)-A-S-H. Slabá vazba sodíku a draslíku ve struktuře alumosilikátového polymeru vede k výskytu výkvětů ve vlhkém prostředí. Použitím aktivátoru s draselnými ionty se snižuje pevnost, ionty draslíku mají i vyšší vyluhovatelnost než ionty sodné. V porovnání se zahraničními popílkami jsou popílkami z ČR méně reaktivní, což způsobuje nižší počáteční pevnosti směsí [7].

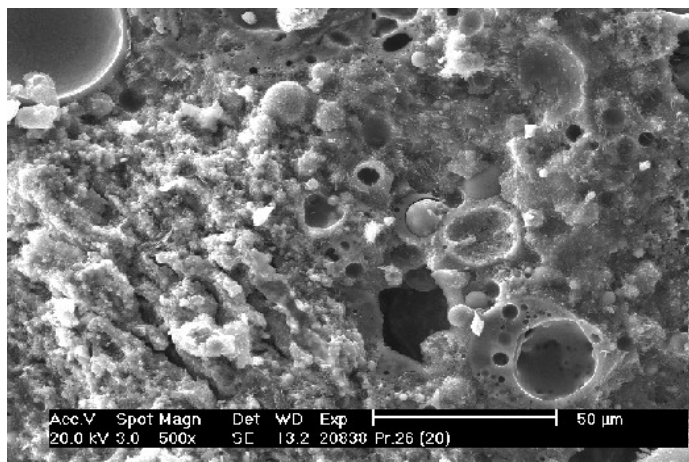


Obr. 12 – Schema výroby s temperací [4]



Obr. 13 – Schema výroby bez temperace s použitím intenzifikátoru [4]

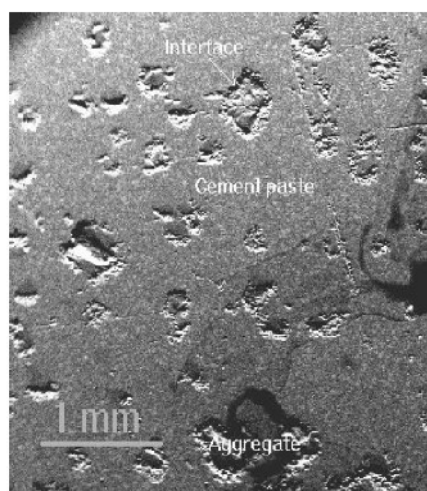
Alkalicky aktivovaný materiál na bázi popílku je porézní materiál. Celková pórovitost je dosti vysoká a dosahuje podle podmínek přípravy 20 – 40 %. Jedná se především o nano a mikro póry [7].



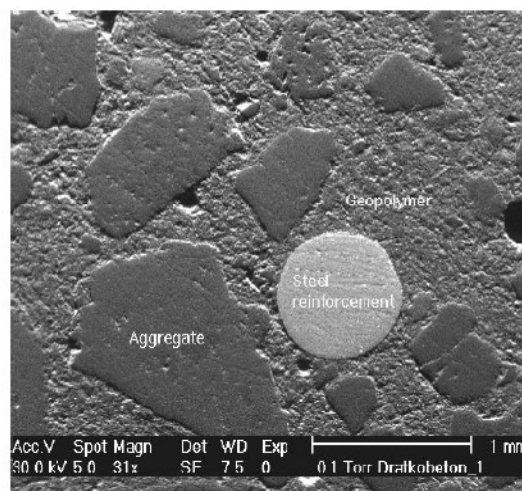
Obr. 14 – Lomová plocha alkalicky aktivované popílkové kaše (SEM) [7]

Tyto materiály vykazují i vynikající adhezi k rozličným materiálům. Čehož je možné využít k přípravě různých ochranných nátěrů betonů, betonových výrobků i kovů.

Na přiložených snímcích z elektronového mikroskopu je ukázáno navázání pojiva na kamenivo, případně ocelovou mikrovýztuž. V porovnání s klasickým betonem na bázi portlandského cementu je zřejmá absence přechodové mezivrstvy mezi maticí a kamenivem, případně výztuží.



Obr. 15

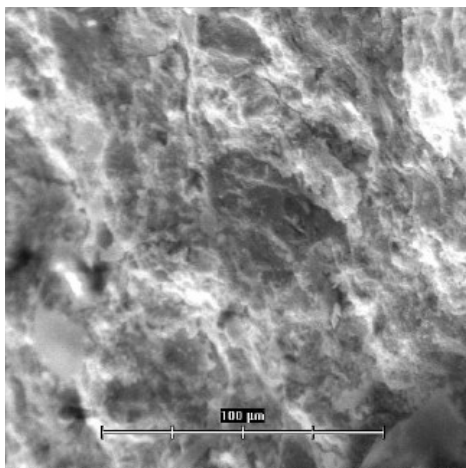


Obr. 16

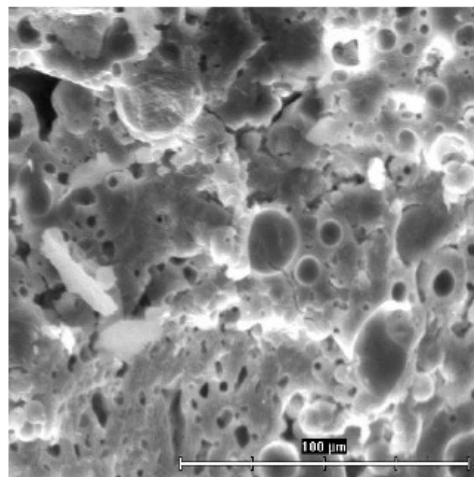
Obr. 15 – Beton z portlandského cementu [13]

Obr. 16 – Popílkový alkalicky aktivovaný beton [13]

Porovnání struktury cementového a popílkového betonu:



Obr. 17



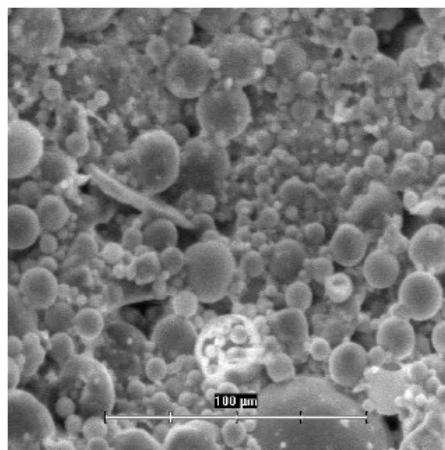
Obr. 18

Obr. 17 – Struktura lomu CEM I 42,5 [14]

Obr. 18 – Alkalicky aktivovaný popílkový beton [14]



Obr. 19



Obr. 20

Obr. 19 – Struktura volného povrchu CEM I 42,5 [14]

Obr. 20 – Alkalicky aktivovaný popílkový beton [14]

2.6.4 Alkalicky aktivovaný metakaolin

Metakaolin se v současné době používá nejen při výrobě alkalicky aktivovaných materiálů, ale i jako přísada do klasických betonů na bázi portlandského cementu. Studiu možností uplatnění metakaolinu jako částečné náhrady cementu v betonech a výzkumu vlastností betonů s použitým metakaolinem je ve světě věnována v současnosti velká pozornost. Důvodem této skutečnosti je fakt, že přídavek metakaolinu povětšinou kladným způsobem ovlivňuje výsledné fyzikální a mechanické vlastnosti. Použitím metakaolinu dochází ke snížení propustnosti betonu a rychlosti pronikání škodlivých iontů (především síranových a chloridových) a tím zvýšení trvanlivosti betonu a zvýšení pevnosti [15].

Většímu uplatnění metakaolinu ve výrobě alkalicky aktivovaných materiálů, „pravých“ geopolymérů, brání jeho vysoká cena způsobená nutností kalcinace kaolínu na poměrně vysoké teploty a nutností působení této teploty po dlouhou dobu.

Na přípravu těchto materiálů je nutné použít vysoce alkalické aktivátory tj. hydroxidy případně směsi hydroxidu a vodního skla. Vzniklé materiály vykazují vysoké pevnosti v tlaku až kolem 80 MPa. Jejich využití je prozatím ve stádiu dalších výzkumů. Metakaolin se přidává do alkalicky aktivovaných strusek a popílků jako regulátor a urychlovač tvrdnutí. Přímé použití geopolymérů v praxi není velké, používají se na výrobu umělého kamene - umělých pískovců pro dekorativní a restaurátorské účely, výrobu past, tmelů a malt pro opravu historických objektů. Samostatné je využití geopolymérů na ohnivzdorné a žáru odolné aplikace (pece, letecký a automobilový průmysl), impregnaci dřevěných výrobků na zvýšení ohnivzdornosti, výrobu speciálních ochranných nátěrů na beton a ocel. Problémem při tomto použití stejně jako u jiných alkalicky aktivovaných materiálů jsou vznikající výkvěty solí, které kazí estetický vzhled [8].



Obr. 21



Obr. 22

Obr. 21 – Geopolymer – umělý pískovec s výkvěty [8]

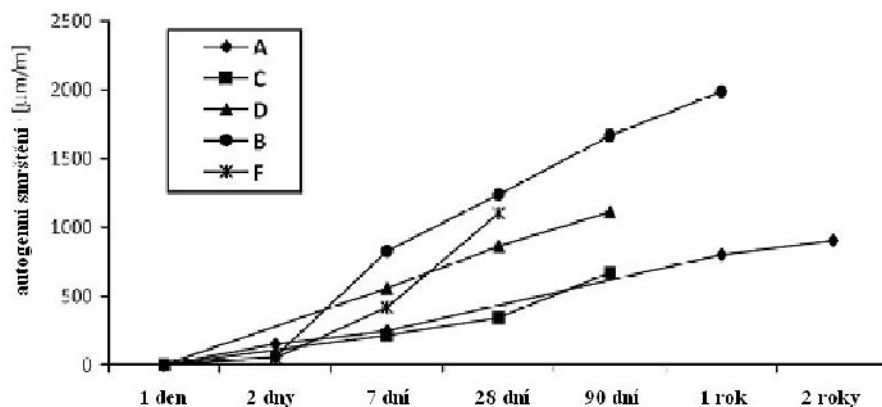
Obr. 22 – Výrobky z geopolymery – umělého pískovce [8]

2.7 PŘEHLED VLASTNOSTÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH MATERIÁLŮ

V této kapitole budou uvedeny výsledky získané studiem vlastností alkalicky aktivovaných materiálů a to zejména materiálů na bázi strusky a popílku. Tyto materiály jsou v současné době středem zájmu díky jejich dostupnosti, ceně a vlastnostem umožňujícím jejich využití ve stavebnictví a alespoň částečném nahrazení klasických betonů z portlandských cementů. Většina vlastností je silně závislá nejen na složení použitých surovin, zejména strusky a alkalického aktivátoru, ale je ovlivněna i použitím dalších přísad.

2.7.1 Smrštění

Materiály připravené alkalickou aktivací strusek vykazují větší míru smrštění v porovnání s klasickými betony na bázi portlandského cementu. Toto smrštění je ovlivněno i použitím přísad jako je úletový popílek a metakaolin. Použitím popílku dochází u vzorků ke snížení smrštění, zatímco metakaolin má vliv spíše na výslednou pevnost. Smrštění lze snížit také použitím látek na bázi propylenglykolu - tyto ale mají negativní vliv na počáteční pevnosti alkalicky aktivovaných struskových betonů [16].



Graf. 1 – Smrštění alkalicky aktivovaných struskových směsí [16]

A – směs struska + popílek 2:1, poměr $(K_2O+Na_2O)/SiO_2 = 70/30$

B – samotná struska, poměr $(K_2O+Na_2O)/SiO_2 = 70/30$

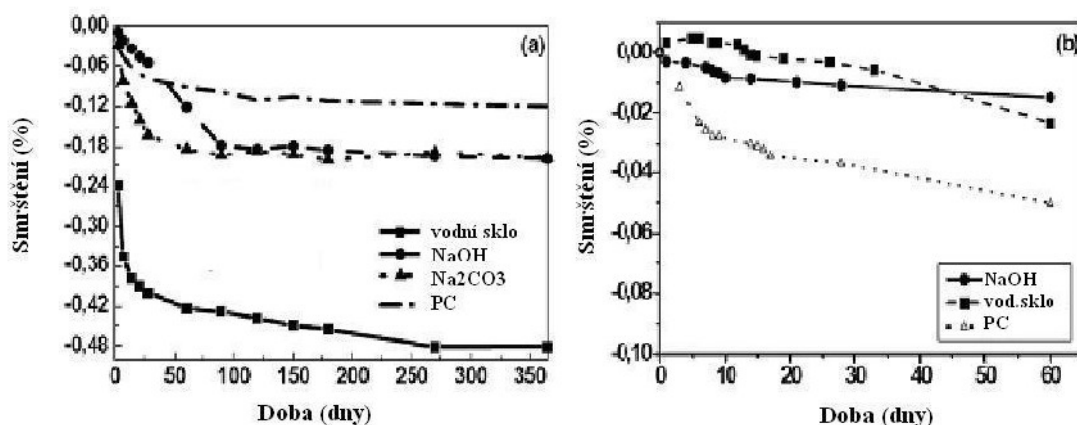
C - směs struska + popílek 2:1, poměr $(Na_2O)/SiO_2 = 50/50$

D - směs struska + popílek 2:1, poměr $(K_2O+Na_2O)/SiO_2 = 50/50$

F - směs struska + metakaolin 9:1, poměr $(K_2O+Na_2O)/SiO_2 = 60/40$

Stejně výsledky byly potvrzeny provedenými výzkumy různých týmů - ve Španělsku tým A. Fernández-Jiméneze a na Ukrajině prof. Krivenka.

U popílkových alkalicky aktivovaných betonů je smrštění oproti portlandskému cementu a strusce nižší, což je dáno jednak jiným mechanismem aktivace, ale také vznikem rozdílných produktů.



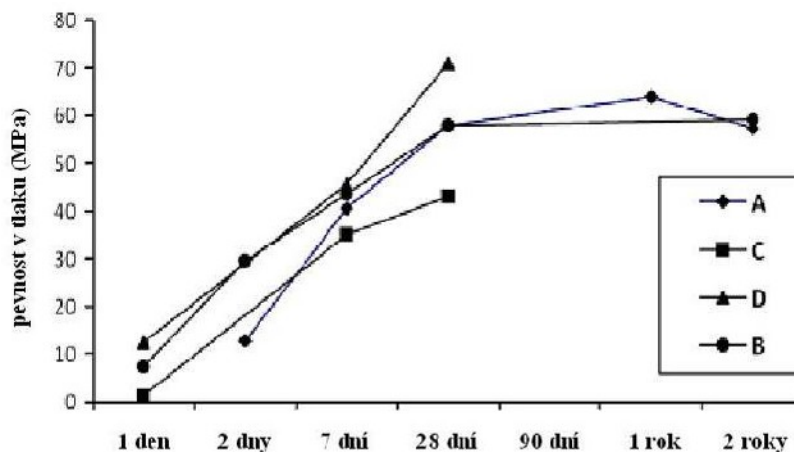
Graf. 2 – Porovnání smrštění alkalicky aktivované strusky (a) a popílku (b) s portlandským cementem [17]

(a) – malta struska + písek 1:2, 25 °C, 4% Na₂O, vodní součinitel 0,4

(b) – malta popílek + písek 1:2, temperace 20h/ 85 °C, 8% Na₂O, vodní souč. 0,35

2.7.2 Pevnost

Vývoj pevností u struskových betonů je obvykle ukončen po 28 dni a dále se již mění nepatrně. Oproti tomu materiály z popílkových betonů vykazují plynulý růst pevností až do asi stého dne, poté je již další vzrůst také pozvolný. U strusky je patrný vzrůst pevností při použití směsného aktivátoru tj. hydroxidu draselného a sodného vodního skla, oproti pevnostem naměřeným při použití pouze sodného a nebo pouze draselného aktivátoru. U popílku je tento trend opačný a při použití draselných aktivátorů obvykle pevnost klesá [7, 16].



Graf. 3 – Vývoj pevností v tlaku alkalicky aktivovaných struskových směsí [17]

A – směs struska + popílek 2:1, poměr $(K_2O+Na_2O)/SiO_2 = 70/30$

B – samotná struska, poměr $(K_2O+Na_2O)/SiO_2 = 70/30$

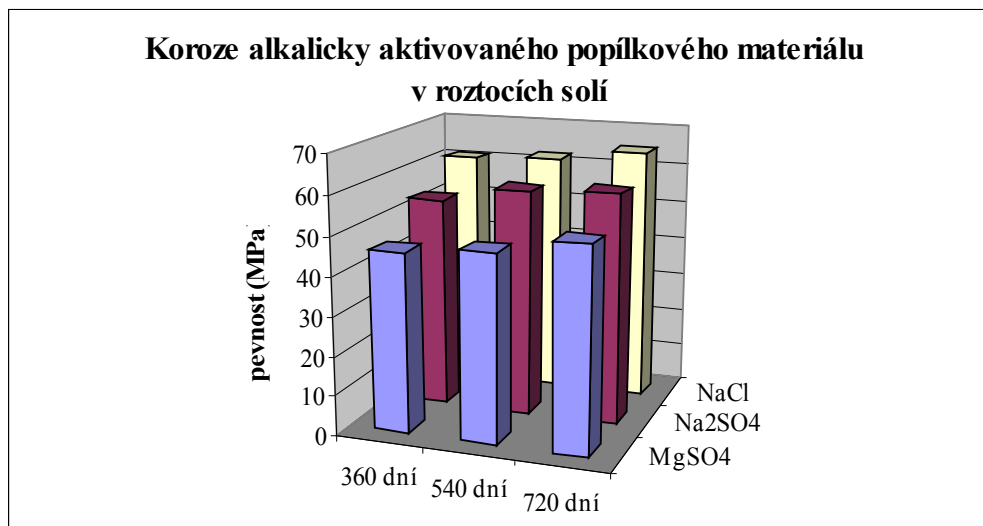
C - směs struska + popílek 2:1, poměr $(Na_2O)/SiO_2 = 50/50$

D - směs struska + popílek 2:1, poměr $(K_2O+Na_2O)/SiO_2 = 50/50$

2.7.3 Chemická odolnost

Chemická odolnost alkalicky aktivovaných materiálů je v porovnání s betony z portlandského cementu výrazně vyšší, což je zapříčiněno výskytem jiných produktů reakcí přítomných v matici. Tyto materiály dlouhodobě odolávají roztokům solí (chloridy, sírany), kterým betony z portlandského cementu odolávají velmi málo a nebo vůbec ne.

Materiály z alkalicky aktivovaného popílku jsou odolnější než materiály na bázi strusky, což je opět způsobeno jejich jinou stavbou. Vzorky připravené z alkalicky aktivovaných popílkových směsí i při dlouhodobém uložení v solných roztocích, vykazovaly stálý růst pevností [3].



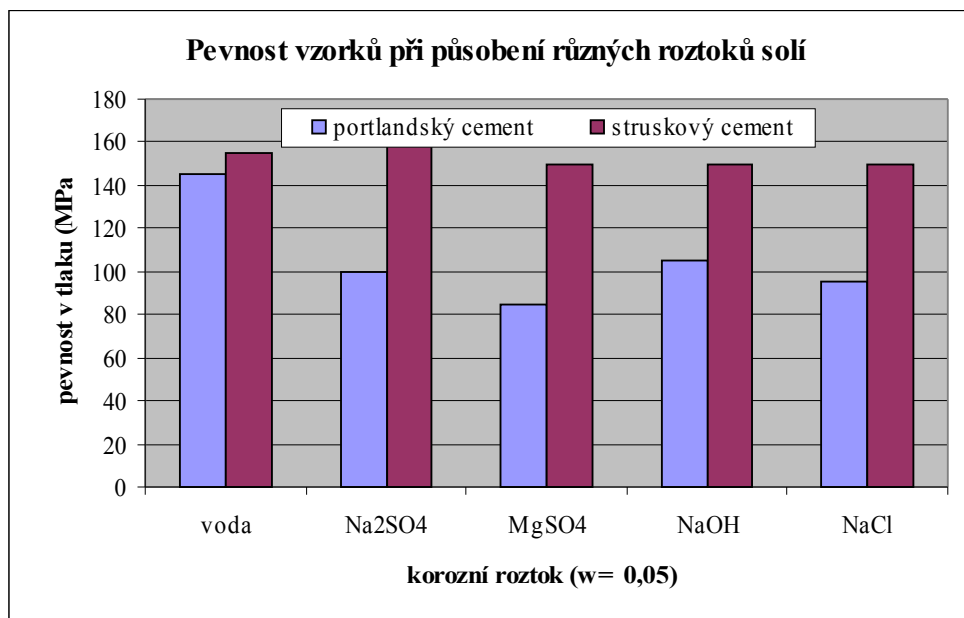
Graf. 4 – Koroze alkalicky aktivovaného popílkového materiálu v roztocích solí [3]



Obr. 23 – Vzhled vzorků po dvouletém působení solných roztoků
- vlevo NaCl 16,4 %, uprostřed Na₂SO₄ 4,4 %, v pravo MgSO₄ 5 % [3]

V kyselém prostředí dochází k depolymeraci aluminosilikátové matrice následkem uvolnění kyseliny křemičité a výměně iontů Na⁺ a K⁺ ionty vodíkovými nebo oxoniovými (reakce jsou podobné jako u kyselinové koroze skel). Vlastnosti geopolymerních materiálů se zhoršují díky vzniku mikrotrhlin, zatímco alkalicky aktivované materiály zhoršují své vlastnosti hlavně kvůli krystalizaci zeolitů a vzniku křehké pórovité struktury. V porovnání s portlandskými betony je odolnost vyšší z důvodu nevznikajícího portlanditu při reakci, který je kyselinami snáze napadnutelný [18].

Porovnání odolnosti malt z portlandského cementu a alkalicky aktivovaných struskových malt ukazuje následující graf – Graf. 5 [19].



Graf. 5 – Porovnání pevností betonu na bázi portlandského cementu a alkalicky aktivované strusky při působení korozních roztoků

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že jsou tyto materiály vhodné pro použití v prostředí, kde dochází k výskytu solí, jako jsou například části vozovek a mostů exponované posypovými solemi a objekty vystavené působení mořské vody [20].

2.7.4 Výkvěty

Výkvěty u alkalicky aktivovaných materiálů jsou způsobené jejich strukturou. Sodné a draselné ionty nejsou pevně vázány uvnitř struktury (C-S-H gelu v případě strusky a N-A-S-H gelu v případě popílků a metakaolinu) a může tak vlivem vlhkosti dojít k jejich snadnému transportu k povrchu materiálu a k jejich následnému vyloučení do roztoku, případně vyloučení na povrchu jako výkvětu.

Z hlediska výkvětovnosti se jako jednoznačně výhodnější ukazuje použití draselných nebo draselnosodných aktivátorů. Značný je zejména vliv NaOH, což je způsobeno reakcí sodných iontů se vzdušným oxidem uhličitým [21].

Při této reakci vznikají hydratované produkty, zejména soda, nejčastěji jako dekahydrát, případně směsné soli sírany-uhličitanu sodné. Tyto produkty jsou bílé krystalické látky a vlivem přítomnosti hydratačních vod nabývají na objemu. Oproti tomu při použití draselných aktivátorů dochází k vyloučení uhličitanu draselného, který nemá krystalickou vodu, nenarůstá do objemu a výkvěty proto nejsou na povrchu vidět. Tvorba výkvětů je pouze estetickou záležitostí a nebyl prokázán vliv na pevnosti materiálů [3].



Na ₂ O [%]	100	83	76	17	0
K ₂ O [%]	0	17	24	83	100

Obr. 24 – Porovnání vzhledu a množství výkvětů při použití různých aktivátorů

$$(K_2O+Na_2O+SiO_2) = 8 \%, (Na_2O+K_2O)/SiO_2 = 80/20 [16]$$

Výkvěty prozatím nelze běžným a jednoduchým způsobem z alkalicky aktivovaných materiálů odstranit zcela. Lze je pouze omezit správnou volbou aktivátoru a přísad. Úplné odstranění je možné výpalem vzorků na vysoké teploty (u popílkových materiálů více než 800 °C), kdy dojde k fixaci sodných a draselných iontů uvnitř matrice, podobně jako je tomu u zeolitů. Druhou možností je úplné vyloučení iontů ven z matrice [21].

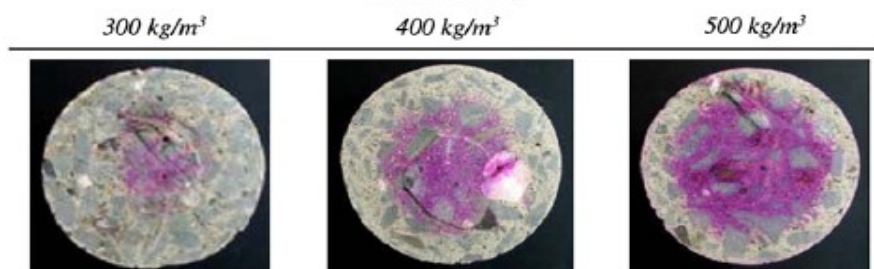


Obr. 25 – Výkvěty na POPbetonu® – vlevo nevypálený vzorek, vpravo vypálený na 600 °C - zřetelná výrazná redukce výkvětů [16]

2.7.5 Karbonatace

Vlivem malého, případně vůbec žádného obsahu vápenatých iontů dochází u alkalicky aktivovaných materiálů v porovnání s materiálem na bázi portlandského cementu k rychlejší karbonataci. U směsi z portlandského cementu dochází při karbonataci ke vzniku nerozpustného uhličitanu vápenatého, který další karbonataci dále zpomaluje. Toto u alkalicky aktivovaných materiálů není možné, jelikož neobsahují tolik vápníku a reakcí se vzdušným CO₂ vznikají ve vodě snadno rozpustné uhličitany alkalických kovů, které mohou být vylouženy nebo vyloučeny ve formě výkvětů (karbonatace nejspíše probíhá ve vlhkém prostředí).

Karbonataci dochází ke snížení pH v matrici a tím ke zvýšení možnosti koroze vložené výztuže, jelikož může působením např. chloridových iontů dojít k její depasivaci [22].



Obr. 26 – Fenolftaleinový test - míra karbonatace alkalicky aktivovaného struskového betonu v závislosti na množství použité strusky ve směsi [22]

2.7.6 *Stabilita ocelové výztuže*

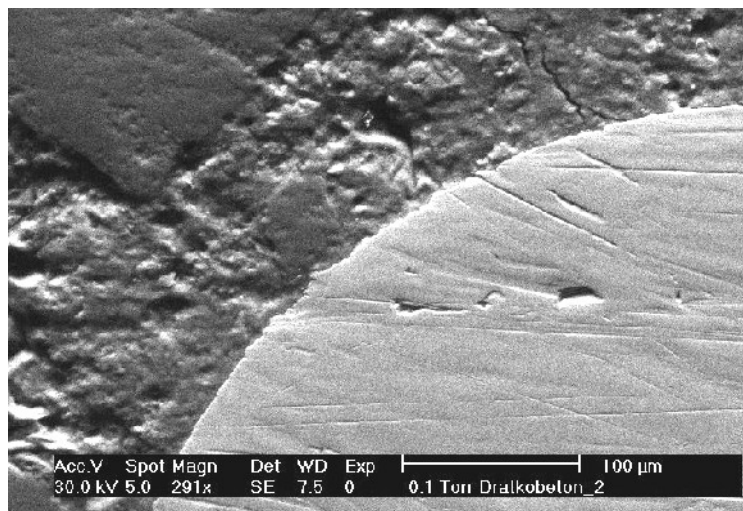
Stabilita ocelové výztuže je rozdílná při použití různých alkalicky aktivovaných systémů. Vzhledem k vysokému pH v matrici ($\text{pH} > 13$) je ocelová výztuž dostatečně chráněna pasivační vrstvou. Vlivem snadné vyloužitelnosti iontů Na^+ případně K^+ může dojít k výraznému snížení pH a výztuž může být pak snáze atakována např. chloridovým aniontem a může snáze podlehnout korozi.

U popílkových betonů vzhledem k absenci vápníku v matrici dochází k tvorbě snadno rozpustných uhličitánů, u struskových betonů je časem únik alkalických iontů zpomalován vznikem nerozpustného uhličitánu vápenatého. Výztuž v betonech na bázi portlandského cementu je chráněna přítomným málo rozpustným portlanditem, který udržuje pH na dostatečné úrovni pro zachování pasivační vrstvy vložené výztuže. Hlavními korozními produkty jsou magnetit (Fe_3O_4), wüstite (FeO) a goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) [22, 23].

Přepočítaná rychlost koroze pro ocel a geopolymery na bázi metakaolinu při dlouhodobých měřeních (18 – 20 měsíců) dosahuje hodnot nižších než 0,002 mm za rok při uložení v suchém prostředí, při uložení ve vlhku tato hodnota stoupá na 0,004 mm za rok [24].

Alkalicky aktivované materiály v porovnání s materiály portlandského cementu mají výrazně nižší difuzní koeficient pro chloridové ionty, které nejagresivněji atakují výztuž v betonu a způsobují její korozi. Hodnoty koeficientů u alkalicky aktivovaných materiálů jsou cca. 2 – 4x nižší [25].

Toto bylo potvrzeno při zkouškách odolnosti výztuže umístěné v alkalicky aktivovaném slínkovém betonu Pyrament. Po tříletém působení roztoku NaCl (3,5 %) nebyly na použité oceli znatelné žádné produkty koroze a beton tak prokázal svou výbornou odolnost [26].



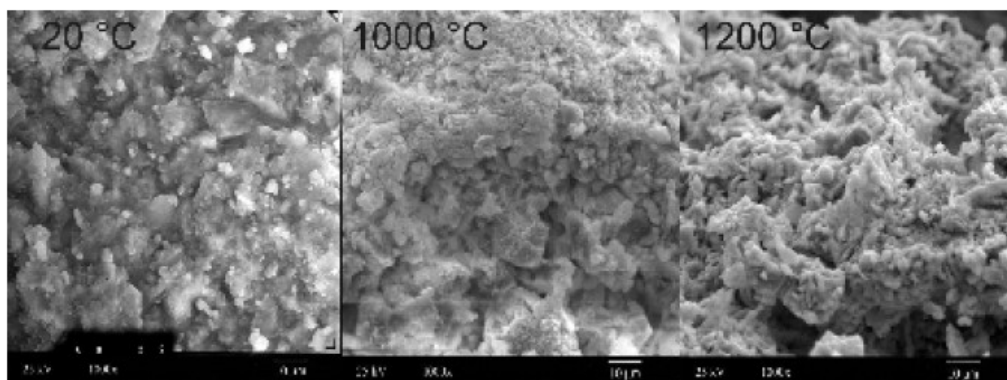
Obr. 27 – Dokonalé přilnutí matrice POPbetonu® k ocelové mikrovýztuži (SEM) [14]

2.7.7 Mrazuvzdornost

Mrazuvzdornost alkalicky aktivovaných materiálů je stejně jako mrazuvzdornost materiálů na bázi portlandského cementu závislá na míře pórovitosti resp. míře provzdušnění betonu. Významný vliv má složení a množství alkalického aktivátoru případně přísadky popílku. U struskových betonů degradace při zmrazování startuje v krycí vrstvě, kde dochází k tvorbě mikroskopických trhlinek. Během zmrazovacích cyklů ve vodném prostředí nebyl pozorován žádný rozpad ani deformace vzorků. Pevnost po 150 zmrazovacích cyklech klesla cca. na 70 % pevnosti vzorků testovaných za standardních podmínek [27].

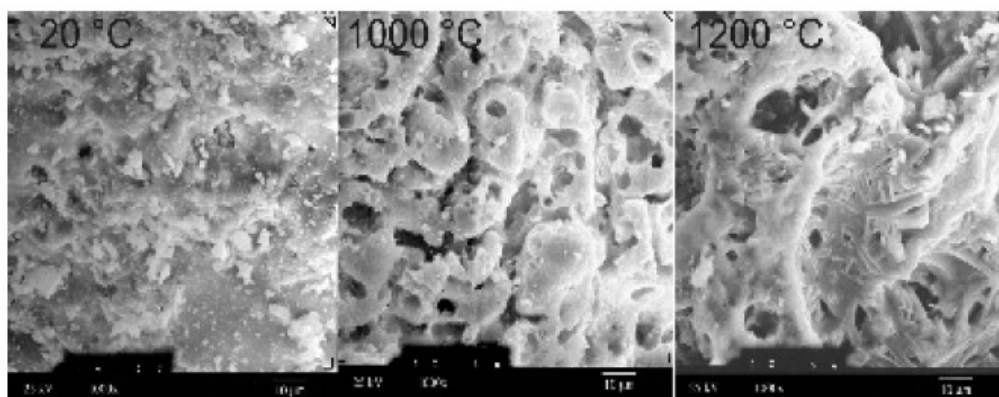
2.7.8 Tepelná odolnost

Zahřívání hydraulických pojiv na vysoké teploty je provázeno změnami mikrostruktury, kdy u slínkového materiálu dochází nejprve k uvolnění fyzikálně vázané vody (teplota do 300 °). Poté nastává postupná dehydratace a rozklad C-S-H gelu a dojde ke zvýšení porozity a snížení pevností.



Obr. 28 – Změny v mikrostruktúře portlandského pojiva po tepelném namáhání [28]

Alkalicky aktivované struskové pojivo má počáteční průběh tepelného rozkladu obdobný, ale mikrostruktura je zcela odlišná. Alkalicky aktivované pojivo má při 800 °C amorfni houbovitou strukturu s velkými póry.



Obr. 29 – Změny v mikrostruktúře alkalicky aktivovaného struskového pojiva po tepelném namáhání [28]

Nad touto teplotou pak dochází k tvorbě nové krystalické fáze, což má za následek výrazný nárůst pevností. Při 1200 °C pak dochází ke vzniku keramické vazby, což má za následek extrémní nárůst pevností. U slínkového pojiva dochází v rozmezí teplot 200–1000 °C prakticky k lineárnímu poklesu pevností. Při 1200 °C je patrné mírné zvýšení, které je způsobeno tvorbou nových krystalických fází [28].

Všechna alkalicky aktivovaná pojiva ať na bázi slínku, strusky, popílku nebo metakaolinu se vyznačují vysokou odolností proti vysokým teplotám a ohni. Tuto vlastnost materiály z portlandského cementu postrádají. Využitím těchto betonů lze pak dosáhnout vyšší stability stavebních konstrukcí, všude tam, kde hrozí zasažení ohněm a vysokými teplotami (tunely, budovy atd.). Materiály na bázi slínku (Pyrament®) a metakaolinu („pravé“ geopolymery) jsou využívány jako žárobetony.



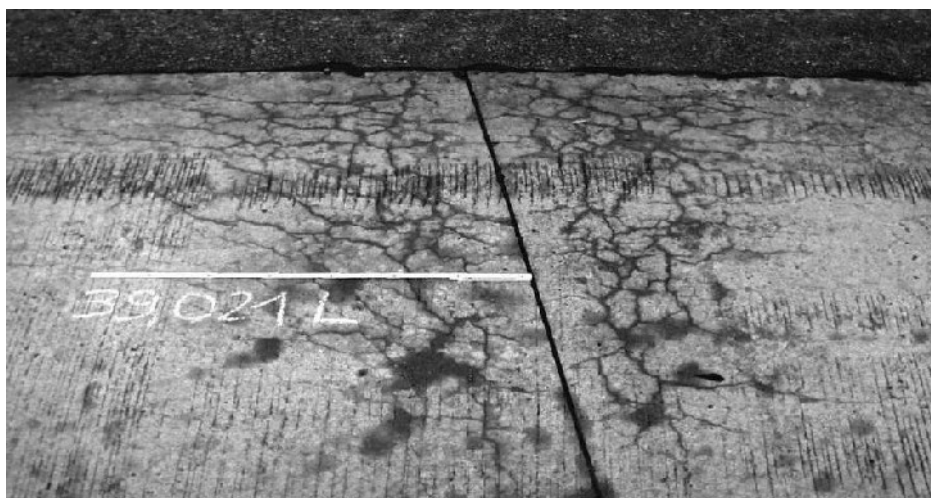
*Obr. 30 – Alkalicky aktivované popílkové malty
– zleva výpal na 20, 200, 400, 600, 800 a 1 000 °C [5]*

2.7.9 Alkalicko-křemičitá reakce

Poprvé byl tento problém popsán u betonů v USA roku 1937, kde se objevily trhliny v dálnici. Následně byl tento způsob porušení betonových konstrukcí popsán v celé řadě zemí včetně České republiky. Alkalicko-křemičitá reakce je souhrn fyzikálně chemických reakcí mezi kamenivem obsahující reaktivní formy $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ (opál, chalcedon, rohovec, pazourek atd.) a pojivovou maticí betonu obsahující alkálie. V průběhu složitých reakcí na rozhraní kameniva a matrice dochází ke vzniku gelu, který se rozpíná a vyvolává silné expanzní tlaky, které jsou vyšší než pevnost v tahu materiálu. Následkem toho dojde k porušení a vytvoření trhlin. Výrazně klesá modul pružnosti a pevnost v tahu materiálu. Doba prvního projevu je závislá na podmínkách a může být od několika let do několika desítek let [29].

Podmínky ke vzniku alkalicko-křemičité reakce:

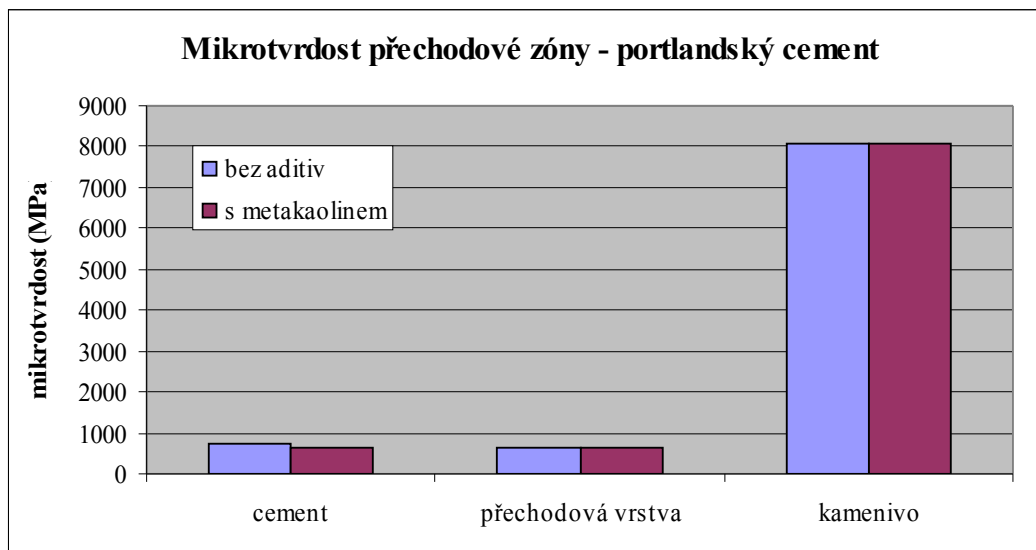
- přítomnost alkálií v matrici betonu
- přítomnost reaktivního $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ v kamenivu
- dostatečná vlhkost
- přítomnost Ca^{2+} iontů – portlandit, C-S-H fáze



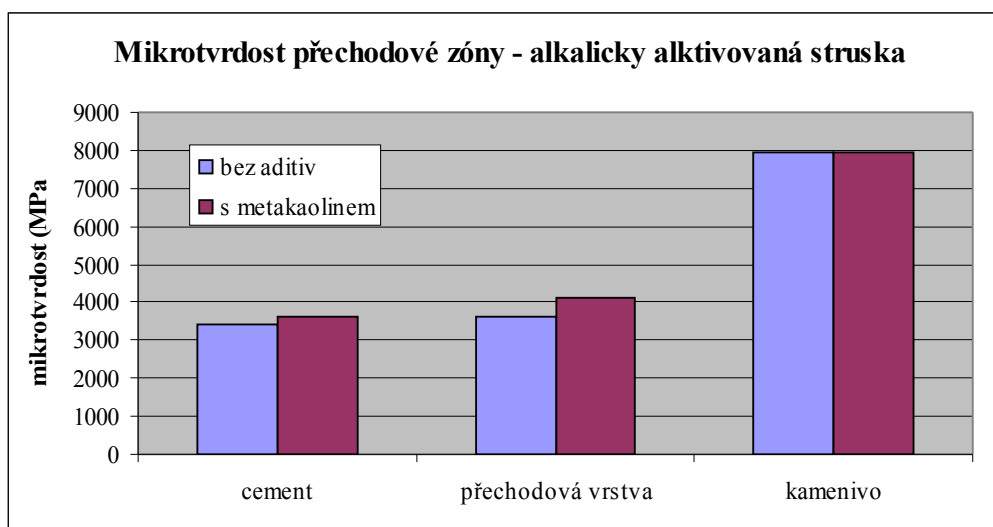
Obr. 31 – Poruchy způsobené alkalicko-křemičitou reakcí na dálnici D11 [29]

U alkalicky aktivovaných struskových materiálů byla tato reakce zkoumána také. Vzorky byly dlouhodobě sledovány a byl stanoven vzhled a složení fází na rozhraní kameniva a matrice. Výsledky v porovnání s portlandským cementem ukazují, že složení a struktura kontaktního pásu jsou rozdílné, stejně tak jako mikrotvrdosti v tomto pásu. Použití metakaolinu u alkalicky aktivovaných struskových materiálů potlačuje vznik produktů alkalicko-křemičité reakce, jelikož na povrchu kameniva vzniká nepropustná vrstva hydrohlinitokřemičitanů [30].

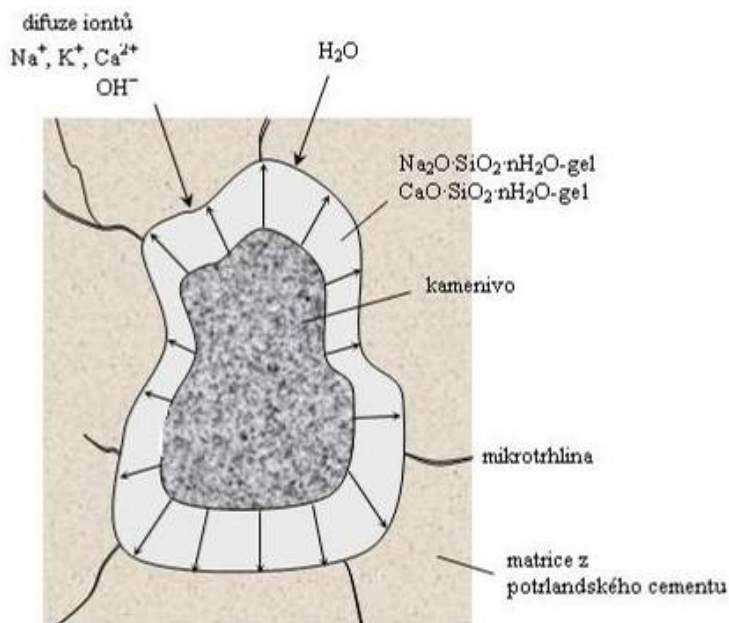
Vzorky alkalicky aktivovaných struskových materiálů vystavené dlouhodobému působení roztoku NaOH (80 °C) vykazují čtyřikrát menší rozpínavost, než vzorky z betonu na bázi portlandského cementu. Pokles pevností je také výrazně nižší [31].



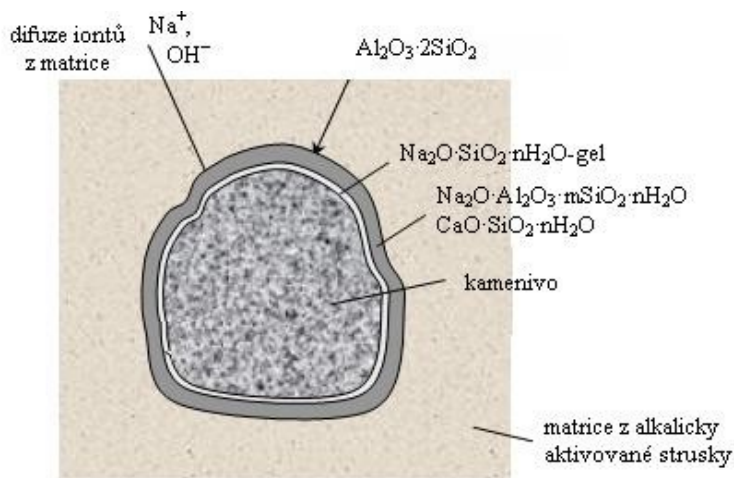
Graf. 6 – Vývoj mikrotvrdości na přechodové vrstvě kameniva a matrice na bázi portlandského cementu (uložení vzorků 65 °C, 60 dní) [30]



Graf. 7 – Vývoj mikrotvrdości na přechodové vrstvě kameniva a matrice na bázi alkalicky aktivované strusky (uložení vzorků 65 °C, 60 dní) [30]

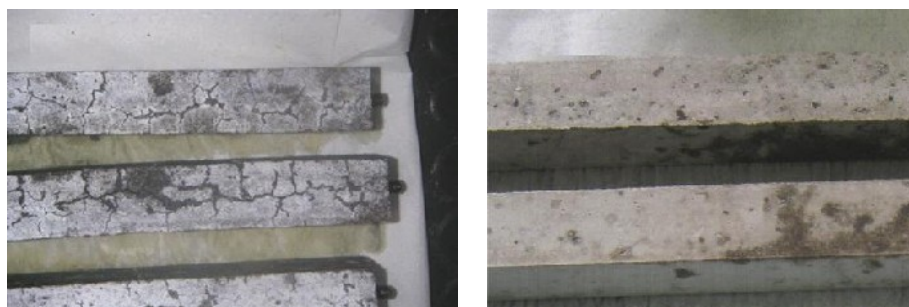


Obr. 32 – Schema destrukce matrice z portlandského cementu [30]



Obr. 33 – Schema alkalicko křemičité reakce s pozitivním efektem alkalicky aktivované struskové matrice [30]

U alkalicky aktivovaných popílkových betonů nebyl prozatím prokázán žádný vliv přítomnosti alkálií v alkalickém aktivátoru na vznik alkalicko křemičité reakce. Tyto systémy jsou mnohem méně citlivé na vznik rozpínivosti u alkalicko křemičité reakce v porovnání s tradičními betony na bázi portlandských cementů. To je důkaz toho, že vápník hraje důležitou úlohu při tvorbě rozpínavého gelu [30].



Obr. 34 – Vzhled vzorků betonu z portlandského cementu (vlevo) a alkalicky aktivovaného popílkového betonu (vpravo) při použití reaktivního kameniva (85 °C, ponoření v roztoku NaOH, 90 dní) [32]

2.7.10 Ekologie

Celosvětová spotřeba betonu je odhadována na 8,8 miliard tun ročně a cementářský průmysl je tak zodpovědný za produkci cca. 8 % celkových emisí CO₂ (na jednu tunu vyrobeného cementu připadá téměř jedna tuna vyprodukovaného CO₂). Vysoký nárůst produkce cementu je pozorován v poslední době především v nejlidnatějších zemích, v Číně a Indii. Z tohoto důvodu je nutné najít alternativu k portlandskému cementu. Touto alternativou by mohly být materiály na bázi alkalicky aktivovaných odpadních surovin, především strusky a popílku. Z porovnání vyplývá, že na výrobu geopolymerního struskového pojiva je potřeba dvakrát méně energie než na výrobu portlandského cementu a celkové emise CO₂ jsou 3,4 krát nižší než u portlandského cementu. Alkalicky aktivované materiály lze z tohoto hlediska zařadit mezi materiály šetrné k životnímu prostředí [33].

	Spotřeba energie (GJ/t)
Portlandský cement	3,70
Alkalicky aktivovaný struskový cement	1,86

Tab. 2 – Energetická náročnost – údaje z roku 2008 [33]

	Emise CO ₂ v t CO ₂ /t
Portlandský cement	1,0
Alkalicky aktivovaný struskový cement	0,3

Tab. 3 – Emise CO₂ – údaje z roku 2008 [33]

2.7.11 Shrnutí

Vybrané vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů jsou shrnuty v následující tabulce – *Tab. 4*. Porovnání je provedeno s běžným betonem na bázi portlandského cementu.

Vlastnosti	Alkalicky aktivovaný materiál			
	Slínek	Struska	Popílek	Metakaolin
Hlavní fáze pojiva	C-S-H	C-A-S-H	N-A-S-H	N-A-S-H
Vedlejší fáze pojiva	C-A-H	hydrotalcit, C-A-H	zeolit, N-C-A-H	zeolit
Rychlost tuhnutí	vyšší	nižší až stejná	nižší	nižší
Pevnost v tlaku	vyšší	vyšší	vyšší	vyšší
Smrštění	-	vyšší	nižší	-
Chemická odolnost	vyšší	vyšší	vyšší	vyšší
Výkvěty	-	vyšší	vyšší	vyšší
Karbonatace	-	vyšší	vyšší	vyšší
Stabilita ocelové výztuže krátkodobá	vyšší	vyšší	vyšší	vyšší
Stabilita ocelové výztuže dlouhodobá	vyšší	-	-	-
Mrazuvzdornost	vyšší	stejná až vyšší	vyšší	vyšší
Tepelná odolnost	vyšší	vyšší	vyšší	vyšší
Alkalicko-křemičitá reakce	-	nižší	nižší	-

Tab. 4 – Porovnání vlastností alkalicky aktivovaných materiálů s běžným betonem na bázi portlandského cementu

Některé údaje pro porovnání se nepodařilo nalézt např. stabilita ocelové výztuže byla studována u těchto materiálů nejdéle cca. 2 roky, což je nedostatečné, stejně tak jako dlouhodobá odolnost proti alkalicko-křemičité reakci.

Celkově lze tedy říci, že produktem alkalické aktivace jsou pak materiály, které se v porovnání s klasickými betony na bázi portlandského cementu vyznačují vysokými pevnostmi v tlaku, vysokou chemickou odolností, odolností vůči vysokým teplotám a odolností proti mrazu.

Jejich nevýhodou je naopak tvorba výkvětů, nižší pevnosti v tahu, nižší hodnoty Youngova modulu pružnosti a lomové houževnatosti. V neposlední řadě pak také jejich vyšší nároky na technologii a bezpečnost, jelikož se pracuje s žíravými a dráždivými materiály.

2.8 PRAKTICKÉ APLIKACE A POUŽITÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH MATERIÁLŮ

Alkalicky aktivované materiály mají díky svým zajímavým vlastnostem velký potenciál v použití. Vzhledem k tomu, že jsou používány jen krátce, je třeba ještě mnoha výzkumů a testů k jejich plnému nasazení jako konstrukčních materiálů zejména ve stavebnictví.

Možné další použití alkalicky aktivovaných aluminosilikátových polymerů - geopolymérů:

- speciální betony
- prefabrikáty a stavební bloky
- masivní betonové konstrukce a objekty
- protihlukové stěny
- tepelně a žáru odolné materiály
- chemicky odolné materiály
- ochranné nátěry a vrstvy
- fixace/solidifikace radioaktivních a toxických odpadů
- výroba slévárenských forem
- kompozitní materiály
- restaurátorství a výroba umělých pískovců
- dekorativní materiály a předměty

Nejnámější a největší použití alkalicky aktivovaných struskových materiálů ve stavebnictví je známo z Ukrajiny a Ruska, kde se s těmito materiály pracuje již řadu let. Na stavbách vyrobených z alkalicky aktivovaného struskového betonu ani po dlouhé době nebyly pozorovány žádné strukturální ani jiné změny.



Obr. 35 – Mariupol, Ukrajina (1960) - devítipodlažní dům vyrobený z alkalicky aktivovaného struskového betonu – kontrola v roce 2000 [34]



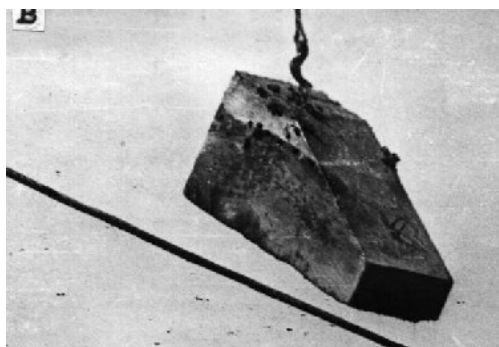
Obr. 36 – Lipetsk, Rusko(1987-1989) - dvacetipodlažní dům vyrobený z alkalicky aktivovaného struskového betonu – kontrola v roce 1999 [34]



Obr. 37 – Oděsa, Ukrajina (1966) - kolektory pro podzemní vodu z alkalicky aktivovaného struskového betonu (odběr vzorku, pohled zevnitř) – kontrola v roce 2000 [34]



Obr. 38 – Trať Moskva - St. Petěrburg, Rusko - železniční pražce z alkalicky aktivovaného struskového betonu (1989) – kontrola v roce 1999 [34]



Obr. 39 – Blok z alkalicky aktivovaného struskového betonu uložený 5 let v mořské vodě (1962) – kontrola v roce 1967 [34]



Obr. 40 – Finsko – odpadní trubky z alkalicky aktivovaného struskového betonu [34]



*Obr. 41 – Ternopol, Ukrajina (1984) – porovnání části vozovky
z alkalicky aktivovaného struskového betonu (vlevo)
a klasického betonu na bázi portlandského cementu (vpravo) [34]*



*Obr. 42 – USA – betonování přistávací dráhy pomocí
alkalicky aktivovaného betonu Pyrament [9]*



*Obr. 43 – Port Melbourne, Victoria, Austrálie – E-beton alkalicky aktivovaný
popílkový beton (pevnost 25 MPa) [35]*



Obr. 44 – Austrálie, fa. Zeobond – betonáž základů sila [35]



*Obr. 45 – Port Melbourne, Victoria, Austrálie – E-beton prefabrikované panely
přes most - alkalicky aktivovaný popílkový beton (pevnost 55 MPa) [35]*



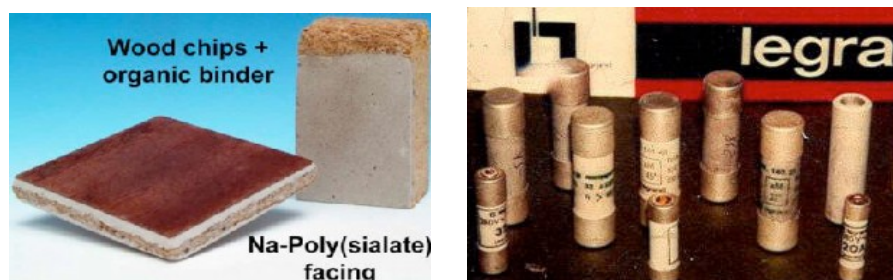
*Obr. 46 – Průmyslové využití alkalicky aktivovaného popílkového betonu
k výrobě prahů [36]*



*Obr. 47 – Shenyang, Čína – dlažba a tvárnice z alkalicky aktivovaného
popílkového betonu [37]*



Obr. 48 – ŽPSV a.s. Brno – silniční zábrany z alkalicky aktivovaného struskového betonu (2011) [38]



Obr. 49 – Francie, 80. léta 20. století ohni odolné dřevovláknité desky s povlakem geopolymery a zapalovací svíčky z geopolymery [39]



Obr. 50



Obr. 51

Obr. 50 – Geopolymerní umělý pískovec - detail [15]

Obr. 51 – Socha z umělého pískovce [8]

3. MALÉ MOSTNÍ OBJEKTY

Jak již bylo zmíněno, tato práce je zaměřena svou největší částí na výzkum nových alkalicky aktivovaných materiálů s myšlenkou možnosti užití těchto materiálů pro malé mostní objekty. Tuto myšlenku ovlivní výsledky jednotlivých zkoušek zvolených materiálů.

Tato část se zabývá především zmapováním malých mostních objektů co se počtu malých mostů v porovnání s velkými týká. Jejich velké množství již postavených a velké procento stále nově stavěných mostů, je zajímavou cestou s možností návrhu nových materiálů pro tyto malé objekty, před případnými dalšími použitími u mostních staveb většího charakteru.

Pro vyzkoušení použití nových materiálů jsou tyto malé objekty ideálními z mnoha důvodů. Především pak z ekonomického hlediska, kdy náklady na malé mosty jsou mnohonásobně nižší než u velkých mostních objektů. Dále i z pohledu statického hlediska a z počátku i pro využití malých mostů menšího významu, kdy může být nový použitý materiál sledován a hodnocen v čase.

3.1 SOUČASNÝ STAV V MOSTNÍM STAVITELSTVÍ

Je známo, že malých mostů do délky přemostění 10 m je v České republice z celkového počtu všech mostů, více jak 80 %. Jejich výstavba je stále žádanou.

Na druhou stranu oproti novým stavbám, je také hodně těchto malých objektů žádajících si opravy a rekonstrukce. Údržba, opravy a v neposlední řadě celé přestavby takového množství objektů jsou technicky i finančně velmi náročné. Pro optimalizaci řešení mostních objektů i stavebních úprav prováděných během doby jejich životnosti jsou zpracovávány studie a varianty s důkladným ekonomickým vyhodnocením.

V České republice jsou pro zmapování mostních objektů k dispozici dva softwarové systémy, které prochází řadou úprav a zdokonalení, ale jsou funkčními a umožňují kvalifikované hospodaření s mostními objekty celkově. Jedná se o systém pro správu mostů pozemních komunikací a železničních mostů.

- Mosty pozemních komunikací - Systém hospodaření s mosty

Systém sjednocuje metodiky vedení mostního pasportu, hodnocení stavu a systému hospodaření s mostními objekty pro správce všech mostů v České republice. Jednotný systém hodnocení poskytuje rovnocenné informace o celkovém stavu mostních objektů na silniční síti a kvalitnější možnosti finančního plánování pro provádění údržby a oprav mostních objektů. Jedná se o otevřený systém přístupný všem správcům a ostatním právnickým a fyzickým osobám (úroveň přístupu je dána přístupovými kódy pro různé úrovně) [40].

- Železniční mosty - Mostní evidenční systém

Železniční mosty v České republice, podobně jako železniční tratě, jsou majetkem Správy železniční dopravní cesty (SŽDC). Údržbu na nich provádějí České dráhy. Mostní evidenční systém je databázová aplikace určená k evidenci železničních mostů a objektů mostům podobných. Systém je určen pro správce mostních objektů na železničních tratích. Aplikace se skládá ze tří ucelených částí, které jsou na sobě nezávislé. Jedná se o evidenci železničních mostů, evidenci železničních propustků a evidenci kolejových mostových vah.

Každá část popisuje objekt nejen z technického hlediska, ale i z hlediska podrobných prohlídek, textových a grafických příloh [40].

3.2 OBECNÝ POPIS POJMU MALÝ MOSTNÍ OBJEKT

Pod pojmem malý most je brán mostní objekt se světlostí mostního otvoru od 2,01 m do 10,00 m. Malé mosty se navrhují z velké části ze železobetonu, nejčastěji jako mosty deskového a rámového typu.

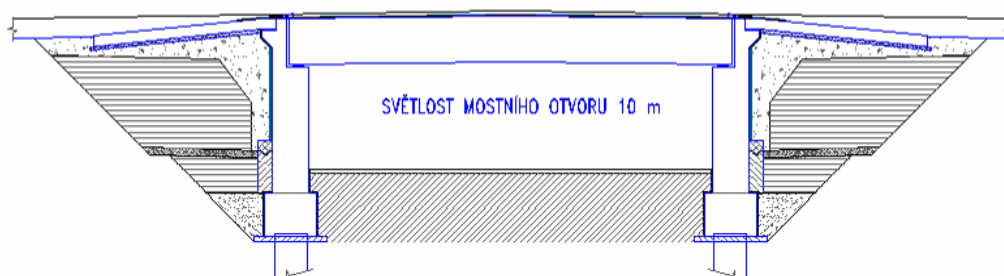
- Deskové mosty

Hlavní nosnou konstrukcí je železobetonová nebo předpjatá, plná nebo vylehčená deska. Konstrukce deskového mostu se vyznačuje malou konstrukční výškou, která je výrazně menší než délka a šířka těchto mostů.

Jsou často navrhovanými konstrukcemi pro svou jednoduchou proveditelnost a jasné statické působení. Velkou předností mostní desky je též účinné roznášení soustředěných zatížení od vozidel a jejich kolových a nápravových tlaků – téměř celá deska přenáší zatížení a snese proto i větší přetížení. Obecně lze říci, že v desce lze beton v tlačené oblasti lépe využít.

Nevýhodou je pak především u malých mostů, kde se nesetkáme až tak často s vylehčenou mostní deskou, větší spotřeba betonu a výztuže. Na druhou stranu větší hmotnost se příznivě projevuje na zmírňování dynamických účinků dopravy.

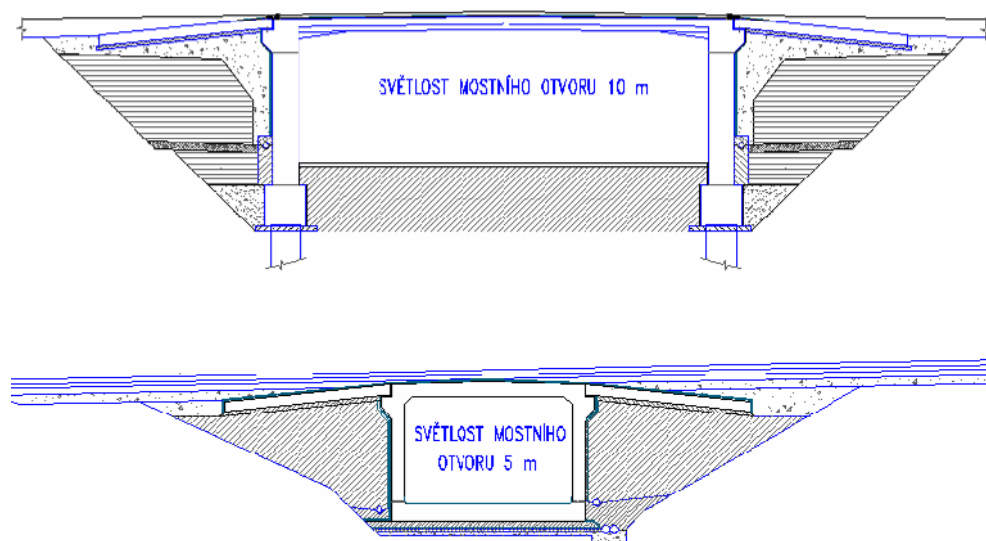
Pro své optimální stavební náklady a i následně celkové náklady s ohledem na údržbu, jsou velice žádanými a početně rozšířenými konstrukcemi.



Obr. 52 – Příklad deskového mostu - schéma

▪ Rámové mosty

Uspořádáním uložení desky na podpory nebo spojením s podporami vzniká deskový rámový most. Deska je spojena s podporami kloubově nebo monoliticky. Při monolitickém spojení desky se spodní stavbou vzniká ze statického hlediska rámová soustava. Kloubové spojení desky o jednom poli na obě podpory vytváří tzv. rozpěrákovou konstrukci (rozepržením se výhodně změní statický systém a opěry lze navrhnout tenčí).



Obr. 53 – Příklady rámových mostů - schema

3.3 MALÉ MOSTY A POVODNĚ

V neposlední řadě je nutno upozornit i na povodně ovlivňující ve velké míře zejména malé mosty.

U velkých mostů se do jednotlivých pilířů soustřeďuje velké zatížení, což vyžaduje kvalitní zakládání dimenzované na značné síly. V současnosti se velmi často využívá zakládání hlubinné. Zakládání je věnována značná pozornost.

Při povodni, kdy pod mostem protéká o mnohonásobně víc vody, díky dostatečnému volnému prostoru obvykle nedochází k přílišnému zvýšení rychlosti proudící vody v profilu pod mostem. Navíc se velkým mostům při povodni věnuje náležitá péče odstraňováním naplavenin pod mostními poli a tak se snižují rizika poškození.

U malých mostů je situace odlišná. Zatížení na základy od vlastní tíhy a provozu je relativně malé, což samo o sobě často umožňuje návrh mělkých plošných základů, nebo subtilního hlubinného zakládání. Malé mosty umístěné v násypch vedených napříč údolní nivou překlenují často potok nebo říčku bystřinného typu, kdy značně osciluje minimální a maximální průtok. Během velké povodně pak může nastat vzduť vody a následné rychlé proudění v relativně malém mostním otvoru [41].

Díky tomuto byla řada malých mostů zničena vlivem povodňové vlny. S časem se postupně tyto mosty opravují. Hledají se co nejlevnější účelné varianty řešení oprav. Bohužel díky opakujícím se povodním je stále toto téma otevřeným a přibývá mostů žádajících si opravy, či celé nové kompletní postavení. Vzhledem k této situaci by bylo zajímavé do oprav začlenit nové materiály na tyto malé objekty. Pro začátek z velkého počtu nutných oprav by bylo možné vybírat objekty méně významného charakteru, využít nových materiálů a sledovat vlastnosti chování v čase.

Příklady malých mostů:

- most přes Dobrovodskou stoku v Rudolfové ulici v Českých Budějovicích

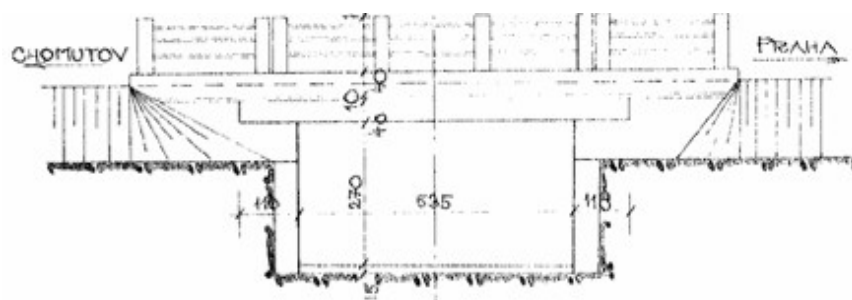
Téměř 10 metrů dlouhá stavba převádí dopravu přes vodoteč dvěma jízdnicemi a odbočovacími pruhy. Nosná část mostu je vybudována jako železobetonová monolitická rámová konstrukce s náběhy desky o jednom poli. Most má hlubinné založení. Stavba pomůže lepšímu průtoku Dobrovodské stoky a je součástí městských protipovodňových opatření. Délka přemostění 8,2 m, délka mostu 9,6 m, rozpětí polí 8,7 m, šířka mostu 20,90 – 27,50 m [42].



Obr. 54 – Most v Rudolfové ulici v Českých Budějovicích [42]

- most přes potok u Nezabylic

Tento most převádí dopravu přes potok Hačka - dva jízdní pruhy silnice I/7. Délka přemostění 5,35 m, délka nosné konstrukce 10,0 m, celková šířka 10,3. Plně masivní opěry z prostého betonu. Druh statického působení u nosné konstrukce – prostá deska. Nosnou konstrukci v tomto případě tvoří železobetonové přepjaté prefa nosníky typu Hájek délky 10,0 m.



Obr. 55 – Most přes potok u Nezabylic

4. INTEGROVANÉ MOSTY

Co se týká integrovaných mostů, jsou tyto objekty velice specifickou zajímavou oblastí, které bude věnováno o něco málo více stran obecného popisu, než tomu bylo v předchozí kapitole malých mostních objektů. Svými vlastnostmi mohou být velice výhodnými, pro myšlenku využití nových materiálů, prozatím samozřejmě u malých staveb tohoto typu. V současné době se integrované mosty navrhují v kombinaci materiálů beton a ocel. Cílem této části disertační práce je seznámení se s problematikou integrovaných mostů a obecný popis a vysvětlení jejich základních vlastností.

4.1 OBECNÝ POPIS POJMU INTEGROVANÝ MOST

Integrovaný most – zjednodušeně řečeno, je most bez ložisek a pohyblivých mostních závěrů. V dávných dobách, kdy nebyly ještě mostní závěry ani ložiska známy, se mostní konstrukce stavěly jen tímto způsobem. Řešení bez mostních závěrů bylo možné proto, že se místo celistvých (asfaltových) vozovek používaly dlažby, kde pohyby byly realizovány ve spárách mezi dlažebními kostkami. Další příznivou skutečností bylo, že se jednalo obvykle o mosty malých rozpětí. V tomto smyslu lze také uzavřené rámy zařadit mezi integrované mosty. U zděných mostů se mikropohyby uskutečňovaly ve spárách zdiva.

Na přelomu 19. a 20. století, byl kámen a cihly nahrazovány stále častěji betonem a ocelí. Při návrhu mostních konstrukcí se začaly používat zjednodušené výpočetní modely. U projektovaných mostů se začaly navrhovat mostní závěry a ložiska oddělující nosnou konstrukci mostu od spodní stavby. Tyto části se staly nedílnou a samozřejmou součástí při návrhu nových mostů. V současné době se zjišťuje, že tyto konstrukční prvky často přinášejí problémy spojené s jejich údržbou, v horším případě pak spojené vysoké náklady s jejich výměnou. V řadě vyspělých zemí je snahou tyto provozní náklady snížit a řešit takové konstrukční návrhy, které použití mostních závěrů a ložisek eliminují.

Díky vývoji technologií, novým výzkumům a možnosti použití počítačových programů a simulací, jsou integrované mosty v dnešní době běžně používaným typem mostní konstrukce.

Jeden z nejdůležitějších rysů integrovaných mostů spočívá ve spolupůsobení se spodní stavbou včetně pilotového základu v případě hlubinného založení. Zemina přímo s nosnou konstrukcí integrovaného mostu nespolečně působí, ale ovlivňuje její působení. U tohoto typu mostů je také realizován plynulý přechod vozovky z přilehlého zemního tělesa na mostní konstrukci bez použití mechanických mostních závěrů, které jsou obecně náchylné k nejrůznějším poruchám, především k zatékání vody do spodní stavby.

Opěry integrovaného mostu jsou pevně spojené s nosnou konstrukcí. Ze statického hlediska tvoří rám. Vlivem teplotní roztažnosti se opěry pohybují ve vodorovném směru společně s mostem. V porovnání s tradičními mosty vede tato skutečnost ke specifikům při návrhu opěr i hlavní nosné konstrukce [43, 44].

4.2 ROZDÍLY TRADIČNÍCH A INTEGROVANÝCH MOSTŮ

Hlavní odlišností jak již bylo zmíněno je, že součástí tradičních mostů jsou ložiska a mostní závěry, u integrovaných mostů se tyto konstrukční prvky nenavrhují. Tyto rozdíly se projevují v samotném návrhu, statickém působení a v konstrukčním uspořádání. Odlišně jsou řešeny i mnohé detaily. V této kapitole jsou popsány a definovány základní rozdíly u návrhu integrovaných mostů, které byly zmíněny.

4.2.1 Konstrukční uspořádání integrovaných mostů

Mezi nejpatrnější rozdíly v konstrukčním uspořádání tradičních a integrovaných mostů lze považovat:

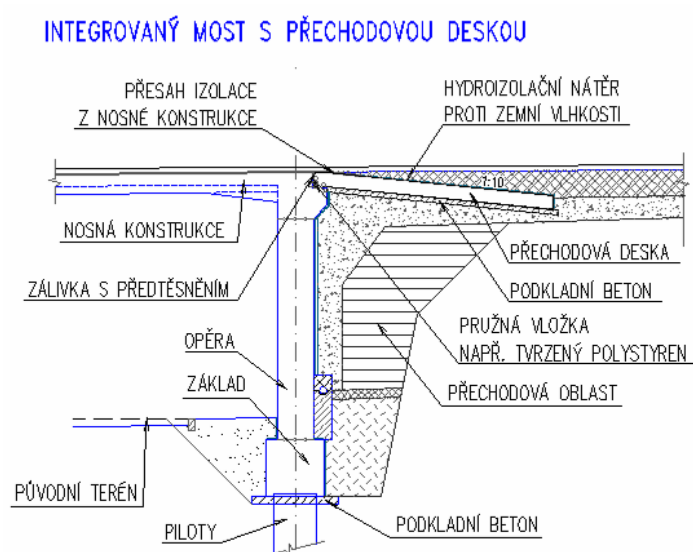
- spojení nosné konstrukce a opěr do jednoho celku

V případě tradičních trámových mostů je nosná konstrukce usazena na opěry prostřednictvím ložisek. U integrovaných mostů jsou hlavní nosníky zpravidla zakončeny koncovým příčником, který je monoliticky spojen s opěrou a tvoří tak rámový roh. Nejedná se pouze o trámové mosty, mohou to být i desky.

▪ přechod vozovky mezi mostem a přilehlým zemním tělesem

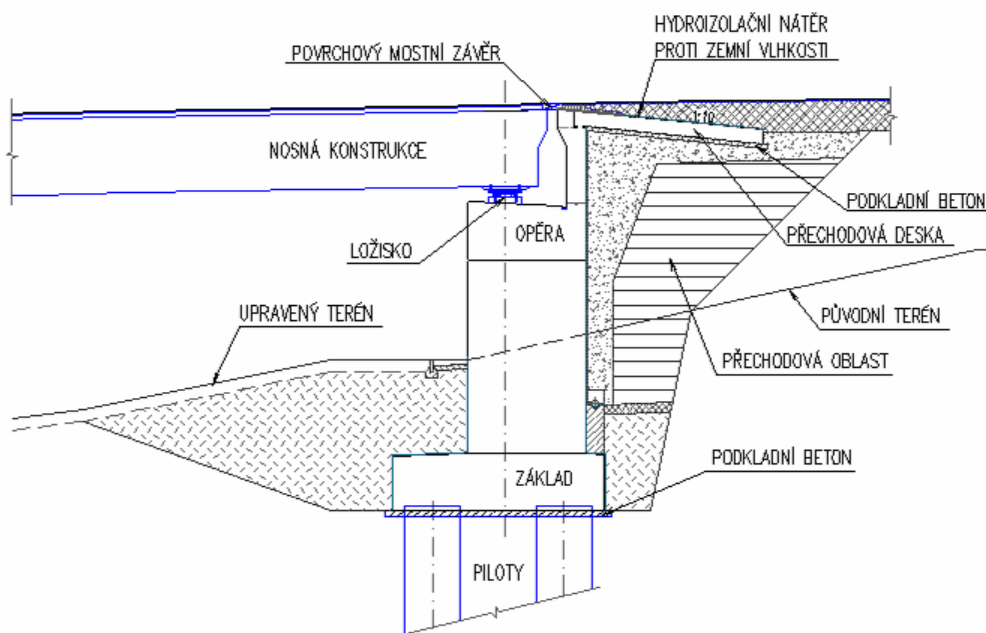
Co se týká přechodu vozovky mezi mostem a přilehlým zemním tělesem, je v případě tradičních mostů nutné překlenout mezeru mezi hlavní nosnou konstrukcí a opěrou pomocí mechanického mostního závěru, který umožňuje dilatační pohyby mostní konstrukce. U integrovaných mostů tato mezera odpadá a na opěru zpravidla navazuje přechodová deska [43, 44].

Schema uspořádání podporové oblasti tradičních a integrovaných mostů:



Obr. 56 – Integrovaný most

TRADIČNÍ MOST S PŘECHODOVOU DESKOU, MOSTNÍM ZÁVĚREM A LOŽISKY



Obr. 57 – Tradiční most

4.2.2 Statické působení integrovaných mostů

Mezi nejdůležitější odlišnosti ve statickém působení u typického uspořádání integrovaných mostů patří:

- vytvoření rámového rohu v místě opěry

Nosná konstrukce u tradičních mostů je zpravidla osazena na ložiskách. Ta umožňují volné natočení konců mostu a tím vzniká kloubové uložení nezávislé na geometrii opěr. U integrovaných mostů je naopak nosná konstrukce monoliticky spojena s opěrou a tvoří rámový roh. Dojde-li k natočení koncových průřezů mostu, deformace se projeví i na opěrách a naopak. Důsledkem je spolupůsobení nosné konstrukce s opěrami.

- spolupůsobení nosné konstrukce se spodní stavbou a zeminou

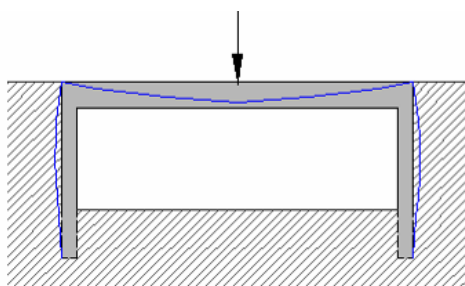
U integrovaných mostů ke vzájemnému spolupůsobení nosné konstrukce a spodní stavby (s tím související i deformace opěr) dochází vlivem

dopravního a teplotního zatížení nosné konstrukce. Do tohoto celého systému je tím pádem zapojena i zemina za opěrami, která je v důsledku pohybů opěr stlačována. To vede ke statickému spolupůsobení nejen nosné konstrukce a spodní stavby, ale i přilehlé zeminy.

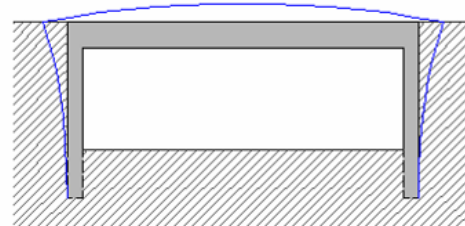
▪ omezení volných dilatací

U tradičních mostů jsou konstrukčními částmi mostní závěry a ložiska, se kterými nosná konstrukce tradičních mostů spolupůsobí. Tyto konstrukční části jsou uspořádány tak, aby v důsledku teplotních změn umožnily volné dilatační posuny v podélném a někdy i příčném směru. K tomu je použito právě vhodné kombinace pevných, jednosměrně nebo obousměrně posuvných ložisek a pohyblivých mostních závěrů. U integrovaných mostů je těmto dilatačním posunům bráněno již zmíněným rámovým spojením nosné konstrukce a opěr. Všechna zkrácení a protažení mostní konstrukce se projevují následnými deformacemi a případnými posuny opěr. Vodorovné posuny jsou částečně omezeny tuhostí opěr a odporem přilehlé zeminy [43, 44].

Deformace integrovaného mostu:



Obr. 58



Obr. 59

Obr. 58 – Deformace od zatížení dopravou

Obr. 59 – Deformace od teploty

4.2.3 Návrh integrovaných mostů

V návaznosti na konstrukční uspořádání a statické působení integrovaných mostů, z předešlých odstavců jsou základní odlišnosti oproti tradičním mostům co se návrhu týká, především tyto:

- zahrnutí spodní stavby do výpočetního modelu konstrukce

Nosná konstrukce a spodní stavba se u tradičních mostů modeluje odděleně. U integrovaných mostů s nosnou konstrukcí spolupůsobí spodní stavba prostřednictvím rámového rohu, což je nutné zohlednit a zahrnout do výpočetního modelu. Rozložení vnitřních sil v nosné konstrukci a v opěrách ovlivňuje tuhost opěr. Proto se spodní stavba s nosnou konstrukcí modeluje jako jeden celek, nebo lze nahradit vliv spodní stavby soustavou bodových a torzních pružin [43, 45].

- zahrnutí přilehlé zeminy do modelu konstrukce

Do výpočetního modelu konstrukce je nutné zahrnout i vliv přilehlé zeminy v zásypu za opěrami. Napjatost celé mostní konstrukce ovlivňuje stlačování zeminy při pohybu opěr v důsledku teplotní roztažnosti. Vliv zeminy se ve výpočetním modelu definuje například zavedením pružného podloží ve vodorovném směru na prvky spodní stavby.

- výrazný vliv teplotních změn na napjatost konstrukce

V případě tradičních mostů je cílem uvolnit dilatační posuny mostní konstrukce a tak omezit silové namáhání nosné konstrukce vlivem teplotních změn. U integrovaných mostů jsou tyto dilatace omezeny. Při oteplení či ochlazení mostní konstrukce dochází ke vzniku napjatosti. Nosná konstrukce je zatížena normálovými silami a ohybovými momenty vlivem statické neurčitosti vzhledem k nerovnoměrným změnám teploty i vlastním pnutím. Z tohoto důvodu je nutné vliv teploty zohlednit již v počátečním modelu a návrhu [43].

4.3 TYPY INTEGROVANÝCH MOSTŮ

Dle způsobu a účelu využití, použité kombinace materiálů, mají integrované mosty celou řadu podob a široký rozsah použití. Navrhují se jako silniční mosty [46], železniční mosty [47], ale i jako lávky pro chodce. Z hlediska počtu polí se setkáváme s konstrukcemi o jednom poli nebo více polích [48]. Co se týká materiálů je vrchní stavba tvořena z monolitického železobetonu [49], nebo předpjatých betonových prefabrikátů [50], [51], případně spřažená [52] se železobetonovou mostovkou a plnostěnnými nebo příhradovými ocelovými nosníky [49].

S tímto typem mostů se setkáváme především v zahraničí. Tam podle prováděných statistik tvoří tento typ až třetinu staveb – jedná se především o střední a velké mosty. U nás tyto mosty nazvané konkrétně jako integrované, velké zastoupení nemají.

Příklad z již postaveného mostu (nejedná se o malý most) tohoto typu v České republice je např.:

- most přes Ploučnici ve Stružnici

Nejznámější ocelobetonový integrovaný most navržený jako spojitý nosník o třech polích jejichž délky jsou 12,2 m + 24,3 m + 12,2 m, převádějící komunikaci šířky 5,0 m a jednostranný chodník širší 1,5 m. Podpěry jsou založeny na vrtaných pilotách. Spojení trámu s krajními i mezilehlými podpěrami je provedeno jako rámové pomocí železobetonových příčníků.



Obr. 60 – Most přes Ploučnici ve Stružnici [53]

4.4 DĚLENÍ INTEGROVANÝCH MOSTŮ DLE SPODNÍ STAVBY

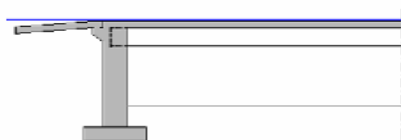
Jednotlivé typy integrovaných mostů s ohledem na potřebné využití, začlenění do daného terénu a okolí, nabízejí mnoho možností konstrukčního řešení a správné volby pro zasazení do konkrétního terénu. Má-li se toto nějakým způsobem roztřídit do skupin, může se postupovat podle různých hledisek, kde jednotlivé skupiny se mohou navzájem prolínat a plynule přecházet jedna ve druhou. V této kapitole je popsáno základní dělení dle začlenění mostu do okolního terénu. Jedná se především o mosty s opěrami plné výšky a mosty založené na násypu [43].

4.4.1 Mosty s opěrami plné výšky

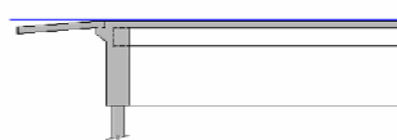
Mosty s opěrami plné výšky jsou navrhovány a projektovány tam, kde jsou požadavky na světlé rozpětí a světlou výšku konstrukce, které jsou dány a definovány průjezdným profilem přemostované komunikace. Nejčastěji se s nimi setkáme u silničních nebo dálničních nadjezdů nad pozemními komunikacemi či železničními tratěmi. Jejich typické použití je pak především u mimoúrovňových křížení dvou komunikací.

Opěry těchto mostů jsou buď masivní železobetonové nebo vytvořené z ocelových štetovnicových, popřípadě pilotových stěn, které jsou doplněné pažením, kotveným do tělesa násypu vyztuženého geotextiliemi. V případě návrhu opěr ze železobetonu, tyto zakládáme na plošných základech nebo pilotách. Návrh je závislý na potřebném rozpětí mostu a únosnosti základové půdy [43, 44].

Integrované mosty s plnou výškou opěr:



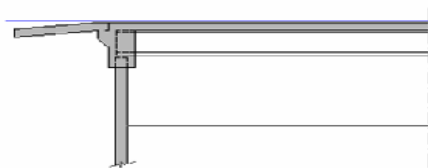
Obr. 61



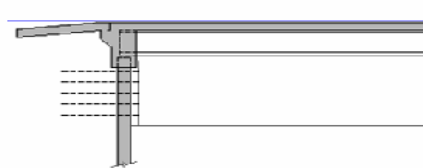
Obr. 62

Obr. 61 – Masivní železobetonové opěry založené na plošných základech

Obr. 62 – Masivní železobetonové opěry založené na pilotách



Obr. 63



Obr. 64

Obr. 63 – Opěry vytvořené z ocelových štětovnicových stěn

Obr. 64 – Opěry vytvořené z pilotových stěn, doplněných pažením kotveným do tělesa násypu vyztuženého geotextiliemi

Mezi nosnou konstrukcí a opěrami je dosažena plná momentová spojitost, spodní stavba s nosnou konstrukcí spolupůsobí celkově včetně zeminy, která přiléhá na opěry.

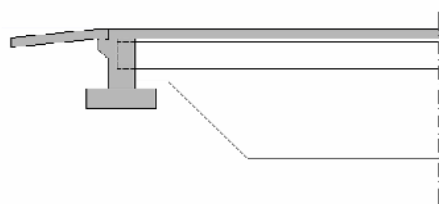
Pokud budeme brát v úvahu vodorovné pohyby a natočení nosné konstrukce především u masivních železobetonových opěr je zde značné rámové působení. Tyto opěry jsou velice tuhé a při vodorovném namáhání se pohybují společně jako tuhé celky. Z toho vyplývá nutný návrh dostatečně únosného rámového rohu. Podstatně poddajnější než železobetonové masivní opěry jsou opěry ze štětovnicových stěn, které jsou ohybově poddajnější. Momenty, které jsou přenášeny ze spodní stavby do nosné konstrukce jsou menší. Nevýhovou štětovnicových stěn jsou nejen vysoké ceny oceli, ale především koroze štětovnic. Nejméně omezující pohyby nosné konstrukce, jsou při návrhu opěr z pilotových stěn. Odpor zeminy vůči pilotám s rozestupy je výrazně menší než u plných stěn. Samotné piloty mohou být ocelové z válcovaných profilů nebo častěji navrhované - masivní železobetonové [43, 44].

4.4.2 Mosty založené na násypu

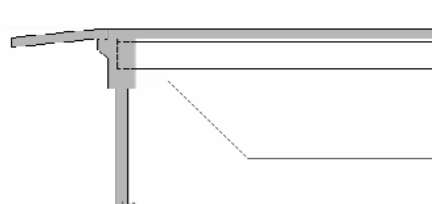
Mosty založené na násypu se navrhují do míst, kde šířka průjezdného profilu pod mostem není určujícím kritériem pro rozpětí mostu. Proto se s nimi setkáváme nejčastěji u přemostění železničních tratí s malým počtem kolejí nebo pozemních komunikací s menším počtem jízdních pruhů. Velice se hodí pro překlenutí vodotečí, kde koryto řeky tvoří přirozený násep, vhodný pro založení opěr těchto mostů.

Mosty se zakládají na plošných základech nebo na pilotách. Spojení nosné konstrukce a opěry je tuhé, ale je nutno brát v úvahu právě malou výšku opěr. Z tohoto vyplývá, že odpor zeminy v přilehlém násypu je relativně malý a omezení vodorovných pohybů a natočení konců nosné konstrukce také malé. Nosná konstrukce se svým chováním tak vzdaluje rámovému působení a spíše se blíží uložení prostému. Dilatační posuny a natočení při založení na plošných základech se odehrávají v základové spáře, což negativně ovlivňuje samotné podloží, které částečně degraduje. Díky těmto faktům, lze tyto mosty navrhovat tam, kde je únosnost podloží dostatečná a rozpětí mostu nepřilíš velké. Pokud tyto podmínky nelze splnit použije se založení na pilotách. U tohoto typu založení jsou pak dilatační posuny a natočení přenášeny ohybovou poddajností pilot [43, 44].

Integrované mosty založené na násypu:



Obr. 65

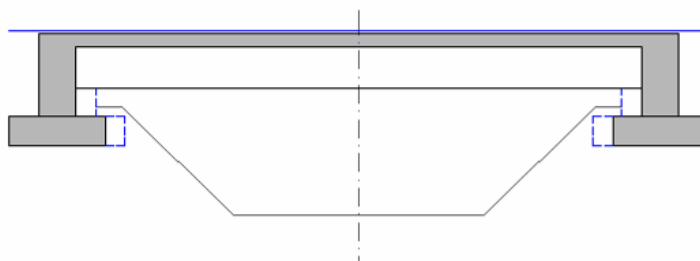


Obr. 66

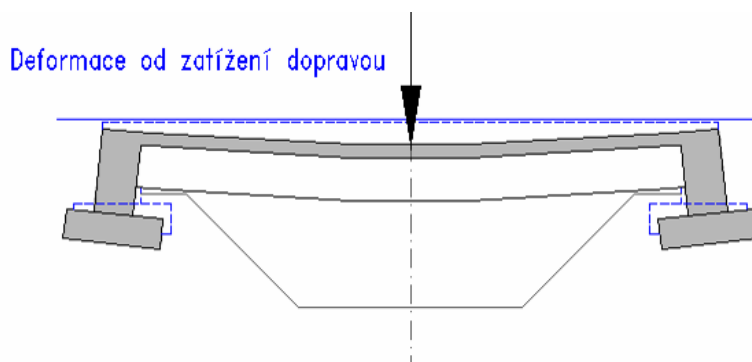
Obr. 65 – Mosty založené na plošných základech

Obr. 66 – Mosty založené na pilotách

Deformace od teploty



Obr. 67 – Deformace od teploty při založení na plošných základech



Obr. 68 – Deformace od zatížení dopravou při založení na plošných základech

4.5 VÝHODY INTEGROVANÝCH MOSTŮ

Vyloučení mostních závěrů a ložisek:

- snížení nákladů na výstavbu mostu
- odpadá problém s nižší životností a následnou výměnou závěrů a ložisek
- snížení provozních nákladů mostu [54], [55]

Zjednodušení spodní stavby:

- nosná konstrukce je monoliticky spojena s opěrami
- odpadají podložiskové bloky, závěrná zídka a dilatační mezera – vše je sloučeno do koncového příčnicku
- opěry jsou rozeprény nosnou konstrukcí a tím podepřeny přiléhajícím zemním tělesem z čehož vyplývá výrazně vyšší stabilita spodní stavby, možnost návrhu štíhlejších opěr, redukce plošných základů a v případě založení na pilotách k návrhu pouze jedné řady pilot u každé opěry
- zjednodušení spodní stavby tak výrazně snižuje spotřebu materiálu, objemy zemních prací a náklady na výstavbu

Zrychlení a zjednodušení výstavby:

- odpadají práce spojené s dodržением přesné geometrie polohy ložisek
- snižují se nároky na přesnost provedení opěr, neboť hlavní nosníky lze při osazování ve větší míře rektifikovat

Štíhlejší nosná konstrukce:

- vzhledem k rámovému působení se ohybové momenty částečně přesouvají z pole k opěrám - to vede v porovnání s prostě podepřenými mosty k návrhu štíhlejší nosných konstrukcí a k redukci stavební výšky

Kratší a nižší nájezdové rampy:

- u mostů na mimoúrovňových kříženích v rovinatém terénu přináší výše zmíněná redukce stavební výšky zkrácení a snížení nájezdových ramp a násypů, což vede k omezení zemních prací při budování přilehlých zemních těles [49]

Zlepšení komfortu jízdy:

- odstraněním mostních závěrů je dosaženo plynulého napojení vozovky na most

Odstranění problémových detailů:

- přenos zatížení je díky zabetonování hlavních nosníků do koncového příčnicku rovnoměrnější
- odstranění nebezpečí zatékání do spodní stavby netěsnostmi v mostních závěrech [56]

Robustnější konstrukce:

- propojením nosné konstrukce se spodní stavbou je zvýšena statická neurčitost a tím i robustnost konstrukce
- integrované mosty jsou díky vyšší duktilitě konstrukce odolnější proti seizmicitě a dalším mimořádným zatížením, například nárazům vozidel do opěr, posunům opěr v důsledku povodní

Mezi další výhody by se mohlo řadit použití alkalicky aktivovaných betonů - prozatím u malých mostů, malých integrovaných mostů (samozřejmě i propustků), před případným dalším vývojem a použitím u staveb větších měřítek. Zda je tato myšlenka reálná a zda tato cesta povede k možnosti využití těchto materiálů ukáží výsledky zkoušek a zhodnocení samotného výzkumu, který byl proveden.

5. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavní cíl předkládané disertační práce je posouzení, vyhodnocení a analýza alkalicky aktivovaných materiálů pro účely inženýrského dopravního stavitelství. Analýza je provedena pomocí experimentálního měření vybraných vzorků připravených z alkalicky aktivovaného materiálu zvoleného složení.

Experimentální část je zaměřena na porovnání vlastností alkalicky aktivovaných samozhutnitelných struskových betonů s klasickými samozhutnitelnými betony na bázi portlandského cementu, na malých laboratorních vzorcích a na velkých trámech rozměrů 200 x 300 x 3000 mm.

Výše popsany hlavní cíl práce je možné rozdělit do následujících bodů:

- V současné době se s vývojem nových materiálů stále častěji objevují alkalicky aktivované betony. Tyto jsou laboratorně zkoušeny na malých vzorcích již řadu let. Před případnou aplikací v praxi je ovšem třeba ověřit vlastnosti těchto materiálů na větších vzorcích a provést jejich porovnání s dosud používanými betony.

Ze studia literatury vyplynulo, že velkoměřítkové zkoušky v České republice nebyly dosud provedeny a když ano tak jinak a z jiného složení použitých materiálů. Proto byla také následně myšlenka vybetonování větších dílů o zvoleném složení, vyplývající z konzultací s odborníky, zrealizována s pomocí firmy ŽPSV a.s. Brno a Katedry dopravního stavitelství – Dopravní fakulty Jana Pernera v Pardubicích. Výsledky, popis, zhodnocení a porovnání vlastností alkalicky aktivovaného a běžného samozhutnitelného betonu na větších vzorcích – trámech 200 x 300 x 3000 mm, je hlavním cílem této předkládané disertační práce.

- Na základě konzultací s odborníky v oboru alkalicky aktivovaných materiálů, byl následně proveden výběr optimálního složení jednotlivých směsí vhodných pro výrobu daných zkušebních vzorků materiálů. Dále byly zvoleny počty laboratorních vzorků a velkých trámů a naplnění zvolených směsí do předem připravených forem.

- Na vyrobených odformovaných trámech byly provedeny ohybové zkoušky a zároveň byla použita nedestruktivní zkouška pomocí akustické emise (při tvrdnutí po dobu 28 dní a při samotném zatěžování).
- Na doprovodných laboratorních vzorcích byly provedeny následující zkoušky:
 - pevnost v tlaku (po 1, 7, 28, 90-ti dnech) - krychle o hraně 150 mm
 - pevnost v tahu za ohybu (po 1, 7, 28 dnech) - trámce 100 x 100 x 400 mm
 - lomová houževnatost a lomová energie - trámce 80 x 80 x 480 mm
 - pevnost v tlaku na zlomcích
 - moduly pružnosti
- Provedením zkoušek na zhotovených vzorcích a porovnáním vlastností těchto materiálů, jejich kladů a záporů, lze získat nový směr pro použití nejen v dopravním stavitelství a ve stavebních oborech. Jednotlivé zkoušky a jejich výsledky jsou popsány a ze získaných výsledků provedeny počítačové simulace pomocí programů SCIA ESA a OOFEM.
- Vzhledem k barevným změnám probíhajícím při zrání alkalicky aktivovaného struskového betonu (tmavě zelená barva časem mění se na šedou) byla na pojivové matici v různém stáří vzorků (28 a 60 dní) provedena také analýza přítomných fází pomocí metody rentgenové difrakce (XRD) a chemické složení stanoveno pomocí rentgenové fluorescenční analýzy (XRF).
- Dále bylo také zhodnoceno i ekonomické porovnání jednotlivých směsí (klasický beton na bázi portlanského cementu vs. alkalicky aktivovaný struskový beton).

Cílem předchozích tří kapitol bylo ucelené shrnutí nastudovaných informací nutných před samotnou přípravou a experimentální částí. Z dostupné literatury byl proveden průzkum využití alkalicky aktivovaných materiálů v souvislosti s dopravním stavitelstvím, včetně stavu současného výzkumu a prováděných zkoušek a to nejen u nás v České republice, ale také v zahraničí.

V první uvedené kapitole bylo cílem popsat dosavadní poznatky a vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů od historie po současnost a současné využití. Zdůraznit rozdílné vlastnosti materiálů dle výběru vstupních surovin, jelikož jejich zanedbání by mohlo vést k technologickým problémům a následně velkým škodám. Z tohoto důvodu je nutné vlastnosti daných směsí nejprve důkladně ověřit v laboratoři na malých vzorcích. Na základě těchto výsledků byla vybrána vhodná směs pro použití na velké stavební dílce.

Další dvě kapitoly o malých mostech a integrovaných mostech zahrnují současný stav v mostním stavitelství a obecný popis s myšlenkou využití alkalicky aktivovaných materiálů pro tyto malé jednoduché mosty, či jejich dílčí části jako jsou například opěry, nosníky, desky a římsy.

6. PRAKTICKÁ ČÁST - PŘÍPRAVA FOREM, SPECIFIKACE POUŽITÝCH MATERIÁLŮ, POPIS PRŮBĚHU BETONÁŽÍ

V této kapitole je uceleně popsáno celkové seznámení s popisem práce, která probíhala před následnými zkouškami. Jedná se především o přípravu před betonováním, následné betonování, odformování, popis jednotlivých použitých směsí, popis trámů, doprovodných vzorků a jejich označení.

Specifikace jednotlivých vstupních surovin a jejich vlastností má svou důležitost v návaznosti na charakter následujících jednotlivých směsí. Proto je tomuto věnována v této kapitole patřičná pozornost.

6.1 PŘÍPRAVA FOREM

Na závodě ŽPSV a.s. v Byňově u Nových Hradů se dlouhá léta vyráběly a zkoušely železniční pražce. V současné době byla výroba pražců pozastavena a na místo toho se vyrábí výrobky z vibrobetonu (šachty, svodidla, atd.). Na této výrobní hale byly po dohodě s ředitelem závodu připraveny tři dřevěné formy – zvolených vnitřních rozměrů 200 x 300 x 3000 mm. Následně na tomto samém místě probíhala i betonáž a v místní laboratoři i část zkoušek.

Betonáž se konala ve dvou etapách. V první etapě byly vybetonovány tři trámy. Ty byly po 28 dnech odformovány a následovala druhá betonáž. Při této se již ale betonovaly pouze trámy dva, protože se vlivem odformování předchozích trámů jedna forma poničila a nebylo ji možné již využít.

Dřevěné formy pro trámy byly usazeny vždy do roviny a k těmto formám byly umístěny i formy na doprovodné vzorky pro zvolené zkoušky, které budou popsány dále.

Formy na doprovodné vzorky byly následujících rozměrů:

- krychle o hraně 150 mm
- trámce 100 x 100 x 400 mm
- trámce 80 x 80 x 480 mm.



Obr. 69



Obr. 70

Obr. 69 – Formy ve tvaru krychle a formy na trámce

Obr. 70 – Formy na trámce



Obr. 71 – Dřevěné formy na trámy

6.2 SPECIFIKACE VSTUPNÍCH SUROVIN

Vstupní suroviny pro jednotlivé směsi měly následné specifikace:

- Cement CEM I 42,5 R „Českomoravský cement a.s. – Mokrý“

		Jednotky	Průměrná hodnota
Fyzikální vlastnosti	Měrný povrch	m ² /kg	347
	Normální konzistence	%	28
	Počátek tuhnutí	minuty	210
	Konec tuhnutí	minuty	268
	Objemová stálost	mm	1
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tlaku - 2 dny	MPa	31,7
	Pevnost v ohybu - 2 dny	MPa	5,9
Chemické vlastnosti	Ztráta žíháním	%	2,640
	Nerozpustný podíl	%	0,620
	Obsah síranů (jako SO ₃)	%	2,940
	Obsah Cl	%	0,054
	Obsah K ₂ O	%	0,820
	Obsah Na ₂ O	%	0,170
	Na ₂ O ekv.	%	0,710

Tab. 5 – Parametry použitého cementu

- Mletá struska SMŠ 380 „Kotouč Štramberk s.r.o.“

		Jednotky	Průměrná hodnota
Chemické složení	SiO ₂	%	38,16
	Fe ₂ O ₃	%	0,33
	Al ₂ O ₃	%	7,08
	CaO	%	38,29
	MgO	%	12,31
	SO ₃	%	0,75
Zrnitost - síto	0,045 mm	1,40	
H ₂ O	%	0,07	
Blaine	cm ² /g	4096	

Tab. 6 – Parametry použité strusky

▪ **Vodní sklo sodné, Ms = 1,6 „Vodní sklo Brno a.s.“**

pH → 11,0–12,0

Bod tání/tuhnutí → -3 °C

Bod varu → 101–102 °C

Relativní hustota → 1 328–1 610 kg/m³

▪ **50 %-ní roztok KOH „Vodní sklo Brno a.s.“**

Celková alkalita (KOH) → 45-50

Uhličitany (K₂CO₃) → max. 0,3 %

Sodík (Na) → max. 0,3 %

Železo (Fe) → max. 0,0005 %

Chloridy včetně KCl (Cl) → max. 0,001 %

Rtuť (Hg) → max. 0,0001 %

▪ **Voda - místní zdroje**

▪ **Plastifikátor Chrysofluid Premia 150 „Chemie s.r.o. Praha“**

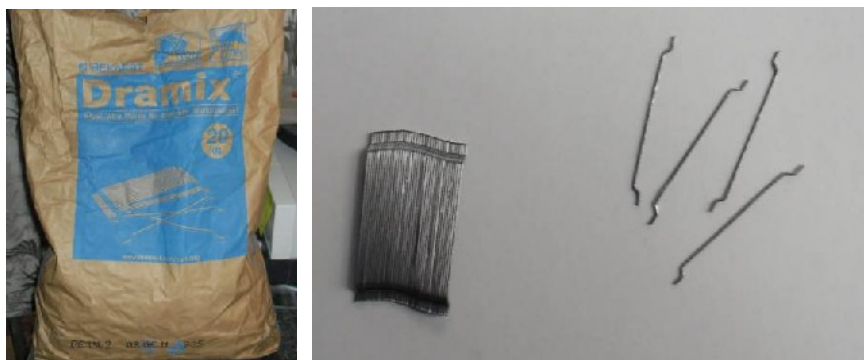
▪ **Drátky Dramix® RC65/35BN „Bekaert Petrovice s.r.o.“**

Průměr drátků → d = 0,55 mm

Délka drátků → l = 35 mm (zalomené konce)

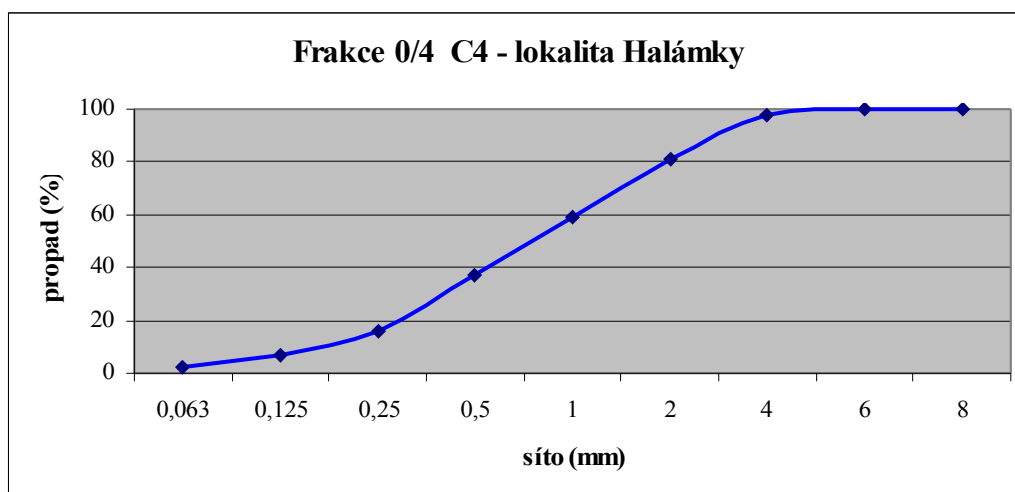
Pevnost v tahu → min. 1100 N/mm²

Množství drátků v 1 kg → 14500 ks



Obr. 72 – Drátky Dramix® RC65/35BN

- Písek 0/4 C4 „LB Minerals s.r.o – Halámky“



Graf. 8 – Zrnitostní křivka použitého písku 0/4 C4 – lokalita Halámky

Poznámka:

Obsah jemných částic → f_3

Obsah chloridů → $C = 0,0002 \%$

Obsah celkové síry → $S = 0,01 \%$

Sírany rozpustné v kyselině → $AS = 0,01 \%$

Obsah přírodních radionuklidů (index hmotn. aktivity) → $I = 0,54$

Obsah humusovitých částic → neobsahuje humusovité látky

Nasákavost vodou → $WA_{24} = 0,90$

Odolnost proti zmrazování a rozmrazování → NPD

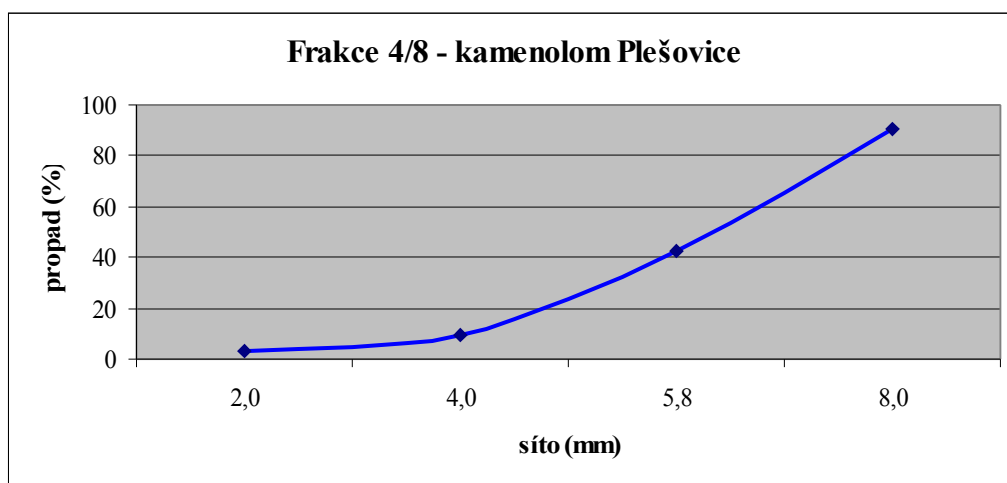
Objemová hmotnost → $2,560 \text{ t/m}^3$

Sypná hmotnost → $1,541 \text{ t/m}^3$

Ekvivalent písku – posouzení jemných částic → $SE = 87$

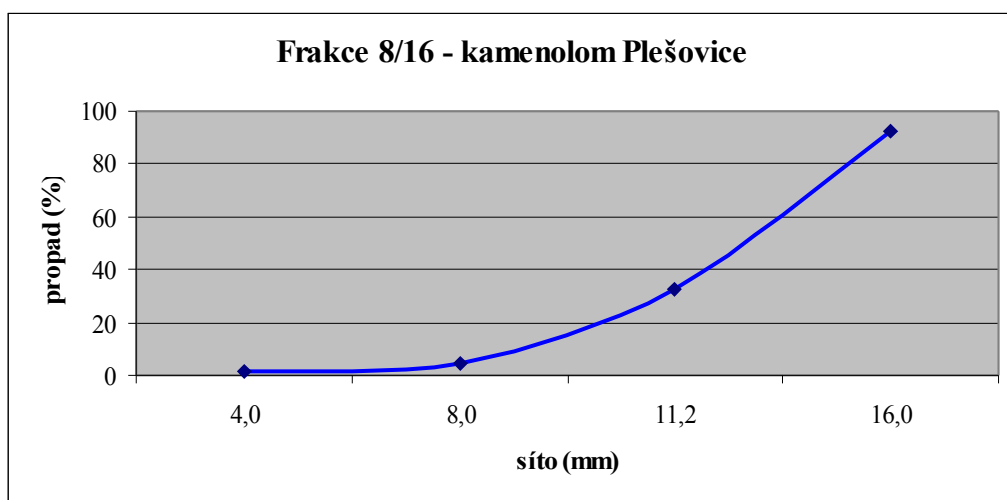
Trvanlivost vůči alkalicko-křemičité reakci → $-0,02 \%$

- Štěrk frakce 4/8 „Kámen a písek s.r.o. - kamenolom Plešovice“



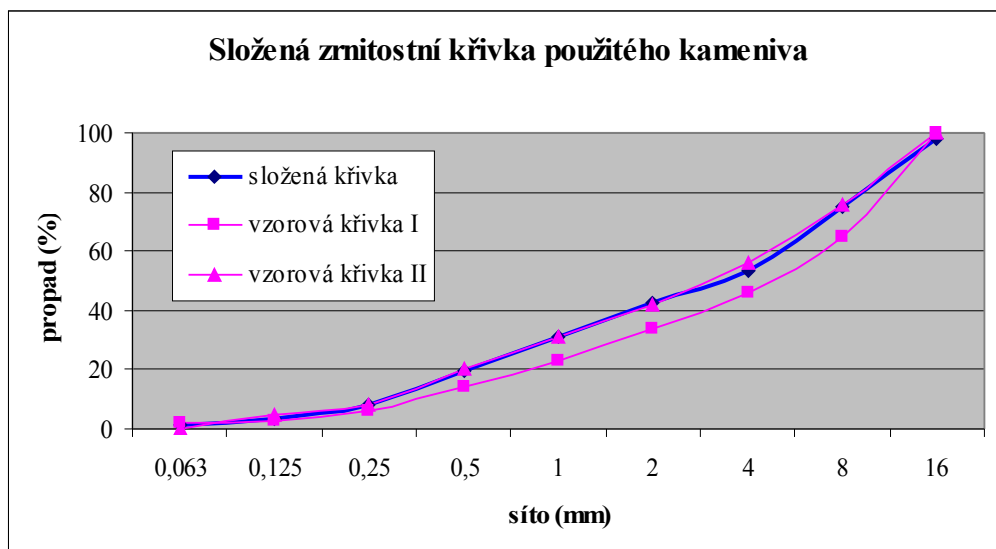
Graf. 9 – Zrnitostní křivka použitého kameniva 4/8 – kamenolom Plešovice

- Štěrk frakce 8/16 „Kámen a písek s.r.o. - kamenolom Plešovice“



Graf. 10 – Zrnitostní křivka použitého kameniva 8/16 – kamenolom Plešovice

Smísením odpovídajících množství písku 0/4 s kamenivý 4/8 a 8/16 bylo získáno směsné kamenivo, u kterého byla pro kontrolu vypočtena celková zrnitostní křivka. Ta byla porovnána se vzorovými doporučenými křivkami kameniva pro běžné betony. Výsledná křivka byla hladká, v grafu se nacházela v oblasti vymezené doporučenými vzorovými křivkami a splňovala tak požadavky na vhodnou zrnitost kameniva.



Graf. 11 – Složená zrnitostní křivka použitého kameniva 0/16

6.3 SLOŽENÍ SMĚSÍ, NAVÁŽENÍ JEDNOTLIVÝCH KOMPONENTŮ, PŘÍPRAVA NA BETONÁŽ

Pro betonáž byly zvoleny tři směsi – složení a označení směsí je v následující tabulce Tab. 7 – Směs 1, Směs 2, Směs 3. V první etapě betonování byly tyto tři směsi použity na tři připravené formy, ve druhé etapě při betonáži následných dvou trámů, byla použita již jen směs 3 doplněná v jednom z trámů o výztuž.

Složka (množství složky v kg)	Směs 1	Směs 2	Směs 3
CEM I 42,5 R Českomoravský cement a.s. - Mokrý	385	385	-
SMŠ 380 Kotouč Štramberk s.r.o.	250	250	450
Vodní sklo sodné, Ms = 1,6 Vodní sklo Brno a.s.	-	-	65
50 %-ní roztok KOH Vodní sklo Brno a.s.	-	-	37
Voda - místní zdroje	210	210	160
Chrysofluid Premia 150 Chemie s.r.o. Praha	4,3	4,3	-
0/4 C4 LB Minerals s.r.o - Halámky	775	775	840
4/8 Kámen a písek s.r.o. - kamenolom Plešovice	355	355	380
8/16 Kámen a písek s.r.o. - kamenolom Plešovice	360	360	390
Dramix® RC65/35BN Bekaert Petrovice s.r.o.	0	40	40

Tab. 7 – Složení použitých směsí

Směs 1: samozhutnitelný beton

Směs 2: samozhutnitelný beton s drátky

Směs 3: alkalicky aktivovaný samozhutnitelný beton s drátky



Obr. 73



Obr. 74



Obr. 75

*Obr. 73 – Připravené roztoky alkalického aktivátoru
(vodní sklo + 50%ní roztok KOH)*

Obr. 74 – Navážené množství drátků Dramix RC65/35BN

Obr. 75 – Velkokapacitní míchačka

Po betobáži byly jednotlivé trámy označeny číslicemi a písmeny:

- *První trám* – označení **1N** - Směs 1 - z prostého samozhutnitelného betonu C40/50
- *Druhý trám* – označení **2N+D** - Směs 2 - z prostého samozhutnitelného betonu C40/50 s přidáním drátků Dramix® RC65/35BN
- *Třetí trám* – označení **3A+D** - Směs 3 – z alkalicky aktivovaného samozhutnitelného struskového betonu s přidáním drátků Dramix® RC65/35BN
- *Čtvrtý trám* - označení **4A+D** - Směs 3 - z alkalicky aktivovaného samozhutnitelného struskového betonu s přidáním drátků Dramix® RC65/35BN

- *Pátý trám* - označení **5A+D+V** - Směs 3 - z alkalicky aktivovaného samozhutitelného struskového betonu s přidáním drátků Dramix® RC65/35BN a s ocelářskou výztuží (4x R14 + třmínky 14x R6).

Toto zvolené označení trámů bude použito dále v textu i u následných grafů.

6.4 PRŮBĚH BETONÁŽÍ

K namíchání směsí byla použita míchačka pro přípravu betonů, směs přepravena do provozní haly a odtud násypkou pomocí vysokozdvížného vozíku dopravena k formám.

Připravené dřevěné formy trámů byly opatřeny odformovacím prostředkem Addiment a společně s formami na doprovodné vzorky naplněny. Jejich povrch byl poté uhlazen. Do zavadlé směsi byly umístěny dva úchyty cca. ve třetinách trámu pro snazší následnou manipulaci při odformování a převozu trámů do zkušební laboratoře.



Obr. 76 – Vybetonovaný trám 1N a doprovodné vzorky

Betonáž trámu 1N a 2N+D z prostého samozhutitelného betonu C40/50 (u 2N+D s přidáním drátků Dramix) probíhala téměř bez komplikací.

U směsi pro třetí trám – alkalicky aktivovaného betonu - se vycházelo ze zkušeností z laboratorních zkoušek prováděných na těchto materiálech již dříve v laboratořích firmy ŽPSV, a.s.. U následné betonáže třetího trámu a použité směsi 3

- z alkalicky aktivovaného struskového samozhutnitelného betonu s drátky Dramix, byl zvolen nižší vodní součinitel, směs byla sušší a vzhledem k technologickým potížím a tím i delší prodlevě mezi namícháním směsi a jejím litím do formy, došlo k částečnému zatuhnutí směsi v násypce. Směsí se nakonec ale i přes vzniklé potíže podařilo formu naplnit. Při odformování po 28 dnech se však ukázalo, že směs byla příliš tuhá a u trámu bylo znatelné velmi špatné zhutnění (doprovodné vzorky chyby nevykazovaly).



Obr. 77



Obr. 78

Obr. 77 – Směs 3 u trámu 3A+D

Obr. 78 – Směs 3 vysypávaná z násypky do formy



Obr. 79 – Vybetonovaný trám 3A+D

Po betonáži byly povrchy trámů opatřeny proti vysychání přípravkem CHRYSO Cure. Všechny tři trámy i doprovodné vzorky byly popsány uvedeným značením 1N, 2N+D, 3A+D.



Obr. 80



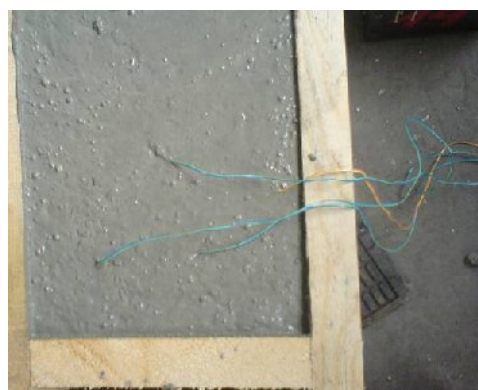
Obr. 81

Obr. 80 – Pohled na vybetonované trámy a doprovodné vzorky
Obr. 81 – Ošetření povrchu trámů přípravkem CHRYSO Cure

Těsně po betonáži byly do směsí umístěny čidla pro sledování teploty materiálů. Pro zkoušku akustické emise, byly po zatuhnutí (cca. po 9 hodinách) na povrchy trámů umístěny snímače.



Obr. 82

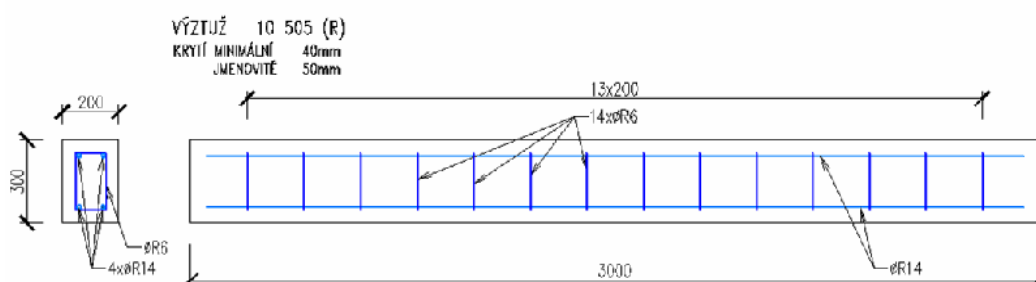


Obr. 83

Obr. 82 – Umístění snímačů pro zkoušku akustické emise
Obr. 83 – Umístění čidel pro sledování teploty materiálů

Vzhledem k nedokonalému zhutnění trámu 3A+D z alkalicky aktivovaného betonu bylo rozhodnuto o vybetonování dalších dvou trámů. U nově betonovaných trámů ze směsi 3 byl po zkušenosti s příliš tuhou směsí, nepatrně zvýšen vodní součinitel. Toto se projevilo i na poklesu pevností a dalších vlastností měřených na doprovodných vzorcích.

Druhá betonáž jak již bylo zmíněno byla provedena po 28 dnech od první betonáže. Formy byly po odformování předchozích trámů očištěny, převezeny na místo betonáže, nově smontovány a srovnány do roviny. Jeden z trámů byl navíc doplněn o ocelářskou výztuž a třmínky. Ta byla svázána vedle připravených forem a následně do jedné z forem vložena. Jednalo se o ocelové pruty 4x R14 se zvoleným rozmístěním třmínků 14x R6. Krytí výztuže s označením 10 505 (R) bylo minimálně 40 mm, jmenovité krytí 50 mm. Tímto byla dokončena příprava pro betonáž trámů 4A+D a 5A+D+V.



Obr. 84 – Schéma výztuže



Obr. 85



Obr. 86

Obr. 85 – Připravené formy pro betonáž zbylých dvou trámů

Obr. 86 – Detail výztuže u trámu 5A+D+V

Po předchozí zkušenosti s časovou prodlevou a rychlým tuhnutím směsi 3, bylo s tímto při betonáži připravených dvou forem počítáno a následná betonáž proběhla již bez komplikací. Opět byly s touto namíchanou směsí naplněny i připravené formy doprovodných vzorků.



Obr. 87



Obr. 88

Obr. 87 – Dovezená násypka se směsí 3 pro betonáž do připravených forem

Obr. 88 – Vybetonované trámy 4A+D a 5A+D+V s doprovodnými vzorky

6.5 ODFORMOVÁNÍ

Doprovodné vzorky první etapy betonáže byly druhý den po betonáži odvezeny do laboratoře a odformovány. Aby nedošlo k záměně, byly řádně popsány a na první řadě vzorků byly provedeny zkoušky pevností po jednom dni.

Zbylé vzorky pro zkoušky po 7, 28 a 90 dnech byly uloženy do normované vodní lázně určené pro skladování vzorků.



Obr. 89



Obr. 90

Obr. 89 – Dovězené doprovodné vzorky v laboratoři

Obr. 90 – Odformování krychlí



Obr. 91



Obr. 92

Obr. 91 – Popsání jednotlivých doprovodných vzorků z první etapy betonáže

Obr. 92 – Uložení vzorků pro zkoušky po 7, 28 a 90 dnech do vodní lázně

Po 28 dnech od první etapy betonáže byly odformovány první tři trámy 1N, 2N+D a 3A+D. Trámy z prostého samozhutitelného betonu C40/50 nevykazovaly po odbednění žádné poškození ani žádné vady vlivem špatného ztuhnutí. Třetí trám z alkalicky aktivovaného samozhutitelného betonu byl opakem, vlivem uvedené časové prodlevy při dopravě směsi k formě.



Obr. 93 – Částečně odformovaný trám 2N+D



Obr. 94 – Částečně odformovaný trám 3N+D

Částečně odformované trámy byly vysokozdvížným vozíkem vyvezeny z haly k úplnému odformování a následně převezeny do zkušební laboratoře k lisu.



Obr. 95 – Odvoz trámů z haly



Obr. 96



Obr. 97

Obr. 96 – Částečně odformované trámy uložené na dvoře

Obr. 97 – Vyjmutí trámů z formy



Obr. 98 – Zcela odformované trámy



Obr. 99 – Dovoz trámů do laboratoře

Podobně jako u této první etapy byly odformovány doprovodné vzorky a trámy z druhé etapy betonáže. Odformování samotných trámů proběhlo odlišně než u první řady a to s použitím malého jeřábu přímo v laboratoři.



Obr. 100 – Převezené trámy z druhé etapy betonáže ve formách v laboratoři



Obr. 101 – Odformované trámy 4A+D a 5A+D+V

6.6 ZKOUŠKY

Na vyrobených odformovaných trámech byly provedeny ohybové zkoušky v místní laboratoři na lisu, na kterém se dříve zkoušely vyráběné pražce. Zároveň byla také použita nedestruktivní zkouška pomocí akustické emise (při tvrdnutí po dobu 28 dní a při samotném zatěžování).

Zkoušky prováděné na doprovodných vzorcích:

- pevnost v tlaku (po 1, 7, 28, 90-ti dnech) - krychle o hraně 150 mm
- pevnost v tahu za ohybu (po 1, 7, 28 dnech) - trámce 100 x 100 x 400 mm
- lomová houževnatost a lomová energie - trámce 80 x 80 x 480 mm
- pevnost v tlaku na zlomcích
- moduly pružnosti

Provedením zkoušek na zhotovených materiálech a porovnáním vlastností těchto materiálů, jejich kladů a záporů, lze získat nový směr a použití nejen ve stavebních oborech. Jednotlivé zkoušky a jejich výsledky jsou popsány v následující kapitole, kde jsou ze získaných výsledků provedeny počítačové simulace pomocí programů SCIA ESA a OOFEM.

Vzhledem k barevným změnám probíhajícím při zrání alkalicky aktivovaného struskového betonu (tmavě zelená barva časem mění se na šedou) byla na pojivové matrici v různém stáří vzorků (28 a 60 dní) provedena také analýza přítomných fází pomocí metody rentgenové difrakce (XRD) a chemické složení stanoveno pomocí rentgenové fluorescenční analýzy (XRF).

V závěru následující kapitoly je zhodnoceno i ekonomické porovnání jednotlivých směsí (klasický beton vs. alkalicky aktivovaný struskový beton).

7. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ - ZKOUŠKY JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ, POROVNÁNÍ JEJICH VLASTNOSTÍ A VÝROBNÍCH NÁKLADŮ

7.1 ZKOUŠKY PROVÁDĚNÉ NA DOPROVODNÝCH VZORCÍCH

Zkoušky prováděné na doprovodných vzorcích byly realizovány po jednom dni od betonáže, dále pak po 7 dnech, 28 dnech a některé zkoušky pak i po 90 dnech.

Na krychlích o hraně 150 mm byla provedena pevnost v tlaku. Tato zkouška se dělala na závodě ŽPSV, a.s. v Byňově, na lisu, na kterém se následně prováděly i ohybové zkoušky na trámech.

Pevnosti v tahu za ohybu byly stanoveny na závodě ŽPSV a.s. v Brně na trámcích 100 x 100 x 400 mm, po 1, 7, 28 dnech a na jejich zlomcích změřeny pevnosti v tlaku. Na stejné velikosti trámů byl stanoven statický a dynamický modul pružnosti.

Dále byla na trámcích velikosti 80 x 80 x 480 mm stanovena lomová energie a lomová houževnatost.

U všech vzorků byly stanoveny měrné hmotnosti jednotlivých materiálů.

7.1.1 Pevnost v tlaku - krychle o hraně 150 mm

Po vyhodnocení zkoušek pevnosti v tlaku na krychlích bylo zjištěno, že hodnoty pevností vzorků ze samozhutnitelného betonu C40/50 jsou oproti vzorkům z alkalicky aktivovanému betonu vyšší. Rozdíl v pevnostech doprovodných vzorků vyrobených z alkalicky aktivovaných struskových betonů je způsobený rozdílným vodním součinitelem směsí. Z důvodu špatného zhutnění trámu 3A+D byl u následujících vyráběných trámů (4A+D a 5A+D+V) použit nepatrně vyšší vodní součinitel, čímž došlo i k nepatrným poklesům pevností v tlaku – viz. *Tab. 8*.



Obr. 102



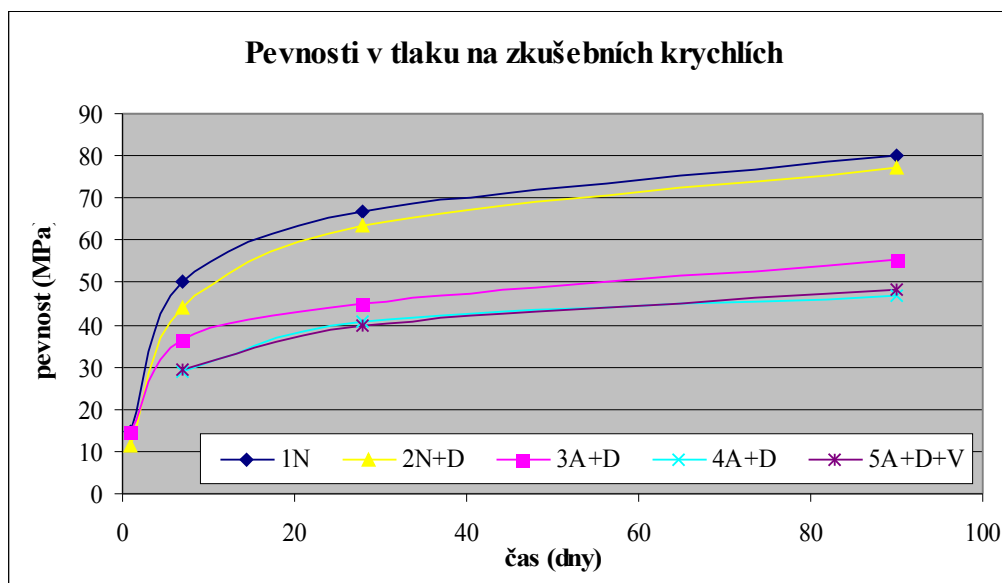
Obr. 103

Obr. 102 – Zkouška pevnosti v tlaku na krychli

Obr. 103 – Detail krychle a vzniklých trhlin

Směs	Pevnost v tlaku (MPa)			
	1 den	7 dní	28 dní	90 dní
1N	14,67	50,27	66,67	79,86
2N+D	11,15	43,92	63,28	77,30
3A+D	14,45	36,25	45,07	55,26
4A+D	-	28,67	40,79	46,96
5A+D+V	-	29,24	39,81	48,20

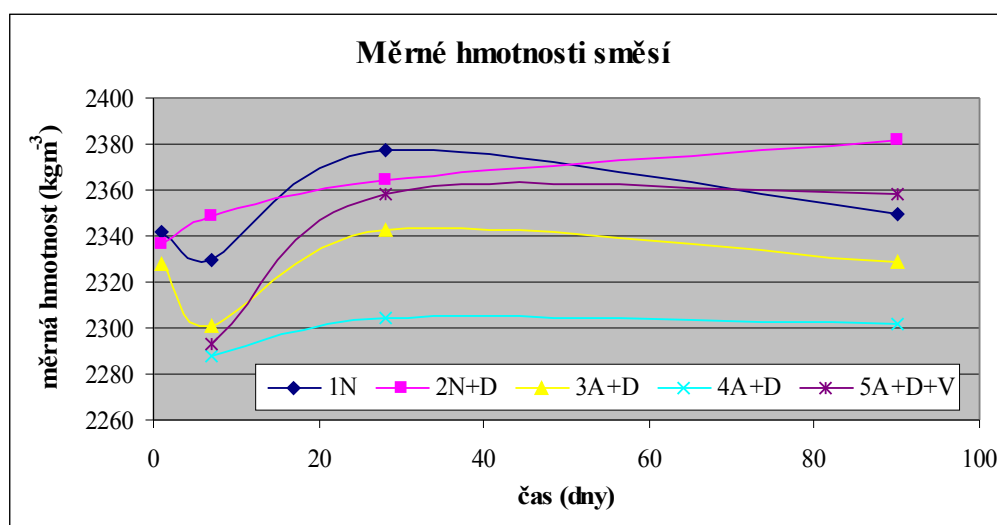
Tab. 8 – Pevnosti v tlaku



Graf. 12 – Pevnosti v tlaku na zkušebních krychlich

Směs	Měrná hmotnost (kgm ⁻³)				Průměrná hodnota
	1 den	7 dní	28 dní	90 dní	
1N	2341,6	2329,4	2377,6	2349,2	2349,5
2N + D	2336,4	2349,1	2364,3	2382,1	2358,0
3A + D	2327,6	2301,2	2342,6	2328,8	2325,0
4A+D	-	2287,6	2304,2	2301,6	2297,8
5A+D+V	-	2293,2	2357,9	2358,5	2336,5

Tab. 9 – Měrné hmotnosti



Graf. 13 – Měrné hmotnosti směsí

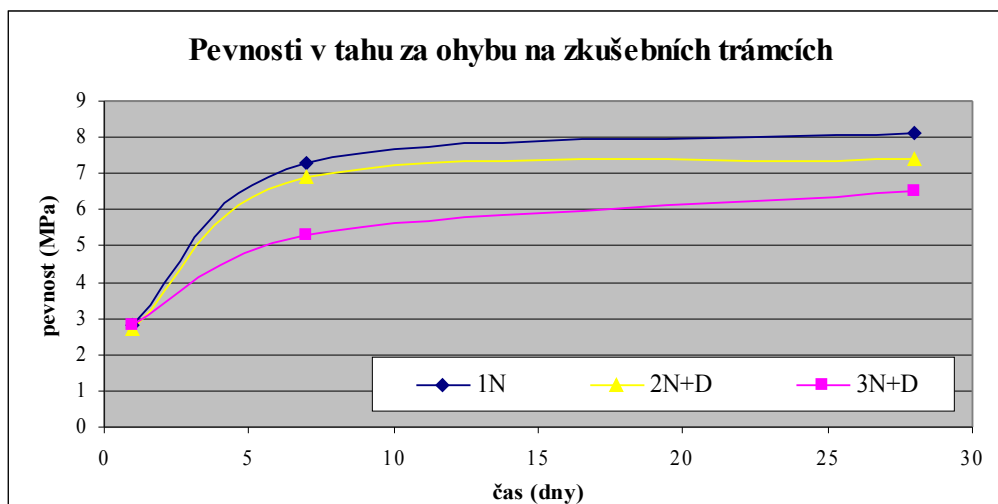
7.1.2 Pevnost v tahu za ohybu - trávce 100 x 100 x 400 mm

Pevnosti v tahu za ohybu byly provedeny po 1, 7 a 28 dnech, u čtvrté řady vzorků původně zamýšlených pro zkoušky pevnosti v tahu po 90 dnech byl na místo tohoto stanoven modul pružnosti.

Po vyhodnocení zkoušek pevnosti v tahu za ohybu na zkušebních trávcech bylo zjištěno, že hodnoty u vzorků ze samozhutitelného betonu C40/50 jsou oproti vzorkům z alkalicky aktivovaného betonu vyšší.

Směs	Pevnost v tahu za ohybu (MPa)		
	1 den	7 dní	28 dní
1N	2,8	7,3	8,1
2N+D	2,7	6,9	7,4
3A+D	2,8	5,3	6,5

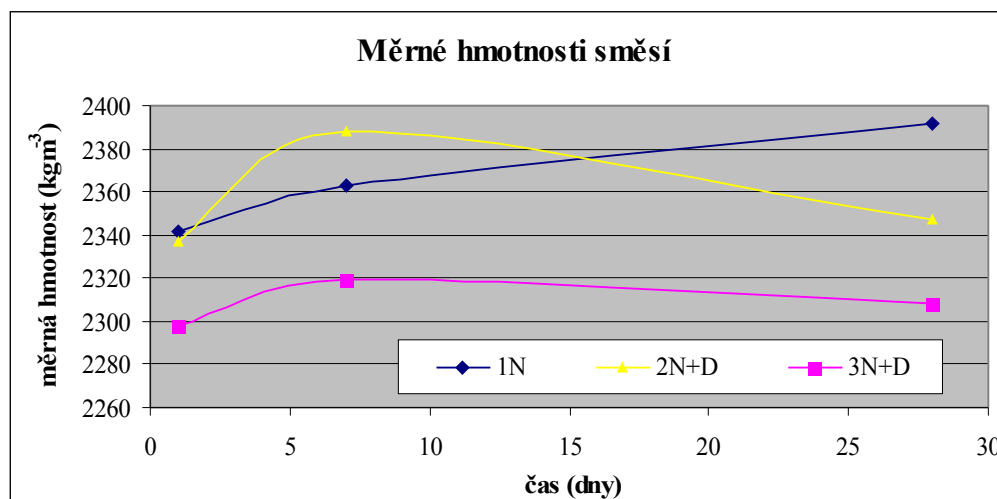
Tab. 10 – Pevnosti v tahu za ohybu



Graf. 14 – Pevnosti v tahu za ohybu na zkušebních trácích

Směs	Měrná hmotnost (kgm^{-3})		
	1 den	7 dní	28 dní
1N	2342,0	2363,0	2392,0
2N+D	2337,0	2388,0	2347,0
3A+D	2298,0	2319,0	2308,0

Tab. 11 – Měrné hmotnosti



Graf. 15 – Měrné hmotnosti směsí

7.1.3 Lomová houževnatost a lomová energie - trávce 80 x 80 x 480 mm

Na trávcech 80 x 80 x 480 mm byl mimo lomové houževnatosti a lomové energie také ještě měřen tah v ohybu a modul pružnosti. Výsledné hodnoty pro jednotlivé trávce jsou v následující tabulce – Tab. 12.

Měřená veličina		1N	2N+D	3A+D
Tah ohybem	[MPa]	6,6 ± 0,1	8,5 ± 1,5	6,1 ± 0,1
Tah ohybem - zářez	[MPa]	6,0 ± 0,5	7,4 ± 1,0	5,5 ± 0,1
Objemová hmotnost	[kgm ⁻³]	2380 ± 35	2337 ± 10	2312 ± 25
Modul pružnosti	[GPa]	27,5 ± 1,5	25,0 ± 1,8	20,4 ± 0,6
Lomová houževnatost	[MPam ^{1/2}]	1,340 ± 0,015	9,2 ± 0,2	7,08 ± 0,2
Lomová energie - přepočet	[Nm ⁻¹]	65,3 ± 2,1	3385,6 ± 97,2	2457,2 ± 58,4
Lomová práce	[Nm]	220 ± 10	-	-

Tab. 12 – Výsledky zkoušek na trávcech 80 x 80 x 480 mm

Nejdříve byly provedeny lomové zkoušky na trávcech 480 x 80 x 80 mm s centrálním zářezem do třetiny výšky (cca 28 mm). Rozpětí podpěr bylo 400 mm. Z této zkoušky je pevnost v tahu ohybem na naříznutých trávcech, modul pružnosti (v tahu ohybem na naříznutých trávcech), lomová houževnatost a lomová práce (pokud byla získána dostatečně dlouhá sestupná větev, což u drátkobetonu nebylo). Následně

byla na jednom zlomku z každého trámce (dlouhém cca 260 mm) zkoušena pevnost v tahu ohybem (tříbodově) při rozpětí 220 mm (výška trámce cca 80 mm, takže poměr výška/ rozpětí $2,75 \approx 3$ jako u klasické zkoušky).

Díky koncentraci napětí v okolí zářezu by měla být pevnost v tahu ohybem na naříznutém trámci vždy menší, než klasická pevnost v tahu ohybem. Navíc trochu odráží vlastnosti betonu uprostřed průřezu, což je zajímavé třeba u sledování dlouhodobého vývoje pevností nebo u mrazuvzdornosti.

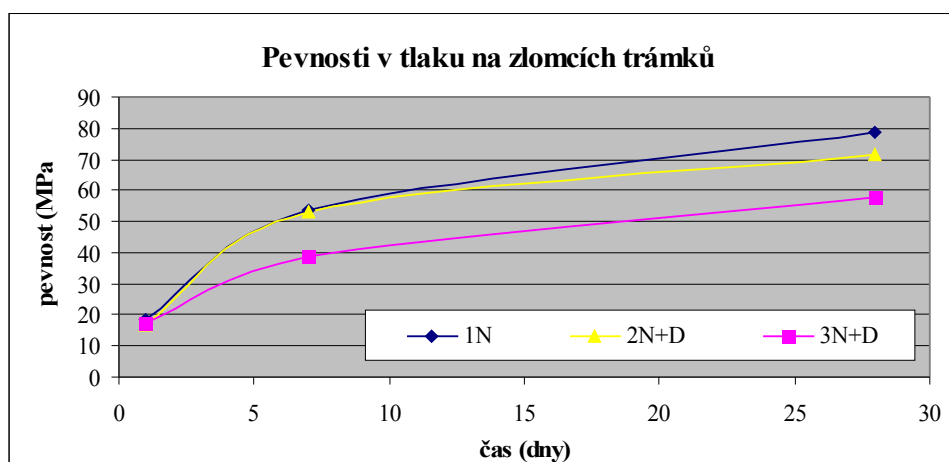
7.1.4 Pevnost v tlaku na zlomcích

Na původních trámcích 100 x 100 x 400 mm po provedené zkoušce pevnosti v tahu za ohybu, byla stanovena pevnost v tlaku na zlomcích.

Stejně jako u zkoušek provedených na krychlích jsou i zde patrné nižší hodnoty pevností v tlaku pro alkalicky aktivované betony v porovnání s klasickým samozhutnitelným betonem na bázi portlandkého cementu C40/50.

Směs	Pevnost v tlaku na zlomcích (MPa)		
	1 den	7 dní	28 dní
1N	18,3	53,5	78,8
2N+D	16,6	53,0	71,5
3A+D	17,5	38,7	57,8

Tab. 13 – Pevnosti v tlaku na zlomcích



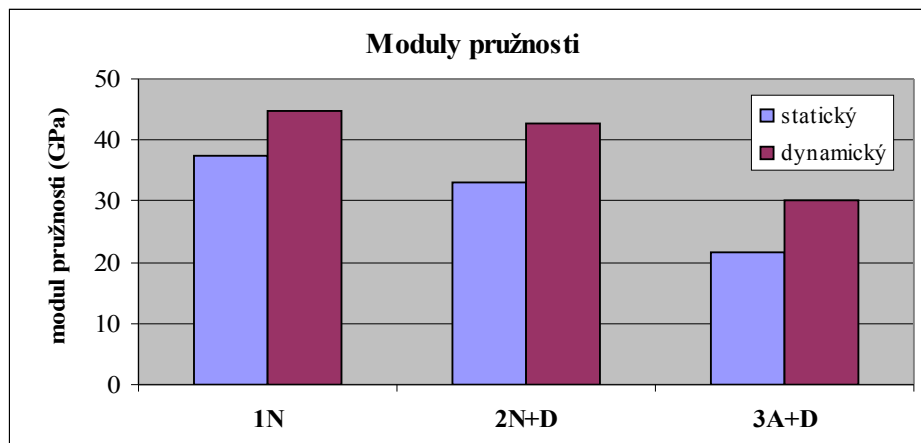
Graf. 16 – Pevnosti v tlaku na zlomcích trámek

7.1.5 Moduly pružnosti

Moduly pružnosti – statický a dynamický opět u všech směsí byly stanoveny na trámcích 100 x 100 x 400 mm. U alkalické směsi jsou hodnoty oproti betonu opět nižší.

Směs	Modul pružnosti (GPa)	
	Statický	Dynamický
1N	37,5	44,8
2N+D	33,1	42,6
3A+D	21,6	30,1

Tab. 14 – Moduly pružnosti



Graf. 17 – Moduly pružnosti

7.2 ZKOUŠKY PROVÁDĚNÉ NA TRÁMECH

Po 28 dnech od betonáže byly na trámech v laboratoři ŽPSV, a.s. na lisu provedeny ohybové zkoušky a doprovodné zkoušky stanovení akustické emise.



Obr. 104 – Laboratoř s lisem

Trámy byly pomocí malého jeřábu umístěny na posuvnou část lisu, dopraveny na střed a upevněny proti posunu. Bylo provedeno rozmístění a uchycení snímacích hodiniek a čidel. Aby nedošlo ke špatnému odečtu hodnot v průběhu zatěžování byly hodnoty na snímacích hodinkách zaznamenávány fotoaparátem a videokamerou a později vyhodnoceny.



Obr. 105



Obr. 106

Obr. 105 – Umístění trámu na posuvnou část lisu jeřábem

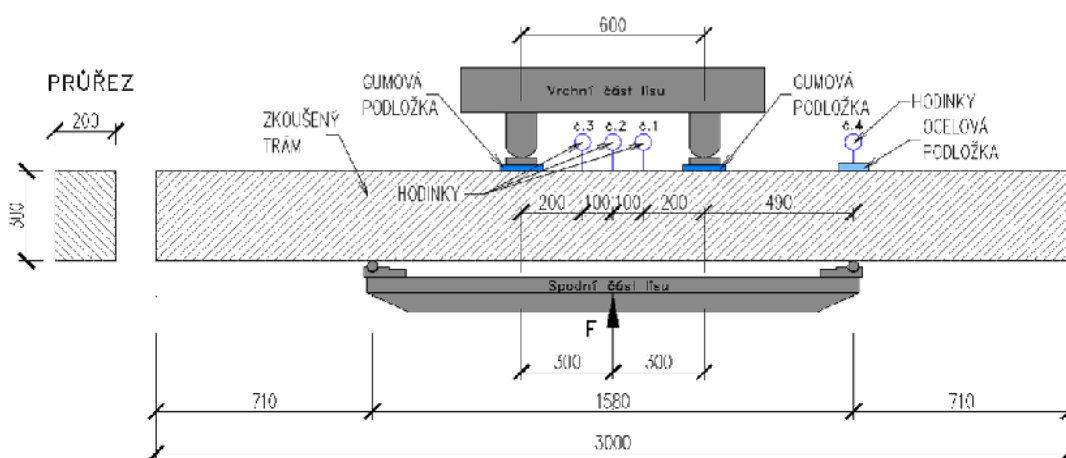
Obr. 106 – Dopravení do prostoru lisu



Obr. 107 – Trám umístěný v lisu



Obr. 108 – Umístění snímacích hodin a čidel



Obr. 109 – Schéma trámu umístěného v lisu s rozmístěním jednotlivých hodin

7.2.1 Ohybové zkoušky na trámech

Prvním zkoušeným trámem byl trám označený 3A+D. Následovaly zkoušky trámu 1N a 2N+D. Po 28 dnech pak zkoušky zbylých dvou trámů 4A+D a 5A+D+V.

- Třetí trám – označení 3A+D - Směs 3 – z alkalicky aktivovaného samozhutnitelného struskového betonu s přidáním drátků Dramix RC65/35BN

Jako první byl zvolen tento trám z důvodu jeho poškození vlivem špatného zhutnění. Na tomto trámu byla vyzkoušena doprava k lisu, jeho uchycení a následný způsob měření.

Při zatěžování trámu vlivem špatné regulace působící síly došlo ke skokovému vzrůstu ze 4 kN na 60 kN, čímž vznikla trhлина a trám se zlomil.

Při dalších pokusech u zbylých trámů byl proto zvolen mnohem jemnější a opatrnější způsob zatěžování.



Obr. 110 – Trhлина – trám 3A+D



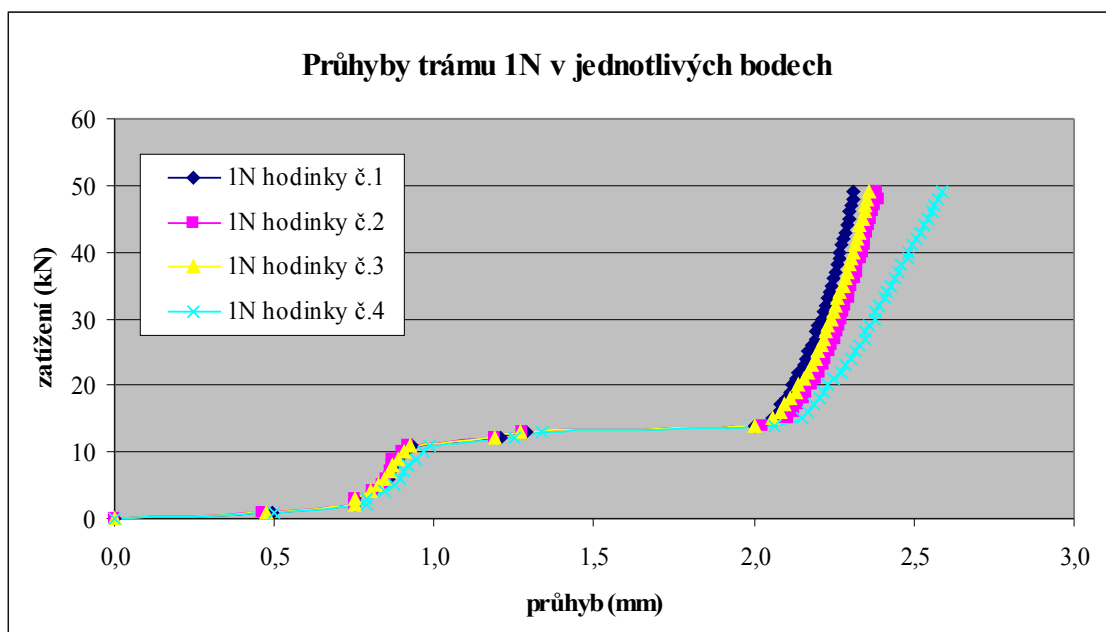
Obr. 111 – Detail materiálu na lomu

- První trám – označení 1N - Směs 1 - z prostého samozhutnitelného betonu C40/50

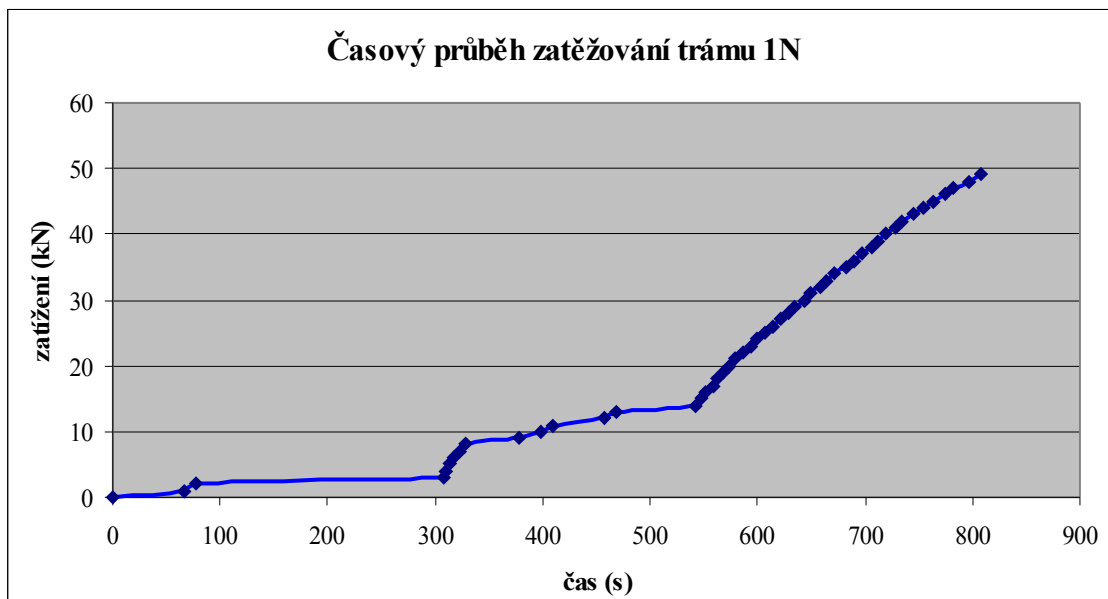
Namáhaný průřez $301,85 \times 205,75 = 62105,64 \text{ mm}^2$

Vznik trhliny a úplné zlomení trámu při 49 kN

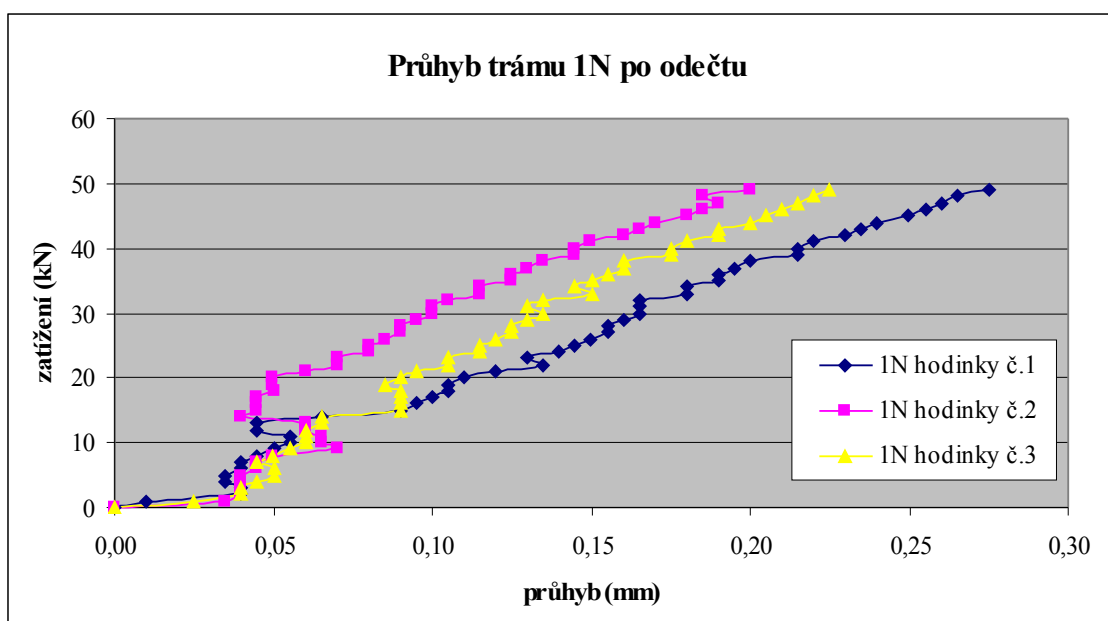
Jednotlivé naměřené hodnoty jsou v příloze – **PŘÍLOHA A**



Graf. 18 – Průhyb trámu 1N v jednotlivých bodech



Graf. 19 – Časový průběh zatěžování trámu 1N



Graf. 20 – Průhyb trámu 1N po odečtu



Obr. 112



Obr. 113

Obr. 112 – Trhlina – trám 1N

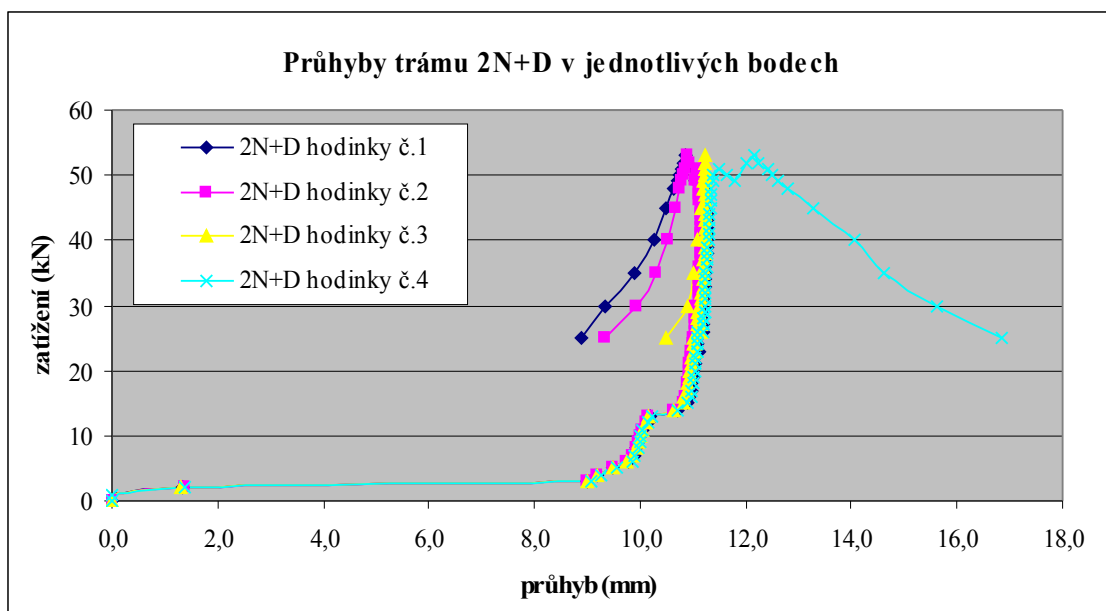
Obr. 113 – Detail materiálu na lomu

- Druhý trám – označení 2N+D - Směs 2 - z prostého samozhutitelného betonu C40/50 s přidáním drátků Dramix RC65/35BN

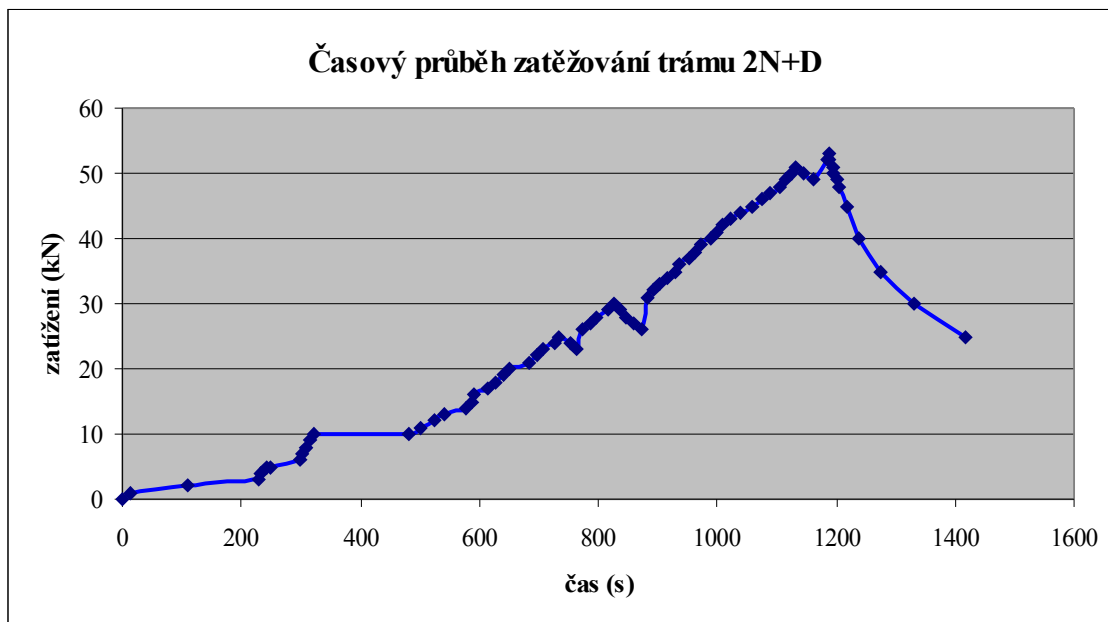
Namáhaný průřez $301,70 \times 203,05 = 61260,19 \text{ mm}^2$

Vznik trhliny při 51 kN

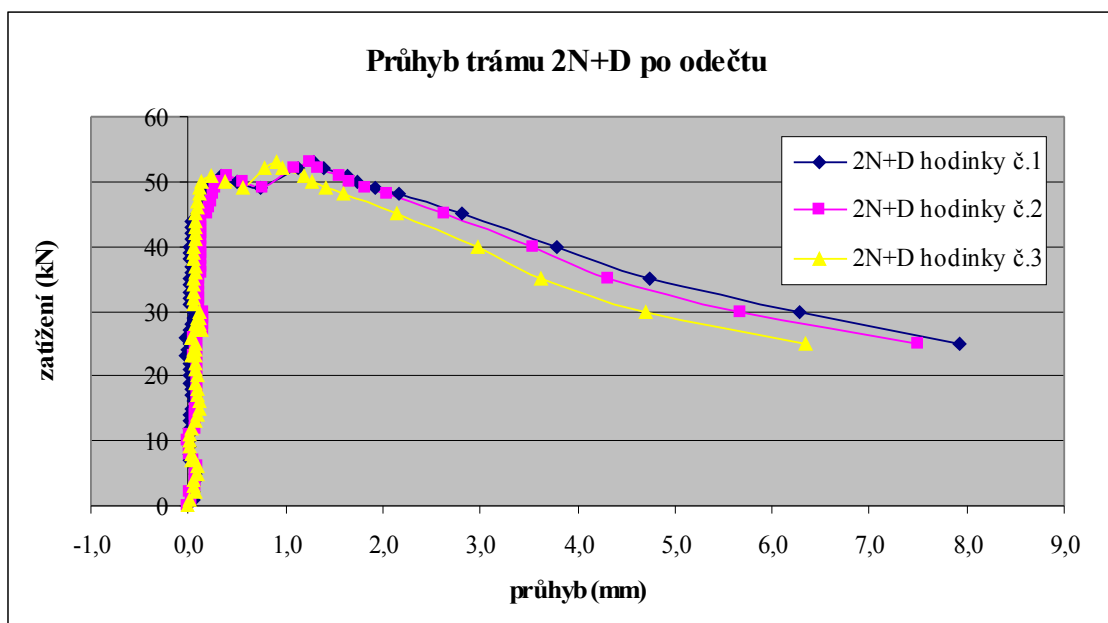
Jednotlivé naměřené hodnoty jsou v příloze – **PŘÍLOHA B**



Graf. 21 – Průhyb trámu 2N+D v jednotlivých bodech



Graf. 22 – Časový průběh zatěžování trámu 2N+D



Graf. 23 – Průhyb trámu 2N+D po odečtu



Obr. 114 – Trhlina – trám 2N+D



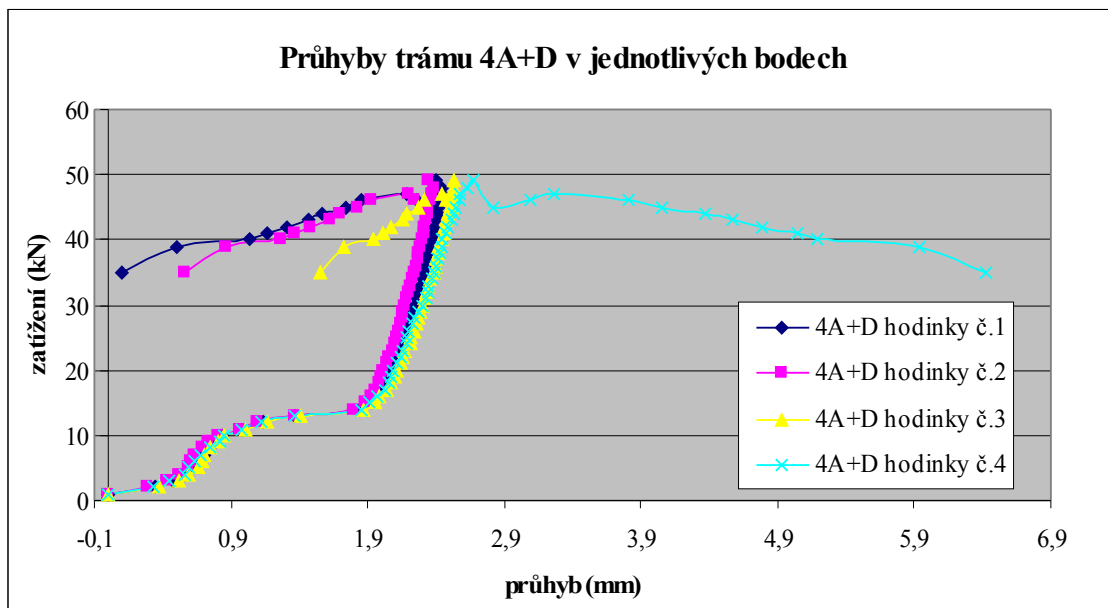
Obr. 115 – Detail trhliny – trám 2N+D

- Čtvrtý trám - označení 4A+D - Směs 3 - z alkalicky aktivovaného samozhutnitelného struskového betonu s přidáním drátků Dramix RC65/35BN

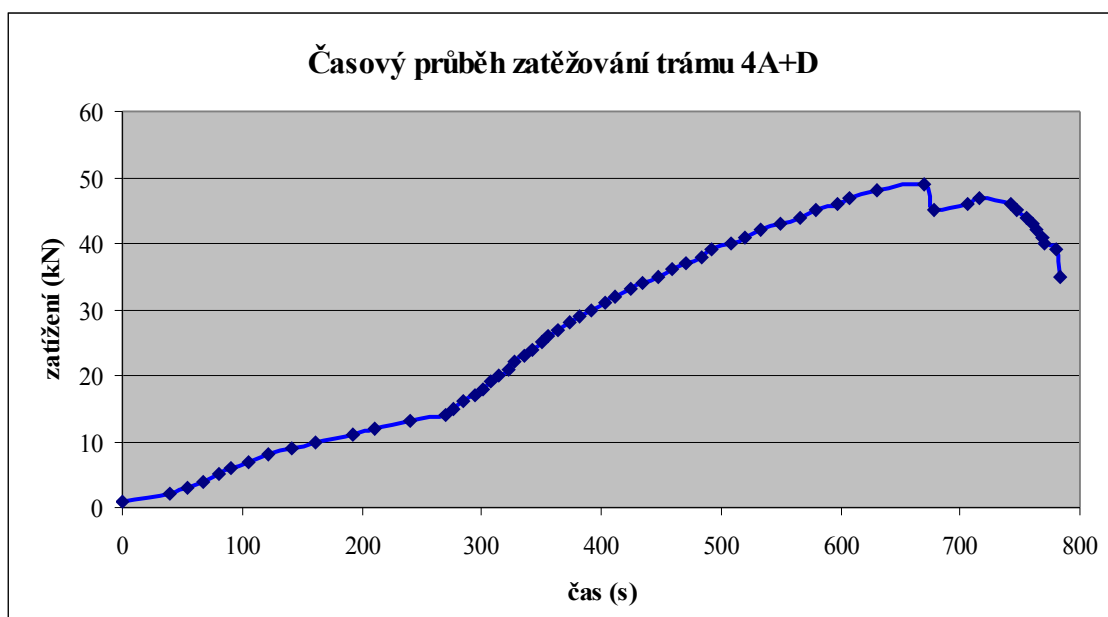
Namáhaný průřez $299,90 \times 212,00 = 63578,80 \text{ mm}^2$

Vznik trhliny při 49 kN

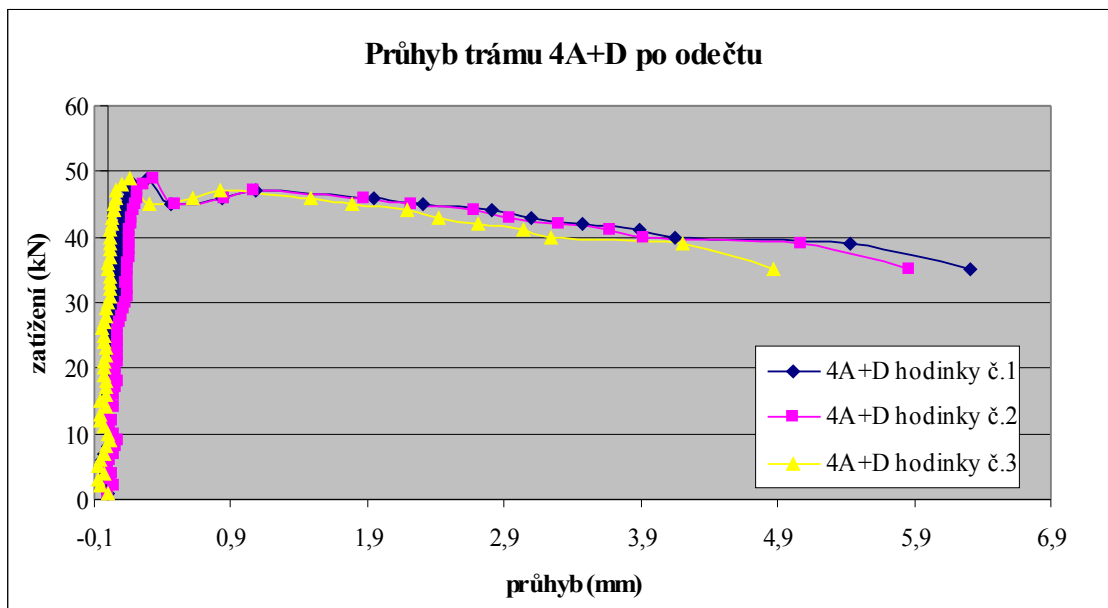
Jednotlivé naměřené hodnoty jsou v příloze – **PŘÍLOHA C**



Graf. 24 – Průhyb trámu 4A+D v jednotlivých bodech



Graf. 25 – Časový průběh zatěžování trámu 4A+D



Graf. 26 – Průhyb trámu 4A+D po odečtu



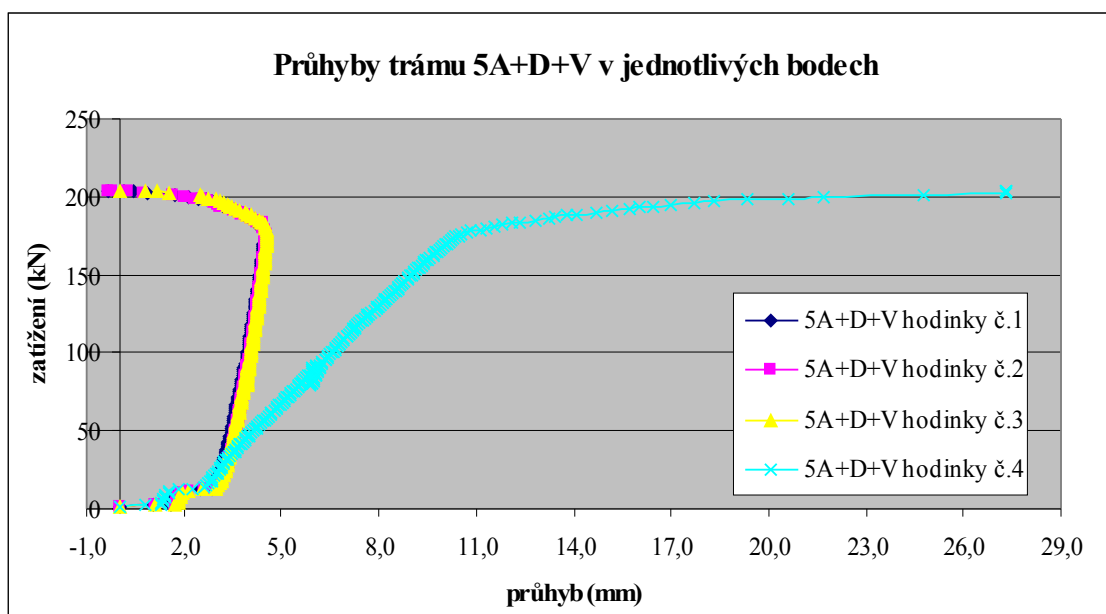
Obr. 116 – Trhlina – trám 4A+D

- Pátý trám - označení 5A+D+V - Směs 3 - z alkalicky aktivovaného samozhutnitelného struskového betonu s přidáním drátků Dramix RC65/35BN a s ocelářskou výztuží (4x R14 + třmínky 14x R6).

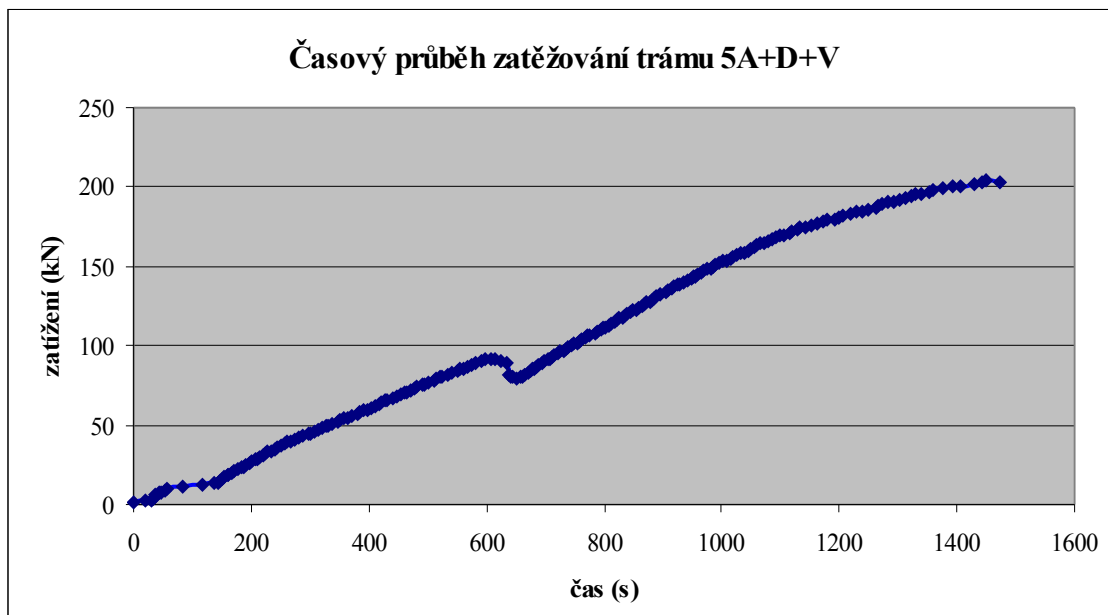
Namáhaný průřez $298,30 \times 212,70 = 63448,41 \text{ mm}^2$

Vznik trhliny při 77 kN

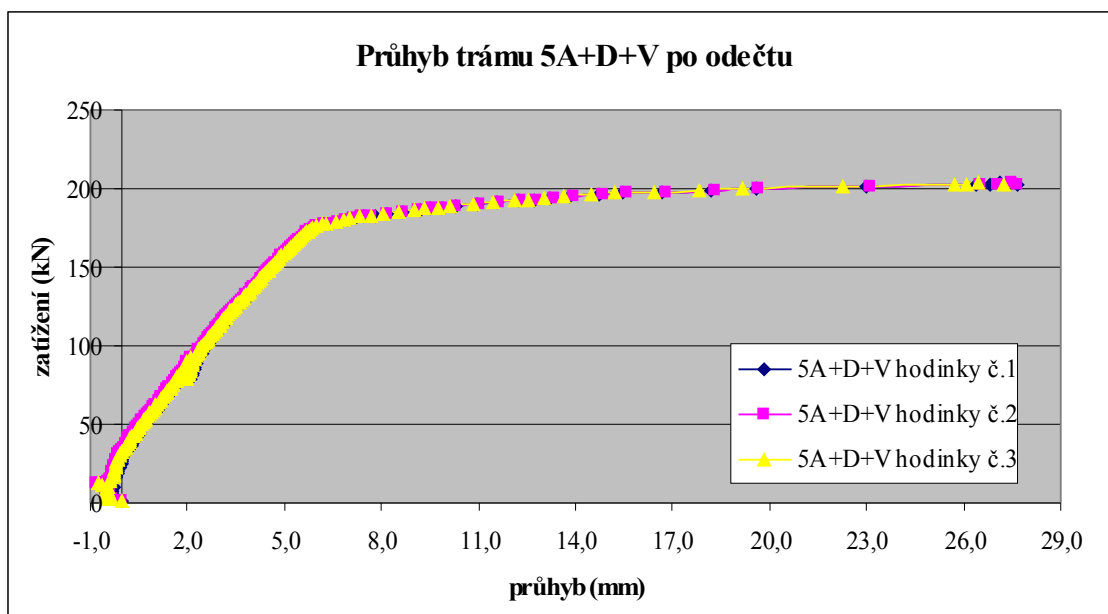
Jednotlivé naměřené hodnoty jsou v příloze – **PŘÍLOHA D**



Graf. 27 – Průhyb trámu 5A+D+V v jednotlivých bodech



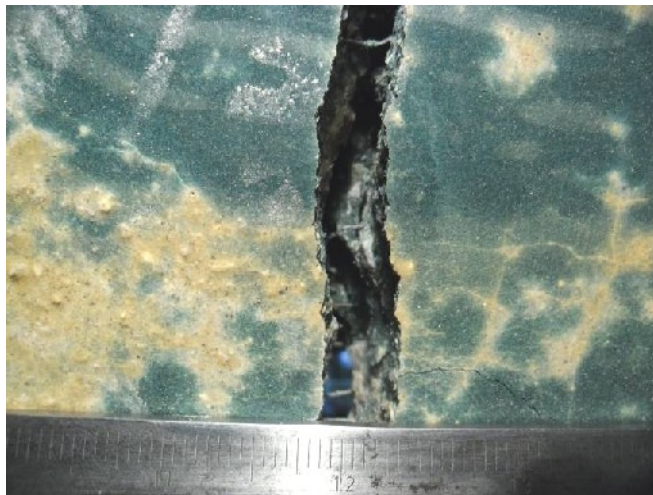
Graf. 28 – Časový průběh zatěžování trámu 5A+D+V



Graf. 29 – Průhyb trámu 5A+D+V po odečtu



Obr. 117 – Trhliny – trám 5A+D+V



Obr. 118 – Detail trhliny – trám 5A+D+V



Obr. 119 – Viditelné prohnutí trámu



Obr. 120 – Detail třmínku a výztuže

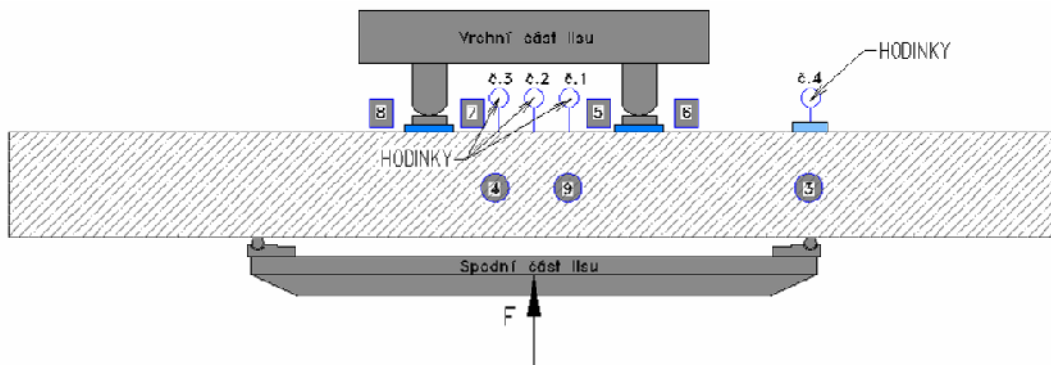
7.2.2 Zkouška pomocí akustické emise

Touto defektoskopickou metodou na integrální detekování, lokalizaci a vyhodnocení materiálových vad a trhlin, byly vyhodnoceny procesy probíhající v materiálu během zatěžování.

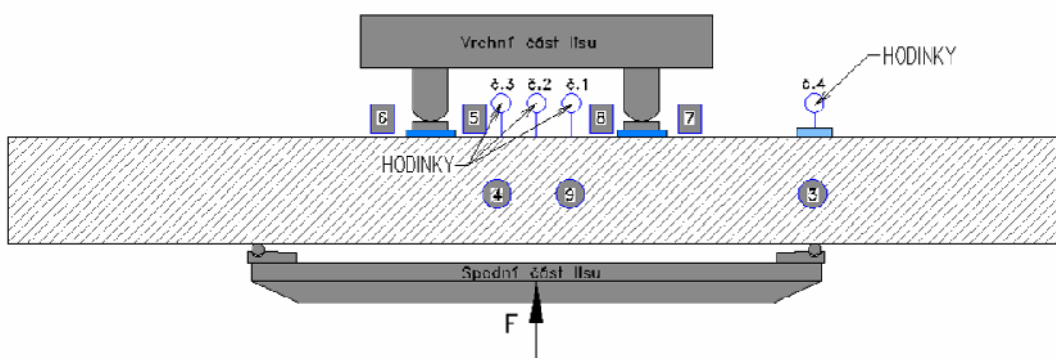
Na trám se rozmístily snímací sondy, které byly přes předzesilovač signálu a koaxiální kabel připojeny na analyzátor vln a řídicí počítač. Jako pomocná veličina byla zaznamenávána teplota. Naměřená data v počítači byla následně připravena k dalšímu zpracování.

Měření bylo provedeno aparaturou Dakel XEDO se 7 kanály. Kanály 5 až 8 měly frekvenční filtr nastavený na hodnotu od 27 kHz do 405 kHz a zesílení 20 dB. Ostatní kanály 3, 4 a 9 měly frekvenční vstupní rozsah od 500 kHz do 2 MHz, u nich bylo nastaveno zesílení 35 dB. Pro měření byly použity snímače IDK 09 (kanály 3, 4 a 9) a snímače MTPA - 15 (kanály 5 až 8).

Rozmístění snímačů je na *Obr. 121 a Obr. 122.*



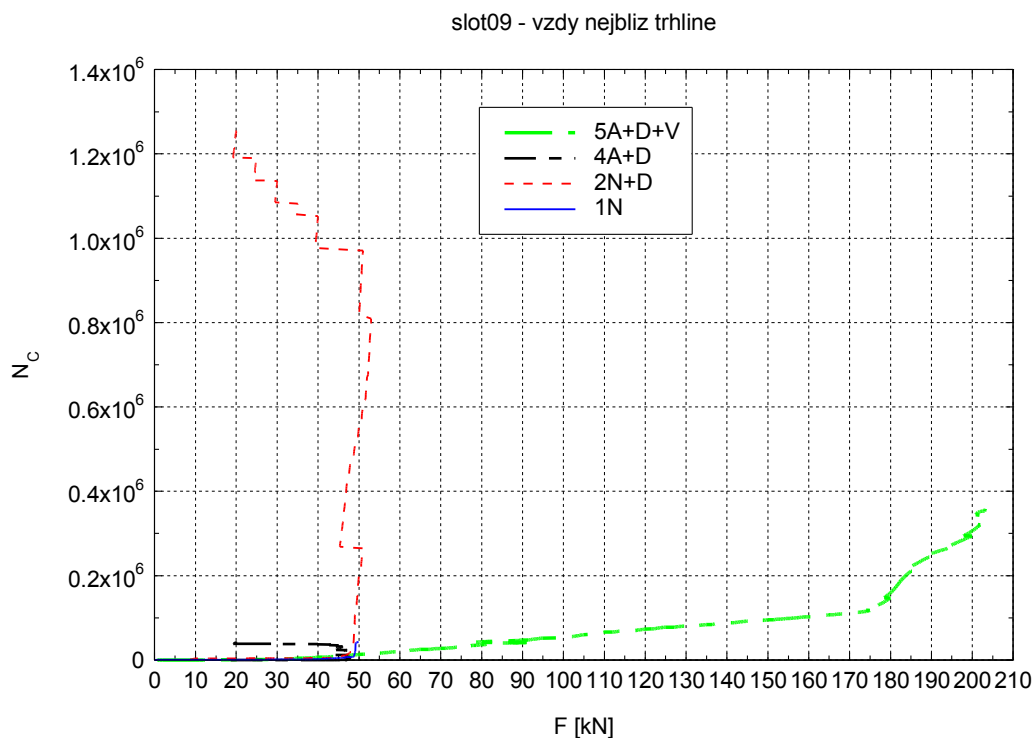
Obr. 121 – Rozmístění snímačů - trám 1N a 2N+D



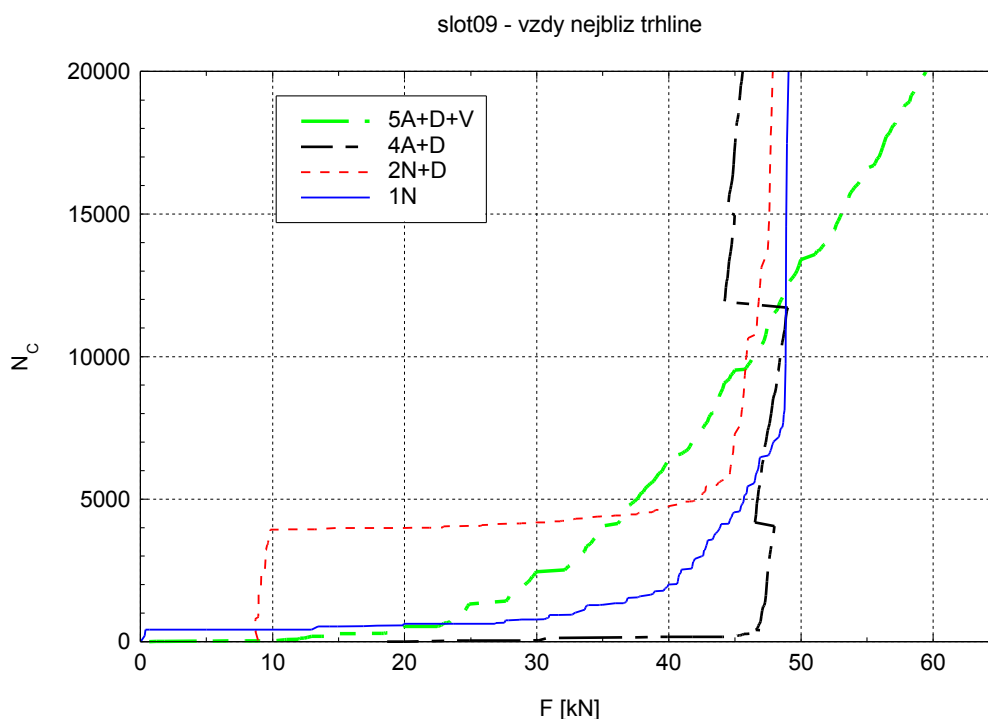
Obr. 122 – Rozmístění snímačů - trám 4A+D a 5A+D+V

Z dat získaných snímačem umístěným nejblíže ke středové trhlině byly vytvořeny grafy – Graf. 30 a Graf. 31. Závislost aktivity akustické emise na síle (Graf. 30) ukazuje, že trám 5A+D+V má největší pevnost až do síly 175 kN, kdy je zřetelný vzestup aktivity akustické emise. U ostatních vzorků je zřejmý nárůst aktivity akustické emise již v oblasti pod 50 kN.

Trám 1N (Graf. 31) má první nárůst emisní aktivity na hodnotě 10 kN, který nemusí být významný. Trám 5A+D+V má oproti ostatním trámům první náběh již na hodnotě síly mezi 20 kN a 30 kN, avšak i nadále odolává zatížení. Ostatní trámy přibližně od síly 40 kN vykazují výrazný nárůst emisní aktivity a tedy i deformaci celé struktury. Pokles síly pak společně s narůstající emisní aktivitou ukazují na konečnou deformaci struktury.



Graf. 30 – Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F

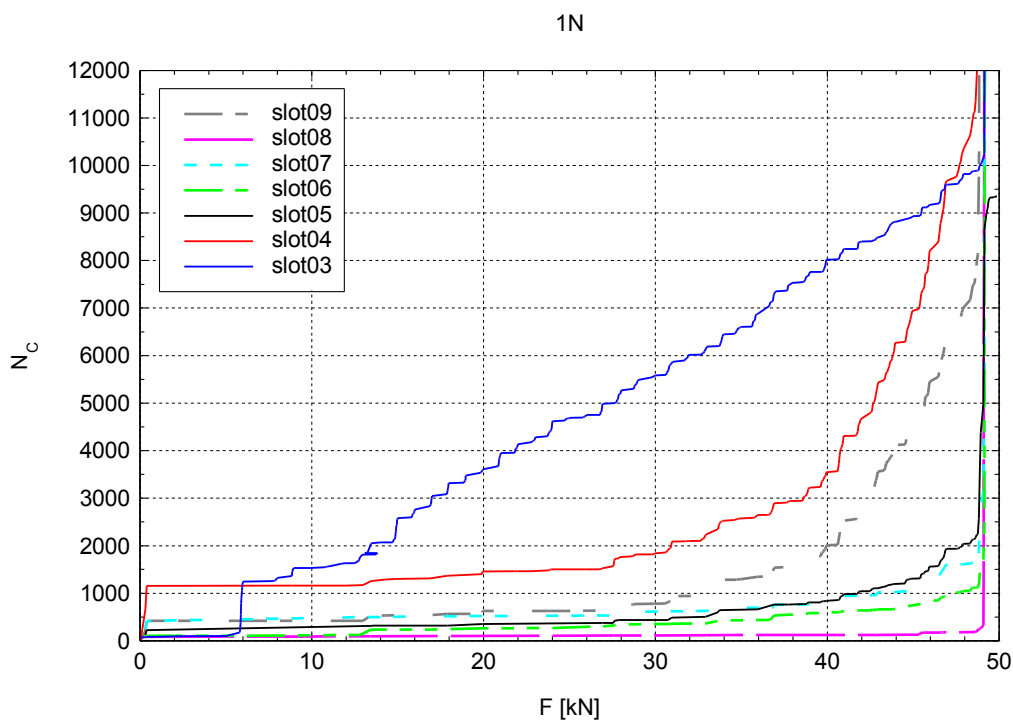


Graf. 31 – Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F

– výřez z grafu – Graf. 30

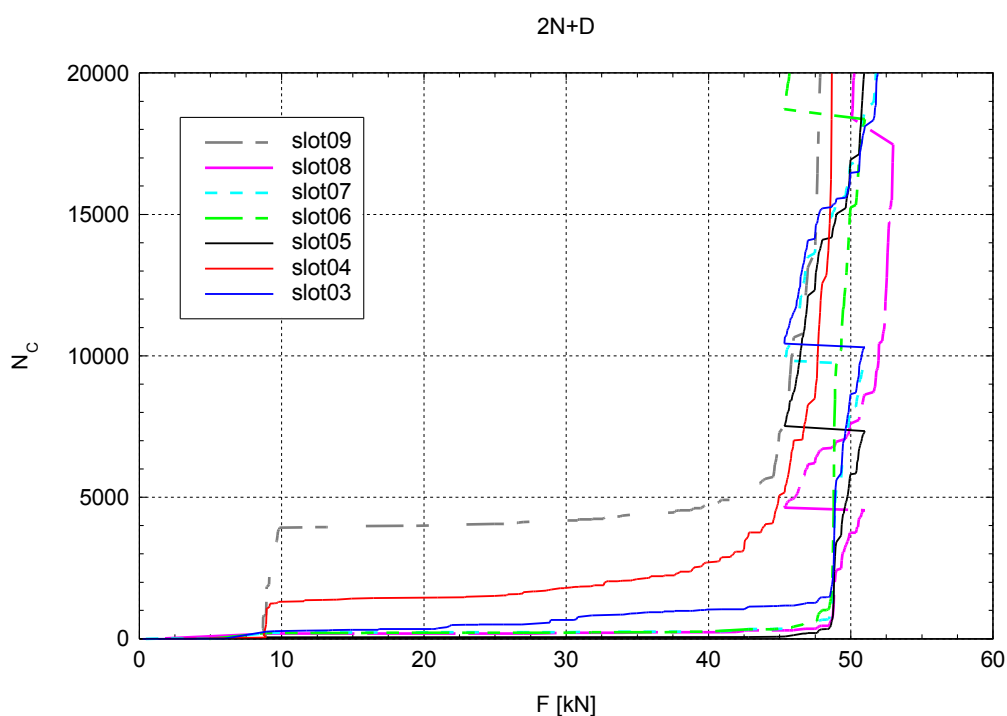
Pro vyhodnocení aktivity akustické emise byl využit nejčastěji používaný parametr - počet překmitů přes nastavenou úroveň.

Na grafu – *Graf. 32* je zobrazena aktivita akustické emise N_c v závislosti na zatěžovací síle F u všech použitých snímačů u trámu 1N. Nárůst aktivity ihned na počátku u kanálu 4 je způsoben ustálením vzorku při nastavení předzatižení. Emisní aktivita u kanálu 3, na rozdíl od ostatních kanálů, roste lineárně již od zatížení 6 kN, což může být způsobeno zachycením blízké mikrotrhliny, která nemá významný vliv na celkovou strukturu. Jedná se o vnikání podpory do nosníku, nad kterou byl snímač umístěn. Kanály 4, 9 a 5 mají začátek nárůstu emisní aktivity v oblasti nad 30 kN. V této fázi lze předpokládat vznik trhliny v blízkosti těchto snímačů v takovém rozsahu, že další použití trámu by bylo již nebezpečné. V oblasti 40 kN je zřejmý začátek destrukce struktury již v celé oblasti. Totální destrukce pak nastává v oblasti téměř 50 kN.



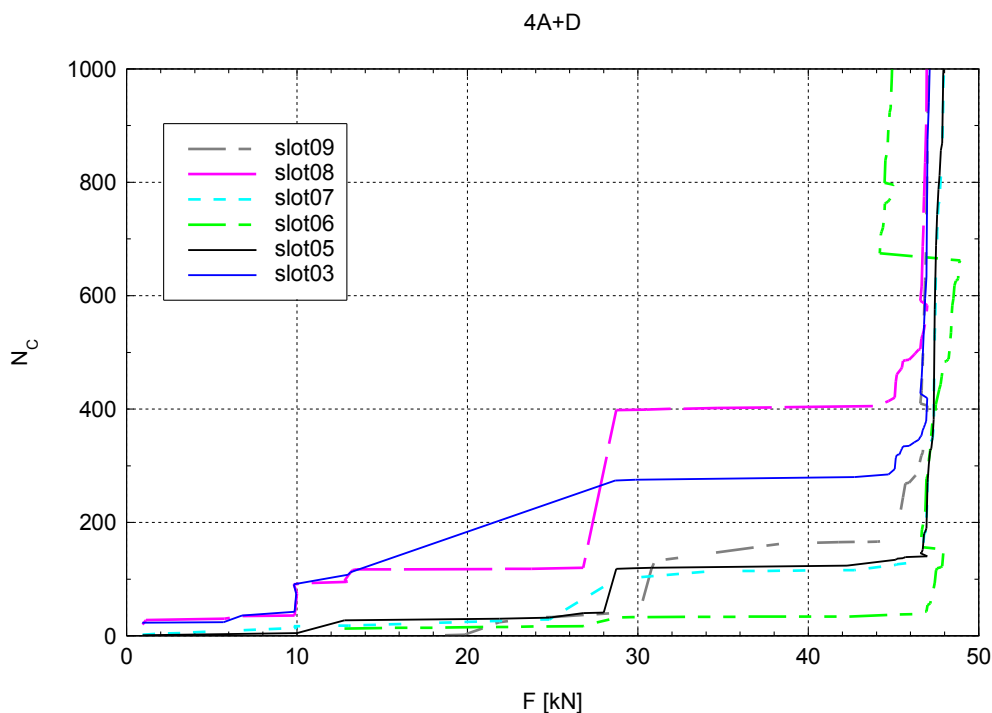
Graf. 32 – Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F u trámu 1N

V případě, že do betonu jsou vloženy drátky – trám 2N+D (Graf. 33), byla zvýšená aktivita akustické emise na kanálech 9 a 4 již při hodnotě 8 kN, což může značit vznik trhliny, která nemusí mít vliv na kvalitu struktury. Kanál 3, obdobně jako u trámu 1N, vykazuje emisní aktivitu dříve než ostatní snímače. Významný nárůst emisní aktivity je již od 20 kN, zejména na snímačích 9 a 4, které jsou nejbližší místa předpokládajícího vznik trhliny. Při 45 kN již zřetelně aktivita akustické emise roste, tedy vzorek je v oblasti významné deformace a na téměř 50 kN dochází k destrukci vzorku, tedy jeho betonové části. Vzorek drží na drátcích, avšak zatížení nelze zvětšovat.



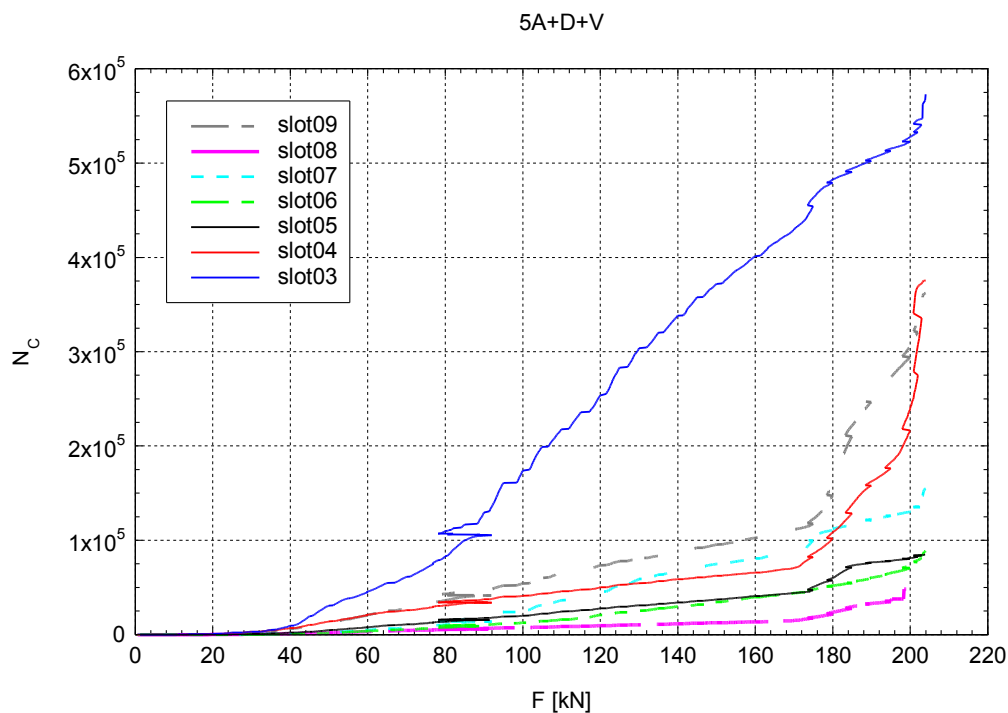
Graf. 33 – **Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F u trámu 2N+D**

Trám 4A+D (Graf. 34) vykazuje první aktivitu akustické emise na 10 kN, která nemusí být významná. Avšak významná aktivita je v oblasti nad 25 kN prakticky na všech kanálech. Další aktivita je zřetelná až v oblasti těsně před destrukcí tj. na 44 kN, kdy vzniká výrazný lom.

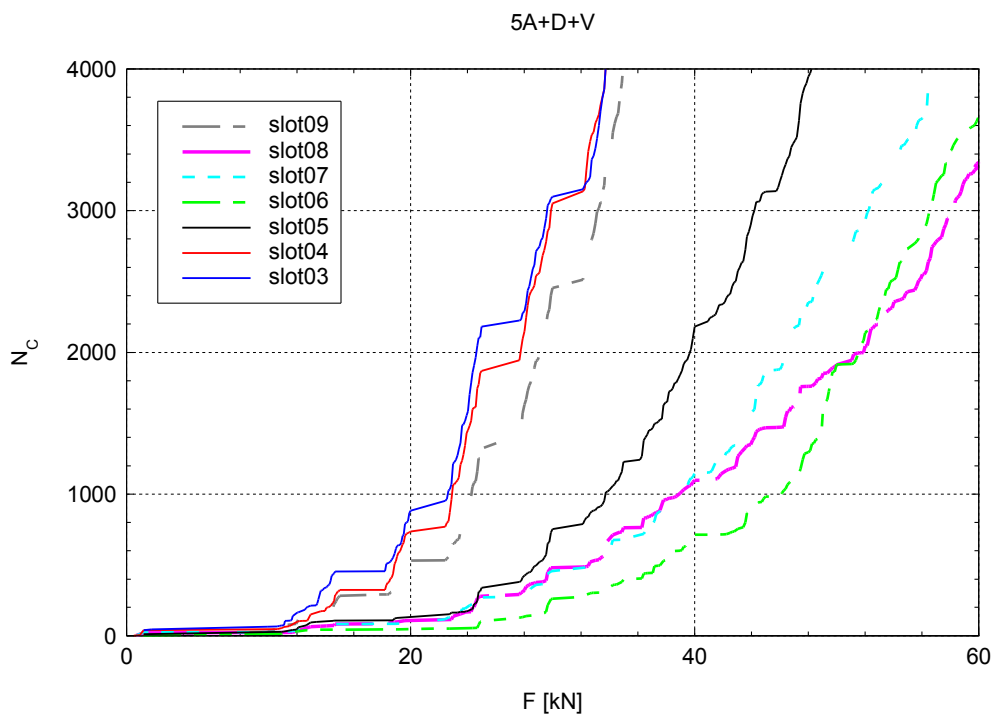


Graf. 34 – Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F u trámu 4A+D

Trám 5A+D+V (Graf. 35) vykazuje vlivem použití výztuže výrazně větší pevnosti. Deformace betonu je zřetelná v oblasti nad 40 kN. Destrukce kovové výztuže je v oblasti 170 kN, kdy začíná nárůst aktivity akustické emise. Vytvořená trhлина je v blízkosti kanálu 3 a roste nejvýznamněji po celou dobu zatěžování. V oblasti 10 kN (Graf. 36) je předpokládán z charakteru aktivity akustické emise na vznik první trhliny. Snímače 3, 4 a 9, které jsou umístěny na boční stěně lépe indikují vznik trhlin a jejich šíření. Od 25 kN už betonová struktura přestává držet vzorek a od 40 kN je vzorek již držen pouze výztuží, příp. drátky.



Graf. 35 – Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F
u trámu 5A+D+N



Graf. 36 – Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F
u trámu 5A+D+N – výřez z grafu – Graf. 35

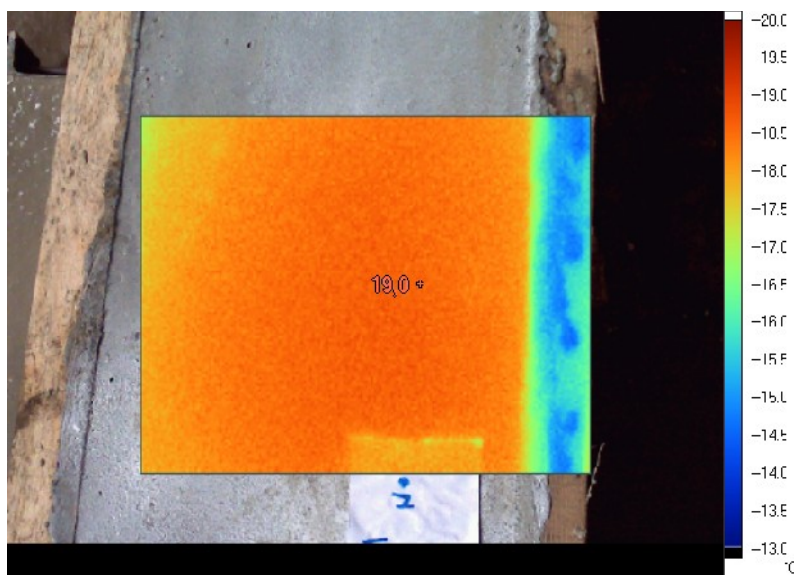
Porovnáním grafů jednotlivých trámů lze usuzovat, že struktura trámů z alkalicky aktivovaného betonu se chová křehčeji než struktura z klasického betonu. Tedy emisní aktivita struktury alkalicky aktivovaného betonu má skokový nárůst, kdežto struktura normálního betonu nárůst pozvolný.

7.2.3 Měření teploty vybetonovaných trámů

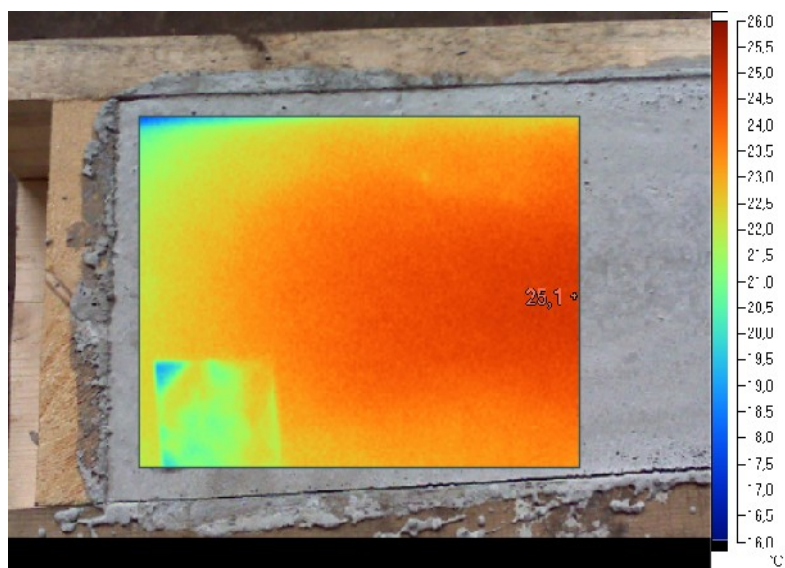
Po provedení betonáže byla u jednotlivých trámů pomocí termokamery měřena povrchová teplota. Měření bylo provedeno v období 2 - 5 h, 10 h a 24 h po betonáži.

U všech vybetonovaných trámů je pozorováno pozvolné zvyšování teploty, která u alkalicky aktivovaného materiálu po deseti hodinách od betonáže pozvolna klesá, kdežto u vzorků z betonu na bázi portlandského cementu dochází stále k malému nárůstu teploty.

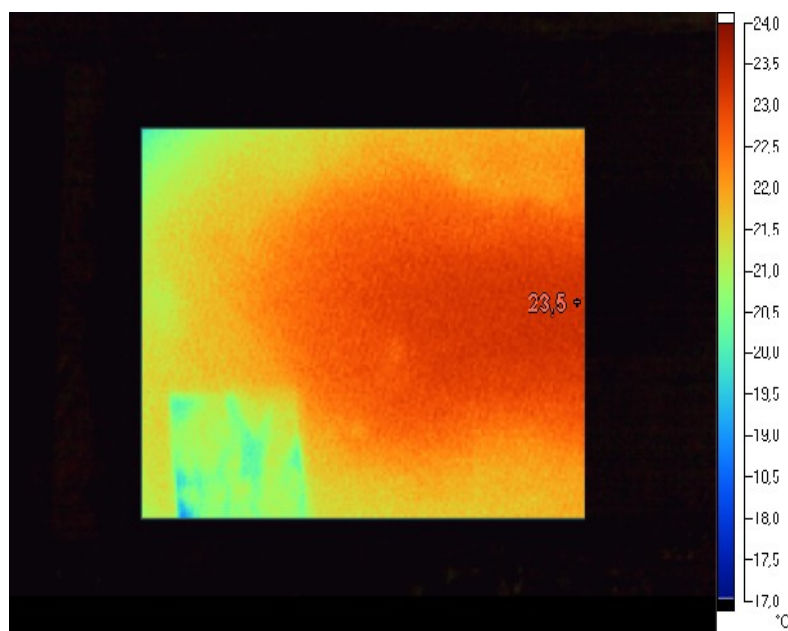
- První trám – označení 1N - Směs 1 - z prostého samozhutnitelného betonu C40/50



Obr. 123 – Trám 1N – odečet v rozmezí 2-5h

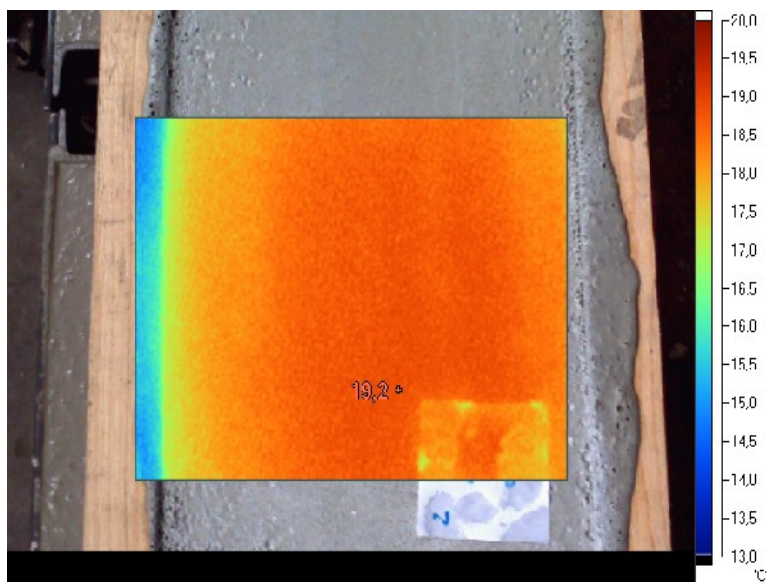


Obr. 124 – Trám 1N – odečet po 10h

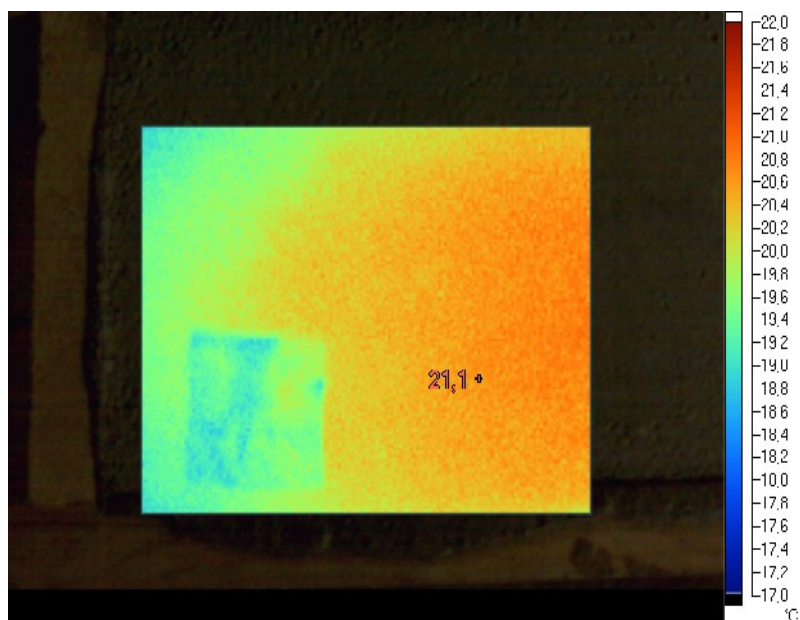


Obr. 125 – Trám 1N – odečet po 24h

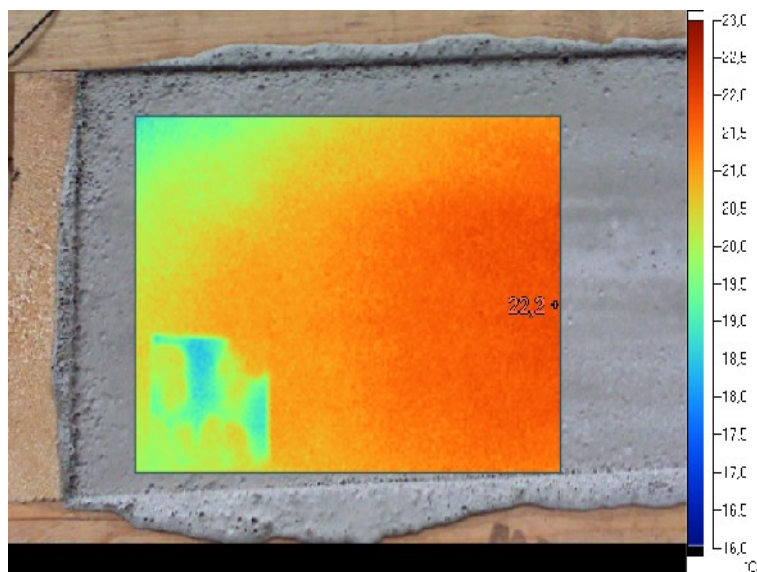
- Druhý trám – označení 2N+D - Směs 2 - z prostého samozhutitelného betonu C40/50 s přidáním drátků Dramix RC65/35BN



Obr. 126 – Trám 2N+D – odečet v rozmezí 2-5h

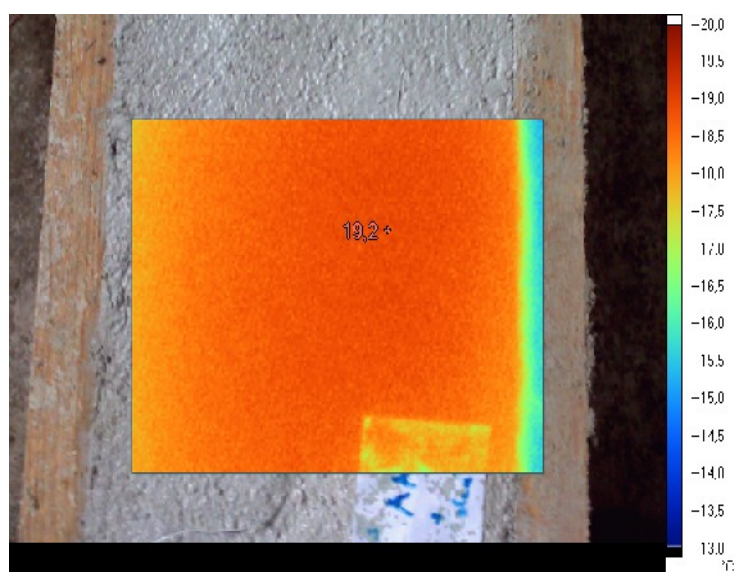


Obr. 127 – Trám 2N+D – odečet po 10h

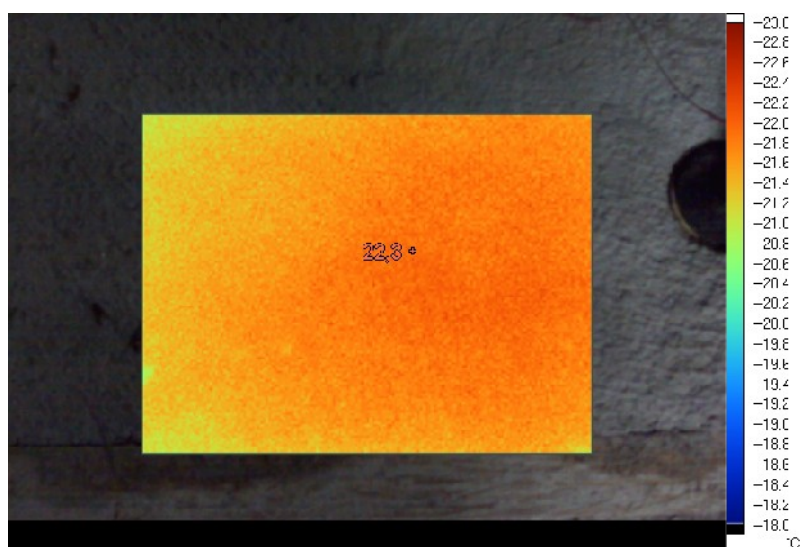


Obr. 128 – Trám 2N+D – odečet po 24h

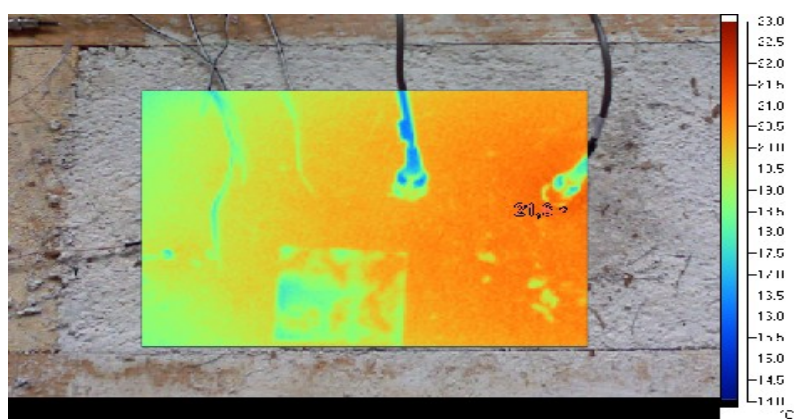
- Třetí trám - označení 3A+D - Směs 3 - z alkalicky aktivovaného samozhutnitelného struskového betonu s přidáním drátků Dramix RC65/35BN



Obr. 129 – Trám 3A+D – odečet v rozmezí 2-5h



Obr. 130 – Trám 3A+D – odečet po 10h

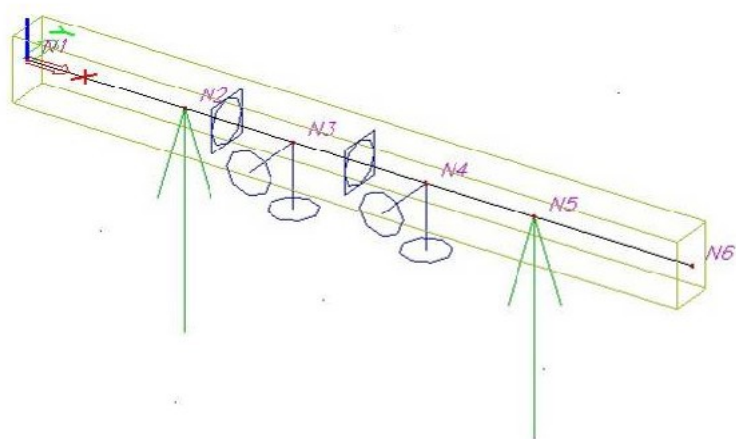


Obr. 131 – Trám 3A+D – odečet po 24h

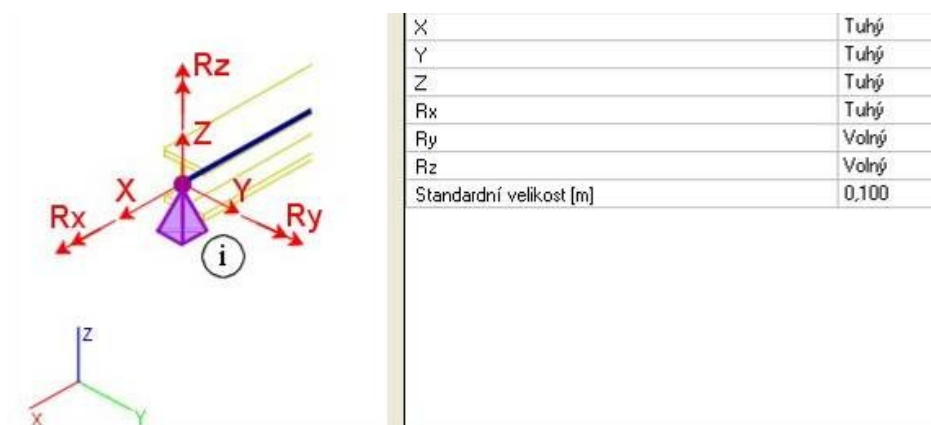
7.3 SIMULACE V PROGRAMU SCIA ESA

Získané hodnoty z měření byly vyhodnoceny i počítačovým programem SCIA ESA. Provedené simulace jsou zobrazeny příloženými schémata pro jednotlivé trámy.

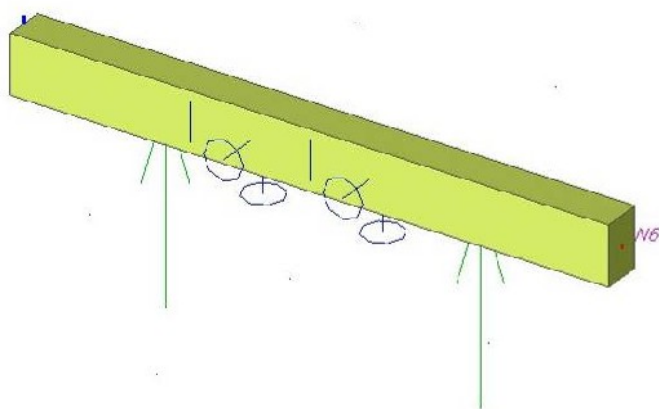
Nadefinování základního modelu je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 132 – Základní model



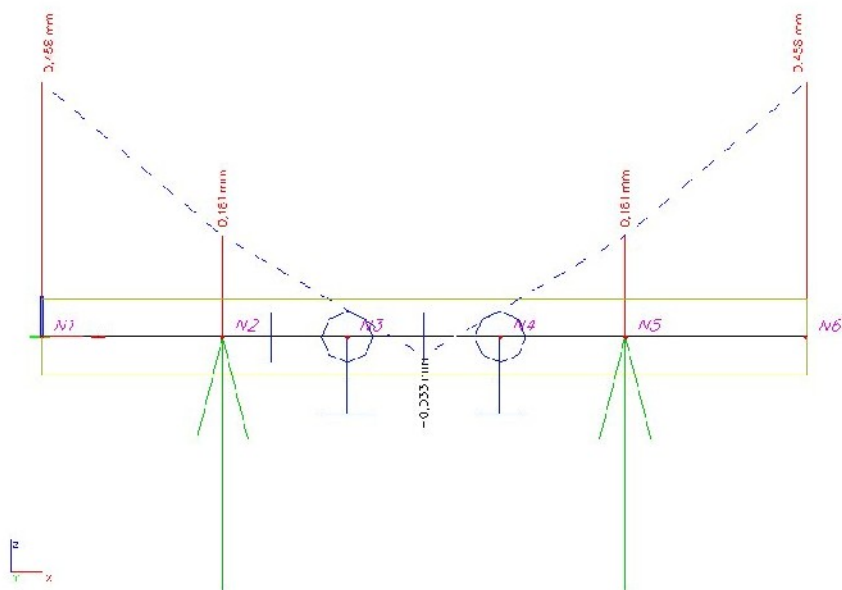
Obr. 133 – Definice podpor v uzlech



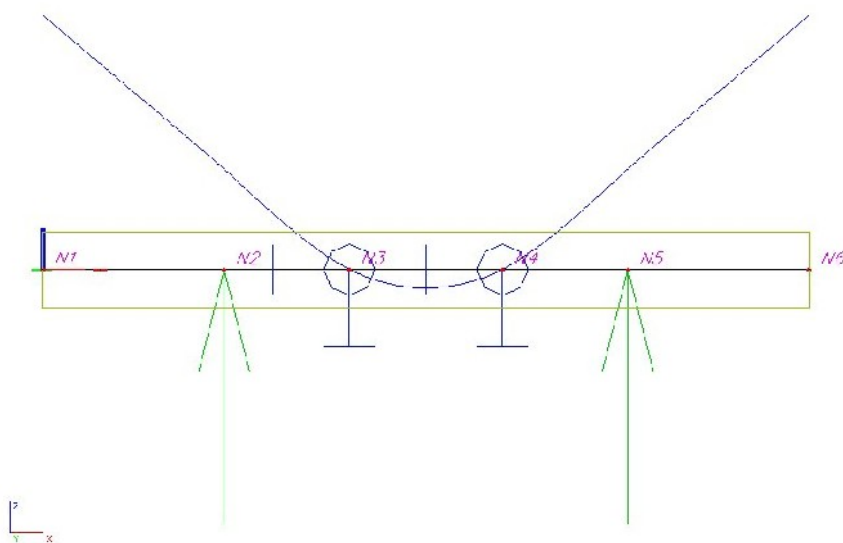
Obr. 134 – Základní model - renderovaný

- První trám – označení 1N – Směs 1 – z prostého samozhutnitelného betonu C40/50

Vznik trhliny a úplné zlomení trámu při 49 kN – průměrná hodnota průhybu 0,233 mm. Hodnota průhybu v nasimulovaném modelu 0,214 mm.



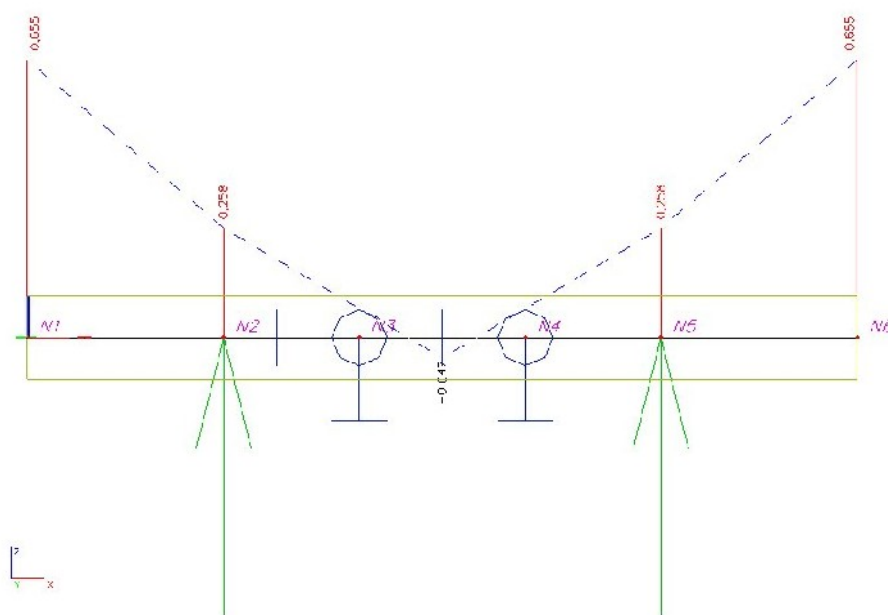
Obr. 135 – Model – trám 1N



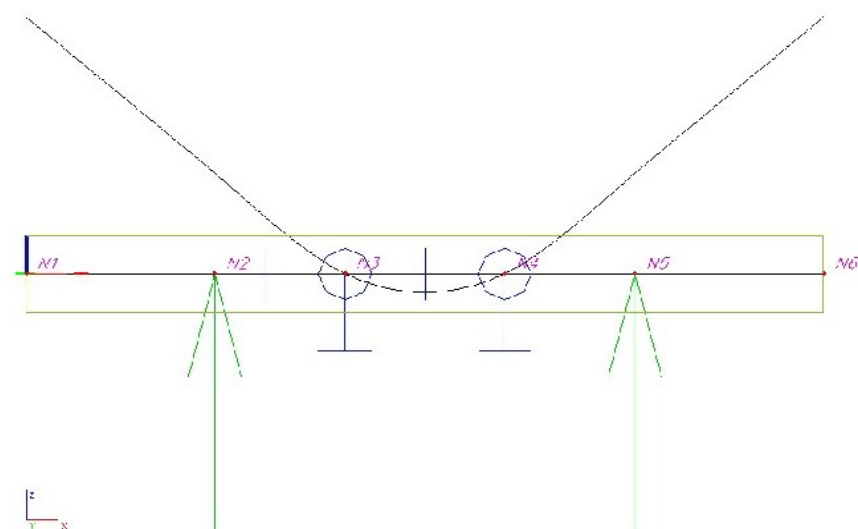
Obr. 136 – Deformace trámu 1N

- Druhý trám – označení 2N+D - Směs 2 - z prostého samozhutnitelného betonu C40/50 s přidáním drátků Dramix RC65/35BN

Vznik trhliny při 51 kN – průměrná hodnota průhybu 0,328 mm. Hodnota průhybu v nasimulovaném modelu 0,305 mm.



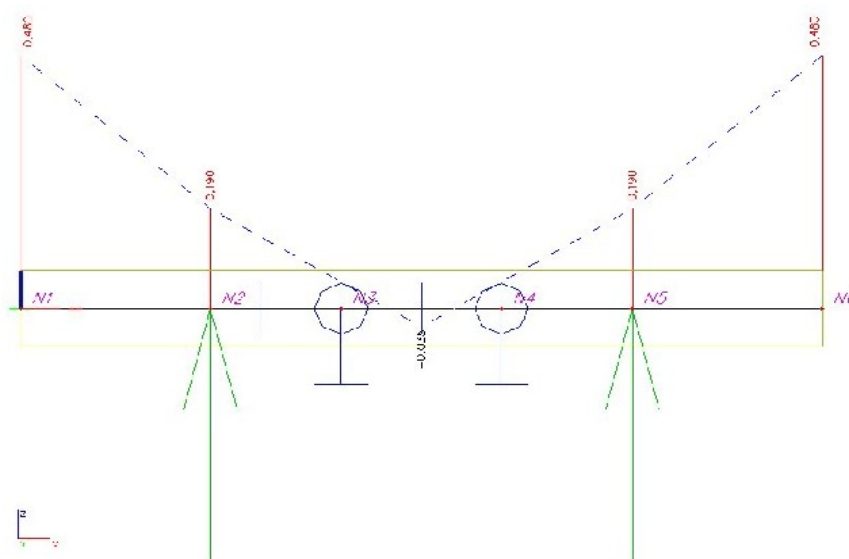
Obr. 137 – Model – trám 2N+D



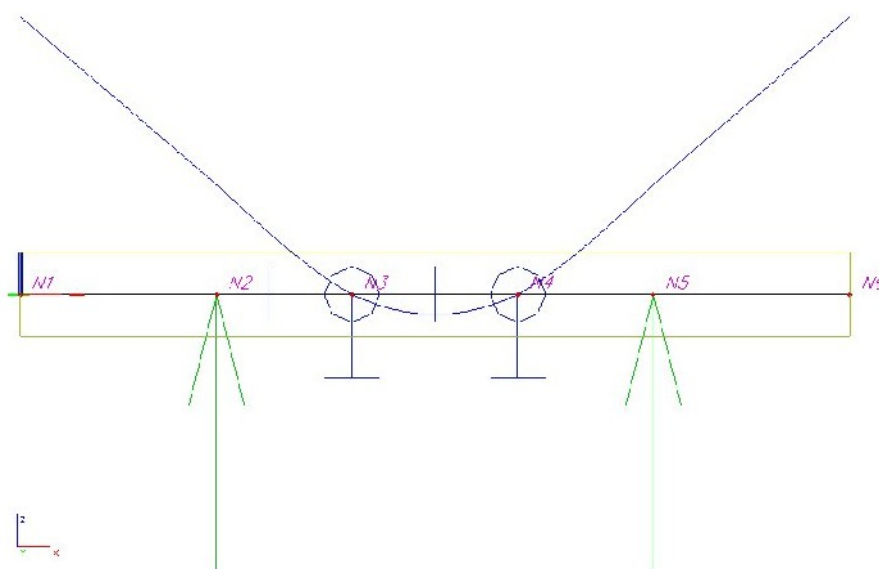
Obr. 138 – Deformace trámu 2N+D

- Čtvrtý trám - označení 4A+D - Směs 3 - z alkalicky aktivovaného samozhutnitelného struskového betonu s přidáním drátků Dramix RC65/35BN

Vznik trhliny při 49 kN – průměrná hodnota průhybu 0,257 mm. Hodnota průhybu v nasimulovaném modelu 0,225 mm.



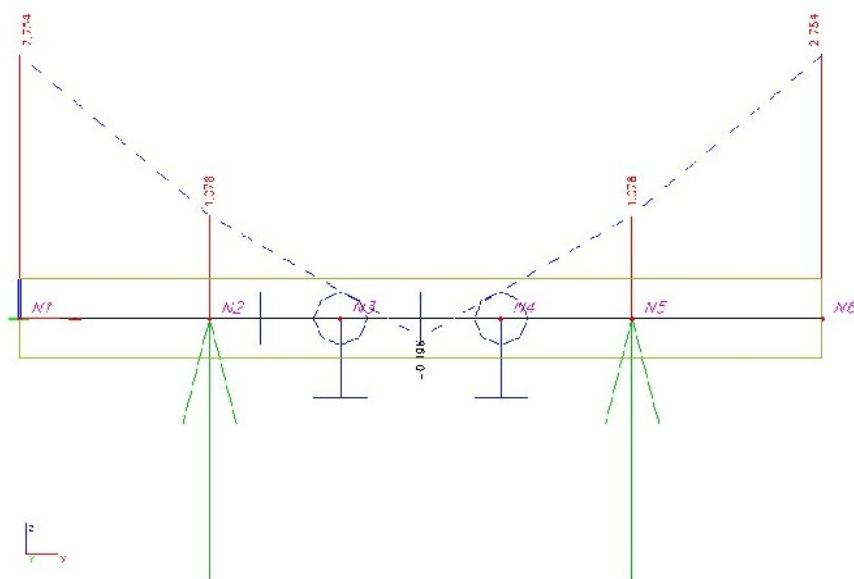
Obr. 139 – Model – trám 4A+D



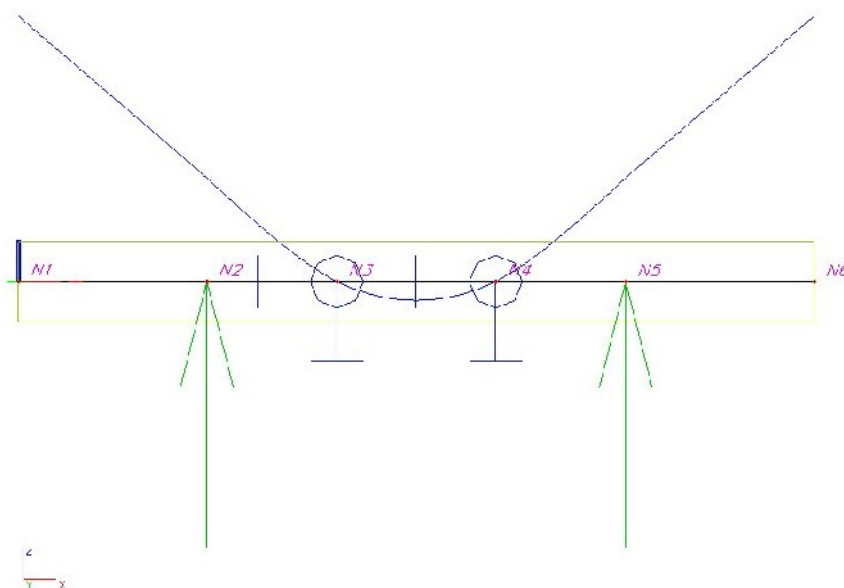
Obr. 140 – Deformace trámu 4A+D

- Pátý trám - označení 5A+D+V - Směs 3 - z alkalicky aktivovaného samozhutitelného struskového betonu s přidáním drátků Dramix RC65/35BN a s ocelářskou výztuží (4x R14 + třmínky 14x R6)

Vznik trhliny při 77 kN – průměrná hodnota průhybu 1,635 mm. Hodnota průhybu v nasimulovaném modelu 1,274 mm.



Obr. 141 – Model – trám 5A+D+V



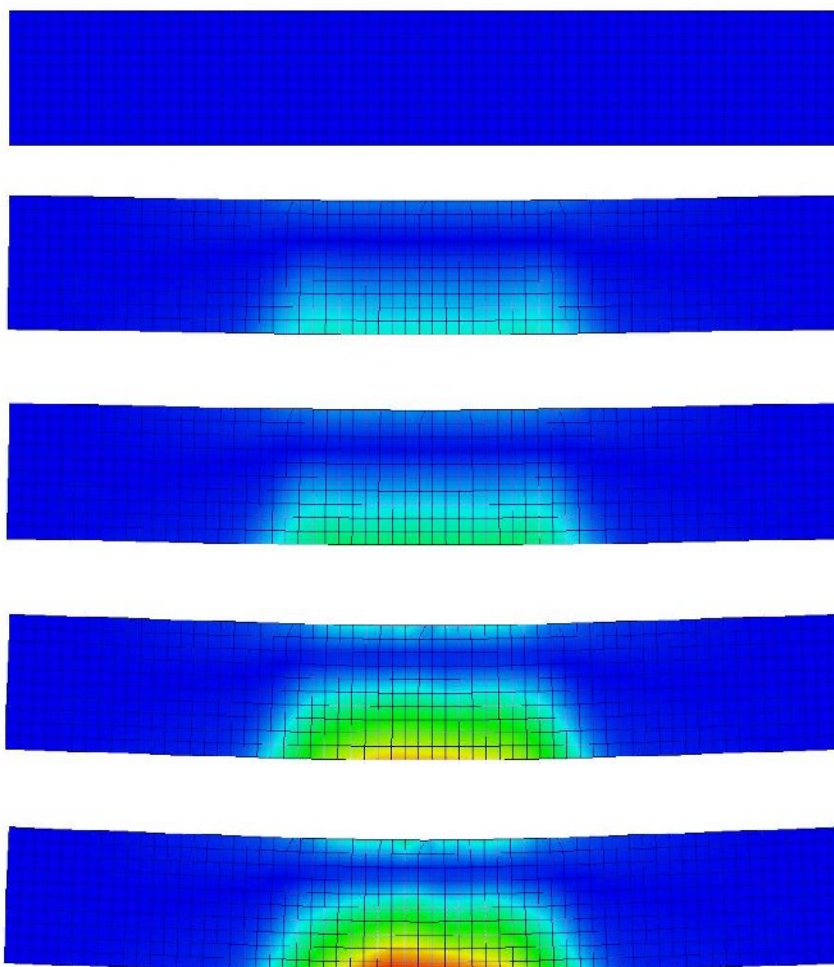
Obr. 142 – Deformace trámu 5A+D+V

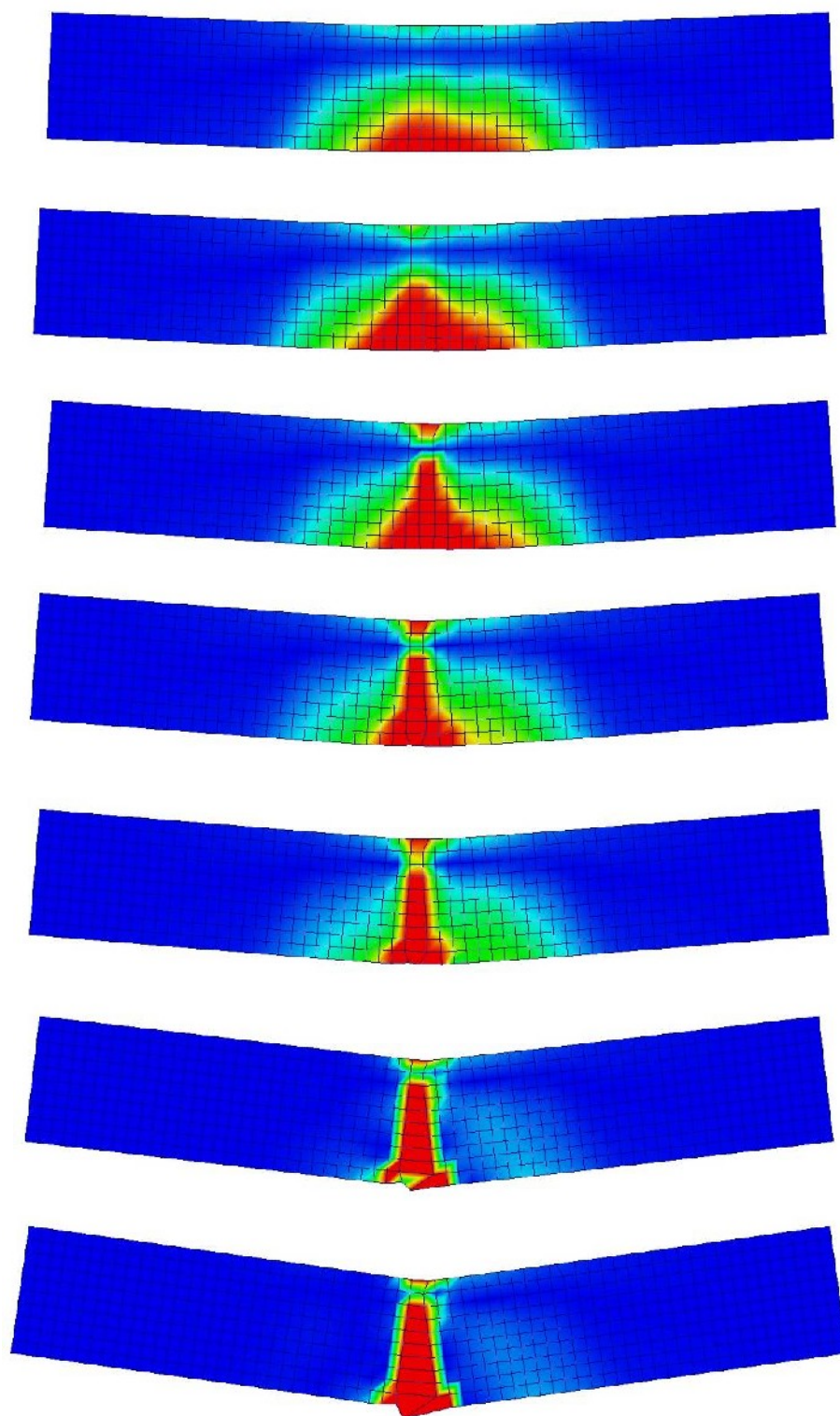
7.4 SIMULACE V PROGRAMU OOFEM

Ve spolupráci s ČVUT byla provedena i simulace v programu OOFEM. Simulace byla definována na čtyřbodový ohyb trámu 4A+D. Byl použit izotropní model poškození pro beton v tahu s lineární sestupnou větví. Lomová energii byla přepočítána z lomové houževnatosti na 2457 N/m. Rozptýlené drátky byly uvažovány rozetřené v hmotě betonu a nemodelovaly se zvlášť.

Další parametry pro beton byly zvoleny následující - modul pružnosti 20,4 GPa, pevnost v tahu za ohybu musela být snížena na 1,632 MPa. Tato pevnost je samozřejmě nižší než co existuje z měření na menších trácích. Důvod je ve smršťování velkého trámu, kde se beton potrhá a ocelové drátky přenáší tah téměř od samého počátku zatěžování. V malých vzorcích tah přenesou beton. Pokud bychom uvažovali pevnost v tahu cca 5,5 MPa, vyjde zatěžovací síla asi 110 kN.

Zobrazení simulace je na následující řadě vybraných schémat:





Obr. 143 – Simulace trámu 4A+D v programu OOFEM

7.5 ZKOUŠKY XRD A XRF

Vzhledem k barevným změnám probíhajícím při zrání alkalicky aktivovaného struskového betonu byla provedena také analýza přítomných fází pomocí metody rentgenové difrakce (XRD). Chemické složení bylo stanoveno pomocí rentgenové fluorescenční analýzy (XRF).

Alkalicky aktivovaný struskový beton je po vytvrdnutí tmavě zelené barvy, ale při zrání se tato barva ztrácí a beton získává barvu šedou. Toto zabarvení systémů na základě alkalické aktivace vysokopecní strusky je běžné, ale teorie jeho vzniku a následného vymizení se liší. Jednou z možností je, že toto zabarvení způsobuje železo přítomné ve struktuře struskové matrice.

Z vnitřní části pojivové matrice alkalicky aktivovaného struskového betonu byly odebrány 2 vzorky. Jeden ve stáří 28 dní od betonáže (tmavě zelený) a druhý 60 dní od betonáže (šedý).

K analýze byly vybrány úlomky matrice tak, aby pokud možno neobsahovaly částice kameniva (písek). Získat čistou matici nebylo možné, protože beton obsahuje i velmi jemné částice písku, kdy tyto složky jsou v analýzách také patrné. Vyšší obsah SiO_2 a Al_2O_3 zjištěný pomocí rentgenové fluorescenční analýzy a výrazný pík křemene u rentgenové difrakční analýzy pochází také z kameniva.

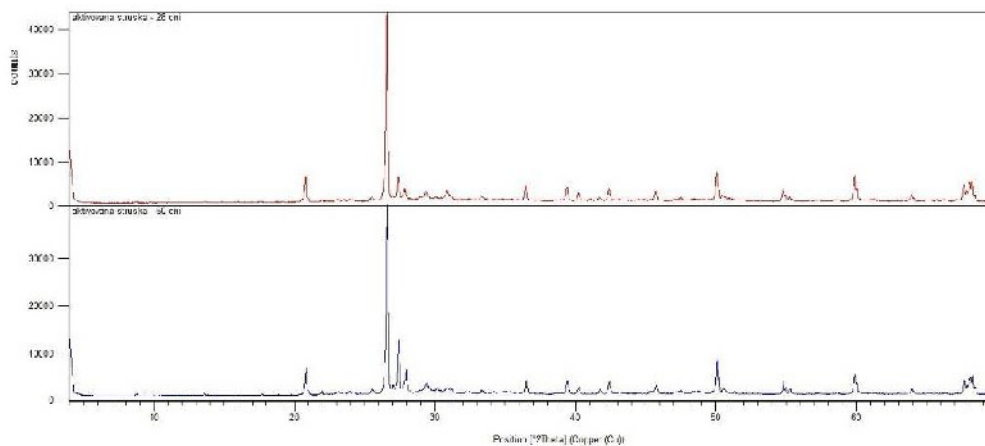
- Rentgenová fluorescenční analýza

Složka	Struska*	Matrice 28 dní	Matrice 60 dní
SiO_2	38,16	57,71	58,34
CaO	38,29	19,21	17,6
MgO	12,31	5,83	4,69
Al_2O_3	7,08	9,41	10,49
Fe_2O_3	0,33	0,59	0,57
SO_3	0,75	-	0,73
S	-	0,32	-
Na_2O	-	2,64	2,75
K_2O	-	3,54	4,13
TiO_2	-	0,33	0,29
MnO	-	0,21	0,19
Suma	96,92	99,79	99,78

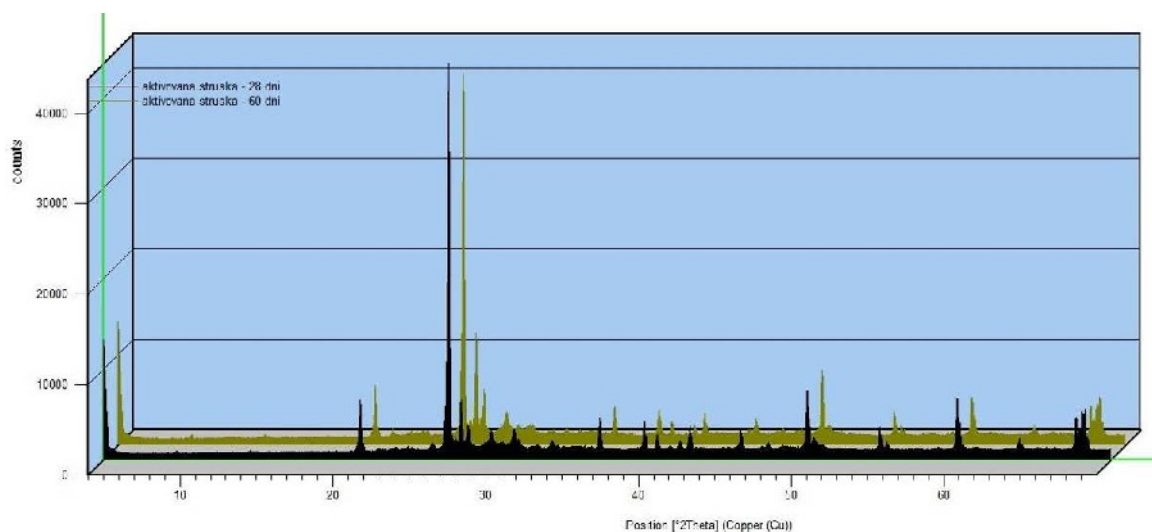
* hodnoty dodavatele - fa. Kotouč Štramberk s.r.o.

Tab. 15 – Výsledky rentgenové fluorescenční analýzy

▪ Rentgenová difrakční analýza



Obr. 144 – 2D porovnání rentgenogramů vzorků matrice staré 28 dní a 60 dní



Obr. 145 – 3D porovnání rentgenogramů vzorků matrice staré 28 dní a 60 dní

Při porovnání obou difraktogramů není zřetelný vznik žádné nové fáze, která by vznikla po dobu tvrdnutí betonu. Nalezené píky lze identifikovat jako křemen, albit, microline, wollastonit a jako minoritní další fáze složené z různých hlinitokřemičitanů sodných, draselných případně směsných.

7.6 VÝKVĚTY

Na úlomku alkalicky aktivovaného struskového betonu z první betonáže byla sledována tvorba výkvětů v čase. Vzorek byl z části ponořen do vody a uložen při teplotě 20 - 25 °C. Odpařená voda byla průběžně doplňována. V průběhu uložení vzorku se na povrchu začaly tvořit nepatrné výkvěty. Jejich vzhled a velikost po půl roce uložení jsou ukázány na přiloženém snímku - *Obr. 146*.



Obr. 146 – Výkvěty na vzorku materiálu po půlroce uložení ve vodní lázni

Univerzálním indikátorovým pH papírkem bylo stanoveno pH výluhu. Po půlroce uložení bylo $\text{pH} = 7 - 8$.



Obr. 147 – Uložení vzorku a měření pH výluhu

7.7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Na závěr bylo provedeno porovnání nákladů jednotlivých materiálů. Ekonomické posouzení je zaměřeno na ceny materiálů, které byly použity při tomto výzkumu – tedy porovnání ceny za 1 m³ samozhutnitelného betonu C40/50 a samozhutnitelného alkalicky aktivovaného struskového betonu.

Důležitou rolí při použití nových alkalicky aktivovaných materiálů je i příznivá ekonomická bilance, kdy při vhodném složení kompozitu lze dosáhnout ceny srovnatelné s výrobky obsahující cement.

Ve stavebnictví budou hrát ještě dlouho hlavní roli pojiva na bázi portlandského cementu, jehož výroba však přispívá nemalou měrou k objemu emitovaného CO₂. Potřebná a požadovaná množství cementů lze zajistit i bez zvyšování výroby portlandského slínku. Výrazný trend ke zvýšení objemu je produkování vícesložkových a směsných cementů s různým podílem druhotných surovin.

Ke kalkulaci ceny byly využity podklady získané od dodavatelů. V případě cementu, ale i ostatních surovin je zřejmé, že tyto ceny budou u velkých odběratelů jiné jelikož jsou upraveny na základě odběratelských smluv.

Složky	Množství na 1 m ³ směsi (kg)	Cena za 1t (Kč)	Cena na 1 m ³ směsi (Kč)
CEM 42,5 R	385	2350,-	905,-
SMŠ 380	250	1290,-	323,-
plastifikátor*	4,3	40000,-	172,-
0/4 C4	775	260,-	202,-
4/8	355	360,-	128,-
8/16	360	283,-	102,-
voda***	210	70,-	15,-
Suma	2339		1845,-

* cena za běžně dostupný typ

*** cena za pitnou vodu

Tab. 16 – Cenová kalkulace směsi klasického betonu na bázi portlandského cementu a strusky, využívaného v závodě ŽPSV, a.s. Nové Hrady

Složky	Množství na 1 m ³ směsi (kg)	Cena za 1t (Kč)	Cena na 1 m ³ směsi (Kč)
SMŠ 380	450	1290,-	581,-
VS 1,6 Na	65	4600,-	299,-
50% roztok KOH**	18,5	21000,-	389,-
0/4 C4	840	260,-	218,-
4/8	380	360,-	137,-
8/16	390	283,-	110,-
voda***	178,5	70,-	12,-
Suma	2322		1746,-

** cena za pevný hydroxid draselný (voda na přípravu roztoku je připočtena k celkové vodě ve směsi)

*** cena za pitnou vodu

Tab. 17 – *Cenová kalkulace směsi alkalicky aktivovaného struskového betonu*

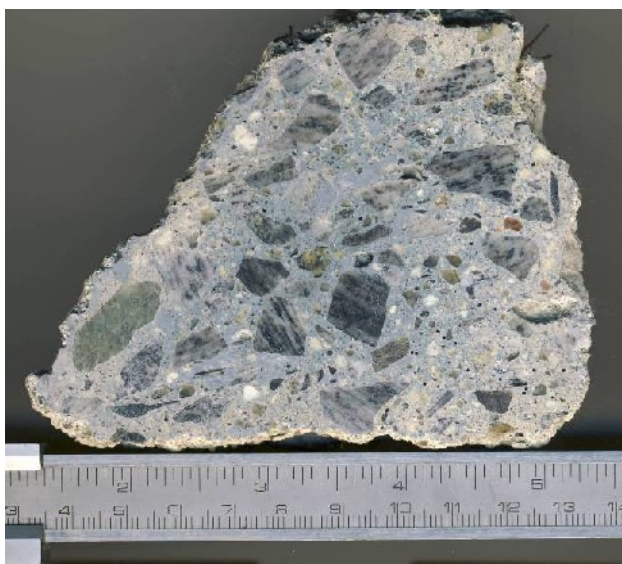
Veškeré ceny jsou uvedeny bez DPH a platné pro konec roku 2011.

Z tabulek je zřejmé, že ceny betonů jsou téměř shodné. Malý rozdíl ve prospěch alkalicky aktivovaného struskového betonu je ovlivněn zejména uvažovanými základními cenami cementu a také cenami chemikálií pro chemický průmysl, kdy je cena hydroxidu draselného při odběru nad 20 tun výrazně nižší (toto množství ale odpovídá výrobě více než 1000 m³ alkalicky aktivovaného struskového betonu) avšak skladování takového množství by neslo další náklady s tím spojené.

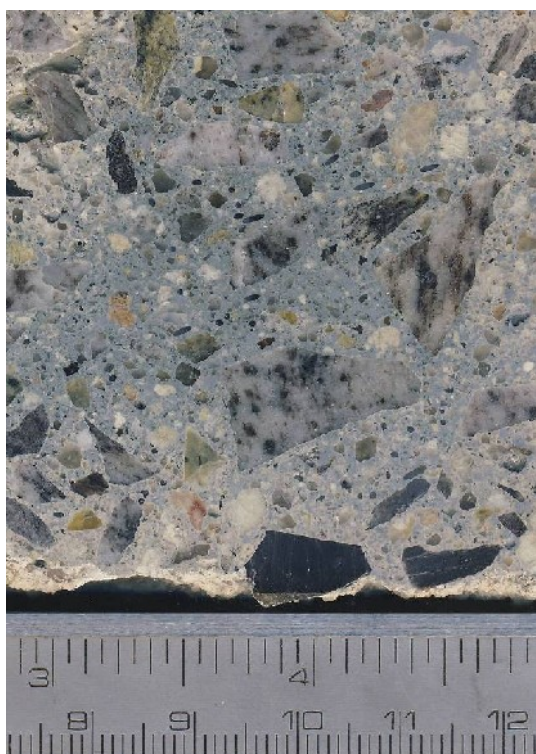
I přesto, že lze k výrobě alkalicky aktivovaného struskového betonu využít stávající technologii, bylo by nutné ji upravit např. dávkovači alkalických aktivátorů, případně při použití pevného hydroxidu draselného provozem na přípravu jeho roztoku. V neposlední řadě je nutné připočíst i náklady na zvýšené bezpečnostní a hygienické požadavky, jelikož se pracuje se silnými žiravinami.

7.8 NÁBRUS ALKALICKY AKTIVOVANÉHO BETONU S DRÁTKY DRAMIX

Před samotným závěrem a zhodnocením celého výzkumu byl alkalicky aktivovaný beton rozříznut a vybroušen. Nábrus tohoto betonu s drátky Dramix je na následujících obrázcích.



Obr. 148 – Nábrus alkalicky aktivovaného betonu s drátky Dramix



Obr. 149 – Detail nábrusu alkalicky aktivovaného betonu s drátky Dramix

8. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Uvedené a popsané výsledky v předchozí kapitole ukazují na pozitivní vliv prováděného výzkumu. V rámci možností bylo provedeno co nejvíce zkoušek různých typů tak, aby byl celkový přínos a množství získaných dat co největší.

Oproti literatuře a dostupných informací z jiných výzkumů podobného směru jsou výsledky jedinečnými. Vzhledem k tomu, že podle dostupných informací nebyly zkoušky na takto velkých vzorcích a s tímto složením směsi provedeny, nelze tyto výsledky porovnávat s jinými výsledky uvedenými v literatuře.

Díky finančnímu omezení, byly jednotlivé zkoušky provedeny pouze jednou, což má za následek částečnou nejistotu a je nutné počítat s určitými odchylkami, které by více zkoušek detailněji prokázalo. I tak jsou ale uvedené výsledky velice zajímavými a z případných grantů by bylo pokračování tohoto výzkumu hodnotným ubírajícím se směrem s dalšími nejen zajímavými, ale i pro praktické využití důležitými, výsledky.

Vzhledem k tomu, že měření na malých zkušebních vzorcích byla prováděna detailně již při prvopočátečním zkoumání vlastností zvolené betonové směsi, byly při výrobě velkých trámů vyrobeny malé doprovodné vzorky jen v počtu jednoho kusu na danou zkoušku. Pro větší počet vzorků by byla velmi problematická a nákladná doprava ke zkouškám do laboratoře v Brně. U velkých trámů byl jejich počet omezen nejen počtem připravených forem, ale i velikostí vyhrazené plochy pro dlouhodobé uskladnění, aby nedošlo k jakémukoli omezení běžného chodu závodu a jeho laboratoře. Betonáž a samotné měření na velkých vzorcích se provádělo za plného provozu závodu a proto bylo již samotné odbednění dílců a doprava do laboratoře poměrně složitým úkolem, který se ale díky zúčastněným a ochotě vedení a zaměstnanců povedlo zvládnout na výbornou.

U zhodnocení výsledků je samozřejmě počítáno s chybami, které provází každé poloprovozní zkoušky. Mezi základní uvažované chyby se řadí výsledky získané z velkých trámů, které se poměrně dosti liší od výsledků získaných na malých vzorcích, což je způsobeno známým tzv. „size efektem“. Hodnoty pevností na doprovodných vzorcích, jsou v porovnání s velkými trámy vyšší, u těchto je menší pravděpodobnost výskytu mikrotrhlin vlivem smrštění. Další uvažovanou chybou při měření průhybů je nemožnost zajistit plynulý a jemný zdvih lisu, toto je zřejmé

obzvláště v počátcích měření. Nízkou pevnost v tahu, zejména u alkalicky aktivovaného betonu, je možné z části vysvětlit i nevhodnou metodou převozu odbedněných trámů do laboratoře. Převozem volně zavěšených trámů mohlo dojít ke vzniku dalších mikrotrhlin, které ovlivnily následné výsledky měření. Tyto chyby je třeba při dalším výzkumu nebo případné aplikaci v praxi vzít v úvahu.

Celkové zhodnocení průběhu výzkumu lze označit jako velmi dobré a výsledky jako jedinečné a z tohoto důvodu by mělo v tomto výzkumu být dále a v širším měřítku pokračováno. Provedený výzkum svým rozsahem ani použitými materiály neodpovídá dosud žádnému jinému výzkumu provedenému v jiných laboratořích či provozech. Vlastní složení směsí, především pak zakomponování rozptýlené výztuže - drátků do směsi alkalicky aktivovaného betonu přináší nové výsledky a směr pro jeho pokračování.

Výzkum prováděný na velkých vzorcích v poloprovozních podmínkách je vždy mnohem složitější v logistickém naplánování, náročnější na prostory a celkové sladění tak, aby vše bylo nakonec zdárně dokončeno. V tomto je především tento výzkum cenný, protože byly získány výsledky, se kterými lze dále pracovat v technické praxi. Vyrobené dílce po odbednění vykazovaly výborné vlastnosti, nerozpadaly se a hodnoty získané z provedených zkoušek v porovnání s dílci z klasického betonu na bázi portlandského cementu vycházejí velice dobře a jsou porovnatelné.

9. ZÁVĚR

O malých mostech a integrovaných mostech ve spojitosti obecného popisu a prohloubení teorie k lepšímu praktickému navrhování je napsáno poměrně dosti. O návrhu samotném – o modelech zeminového prostředí, o použití numerických metod a programů je také již psáno a blíže je tato problematika zkoumána. K integrovaným mostům se dnešní doba poměrně často vrací z hlediska ekonomického, jak při výstavbě tak následné údržbě, díky odpadajícím starostem s ložisky a mostními závěry. Malých mostů obecně, je velké množství a velké především i těch, co byly porušeny povodněmi. Přibývá i letitých mostů co žádají opravy, nebo kompletní novou výstavbu. Při těchto rekonstrukcích a nových výstavbách jsou ale stále užívány pouze známé materiály. Tento prováděný výzkum měl za cíl zjistit, zda by nebylo možné aplikovat na tyto stavby nové alkalicky aktivované betony a zda by tyto materiály nepřinesly výhody oproti klasickým betonům.

Myšlenky pro použití alkalicky aktivovaných betonů při výstavbě malých mostů a malých integrovaných mostů (případně samozřejmě i propustků) by mohly být zajímavým směrem v současné moderní době. Proto byly ověřeny základní vlastnosti alkalicky aktivovaných betonů v porovnání s klasickými betony na větších trámcích a doprovodných vzorcích.

Provedeným výzkumem bylo zjištěno, že alkalicky aktivované betony, jsou křehčími materiály oproti betonu na bázi portlandského cementu. Použitá směs u vybetonovaných trámů vykazuje nižší pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu, je znatelně větší smrštění. Vývoj pevností u alkalicky aktivovaných struskových betonů je obvykle ukončen po 28 dni a dále se již mění nepatrně. Při použití vysokopecní strusky jsou u získaných materiálů patrné vyšší pevnosti při použití směsného aktivátoru tj. hydroxidu draselného a sodného vodního skla, oproti pevnostem naměřeným při použití pouze sodného a nebo pouze draselného aktivátoru.

Chemická odolnost alkalicky aktivovaných materiálů je v porovnání s betony z portlandského cementu výrazně vyšší. Tyto materiály dlouhodobě odolávají roztokům solí (chloridy, sírany), kterým betony z portlandského cementu odolávají velmi málo a nebo vůbec ne. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že jsou tyto materiály vhodné pro použití v prostředí, kde dochází k výskytu solí, jako jsou například části

vozovek a mostů exponované posypovými solemi a také u objektů, které jsou vystavené působení mořské vody.

Stabilita ocelové výztuže je rozdílná při použití různých alkalicky aktivovaných systémů. Vzhledem k vysokému pH v matrici ($\text{pH} > 13$) je ocelová výztuž dostatečně chráněna pasivační vrstvou, nicméně její dlouhodobou stabilitu bude nutné ověřit dalšími výzkumy.

Mrazuvzdornost alkalicky aktivovaných materiálů je stejně jako mrazuvzdornost materiálů na bázi portlandského cementu závislá na míře pórovitosti resp. míře provzdušnění betonu. Závisí obvykle výrazně také na složení směsi resp. přidavku dalších aditiv (popílku, metakaolinu, mikrosiliky atd.).

Použití tohoto materiálu na konstrukce nebo jejich části u malých mostních staveb je reálné. Je ale třeba dalších výzkumů optimálního složení alkalicky aktivovaných směsí a následně aplikace materiálu pro konkrétní objekty a konkrétní statické výpočty.

Neznamená to však, že tyto materiály nelze již nyní využít například pro použití na římsy mostních konstrukcí, svodidla a zábradelní svodidla nejen u malých zmiňovaných mostů. Dále tyto materiály mohou být využity pro prefabrikáty a stavební bloky, pro použití u protihlukových stěn, při výrobě slévárenských forem, jako ochranné nátěry a vrstvy, při požadavku stavebních prvků na tepelně a žáru odolné materiály, v restaurátorství, při fixaci radioaktivních a toxických odpadů a mnoho dalších aplikacích.

Tyto materiály jsou díky ekonomickému posouzení, které je oproti klasickému betonu nepatrně příznivější, zajímavé. Navíc využití odpadních surovin, ekologická šetrnost a další přednost jako je vynikající odolnost vůči korozivnímu prostředí, jsou výhodami nemalého charakteru.

Snahou tohoto výzkumu bylo provést co největší množství zkoušek a vytěžit z vybetonování velkých dílců co nejvíce výsledků, které byly následně zpracovány počítačovými programy, provedeny simulace a všechny výsledky následně sepsány a zobrazeny v této práci.

Velice si cením možnosti vybetonování velkých trámů, na kterých mohly být provedeny veškeré dostupné zkoušky.

Bude ještě třeba provést mnoho výzkumů a ověřit mnoho možných vyřčených i nevyřčených hypotéz, ale pokud by byly dané úvahy kladné, jistě by naše současnost zanechala budoucnosti významný objev v této oblasti a stavitelům ukázala nové směry a možnosti při realizacích podobných staveb.

Věřím, že tato práce přinesla do současné vědy byť jen malé, ale zajisté zajímavé výsledky a věřím, že se najde mnoho následovníků a nové materiály na bázi alkalické aktivace budou v budoucnu běžně používanými. Tuto prvopočáteční myšlenku bylo snahou podpořit provedeným výzkumem a touto disertační prací.

LITERATURA

- [1] Frýbortová, I. Možnosti alkalické aktivace ocelářské strusky. Bakalářská práce, VUT Brno, 2010.
- [2] Indra, I. Kompozitní materiály na bázi alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přísadkou elektrárenského popílku. Diplomová práce, VUT Brno, 2010.
- [3] Škvára, F. Alkalicky aktivované materiály - geopolymery, GEO-2007. <http://www.geopolymery.eu>. (accessed March 01, 2012).
- [4] Svoboda, P.; Doležal, Škvára, F.; J.; Kopecký, L.; et al. Beton bez cementu s názvem POPbeton, 2006. <http://www.geopolymery.eu>. (accessed March 01, 2012).
- [5] Vinšová, L. Materiály na bázi aluminosilikátových polymerů. Diplomová práce, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011.
- [6] Fečko P., Kušnierová M., Tyčková B., Kablík V., Farkašová A.: „Popílky“, Institut environmentálního inženýrství, VŠB-TU Ostrava (2003)
- [7] Škvára, F. Aluminosilikátové polymery (geopolymery). <http://www.geopolymery.eu>. (accessed March 01, 2012).
- [8] Červinka, J. Geopolymery-využití pro restaurování kamene a souvisejících materiálů. Bakalářská práce, UPCE, 2008.
- [9] Pyrament data sheet, Lone Star Industries, Inc., Pyrament Division, Houstone, TX 77252 USA, (accessed March 01, 2012).
- [10] Friedlová, L.; Tesárek, P.; Černý, R.; Rovnaníková, P. Tepelné a vlhkostní vlastnosti kompozitního materiálu na bázi alkalicky aktivované strusky. Stavební obzor 2005, 14 (2).
- [11] Fernández-Jiménez, A.; Palomo, J.; Puertas, F. Alkali-activated slag mortars - Mechanical strength behaviour. Cement and Concrete Research 29 [Online] 1999, 1313-1321. http://www.elsevier.com/wps/find/homepage.cws_home (accessed March 01, 2012).
- [12] Bilek, V., Urbanova, M., Brus, J., Kolousek, D. : Alkali-Activated Slag Concrete development and their practical use, 12 th International Congress on the Chemistry of Cement, J.J.Beaudoin, J.M.Makar and L.Raki Eds., Montreal 2007, Canada, T3-06.6.
- [13] Svoboda, P.; Doležal, Škvára, F.; J.; Kopecký, L.; et al. Concrete based on fly ash geopolymers, <http://www.geopolymery.eu>. (accessed March 01, 2012).
- [14] Šulc R., Svoboda, P.; Mikrostruktura alkalicky aktivovaného popílkového pojiva v POPbetonu®, <http://www.geopolymery.eu>. (accessed March 01, 2012).

- [15] Bartonová, P. Příprava a vlastnosti ryzích geopolymérů. Diplomová práce, VUT Brno, 2009.
- [16] Bílek, V.: Preparation and stability of Alkali Activated Materials from slags and fly-ashes, CIMTEC 2010 – 12 th International Ceramic Congress & 5 th Forum on New Materials, Montecatini Terme, Italy, June, 6-9.
- [17] Fernández-Jiménez, A.; Palomo, J.; Revuelta, D. Alkali activation of industrial by-products to develop new earth-friendly cement. Proceeding of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009) 6-9 September 2009, Bath, UK http://www.elsevier.com/wps/find/homepage.cws_home (accessed March 01, 2012).
- [18] Bulejko, P. Příprava a charakterizace betonů na bázi směsného geopolymerního pojiva. Bakalářská práce, VUT Brno, 2011.
- [19] C. Shi, P. V. Krivenko, D. Roy, Alkali activated cements and concretes, str. 192-193.
- [20] Hamdy E., Ahmed A., Hamdy A., Properties and durability of alkali-activated slag pastes immersed in sea water, <http://www.sciencedirect.com> (accessed March 01, 2012).
- [21] Šulc R., Svoboda, P.; Vliv alkalických aktivátorů na geopolymerné malty, Juniorstav 2008, Nové stavební hmoty, <http://www.geopolymery.eu>. (accessed March 01, 2012).
- [22] Pacheco-Torgal F., Abdollahnejad Z., Camões A.F., Jamshidi M., Ding Y., Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue?, Construction and Building Materials [Online], www.elsevier.com/locate/conbuildmat, (accessed March 01, 2012).
- [23] Aperador W., Mejía de Gutiérrez R., Bastidas D.M., Steel corrosion behaviour in carbonated alkali-activated slag concrete, Corrosion Science 51 [Online] 2009, 2027–2033, www.elsevier.com/locate/corsci, (accessed March 01, 2012).
- [24] Davidovits J., Geopolymer, green chemistry and sustainable development solution, Geopolymer 2005, str. 51 – 55, <http://books.google.cz/books>, (accessed March 01, 2012).
- [25] Della M. R., Weimin J., Silsbee M.R., Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties, Cement and Concrete Research 30 [Online] 2000, 1879-1884, www.elsevier.com, (accessed March 01, 2012).
- [26] Harovel G. W., Corrosion behavior of steel in concrete made with Pyrament® blended cement, (1991), www.elsevier.com, (accessed March 01, 2012).

- [27] Bilek, V., Szklorzova, H.: Freezing and thawing resistance of alkali-activated concretes for the production of building elements, in V.M.Malhotra (Eds) Proceedings of 10 th CANMET/ACI Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Sevilla, 2009, Supplementary papers, pp. 661-670.
- [28] P. Rovnaník, P. Rovnaníková, P. Bayer, Vlastnosti bezslínkových kompozitů po vysokoteplotním namáhání, <http://fast10.vsb.cz/science/seminar2007/pics/23.pdf>, (accessed March 01, 2012).
- [29] Fojtík T., Zohlednění alkalické reakce při návrhu cementobetonového krytu vozovky, III. mezinárodní kolo SVOČ stavebních fakult ČR a SR (Mai 14, 2002), Ostrava VŠB - Technická univerzita Ostrava (accessed March 01, 2012).
- [30] Krivenko P.V., Gelevera A.G., Petropavlovsky O.N., Kavalerova E.S., Role of metakaolin additive on structure formation In the contact zone "cement-alkali-susceptible aggregate", 2nd International Symposium Non-Traditional Cement and Concrete, Brno 2005, ISBN 80-214-2853-8, pp. 83-95.
- [31] Puertas F., Palacios M., Gil-Maroto A., Vázquez T., Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type, Cement & Concrete Composites, www.elsevier.com/locate/cemconcomp, (accessed March 01, 2012).
- [32] García-Lodeiro I., Palomo A., Fernández-Jiménez A., Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems, Cement and Concrete Research 37 (2007) 175–183, www.elsevier.com, (accessed March 01, 2012).
- [33] Kynclová M., Geopolymerní betony – materiály šetrné k životnímu prostředí, Juniorstav 2008, Nové stavební hmoty, <http://www.geopolymery.eu>. (accessed March 01, 2012).
- [34] Krivenko P. V., Status and prospects of research and application of alkali activated materials, 12 International Ceramics Congress, June 6-11, 2010, Montecatini Terme, Tuscany, Italy.
- [35] E-Crete™, Zeobond, Somerton 3062, Victoria, Australia, <http://zeobond.com>, (accessed March 01, 2012).
- [36] Palomo A., Fernández-Jiménez A., López-Hombrados C., Luis Lleyda J., Railway sleepers made of alkali activated fly ash concrete, (2007), 75 – 80, www.elsevier.com, (accessed March 01, 2012).
- [37] Shenyang Fuxing Modern Materials Company Ltd., Tiexi New District of Shenyang, China, (accessed March 01, 2012).
- [38] Bilek, V., Self-compacting alkali activated concrete for production of concrete elements, 36 th Conference on Our world in concrete & structures, 14.-16. 8. 2011, Singapore, pp.215-220.

- [39] Davidovits J., 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications, Geopolymer 2002 Conference, (October 28-29, 2002), Melbourne, Australia, www.geopolymer.org, (accessed March 01, 2012).
- [40] Křístek, V.; Šafář, R. Systém hospodaření s mosty v ČR – současný stav, 2005. http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/3tlv/TL06CZ_1421-2.pdf, (accessed March 01, 2012).
- [41] Vítek, P. Příčiny poškození malých mostů povodněmi – ochranná opatření. Silnice a železnice, ISSN 1803-8441 [Online] 2009. <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/priciny-poskozeni-malych-mostu-povodnemi-ochranna-opatreni/> (accessed March 01, 2012).
- [42] Nový most přes Dobrovodskou stoku pomůže zlepšit dopravu v Českých Budějovicích. Silnice a železnice, ISSN 1803-8441 [Online] 2010. <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/novy-most-pres-dobrovodskou-stoku-pomuze-zlepsit-dopravu-v-ceskych-budejovicich/> (accessed March 01, 2012).
- [43] Křížek, J.: Integrované mosty, Disertační práce, ČVUT, Praha, 2009.
- [44] Roller, F.: Ocelobetonové integrované mosty, Disertační práce, ČVUT, Praha, 2006.
- [45] Way, J. A. – Yandzio, E.: Integral Steel Bridges – Design of a Single-Span Bridge – Worked Example, The Steel Construction Institute, 1997.
- [46] Weizenegger, M.: Hybrid Frame Bridge, River Saale, Merseburg, Germany, Structural Engineering International, IABSE, 2003, roč. 13, č. 3, str. 179 – 181.
- [47] Buba, R. – Stumpf, D.: Integrované železniční mosty v SRN a jejich výhody pro minimalizaci doby výluk, Sborník konference Železniční mosty a tunely, 2007, str. 25-30.
- [48] Schmitt, V. – Buba, R.: Innovative Building Methods for Bridges with Small and Medium Spans – VFT and VFT-WIB, Sborník konference Steel Bridges, Praha, 2006, str. 66 – 74.
- [49] Engelsmann, S. – Schlaich, J. – Schäfer, K.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Entwerfen und Bemessen von Betonbrücken ohne Fugen und Lager, Beuth Verlag, 1999.
- [50] Jung, J. H. – Jang, W. S. – You, S. K. – Kim, Y. H. – Yoon, S. J.: Development of Preflex Composite Beam-Stub Abutment Integral Bridge System, International Journal of Steel Structures, 2006, roč. 6, č. 3, str. 175 – 181.
- [51] Nicholson, B. A.: Integral Abutments for Prestressed Beam Bridges, Prestressed Concrete Association, 1998.
- [52] Collin, P. – Stoltz, A. – Moller, M.: Innovative Prefabricated Composite Bridges, IABSE Melbourne, 2002.

[53] Stráský, J. – vadbík, P. – Lapáček, L. Most přes Ploučnici ve Stružnici (první český integrovaný ocelobetonový most). Sborník konference Mosty 2000, brno, 1999, s. 33-37.

[54] Petursson, H. – Collin, P.: Composite Bridges with Integral Abutments Minimizing Lifetime Costs, Sborník symposia IABSE, Melbourne, 2002.

[55] Zordan, T. – Briseghella, B.: Attainment of an integral Abutment Bridge through the Refurbishment of a Simply Supported Structure, Structural Engineering International, IABSE, 2007, roč. 17, č. 3, str. 228-234.

[56] Lamboj, L. – Studnička, J.: Integrované ocelobetonové silniční mosty. Stavební obzor, 1999, č 2.

PUBLIKACE AUTORKY

[1] Dědečková, L.: Geopolymery: budoucnost mostního stavitelství?. Silnice železnice, 4/2010, str. 20-22.

[2] Dědečková, L.: Od pyramid k mostům. 21. STOLETÍ. 1/2011.

[3] Dědečková, L.: Geopolymery – nové materiály. Kámen 1/2011.

[4] Dědečková, L., Bílek, V.: Zkoušení trámů z alkalicky aktivovaných struskových betonů. Mezinárodní seminář ŽPSV a.s., Betony s ternárními pojivky, Kobyly 8.12. 2011 9. 12. 2011, sborník str. 32-35.

[5] Dědečková, L., Pokorný, J., Bílek, V.: Porovnání některých vlastností běžných a alkalicky aktivovaných betonů z hlediska nosných konstrukcí. 17. mezinárodní symposium Mosty 2012 Brno, 4/2012.

[6] Dědečková, L., Bílek, V.: Porovnání některých vlastností běžných a alkalicky aktivovaných betonů. Silnice železnice, 2/2012, str. 52-53.

[7] Dědečková, L.: Možnost využití alkalicky aktivovaných materiálů pro umělý kámen. Kámen 2/2012.

[8] Topolář, L., Pazdera, L., Bílek, V., Dědečková, L.: Acoustic Emission Method Applied on Four Point Loading of Concrete Structures with and without Small Wires. EAN 2012, 50 th annual conference on experimental stress analysis, 4-7 june/2012, str. 477-484.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1– Stavba z „gruntosilikátových“ bloků (1958) [3].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2– Ukrajina 1990 – domy ze strusko - popílkového alkalicky aktivovaného betonu [3].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3– Čs. Patent 254525.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4– Systém alkalicky aktivovaných materiálů [3].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 5– Schema alkalické aktivace, vznik N-A-S-H gelu.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 6– Základní struktura alkalicky aktivovaného polymeru [3].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 7– Struktura geopolymery podle prof. Davidovitse [3].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 8– Struktura geopolymery navržená prof. Barbosou [3].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 9– Popílek ze spalování hnědého uhlí [7].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 10– Pyrament – použití a aplikace.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 11– Porovnání vlivu množství alkalického aktivátoru a vlivu teploty při aktivaci strusky – pevnost v tahu (vlevo) a pevnost v tlaku (vpravo) [11].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 12– Schema výroby s temperací [4].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 13– Schema výroby bez temperace s použitím intenzifikátoru [4].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 14– Lomová plocha alkalicky aktivované popílkové kaše (SEM) [7].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 15– Beton z portlandského cementu [13]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 16– Popílkový alkalicky aktivovaný beton [13].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 17– Struktura lomu CEM I 42,5 [14].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 18– Alkalicky aktivovaný popílkový beton [14].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 19– Struktura volného povrchu CEM I 42,5 [14].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 20– Alkalicky aktivovaný popílkový beton [14].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 21– Geopolymer – umělý pískovec s výkvěty [8].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 22– Výrobky z geopolymery – umělého pískovce [8].....</i>	<i>33</i>

<u>Obr. 23– Vzhled vzorků po dvouletém působení solných roztoků</u>	
<u>- vlevo NaCl 16,4 %, uprostřed Na₂SO₄ 4,4 %, v pravo MgSO₄ 5 % [3].....</u>	<u>37</u>
<u>Obr. 24– Porovnání vzhledu a množství výkvětů při použití různých aktivátorů.....</u>	<u>39</u>
<u>Obr. 25– Výkvěty na POPbetonu® – vlevo nevypálený vzorek, vpravo vypálený</u>	
<u>na 600 °C - zřetelná výrazná redukce výkvětů [16].....</u>	<u>40</u>
<u>Obr. 26– Fenolftaleinový test - míra karbonatace alkalicky aktivovaného struskového</u>	
<u>betonu v závislosti na množství použité strusky ve směsi [22].....</u>	<u>40</u>
<u>Obr. 27– Dokonalé přilnutí matrice POPbetonu® k ocelové mikrovýztuži (SEM) [14]</u>	
<u>.....</u>	<u>42</u>
<u>Obr. 28– Změny v mikrostruktuře portlandského pojiva po tepelném namáhání [28]</u>	
<u>.....</u>	<u>43</u>
<u>Obr. 29– Změny v mikrostruktuře alkalicky aktivovaného struskového pojiva</u>	<u>43</u>
<u>po tepelném namáhání [28].....</u>	<u>43</u>
<u>Obr. 30– Alkalicky aktivované popílkové malty.....</u>	<u>44</u>
<u>– zleva výpal na 20, 200, 400, 600, 800 a 1 000 °C [5].....</u>	<u>44</u>
<u>Obr. 31– Poruchy způsobené alkalicko-křemičitou reakcí na dálnici D11 [29].....</u>	<u>45</u>
<u>Obr. 32– Schema destrukce matrice z portlandského cementu [30].....</u>	<u>47</u>
<u>Obr. 33– Schema alkalicko křemičité reakce s pozitivním efektem</u>	<u>47</u>
<u>alkalicky aktivované struskové matrice [30].....</u>	<u>47</u>
<u>Obr. 34– Vzhled vzorků betonu z portlandského cementu (vlevo) a alkalicky</u>	
<u>aktivovaného popílkového betonu (vpravo) při použití reaktivního kameniva</u>	
<u>(85 °C, ponoření v roztoku NaOH, 90 dní) [32].....</u>	<u>48</u>
<u>Obr. 35– Mariupol, Ukrajina (1960) - devítipodlažní dům vyrobený z alkalicky</u>	
<u>aktivovaného struskového betonu – kontrola v roce 2000 [34].....</u>	<u>51</u>
<u>Obr. 36– Lipetsk, Rusko(1987-1989) - dvacetipodlažní dům vyrobený z alkalicky</u>	
<u>aktivovaného struskového betonu – kontrola v roce 1999 [34].....</u>	<u>51</u>
<u>Obr. 37– Oděsa, Ukrajina (1966) - kolektory pro podzemní vodu z alkalicky</u>	
<u>aktivovaného struskového betonu (odběr vzorku, pohled zevnitř).....</u>	<u>52</u>

<i>– kontrola v roce 2000 [34].....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 38– Trať Moskva - St. Petěrburg, Rusko - železniční pražce z alkalicky aktivovaného struskového betonu (1989) – kontrola v roce 1999 [34].....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 39– Blok z alkalicky aktivovaného struskového betonu uložený 5 let v mořské vodě (1962) – kontrola v roce 1967 [34].....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 40– Finsko – odpadní trubky z alkalicky aktivovaného struskového betonu [34]</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 41– Ternopol, Ukrajina (1984) – porovnání části vozovky z alkalicky aktivovaného struskového betonu (vlevo)..... a klasického betonu na bázi portlandského cementu (vpravo) [34].....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 42– USA – betonování přistávací dráhy pomocí alkalicky aktivovaného betonu Pyrament [9].....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 43– Port Melbourne, Victoria, Austrálie – E-beton alkalicky aktivovaný popílkový beton (pevnost 25 MPa) [35].....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 44– Austrálie, fa. Zeobond – betonáž základů sila [35].....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 45– Port Melbourne, Victoria, Austrálie – E-beton prefabrikované panely přes most - alkalicky aktivovaný popílkový beton (pevnost 55 MPa) [35].....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 46– Průmyslové využití alkalicky aktivovaného popílkového betonu k výrobě pražců [36].....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 47– Shenyang, Čína – dlažba a tvárnice z alkalicky aktivovaného popílkového betonu [37].....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 48– ŽPSV a.s. Brno – silniční zábrany z alkalicky aktivovaného..... struskového betonu (2011) [38].....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 49– Francie, 80. léta 20. století ohni odolné dřevovláknité desky s povlakem geopolymeru a zapalovací svíčky z geopolymeru [39].....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 50– Geopolymerní umělý pískovec - detail [15].....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 51– Socha z umělého pískovce [8].....</i>	<i>56</i>

<i>Obr. 52– Příklad deskového mostu - schéma.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 53– Příklady rámových mostů - schema.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 54 – Most v Rudolfovske ulici v Českých Budějovicích [42].....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 55– Most přes potok u Nezabylic.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 56 – Integrovaný most.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 57 – Tradiční most.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 58– Deformace od zatížení dopravou.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 59 – Deformace od teploty.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 60– Most přes Ploučnici ve Stružnici [53].....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 61 – Masivní železobetonové opěry založené na plošných základech</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 62 – Masivní železobetonové opěry založené na pilotách</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 63– Opěry vytvořené z ocelových štětovnicových stěn</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 64 – Opěry vytvořené z pilotových stěn, doplněných pažením kotveným do tělesa násypu vyztuženého geotextiliemi.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 65– Mosty založené na plošných základech</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 66– Mosty založené na pilotách.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 67– Deformace od teploty při založení na plošných základech.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 68– Deformace od zatížení dopravou při založení na plošných základech.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 69– Formy ve tvaru krychle a formy na trámce</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 70– Formy na trámce</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 71– Dřevěné formy na trámy</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 72– Drátky Dramix RC65/35BN</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 73– Připravené roztoky alkalického aktivátoru</i>	<i>86</i>
<i>(vodní sklo + 50%ní roztok KOH)</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 74– Navážené množství drátků Dramix RC65/35BN</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 75– Velkokapacitní míchačka.....</i>	<i>86</i>

<i>Obr. 76– Vybetonovaný trám 1N a doprovodné vzorky</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 77– Směs 3 u trámu 3A+D</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 78– Směs 3 vysypávaná z násypky do formy</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 79– Vybetonovaný trám 3A+D</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 80– Pohled na vybetonované trámy a doprovodné vzorky</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 81– Ošetření povrchu trámů přípravkem CHRYSO Cure</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 82– Umístění snímačů pro zkoušku akustické emise</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 83– Umístění čidel pro sledování teploty materiálů</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 84– Schéma výztuže</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 85– Připravené formy pro betonáž zbylých dvou trámů</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 86– Detail výztuže u trámu 5A+D+V.....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 87– Dovezená násypka se směsí 3 pro betonáž do připravených forem</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 88– Vybetonované trámy 4A+D a 5A+D+V s doprovodnými vzorky</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 89– Dovezené doprovodné vzorky v laboratoři</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 90– Odformování krychlí</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 91– Popsání jednotlivých doprovodných vzorků z první etapy betonáže</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 92– Uložení vzorků pro zkoušky po 7, 28 a 90 dnech do vodní lázně</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 93– Částečně odformovaný trám 2N+D</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 94– Částečně odformovaný trám 3N+D</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 95– Odvoz trámů z haly</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 96– Částečně odformované trámy uložené na dvoře.....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 97– Vyjmutí trámů z formy.....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 98– Zcela odformované trámy</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 99– Dovoz trámů do laboratoře</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 100– Převezené trámy z druhé etapy betonáže ve formách v laboratoři</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 101– Odformované trámy 4A+D a 5A+D+V</i>	<i>95</i>

<i>Obr. 102– Zkouška pevnosti v tlaku na krychli.....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 103– Detail krychle a vzniklých trhlin</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 104– Laboratoř s lisem.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 105– Umístění trámu na posuvnou část lisu jeřábem.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 106– Dopravení do prostoru lisu</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 107– Trám umístěný v lisu.....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 108– Umístění snímacích hodiněk a čidel.....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 109– Schéma trámu umístěného v lisu s rozmístěním jednotlivých hodiněk....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 110– Trhlina – trám 3A+D.....</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 111– Detail materiálu na lomu.....</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 112– Trhlina – trám 1N.....</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 113– Detail materiálu na lomu</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 114– Trhlina – trám 2N+D.....</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 115– Detail trhliny – trám 2N+D.....</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 116– Trhlina – trám 4A+D.....</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 117– Trhliny – trám 5A+D+V.....</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 118– Detail trhliny – trám 5A+D+V.....</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 119– Viditelné prohnutí trámu.....</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 120– Detail třmínku a výztuže.....</i>	<i>117</i>
<i>Obr. 121– Rozmístění snímačů - trám 1N a 2N+D.....</i>	<i>118</i>
<i>Obr. 122– Rozmístění snímačů - trám 4A+D a 5A+D+V.....</i>	<i>118</i>
<i>Obr. 123– Trám 1N – odečet v rozmezí 2-5h.....</i>	<i>124</i>
<i>Obr. 124– Trám 1N – odečet po 10h.....</i>	<i>125</i>
<i>Obr. 125– Trám 1N – odečet po 24h.....</i>	<i>125</i>
<i>Obr. 126– Trám 2N+D – odečet v rozmezí 2-5h.....</i>	<i>126</i>
<i>Obr. 127– Trám 2N+D – odečet po 10h.....</i>	<i>126</i>

<i>Obr. 128– Trám 2N+D – odečet po 24h.....</i>	<i>127</i>
<i>Obr. 129– Trám 3A+D – odečet v rozmezí 2-5h.....</i>	<i>127</i>
<i>Obr. 130– Trám 3A+D – odečet po 10h.....</i>	<i>128</i>
<i>Obr. 131– Trám 3A+D – odečet po 24h.....</i>	<i>128</i>
<i>Obr. 132– Základní model.....</i>	<i>129</i>
<i>Obr. 133– Definice podpor v uzlech.....</i>	<i>129</i>
<i>Obr. 134– Základní model - renderovaný.....</i>	<i>129</i>
<i>Obr. 135– Model – trám 1N.....</i>	<i>130</i>
<i>Obr. 136– Deformace trámu 1N.....</i>	<i>130</i>
<i>Obr. 137– Model – trám 2N+D.....</i>	<i>131</i>
<i>Obr. 138– Deformace trámu 2N+D.....</i>	<i>131</i>
<i>Obr. 139– Model – trám 4A+D.....</i>	<i>132</i>
<i>Obr. 140– Deformace trámu 4A+D.....</i>	<i>132</i>
<i>Obr. 141– Model – trám 5A+D+V.....</i>	<i>133</i>
<i>Obr. 142– Deformace trámu 5A+D+V.....</i>	<i>133</i>
<i>Obr. 143– Simulace trámu 4A+D v programu OOFEM.....</i>	<i>135</i>
<i>Obr. 144– 2D porovnání rentgenogramů vzorků matrice staré 28 dní a 60 dní.....</i>	<i>137</i>
<i>Obr. 145– 3D porovnání rentgenogramů vzorků matrice staré 28 dní a 60 dní.....</i>	<i>137</i>
<i>Obr. 146– Výkvěty na vzorku materiálu po půlroce uložení ve vodní lázni.....</i>	<i>138</i>
<i>Obr. 147– Uložení vzorku a měření pH výluhu.....</i>	<i>138</i>
<i>Obr. 148– Nábrus alkalicky aktivovaného betonu s drátky Dramix.....</i>	<i>141</i>
<i>Obr. 149– Detail nábrusu alkalicky aktivovaného betonu s drátky Dramix.....</i>	<i>141</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1– Druh reakčních produktů u jednotlivých pojiv.....</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 2– Energetická náročnost – údaje z roku 2008 [33].....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 3– Emise CO₂ – údaje z roku 2008 [33].....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 4– Porovnání vlastností alkalicky aktivovaných materiálů s běžným betonem na bázi portlandského cementu.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 5– Parametry použitého cementu.....</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 6– Parametry použité strusky.....</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 7– Složení použitých směsí.....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 8– Pevnosti v tlaku.....</i>	<i>98</i>
<i>Tab. 9– Měrné hmotnosti.....</i>	<i>99</i>
<i>Tab. 10– Pevnosti v tahu za ohybu.....</i>	<i>100</i>
<i>Tab. 11– Měrné hmotnosti.....</i>	<i>100</i>
<i>Tab. 12– Výsledky zkoušek na trámcích 80 x 80 x 480 mm.....</i>	<i>101</i>
<i>Tab. 13– Pevnosti v tlaku na zlomcích.....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 14– Moduly pružnosti.....</i>	<i>103</i>
<i>Tab. 15– Výsledky rentgenové fluorescenční analýzy.....</i>	<i>136</i>
<i>Tab. 16– Cenová kalkulace směsi klasického betonu na bázi portlandského cementu a strusky, využívaného v závodě ŽPSV, a.s. Nové Hrady.....</i>	<i>139</i>
<i>Tab. 17– Cenová kalkulace směsi alkalicky aktivovaného struskového betonu</i>	<i>140</i>
<i>Tab. 18– Naměřené hodnoty – trám 1N.....</i>	<i>162</i>
<i>Tab. 19– Naměřené hodnoty – trám 2N+D.....</i>	<i>164</i>
<i>Tab. 20– Naměřené hodnoty – trám 4A+D.....</i>	<i>166</i>
<i>Tab. 21– Naměřené hodnoty – trám 5A+D+V.....</i>	<i>172</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i><u>Graf. 1– Smrštění alkalicky aktivovaných struskových směsí [16].....</u></i>	<i><u>34</u></i>
<i><u>Graf. 2– Porovnání smrštění alkalicky aktivované strusky (a) a popílku (b).....</u></i>	<i><u>35</u></i>
<i><u>Graf. 3– Vývoj pevností v tlaku alkalicky aktivovaných struskových směsí [17]</u></i>	<i><u>36</u></i>
<i><u>Graf. 4– Koroze alkalicky aktivovaného popílkového materiálu v roztocích solí [3].</u></i>	<i><u>37</u></i>
<i><u>Graf. 5– Porovnání pevností betonu na bázi portlandského cementu a alkalicky aktivované strusky při působení korozních roztoků.....</u></i>	<i><u>38</u></i>
<i><u>Graf. 6– Vývoj mikrotvrdosti na přechodové vrstvě kameniva a matrice na bázi portlandského cementu (uložení vzorků 65 °C, 60 dní) [30].....</u></i>	<i><u>46</u></i>
<i><u>Graf. 7– Vývoj mikrotvrdosti na přechodové vrstvě kameniva a matrice na bázi alkalicky aktivované strusky (uložení vzorků 65 °C, 60 dní) [30].....</u></i>	<i><u>46</u></i>
<i><u>Graf. 8– Zrnitostní křivka použitého písku 0/4 C4 – lokalita Halámky.....</u></i>	<i><u>83</u></i>
<i><u>Graf. 9– Zrnitostní křivka použitého kameniva 4/8 – kamenolom Plešovice.....</u></i>	<i><u>84</u></i>
<i><u>Graf. 10– Zrnitostní křivka použitého kameniva 8/16 – kamenolom Plešovice.....</u></i>	<i><u>84</u></i>
<i><u>Graf. 11– Složená zrnitostní křivka použitého kameniva 0/16.....</u></i>	<i><u>85</u></i>
<i><u>Graf. 12– Pevnosti v tlaku na zkušebních krychlích.....</u></i>	<i><u>98</u></i>
<i><u>Graf. 13– Měrné hmotnosti směsí.....</u></i>	<i><u>99</u></i>
<i><u>Graf. 14– Pevnosti v tahu za ohybu na zkušebních trámcích.....</u></i>	<i><u>100</u></i>
<i><u>Graf. 15– Měrné hmotnosti směsí.....</u></i>	<i><u>101</u></i>
<i><u>Graf. 16– Pevnosti v tlaku na zlomcích trámků.....</u></i>	<i><u>102</u></i>
<i><u>Graf. 17– Moduly pružnosti.....</u></i>	<i><u>103</u></i>
<i><u>Graf. 18– Průhyb trámu 1N v jednotlivých bodech.....</u></i>	<i><u>107</u></i>
<i><u>Graf. 19– Časový průběh zatěžování trámu 1N.....</u></i>	<i><u>108</u></i>
<i><u>Graf. 20– Průhyb trámu 1N po odečtu.....</u></i>	<i><u>108</u></i>
<i><u>Graf. 21– Průhyb trámu 2N+D v jednotlivých bodech.....</u></i>	<i><u>109</u></i>
<i><u>Graf. 22– Časový průběh zatěžování trámu 2N+D.....</u></i>	<i><u>110</u></i>

<u>Graf. 23– Průhyb trámu 2N+D po odečtu.....</u>	<u>110</u>
<u>Graf. 24– Průhyb trámu 4A+D v jednotlivých bodech.....</u>	<u>112</u>
<u>Graf. 25– Časový průběh zatěžování trámu 4A+D.....</u>	<u>112</u>
<u>Graf. 26– Průhyb trámu 4A+D po odečtu.....</u>	<u>113</u>
<u>Graf. 27– Průhyb trámu 5A+D+V v jednotlivých bodech.....</u>	<u>114</u>
<u>Graf. 28– Časový průběh zatěžování trámu 5A+D+V.....</u>	<u>115</u>
<u>Graf. 29– Průhyb trámu 5A+D+V po odečtu.....</u>	<u>115</u>
<u>Graf. 30– Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F</u>	<u>119</u>
<u>Graf. 31– Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F</u>	<u>119</u>
<u>– výřez z grafu – Graf. 30.....</u>	<u>119</u>
<u>Graf. 32– Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F.....</u>	<u>120</u>
<u>u trámu 1N</u>	<u>120</u>
<u>Graf. 33– Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F.....</u>	<u>121</u>
<u>u trámu 2N+D</u>	<u>121</u>
<u>Graf. 34– Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F.....</u>	<u>122</u>
<u>u trámu 4A+D</u>	<u>122</u>
<u>Graf. 35– Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F.....</u>	<u>123</u>
<u>u trámu 5A+D+N</u>	<u>123</u>
<u>Graf. 36– Kumulativní aktivita akustické emise N_c v závislosti na síle F.....</u>	<u>123</u>
<u>u trámu 5A+D+N – výřez z grafu – Graf. 35.....</u>	<u>123</u>

PŘÍLOHA A

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	66	0,490	0,465	0,475	0,500	0,010	0,035	0,025
2	78	0,750	0,750	0,750	0,790	0,040	0,040	0,040
3	308	0,750	0,750	0,750	0,790	0,040	0,040	0,040
4	310	0,810	0,805	0,800	0,845	0,035	0,040	0,045
5	314	0,840	0,835	0,825	0,875	0,035	0,040	0,050
6	318	0,855	0,850	0,845	0,895	0,040	0,045	0,050
7	322	0,865	0,860	0,860	0,905	0,040	0,045	0,045
8	328	0,875	0,870	0,870	0,920	0,045	0,050	0,050
9	378	0,890	0,870	0,885	0,940	0,050	0,070	0,055
10	398	0,910	0,900	0,905	0,965	0,055	0,065	0,060
11	410	0,930	0,920	0,925	0,985	0,055	0,065	0,060
12	458	1,205	1,190	1,190	1,250	0,045	0,060	0,060
13	468	1,290	1,275	1,270	1,335	0,045	0,060	0,065
14	542	2,000	2,025	2,000	2,065	0,065	0,040	0,065
15	548	2,060	2,105	2,060	2,150	0,090	0,045	0,090
16	552	2,075	2,125	2,080	2,170	0,095	0,045	0,090
17	558	2,085	2,140	2,095	2,185	0,100	0,045	0,090
18	562	2,100	2,155	2,115	2,205	0,105	0,050	0,090
19	568	2,110	2,165	2,130	2,215	0,105	0,050	0,085
20	574	2,120	2,180	2,140	2,230	0,110	0,050	0,090
21	580	2,130	2,190	2,155	2,250	0,120	0,060	0,095
22	586	2,140	2,205	2,170	2,275	0,135	0,070	0,105
23	594	2,155	2,215	2,180	2,285	0,130	0,070	0,105
24	600	2,165	2,225	2,190	2,305	0,140	0,080	0,115
25	606	2,170	2,235	2,200	2,315	0,145	0,080	0,115
26	614	2,180	2,245	2,210	2,330	0,150	0,085	0,120
27	622	2,190	2,255	2,220	2,345	0,155	0,090	0,125
28	628	2,195	2,260	2,225	2,350	0,155	0,090	0,125
29	634	2,200	2,265	2,230	2,360	0,160	0,095	0,130
30	644	2,210	2,275	2,240	2,375	0,165	0,100	0,135
31	650	2,215	2,280	2,250	2,380	0,165	0,100	0,130
32	658	2,225	2,285	2,255	2,390	0,165	0,105	0,135
33	664	2,230	2,295	2,260	2,410	0,180	0,115	0,150
34	672	2,235	2,300	2,270	2,415	0,180	0,115	0,145
35	682	2,240	2,305	2,280	2,430	0,190	0,125	0,150
36	690	2,250	2,315	2,285	2,440	0,190	0,125	0,155
37	698	2,255	2,320	2,290	2,450	0,195	0,130	0,160
38	706	2,260	2,325	2,300	2,460	0,200	0,135	0,160
39	712	2,265	2,335	2,305	2,480	0,215	0,145	0,175

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
40	720	2,270	2,340	2,310	2,485	0,215	0,145	0,175
41	728	2,275	2,345	2,315	2,495	0,220	0,150	0,180
42	734	2,280	2,350	2,320	2,510	0,230	0,160	0,190
43	746	2,285	2,355	2,330	2,520	0,235	0,165	0,190
44	754	2,290	2,360	2,330	2,530	0,240	0,170	0,200
45	764	2,295	2,365	2,340	2,545	0,250	0,180	0,205
46	774	2,300	2,370	2,345	2,555	0,255	0,185	0,210
47	782	2,305	2,375	2,350	2,565	0,260	0,190	0,215
48	796	2,310	2,390	2,355	2,575	0,265	0,185	0,220
49	808	2,310	2,385	2,360	2,585	0,275	0,200	0,225

vznik trhliny a úplné zlomení trámu při 49 kN

Tab. 18 – Naměřené hodnoty – trám 1N

PŘÍLOHA B

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	14	-0,060	-0,040	-0,030	-0,010	0,050	0,030	0,020
2	108	1,340	1,385	1,320	1,390	0,050	0,005	0,070
3	228	9,010	8,990	9,010	9,070	0,060	0,080	0,060
4	234	9,180	9,170	9,190	9,250	0,070	0,080	0,060
5	242	9,485	9,475	9,465	9,555	0,070	0,080	0,090
6	298	9,785	9,750	9,740	9,845	0,060	0,095	0,105
7	302	9,885	9,850	9,860	9,900	0,015	0,050	0,040
8	308	9,935	9,940	9,920	9,950	0,015	0,010	0,030
9	316	9,985	9,980	9,975	9,990	0,005	0,010	0,015
10	322	10,010	10,015	10,005	10,015	0,005	0,000	0,010
11	502	10,045	10,050	10,040	10,055	0,010	0,005	0,015
12	524	10,150	10,100	10,130	10,170	0,020	0,070	0,040
13	540	10,200	10,135	10,135	10,215	0,015	0,080	0,080
14	576	10,700	10,640	10,620	10,715	0,015	0,075	0,095
15	586	10,880	10,835	10,805	10,915	0,035	0,080	0,110
16	592	10,920	10,865	10,840	10,965	0,045	0,100	0,125
17	614	10,960	10,890	10,880	10,985	0,025	0,095	0,105
18	628	10,970	10,910	10,910	11,005	0,035	0,095	0,095
19	640	11,000	10,925	10,940	11,015	0,015	0,090	0,075
20	650	11,010	10,935	10,940	11,030	0,020	0,095	0,090
21	684	11,030	10,950	10,960	11,045	0,015	0,095	0,085
22	696	11,040	10,965	10,980	11,060	0,020	0,095	0,080
23	708	11,050	10,975	10,995	11,065	0,015	0,090	0,070
24	726	11,060	10,990	11,015	11,080	0,020	0,090	0,065
25	734	11,075	11,000	11,025	11,095	0,020	0,095	0,070
24	752	11,100	11,010	11,040	11,090	-0,010	0,080	0,050
23	764	11,110	11,020	11,055	11,080	-0,030	0,060	0,025
26	774	11,120	11,030	11,065	11,090	-0,030	0,060	0,025
27	786	11,130	11,040	11,070	11,200	0,070	0,160	0,130
28	798	11,140	11,045	11,085	11,210	0,070	0,165	0,125
29	818	11,150	11,055	11,100	11,215	0,065	0,160	0,115
30	826	11,160	11,060	11,110	11,220	0,060	0,160	0,110
29	836	11,165	11,070	11,120	11,220	0,055	0,150	0,100
28	848	11,175	11,080	11,130	11,210	0,035	0,130	0,080
27	860	11,185	11,085	11,140	11,205	0,020	0,120	0,065
26	874	11,195	11,095	11,155	11,195	0,000	0,100	0,040
31	882	11,200	11,105	11,160	11,215	0,015	0,110	0,055
32	892	11,210	11,110	11,170	11,230	0,020	0,120	0,060
33	902	11,220	11,115	11,185	11,230	0,010	0,115	0,045

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
34	916	11,225	11,125	11,185	11,240	0,015	0,115	0,055
35	928	11,230	11,130	11,190	11,245	0,015	0,115	0,055
36	936	11,235	11,135	11,200	11,265	0,030	0,130	0,065
37	952	11,245	11,140	11,205	11,270	0,025	0,130	0,065
38	962	11,255	11,145	11,215	11,275	0,020	0,130	0,060
39	974	11,260	11,150	11,220	11,280	0,020	0,130	0,060
40	990	11,270	11,160	11,230	11,290	0,020	0,130	0,060
41	998	11,270	11,165	11,235	11,300	0,030	0,135	0,065
42	1008	11,275	11,170	11,240	11,305	0,030	0,135	0,065
43	1024	11,275	11,175	11,245	11,315	0,040	0,140	0,070
44	1040	11,280	11,175	11,250	11,320	0,040	0,145	0,070
45	1058	11,240	11,140	11,250	11,330	0,090	0,190	0,080
46	1074	11,220	11,130	11,250	11,340	0,120	0,210	0,090
47	1088	11,200	11,120	11,250	11,350	0,150	0,230	0,100
48	1104	11,190	11,110	11,250	11,360	0,170	0,250	0,110
49	1114	11,180	11,100	11,250	11,375	0,195	0,275	0,125
50	1126	11,160	11,090	11,250	11,395	0,235	0,305	0,145
51	1132	11,140	11,080	11,250	11,485	0,345	0,405	0,235
50	1144	11,120	11,070	11,250	11,625	0,505	0,555	0,375
49	1162	11,060	11,035	11,250	11,805	0,745	0,770	0,555
52	1184	10,895	10,930	11,250	12,025	1,130	1,095	0,775
53	1188	10,870	10,910	11,250	12,165	1,295	1,255	0,915
52	1190	10,835	10,890	11,245	12,220	1,385	1,330	0,975
51	1194	10,795	10,860	11,230	12,425	1,630	1,565	1,195
50	1196	10,765	10,840	11,225	12,500	1,735	1,660	1,275
49	1200	10,705	10,800	11,210	12,620	1,915	1,820	1,410
48	1206	10,625	10,745	11,185	12,780	2,155	2,035	1,595
45	1218	10,480	10,660	11,145	13,290	2,810	2,630	2,145
40	1238	10,280	10,520	11,095	14,070	3,790	3,550	2,975
35	1276	9,890	10,320	11,010	14,625	4,735	4,305	3,615
30	1332	9,330	9,925	10,905	15,605	6,275	5,680	4,700
25	1416	8,900	9,330	10,500	16,835	7,935	7,505	6,335

vznik trhliny při 51 kN

Tab. 19 – Naměřené hodnoty – trám 2N+D

PŘÍLOHA C

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	40	0,350	0,290	0,380	0,330	-0,020	0,040	-0,050
3	54	0,480	0,430	0,515	0,440	-0,040	0,010	-0,075
4	68	0,565	0,520	0,590	0,555	-0,010	0,035	-0,035
5	80	0,640	0,590	0,660	0,590	-0,050	0,000	-0,070
6	90	0,670	0,610	0,690	0,630	-0,040	0,020	-0,060
7	106	0,710	0,640	0,710	0,680	-0,030	0,040	-0,030
8	122	0,740	0,690	0,755	0,745	0,005	0,055	-0,010
9	142	0,790	0,740	0,800	0,820	0,030	0,080	0,020
10	162	0,840	0,800	0,850	0,850	0,010	0,050	0,000
11	192	0,985	0,960	1,000	0,975	-0,010	0,015	-0,025
12	210	1,135	1,090	1,170	1,120	-0,015	0,030	-0,050
13	240	1,370	1,365	1,415	1,360	-0,010	-0,005	-0,055
14	270	1,840	1,800	1,870	1,850	0,010	0,050	-0,020
15	276	1,920	1,890	1,960	1,910	-0,010	0,020	-0,050
16	284	1,970	1,920	1,990	1,970	0,000	0,050	-0,020
17	294	2,010	1,960	2,040	2,025	0,015	0,065	-0,015
18	302	2,040	1,985	2,070	2,055	0,015	0,070	-0,015
19	308	2,065	2,005	2,100	2,070	0,005	0,065	-0,030
20	314	2,090	2,020	2,110	2,080	-0,010	0,060	-0,030
21	322	2,110	2,040	2,140	2,110	0,000	0,070	-0,030
22	328	2,125	2,060	2,160	2,140	0,015	0,080	-0,020
23	336	2,145	2,080	2,170	2,160	0,015	0,080	-0,010
24	342	2,160	2,100	2,210	2,180	0,020	0,080	-0,030
25	350	2,180	2,120	2,220	2,190	0,010	0,070	-0,030
26	356	2,190	2,130	2,240	2,200	0,010	0,070	-0,040
27	364	2,210	2,140	2,255	2,225	0,015	0,085	-0,030
28	374	2,220	2,150	2,270	2,250	0,030	0,100	-0,020
29	382	2,230	2,160	2,280	2,270	0,040	0,110	-0,010
30	392	2,240	2,175	2,295	2,300	0,060	0,125	0,005
31	404	2,260	2,190	2,310	2,330	0,070	0,140	0,020
32	412	2,270	2,200	2,330	2,340	0,070	0,140	0,010
33	424	2,285	2,220	2,340	2,350	0,065	0,130	0,010
34	434	2,300	2,230	2,360	2,370	0,070	0,140	0,010
35	448	2,310	2,240	2,380	2,385	0,075	0,145	0,005
36	460	2,320	2,255	2,400	2,400	0,080	0,145	0,000
37	470	2,330	2,265	2,400	2,420	0,090	0,155	0,020
38	484	2,340	2,275	2,415	2,430	0,090	0,155	0,015
39	492	2,350	2,285	2,420	2,440	0,090	0,155	0,020
40	508	2,370	2,295	2,440	2,450	0,080	0,155	0,010

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
41	520	2,380	2,310	2,455	2,475	0,095	0,165	0,020
42	534	2,390	2,320	2,460	2,490	0,100	0,170	0,030
43	550	2,400	2,330	2,475	2,510	0,110	0,180	0,035
44	566	2,410	2,340	2,490	2,530	0,120	0,190	0,040
45	580	2,420	2,350	2,500	2,550	0,130	0,200	0,050
46	597	2,430	2,360	2,510	2,570	0,140	0,210	0,060
47	608	2,440	2,370	2,520	2,580	0,140	0,210	0,060
48	630	2,450	2,380	2,530	2,635	0,185	0,255	0,105
49	670	2,395	2,350	2,525	2,680	0,285	0,330	0,155
45	678	2,360	2,325	2,510	2,820	0,460	0,495	0,310
46	706	2,260	2,240	2,470	3,090	0,830	0,850	0,620
47	716	2,190	2,195	2,450	3,265	1,075	1,070	0,815
46	742	1,860	1,930	2,320	3,805	1,945	1,875	1,485
45	748	1,740	1,830	2,265	4,050	2,310	2,220	1,785
44	756	1,570	1,700	2,190	4,375	2,805	2,675	2,185
43	760	1,470	1,620	2,150	4,565	3,095	2,945	2,415
42	764	1,305	1,480	2,070	4,780	3,475	3,300	2,710
41	768	1,160	1,370	2,010	5,050	3,890	3,680	3,040
40	770	1,030	1,260	1,940	5,185	4,155	3,925	3,245
39	780	0,510	0,870	1,730	5,940	5,430	5,070	4,210
35	784	0,105	0,560	1,550	6,420	6,315	5,860	4,870

vznik trhliny při 49 kN

Tab. 20 – Naměřené hodnoty – trám 4A+D

PŘÍLOHA D

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	20	1,060	1,125	1,140	0,790	-0,270	-0,335	-0,350
3	30	1,575	1,690	1,705	1,280	-0,295	-0,410	-0,425
4	34	1,670	1,805	1,810	1,320	-0,350	-0,485	-0,490
5	36	1,680	1,825	1,830	1,330	-0,350	-0,495	-0,500
6	38	1,700	1,845	1,845	1,350	-0,350	-0,495	-0,495
7	44	1,720	1,865	1,860	1,410	-0,310	-0,455	-0,450
8	48	1,730	1,885	1,890	1,420	-0,310	-0,465	-0,470
9	52	1,770	1,915	1,920	1,430	-0,340	-0,485	-0,490
10	56	1,800	1,925	1,940	1,515	-0,285	-0,410	-0,425
11	82	2,045	2,155	2,160	1,520	-0,525	-0,635	-0,640
12	118	2,485	2,620	2,590	1,810	-0,675	-0,810	-0,780
13	138	2,860	2,975	2,970	2,230	-0,630	-0,745	-0,740
14	142	2,920	3,045	2,980	2,615	-0,305	-0,430	-0,365
15	146	2,945	3,075	3,060	2,685	-0,260	-0,390	-0,375
16	150	2,980	3,115	3,100	2,760	-0,220	-0,355	-0,340
17	154	3,010	3,145	3,120	2,820	-0,190	-0,325	-0,300
18	160	3,030	3,175	3,140	2,840	-0,190	-0,335	-0,300
19	162	3,040	3,185	3,150	2,870	-0,170	-0,315	-0,280
20	166	3,050	3,205	3,170	2,890	-0,160	-0,315	-0,280
21	172	3,070	3,225	3,200	2,930	-0,140	-0,295	-0,270
22	178	3,100	3,265	3,230	3,000	-0,100	-0,265	-0,230
23	184	3,120	3,285	3,250	3,030	-0,090	-0,255	-0,220
24	188	3,135	3,305	3,265	3,050	-0,085	-0,255	-0,215
25	192	3,150	3,320	3,280	3,095	-0,055	-0,225	-0,185
26	198	3,165	3,335	3,295	3,110	-0,055	-0,225	-0,185
27	202	3,180	3,355	3,310	3,150	-0,030	-0,205	-0,160
28	206	3,200	3,375	3,330	3,170	-0,030	-0,205	-0,160
29	210	3,210	3,380	3,340	3,210	0,000	-0,170	-0,130
30	214	3,220	3,395	3,350	3,240	0,020	-0,155	-0,110
31	220	3,235	3,405	3,360	3,265	0,030	-0,140	-0,095
32	224	3,250	3,415	3,375	3,320	0,070	-0,095	-0,055
33	228	3,255	3,425	3,380	3,340	0,085	-0,085	-0,040
34	234	3,270	3,445	3,395	3,430	0,160	-0,015	0,035
35	240	3,280	3,455	3,410	3,480	0,200	0,025	0,070
36	244	3,290	3,470	3,420	3,540	0,250	0,070	0,120
37	252	3,305	3,480	3,430	3,570	0,265	0,090	0,140
38	256	3,315	3,490	3,440	3,610	0,295	0,120	0,170
39	262	3,325	3,505	3,450	3,640	0,315	0,135	0,190
40	268	3,340	3,515	3,460	3,670	0,330	0,155	0,210

VYUŽITÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH BETONŮ U MALÝCH MOSTNÍCH OBJEKTŮ,
VČETNĚ POUŽITÍ U MALÝCH INTEGROVANÝCH MOSTŮ

DISERTAČNÍ PRÁCE

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
41	274	3,350	3,525	3,470	3,690	0,340	0,165	0,220
42	280	3,350	3,530	3,480	3,770	0,420	0,240	0,290
43	288	3,370	3,545	3,490	3,810	0,440	0,265	0,320
44	296	3,385	3,555	3,500	3,880	0,495	0,325	0,380
45	302	3,400	3,565	3,515	3,910	0,510	0,345	0,395
46	308	3,410	3,575	3,520	3,955	0,545	0,380	0,435
47	314	3,420	3,585	3,530	3,990	0,570	0,405	0,460
48	322	3,440	3,595	3,535	4,040	0,600	0,445	0,505
49	328	3,445	3,605	3,555	4,080	0,635	0,475	0,525
50	332	3,455	3,615	3,560	4,140	0,685	0,525	0,580
51	338	3,460	3,625	3,570	4,210	0,750	0,585	0,640
52	346	3,480	3,635	3,585	4,230	0,750	0,595	0,645
53	352	3,485	3,645	3,595	4,270	0,785	0,625	0,675
54	358	3,500	3,655	3,605	4,330	0,830	0,675	0,725
55	364	3,505	3,660	3,615	4,365	0,860	0,705	0,750
56	372	3,520	3,665	3,640	4,440	0,920	0,775	0,800
57	380	3,530	3,675	3,640	4,490	0,960	0,815	0,850
58	384	3,540	3,685	3,650	4,560	1,020	0,875	0,910
59	392	3,550	3,695	3,655	4,600	1,050	0,905	0,945
60	398	3,560	3,705	3,670	4,660	1,100	0,955	0,990
61	404	3,570	3,715	3,680	4,680	1,110	0,965	1,000
62	410	3,580	3,725	3,685	4,700	1,120	0,975	1,015
63	416	3,590	3,730	3,695	4,780	1,190	1,050	1,085
64	422	3,600	3,740	3,705	4,850	1,250	1,110	1,145
65	428	3,610	3,745	3,715	4,885	1,275	1,140	1,170
66	432	3,615	3,750	3,720	4,935	1,320	1,185	1,215
67	440	3,630	3,765	3,730	4,980	1,350	1,215	1,250
68	446	3,640	3,775	3,740	5,010	1,370	1,235	1,270
69	454	3,650	3,785	3,755	5,075	1,425	1,290	1,320
70	460	3,660	3,790	3,765	5,110	1,450	1,320	1,345
71	464	3,670	3,800	3,775	5,150	1,480	1,350	1,375
72	470	3,680	3,805	3,780	5,200	1,520	1,395	1,420
73	476	3,690	3,815	3,790	5,250	1,560	1,435	1,460
74	482	3,700	3,825	3,805	5,270	1,570	1,445	1,465
75	490	3,710	3,835	3,815	5,360	1,650	1,525	1,545
76	496	3,720	3,840	3,825	5,390	1,670	1,550	1,565
77	502	3,730	3,850	3,835	5,440	1,710	1,590	1,605
78	510	3,740	3,855	3,845	5,490	1,750	1,635	1,645
79	516	3,750	3,865	3,855	5,530	1,780	1,665	1,675
80	522	3,760	3,875	3,860	5,560	1,800	1,685	1,700
81	526	3,765	3,875	3,870	5,610	1,845	1,735	1,740
82	534	3,780	3,885	3,880	5,660	1,880	1,775	1,780

VYUŽITÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH BETONŮ U MALÝCH MOSTNÍCH OBJEKTŮ,
VČETNĚ POUŽITÍ U MALÝCH INTEGROVANÝCH MOSTŮ

DISERTAČNÍ PRÁCE

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
83	542	3,790	3,900	3,890	5,720	1,930	1,820	1,830
84	550	3,800	3,905	3,900	5,750	1,950	1,845	1,850
85	556	3,810	3,915	3,910	5,815	2,005	1,900	1,905
86	562	3,815	3,920	3,920	5,860	2,045	1,940	1,940
87	568	3,825	3,930	3,925	5,925	2,100	1,995	2,000
88	574	3,830	3,940	3,940	5,960	2,130	2,020	2,020
89	582	3,845	3,950	3,950	6,000	2,155	2,050	2,050
90	590	3,855	3,960	3,960	6,040	2,185	2,080	2,080
91	598	3,860	3,965	3,965	6,070	2,210	2,105	2,105
92	608	3,865	3,965	3,970	6,070	2,205	2,105	2,100
91	614	3,865	3,965	3,970	6,050	2,185	2,085	2,080
90	626	3,865	3,965	3,970	5,960	2,095	1,995	1,990
89	634	3,840	3,965	3,950	5,920	2,080	1,955	1,970
82	638	3,830	3,965	3,940	5,900	2,070	1,935	1,960
81	640	3,825	3,960	3,935	5,890	2,065	1,930	1,955
80	646	3,820	3,955	3,930	5,885	2,065	1,930	1,955
79	652	3,820	3,955	3,930	5,900	2,080	1,945	1,970
80	658	3,820	3,950	3,925	5,930	2,110	1,980	2,005
81	662	3,820	3,955	3,930	5,950	2,130	1,995	2,020
82	666	3,830	3,955	3,930	5,980	2,150	2,025	2,050
83	670	3,840	3,960	3,940	6,000	2,160	2,040	2,060
84	674	3,845	3,965	3,945	6,020	2,175	2,055	2,075
85	678	3,860	3,970	3,955	6,050	2,190	2,080	2,095
86	682	3,860	3,975	3,960	6,070	2,210	2,095	2,110
87	686	3,870	3,975	3,970	6,090	2,220	2,115	2,120
88	688	3,870	3,980	3,970	6,110	2,240	2,130	2,140
89	694	3,880	3,985	3,980	6,130	2,250	2,145	2,150
90	698	3,890	3,995	3,990	6,160	2,270	2,165	2,170
91	704	3,895	4,000	3,995	6,200	2,305	2,200	2,205
92	708	3,905	4,005	4,005	6,210	2,305	2,205	2,205
93	712	3,910	4,010	4,010	6,250	2,340	2,240	2,240
94	716	3,920	4,015	4,020	6,270	2,350	2,255	2,250
95	720	3,925	4,025	4,025	6,360	2,435	2,335	2,335
96	724	3,935	4,035	4,035	6,370	2,435	2,335	2,335
97	730	3,940	4,045	4,040	6,410	2,470	2,365	2,370
98	734	3,950	4,045	4,050	6,450	2,500	2,405	2,400
99	738	3,955	4,055	4,060	6,490	2,535	2,435	2,430
100	744	3,960	4,060	4,065	6,555	2,595	2,495	2,490
101	748	3,970	4,065	4,070	6,590	2,620	2,525	2,520
102	754	3,980	4,075	4,080	6,640	2,660	2,565	2,560
103	758	3,985	4,080	4,090	6,680	2,695	2,600	2,590
104	762	3,990	4,085	4,095	6,710	2,720	2,625	2,615

VYUŽITÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH BETONŮ U MALÝCH MOSTNÍCH OBJEKTŮ,
VČETNĚ POUŽITÍ U MALÝCH INTEGROVANÝCH MOSTŮ

DISERTAČNÍ PRÁCE

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
105	768	4,000	4,090	4,100	6,760	2,760	2,670	2,660
106	772	4,005	4,095	4,105	6,815	2,810	2,720	2,710
107	776	4,010	4,105	4,110	6,870	2,860	2,765	2,760
108	784	4,020	4,110	4,125	6,910	2,890	2,800	2,785
109	788	4,030	4,125	4,130	6,930	2,900	2,805	2,800
110	794	4,040	4,130	4,140	7,000	2,960	2,870	2,860
111	798	4,122	4,135	4,145	7,050	2,928	2,915	2,905
112	802	4,055	4,145	4,150	7,090	3,035	2,945	2,940
113	808	4,060	4,155	4,160	7,150	3,090	2,995	2,990
114	812	4,070	4,155	4,170	7,190	3,120	3,035	3,020
115	818	4,080	4,165	4,175	7,220	3,140	3,055	3,045
116	822	4,096	4,170	4,180	7,240	3,144	3,070	3,060
117	826	4,095	4,175	4,190	7,295	3,200	3,120	3,105
118	832	4,100	4,185	4,195	7,360	3,260	3,175	3,165
119	834	4,105	4,185	4,200	7,400	3,295	3,215	3,200
120	840	4,115	4,195	4,210	7,460	3,345	3,265	3,250
121	844	4,125	4,200	4,220	7,510	3,385	3,310	3,290
122	850	4,135	4,210	4,230	7,560	3,425	3,350	3,330
123	856	4,140	4,215	4,235	7,630	3,490	3,415	3,395
124	860	4,150	4,225	4,240	7,660	3,510	3,435	3,420
125	864	4,155	4,230	4,250	7,720	3,565	3,490	3,470
126	868	4,160	4,235	4,260	7,760	3,600	3,525	3,500
127	872	4,170	4,245	4,265	7,850	3,680	3,605	3,585
128	878	4,180	4,270	4,275	7,910	3,730	3,640	3,635
129	882	4,190	4,265	4,280	7,960	3,770	3,695	3,680
130	886	4,190	4,260	4,285	8,000	3,810	3,740	3,715
131	890	4,200	4,265	4,290	8,050	3,850	3,785	3,760
132	894	4,210	4,275	4,300	8,090	3,880	3,815	3,790
133	896	4,215	4,280	4,305	8,160	3,945	3,880	3,855
134	904	4,220	4,285	4,310	8,200	3,980	3,915	3,890
135	910	4,230	4,295	4,320	8,250	4,020	3,955	3,930
136	914	4,240	4,300	4,325	8,310	4,070	4,010	3,985
137	920	4,245	4,305	4,330	8,360	4,115	4,055	4,030
138	926	4,255	4,315	4,340	8,400	4,145	4,085	4,060
139	930	4,260	4,325	4,350	8,475	4,215	4,150	4,125
140	936	4,270	4,330	4,355	8,530	4,260	4,200	4,175
141	942	4,280	4,335	4,360	8,590	4,310	4,255	4,230
142	948	4,285	4,315	4,370	8,620	4,335	4,305	4,250
143	952	4,295	4,355	4,380	8,660	4,365	4,305	4,280
144	956	4,300	4,360	4,380	8,690	4,390	4,330	4,310
145	960	4,305	4,365	4,390	8,740	4,435	4,375	4,350
146	964	4,310	4,370	4,395	8,800	4,490	4,430	4,405

VYUŽITÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH BETONŮ U MALÝCH MOSTNÍCH OBJEKTŮ,
VČETNĚ POUŽITÍ U MALÝCH INTEGROVANÝCH MOSTŮ

DISERTAČNÍ PRÁCE

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
147	970	4,320	4,375	4,400	8,870	4,550	4,495	4,470
148	976	4,325	4,385	4,410	8,920	4,595	4,535	4,510
149	982	4,335	4,395	4,415	8,950	4,615	4,555	4,535
150	986	4,340	4,400	4,420	9,000	4,660	4,600	4,580
151	990	4,345	4,400	4,425	9,060	4,715	4,660	4,635
152	996	4,350	4,410	4,430	9,110	4,760	4,700	4,680
153	1002	4,360	4,415	4,440	9,170	4,810	4,755	4,730
154	1008	4,370	4,420	4,450	9,220	4,850	4,800	4,770
155	1014	4,370	4,425	4,450	9,270	4,900	4,845	4,820
156	1020	4,380	4,430	4,460	9,320	4,940	4,890	4,860
157	1026	4,385	4,440	4,465	9,360	4,975	4,920	4,895
158	1032	4,390	4,445	4,470	9,390	5,000	4,945	4,920
159	1038	4,400	4,455	4,480	9,470	5,070	5,015	4,990
160	1044	4,405	4,460	4,485	9,530	5,125	5,070	5,045
161	1048	4,410	4,460	4,485	9,590	5,180	5,130	5,105
162	1054	4,420	4,465	4,490	9,660	5,240	5,195	5,170
163	1060	4,425	4,475	4,500	9,690	5,265	5,215	5,190
164	1066	4,430	4,485	4,505	9,730	5,300	5,245	5,225
165	1072	4,435	4,485	4,510	9,800	5,365	5,315	5,290
166	1078	4,440	4,490	4,510	9,860	5,420	5,370	5,350
167	1086	4,450	4,495	4,520	9,930	5,480	5,435	5,410
168	1092	4,455	4,500	4,525	9,980	5,525	5,480	5,455
169	1098	4,460	4,505	4,530	10,055	5,595	5,550	5,525
170	1106	4,465	4,505	4,535	10,115	5,650	5,610	5,580
171	1114	4,470	4,515	4,540	10,180	5,710	5,665	5,640
172	1120	4,475	4,515	4,555	10,220	5,745	5,705	5,665
173	1128	4,480	4,520	4,550	10,290	5,810	5,770	5,740
174	1134	4,480	4,520	4,550	10,330	5,850	5,810	5,780
175	1142	4,480	4,525	4,555	10,440	5,960	5,915	5,885
176	1154	4,480	4,525	4,555	10,520	6,040	5,995	5,965
177	1162	4,470	4,520	4,555	10,730	6,260	6,210	6,175
178	1172	4,440	4,505	4,555	10,830	6,390	6,325	6,275
179	1178	4,420	4,485	4,555	11,130	6,710	6,645	6,575
180	1192	4,380	4,445	4,510	11,325	6,945	6,880	6,815
181	1200	4,345	4,415	4,490	11,530	7,185	7,115	7,040
182	1206	4,330	4,385	4,470	11,780	7,450	7,395	7,310
183	1218	4,270	4,420	4,415	12,100	7,830	7,680	7,685
184	1230	4,185	4,230	4,350	12,370	8,185	8,140	8,020
185	1238	4,135	4,165	4,290	12,805	8,670	8,640	8,515
186	1250	4,045	4,060	4,205	13,220	9,175	9,160	9,015
187	1262	3,950	3,945	4,100	13,440	9,490	9,495	9,340
188	1266	3,910	3,885	4,050	13,770	9,860	9,885	9,720

Síla (kN)	Čas (s)	Průhyby v jednotlivých bodech				Průhyby po odečtu		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
189	1274	3,830	3,795	3,970	14,100	10,270	10,305	10,130
190	1282	3,750	3,705	3,880	14,700	10,950	10,995	10,820
191	1294	3,600	3,530	3,735	15,170	11,570	11,640	11,435
192	1304	3,460	3,380	3,605	15,700	12,240	12,320	12,095
193	1314	3,330	3,235	3,490	16,030	12,700	12,795	12,540
194	1322	3,240	3,130	3,405	16,440	13,200	13,310	13,035
195	1328	3,160	3,045	3,330	16,985	13,825	13,940	13,655
196	1338	3,04	2,905	3,230	17,740	14,700	14,835	14,510
197	1352	2,850	2,715	3,080	18,320	15,470	15,605	15,240
198	1360	2,710	2,565	2,970	19,370	16,660	16,805	16,400
199	1376	2,430	2,310	2,770	20,600	18,170	18,290	17,830
200	1392	2,130	2,035	2,540	21,690	19,560	19,655	19,150
201	1406	1,735	1,645	2,490	24,745	23,010	23,100	22,255
202	1430	0,900	0,775	1,550	27,290	26,390	26,515	25,740
203	1442	0,470	0,250	1,180	27,290	26,820	27,040	26,110
204	1450	0,170	-0,200	0,840	27,290	27,120	27,490	26,450
203	1472	-0,360	-0,360	0,050	27,290	27,650	27,650	27,240

 vznik trhliny při 77 kN

Tab. 21 – Naměřené hodnoty – trám 5A+D+V