



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**ANALÝZA VLASTNOSTÍ VLÁKNOCEMENTOVÝCH
KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ**

ANALYSIS OF PROPERTIES OF FIBER-CEMENT COMPOSITE MATERIALS

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Marek Hoško

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2023

ABSTRAKT

Tématem disertační práce byla problematika kalového odpadu vznikajícího při výrobě vláknocementu a jeho zpětné implementace do matrice. Teoretická část práce byla věnována popisu Hatschekově technologii výroby vláknocementu, systému technologických vod, kalového hospodářství a jeho separaci ze systému. Praktická část byla rozdělena do 5 etap. V první etapě byly monitorovány kvalitativní parametry kalového odpadu pomocí vybraných kvalitativních zkoušek. V následující etapě bylo porovnáváno mineralogické a chemické složení vzorků kalového odpadu se standardní břečkou používanou pro výrobu. Ve třetí etapě byl navržen alternativní způsob výroby laboratorních vzorků, na kterém byl ověřen vliv přídavku kalů na pevnostní charakteristiky. V následujícím kroku byly sumarizovány výsledky z předchozích etap a byly navrženy receptury s odpadními kaly pro výrobu na výrobním stroji. Čtvrtá etapa se zabývala samotným zpracováním kalů, jejich odběrem a dávkováním. Během mokrého procesu výroby byla hodnocena řada důležitých ukazatelů efektivity výroby vláknocementových výrobků. Mezi nejdůležitější z nich patří zejména hodnocení podsítných podílů a retencí. V poslední etapě byly vyrobené vzorky s kaly porovnávány se standardními. Vzorky byly podrobeny sérii fyzikálně-mechanických a trvanlivostních zkoušek: podélná a příčná pevnost, objemová hmotnost, vodotěsnost, odolnost proti nárazu, mrazuvzdornost, nasáknutí-vysoušení, metoda skrytých vad, rozměrová stabilita a deformace působením vlhkosti. Výsledkem disertační práce je ucelená studie o vlastnostech a implementaci kalového odpadu do vláknocementu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hatschek proces, vláknocement, kalový odpad.

ABSTRACT

Thesis theme was the issue of sludge waste generated during the production of fiber cement and its reverse implementation into the matrix. The theoretical part of the work has deal with description of Hatschek's fiber cement production technology, technological water system, sludge management and its separation from the system. Experimental part was divided into 5 stages. The first stage was focused on monitoring the qualitative parameters of the sludge waste, which were monitored using selected qualitative tests. In the next stage, was compared the mineralogical and chemical composition of the sludge waste samples with the standard slurry used for production. In the third stage was proposed an alternative method of producing laboratory samples, on which the influence of the addition of sludge on the strength characteristics was verified. In the next step were summarized the results from the previous stages and recipes with waste sludge for production on the production machine were proposed. The fourth stage dealt with the sludge processing itself, its collection and dosing. During the wet production process were evaluated a number of important indicators of the efficiency of production of fiber cement products. Among the most important of them belong percolation and retention evaluation. In the last stage were compared the produced samples with sludge with the

standard ones. The samples were subjected to a series of physical-mechanical and durability tests: longitudinal and transverse strength, density, watertightness, impact test, frost resistance, soak-dry, hidden defect method, dimensional stability and warping. The result of the thesis is a comprehensive study on the properties and implementation of sludge waste into fiber cement.

KEYWORDS

Hatschek process, fibercement, sludge waste.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Marek Hoško *Analýza vlastností vláknocementových kompozitních materiálů*. Brno, 2023. 140 s. Disertační práce. Přílohy 30 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Analýza vlastností vláknocementových kompozitních materiálů zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 6. 2023

Ing. Marek Hoško
autor práce

Poděkování

Velmi rád bych touto cestou poděkoval své rodině za podporu nejenom během studia, ale také v životě.

Dále bych rád poděkoval vedoucímu práce paní doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za vedení práce a cenné rady v průběhu celého studia.

Rád bych také poděkoval panu doc. Ing. Karlu Dvořákovi, Ph.D. za odborný náhled na práci a pomoc s vyhodnocením XRD a DTA analýz.

Velmi rád bych chtěl poděkovat také kolegům, za jejich odborné rady, za pomoc s přípravou experimentů a za velmi cenné diskuze nad tématem využívání kalového odpadu při výrobě vláknocementu. Děkuji Ing. Zdeňce Cahlíkové, Ing. Bohumilovi Hrdličkovi a Ing. Petrovi Martincovi.

Děkuji také Ing. Tomášovi Rojkovi, Ph.D. a celému kolektivu R&D centra v Berouně za odborné diskuze a pomoc při provádění zkoušek na finálních výrobcích.

Obsah

1	Úvod	10
2	Shrnutí dosavadních poznatků	11
2.1	Současné výrobní technologie vláknocementových výrobků	11
2.2	Autoklávované výrobky	11
2.3	Vstupní suroviny	13
2.3.1	Cement	14
2.3.2	PVA vlákna	16
2.3.3	Celulóza (Buničina)	17
2.3.4	Mikroplniva.....	18
2.3.5	Flokulant (Retenční prostředek).....	20
2.4	Technologie výroby vláknocementu	21
2.4.1	Hatschek proces.....	21
2.4.2	Příprava vláknocementové břečky.....	23
2.4.3	Tvorba filtrační vrstvy.....	23
2.4.4	Formátový válec	24
2.4.5	Formování zelené desky.....	24
2.4.6	Vytvrzování	26
2.5	Vlastnosti vlnité vláknocementové krytiny	26
2.6	Popis systému technologických vod a kalového hospodářství.....	27
2.6.1	Systém technologických vod	28
2.6.2	Úprava technologických vod před vypouštěním do kanalizace	29
2.6.3	Separace kalů ze systému čištění odpadních vod.....	30
3	Využití druhotných surovin pro výrobu vláknocementu	33
3.1	Materiály pro náhradu vláken do vláknocementu.....	33
3.1.1	Kal z recyklace papíru	33
3.1.2	Odpadní rýžové slupky a stonky kukuřice.....	37
3.1.3	Odpadní arašídové slupky	38
3.2	Možnosti využití vláknocementu jako druhotné suroviny	40
3.2.1	Využití odpadního prachu z broušení fasádních desek.....	40
3.2.2	Možnosti recyklace ztvrdlého vláknocementu.....	42
4	Cíl práce	44
5	Metodika práce	45
5.1	ETAPA I. – Ověření variability vlastností kalového odpadu	45

5.2	ETAPA II. – Porovnání složení standardní břechky a kalového odpadu	46
5.3	ETAPA III. – Výroba zkušebních těles	46
5.4	ETAPA IV. – Použití kalového odpadu při standardním procesu výroby vláknocementové střešní krytiny	47
5.5	ETAPA V. – Stanovení fyzikálně-mechanických a trvanlivostních parametrů na finálním výrobku s využitím kalového odpadu	48
6	Přehled prováděných analýz	50
6.1	Stanovení sušiny [75].....	50
6.2	Stanovení litrové hmotnosti [76].....	50
6.3	Stanovení pH [74]	50
6.4	Vizuální posouzení [77]	50
6.5	Ztráta žiháním [78]	51
6.6	Diferenčně termická analýza (DTA).....	51
6.7	Rentgenová difrakční analýza (XRD).....	52
6.8	Stanovení pevnosti cementových malt [79]	52
6.9	Stanovení podsítných podílů [80]	53
6.10	Stanovení retencí [81].....	53
6.11	Objemová hmotnost [83].....	53
6.12	Zatížení na mezi pevnosti [84]	54
6.13	Ohybový moment [85].....	54
6.14	Vodotěsnost [86].....	55
6.15	Mrazuvzdornost [68].....	55
6.16	Zkouška nasáknutí-vysoušení [68]	56
6.17	Zkouška teplo-děšť [88]	56
6.18	Stanovení odolnosti proti nárazu (Impact test) [87].....	57
6.19	Metoda skrytých vad [89].....	58
6.20	Rozměrová stabilita [90]	59
6.21	Deformace vzorku působením vlhkosti (Warping) [91]	61
7	Výsledky	62
7.1	Etapa I. - Ověření variability vlastností kalového odpadu.....	62
7.1.1	Sušina kalového odpadu [75]	62
7.1.2	Litrová hmotnost kalového odpadu [76]	63
7.1.3	pH kalového odpadu [74].....	63
7.1.4	Ztráta žiháním kalového odpadu [78]	63
7.1.5	Vizuální posouzení kalového odpadu [77]	67
7.2	Etapa II. – Porovnání složení standardní břechky a kalového odpadu	69

7.2.1	Rentgenová difrakční analýza (XRD)	69
7.2.2	Diferenční termická analýza (DTA).....	71
7.2.3	Chemický rozbor	75
7.3	Etapa III. - Výroba zkušebních těles	76
7.3.1	Chemický rozbor procesní vody a filtrátu kalů.....	77
7.3.2	Pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku.....	77
7.4	Etapa IV. - Použití kalového odpadu při standardním procesu výroby vláknocementové střešní krytiny	79
7.4.1	Postup odběru kalového odpadu [100]	79
7.4.2	Podsítné podíly [80]	81
7.4.3	Retence [81]	82
7.4.4	Tloušťka zelené desky [82]	83
7.4.5	Zmetkovitost [autor].....	85
7.5	Etapa V. – Stanovení fyzikálně-mechanických a trvanlivostních parametrů na finálním výrobku s využitím kalového odpadu.....	87
7.5.1	Vizuální porovnání [77]	87
7.5.2	Fyzikálně-mechanické parametry	89
7.5.3	Trvanlivostní parametry.....	101
8	Diskuze výsledků	118
9	Závěr.....	122
10	Přínos pro vědní obor.....	124
11	Přínos pro praxi.....	125
12	Seznam použitých zdrojů	127
13	Seznam tabulek	136
14	Seznam obrázků.....	137
15	Seznam příloh.....	140

1 Úvod

Vláknocement je kompozitní stavební materiál, který se využívá pro ochranu vnějšího pláště budov, používá se na obklady fasád a na pokrývání střech. Vstupní suroviny pro výrobu vláknocementu jsou cement, vápenec, mikrosilika, buničina, syntetická vlákna a voda. Synergie těchto surovin dává možnost vzniku trvanlivému nehořlavému stavebnímu materiálu. Vláknocementový materiál spojuje vlastnosti jako je pevnost, stálost, odolnost proti povětrnostním vlivům a snadnou opracovatelnost. Je odolný proti kapalinám, mrazu, hnilobě a korozi. Dnešní vláknocementové výrobky splňují přísná hygienická opatření a jsou tak zdravotně nezávadné na rozdíl od azbestocementu vyráběného s použitím azbestových vláken, u kterých byl prokázán vliv na vznik pleurálního onemocnění při dlouhodobé expozici.

Se stále se zvyšujícími požadavky trhu rostou požadavky na spotřebu primárních surovin, kterých je na planetě omezené množství. Používáním druhotných surovin lze ochránit kvalitnější primární suroviny, které pak mohou být použity na místě, kde jsou nenahraditelné. Produkce druhotných surovin v ČR pro komoditu hmoty ze stavebnictví vzrostla od roku 2013 do roku 2017 o 42,7 % [1]. Využívání recyklátů přináší řadu výhod, mezi které patří zejména předcházení nutnosti skládkování, šetření primárních surovin, snižování energií na získání nových surovin a snižování zátěže na životní prostředí. Rozhodujícím kritériem pro využívání druhotných surovin je dosažení srovnatelných kvalitativních parametrů finálních výrobků při zachování minimálně stejné ekonomické náročnosti celého výrobního procesu. Pojem druhotná surovina je dle [2] definován jako materiál obnovený po předchozím použití nebo získaný z odpadu, který nahrazuje primární materiál. Dle [3] lze recyklát vysvětlovat jako materiálový výstup ze zařízení k využívání a úpravě stavebních a demoličních odpadů kategorie ostatní odpad a odpadů podobných stavebním a demoličním odpadům, spočívající ve změně zrnitosti a jeho roztřídění na velikostní frakce recyklovaného umělého kameniva v zařízeních k tomu určených.

Technologie výroby vláknocementu je velice náročná na kvalitu vstupních surovin a klade vysoké požadavky na jejich konstantní vlastnosti. Při výrobě vláknocementu vzniká odpadní kal, který obsahuje určitý podíl cementu, plniva, buničiny, syntetických vláken a vody. Velkou výzvou je znovu využití tohoto kalu zpět do procesu výroby. Zvládnutí tohoto kroku by umožnilo snížení spotřeby primárních vstupních surovin (zejména cementu) a zároveň by se tímto omezilo množství odpadu, který musí být ve většině případů skládkován. Tato disertační práce řeší otázku možného využívání odpadních kalů zpět do procesu výroby vláknocementu a zabývá se analýzou vlivu přísady kalů na vlastnosti vláknocementových výrobků.

2 Shrnutí dosavadních poznatků

2.1 Současné výrobní technologie vláknocementových výrobků

V současné době existují po celém světě dva výrobní postupy bezazbestových vláknocementových výrobků založené na Hatschkově výrobním postupu. Jedná se o následující technologie:

- **Autoklávované výrobky** vyráběné z cementu, jemně mletého křemičitého písku, celulózových vláken a dalších přísad používané zejména pro fasádní desky, obklady stropů a výplňové desky dělicích příček.
- **Na vzduchu tuhnutí výrobky** vyráběné z cementu, celulózových vláken, výztužných organických vláken a dalších přísad používané zejména pro střešní krytiny, ať už maloformátové nebo velkoformátové střešní díce v podobě vlnité krytiny.



Obr.1: Příklady použití vláknocementu: Vlnitá krytina, skládána krytina a fasádní deska [4]

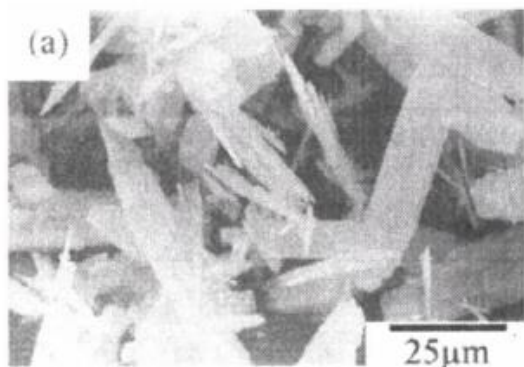
Obě technologie mohou být doplněny o proces lisování výrobků ve stohu nebo v jednokontaktním lisu. Lisování zlepšuje některé vlastnosti finálních výrobků a to zejména objemovou hmotnost, mrazuvzdornost a ohybové pevnosti.

Obě výrobní technologie poskytují řadu výhod a nevýhod a je třeba pečlivě zvolit vhodnou technologii výroby dle typu vyráběného produktu. Je třeba brát v úvahu rozdílné namáhání jednotlivých výrobků na stavbách. Autoklávování přináší výhodu zejména v rychlosti procesu výroby. Autoklávované výrobky je možné expedovat po 48 hodinách od výroby oproti vláknocementu tuhoucím na vzduchu, kdy je třeba dodržet dobu minimálně 28 dní od výroby po jejich expedici a následné využití. Při autoklávování však vznikají jiné hydratační produkty než při klasickém zrání cementu. Tyto produkty a struktura autoklávovaného vláknocementu jsou náchylnější k chemicky korozním látkám jako je např. CO_2 . Z tohoto pohledu se jeví jako výhodnější na vzduchu tuhnutí vláknocementové výrobky. [5]

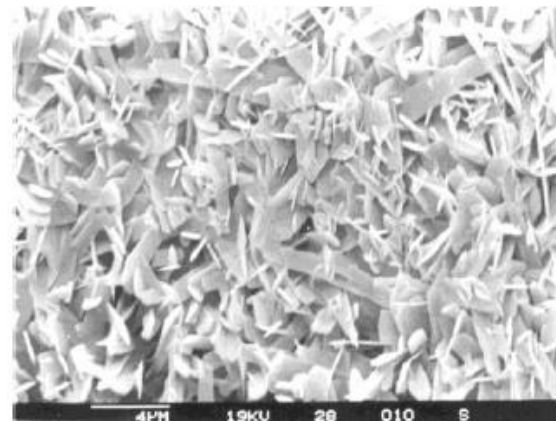
2.2 Autoklávované výrobky

Při autoklávování jsou vláknocementové výrobky vystaveny teplotám okolo $170\text{ }^\circ\text{C}$, zvýšeném tlaku na hodnotu mezi 9-10 atmosféry (0,9-1,0 MPa) s celkovou dobou procesu cca 24 hodin. Celková doba autoklávování je rozdělena na 3 základní fáze, kdy je během 4 hodin zajišťován pozvolný nárůst teploty a tlaku na požadovanou hodnotu. Výdrž při maximální požadované teplotě a tlaku má dobu trvání 16 hodin a k poklesu zvýšených

teplot a tlaku dochází během dalších 4 hodin. Pro celý proces je nezbytné používat jemně mletý křemičitý písek, kdy se využívá jeho chemická reaktivita s cementem. Bylo prokázáno, že je důležité nalézt správný poměr mezi cementem a křemičitým pískem pro správný vývoj mechanických vlastností finálních výrobků. Optimální poměr mezi **cementem a křemičitým pískem** pro dosažení maximálních pevností je **65:35**, což odpovídá CaO:SiO₂ poměru 5:6 pro cement obsahující **65 % CaO a 20 % SiO₂**. Pokud probíhá zrání portlandského cementu za nedostatku reaktivního SiO₂, dochází ke změně hydratačních produktů reakce ze standardních CSH fází na α -C₂S, který krystalizuje v destičkovitém tvaru a výsledný produkt dosahuje menších pevností. To je způsobeno tvarem destičkovitých krystalů, které nejsou v tak těsném kontaktu jako krystaly CSH fází. Při dodržení optimálních podmínek autoklávování a vhodného poměru CaO:SiO₂ dochází k tvorbě minerálu Tobermoritu. Při porovnání struktury α -C₂S a Tobermoritu (C₅S₆H₅) jsou patrné významné rozdíly v morfologii. α -C₂S má výrazně hrubší strukturu než Tobermorit a zatím co porozita obou struktur je přibližně srovnatelná, tak lze pozorovat významný rozdíl v kontaktech mezi individuálními krystaly. Struktura Tobermoritu je pevnější, protože obsahuje větší počet vazeb mezi individuálními krystaly, které dělají celou strukturu kompaktnější. Pro dosažení požadovaných vlastností finálních výrobků je tedy nezbytné dodržet nejen podmínky autoklávování, ale také správný poměr CaO:SiO₂. Rozdíl ve struktuře α -C₂S a Tobermoritu je uveden níže na obr.2 a 3.[6]



Obr. 2: α -C₂S hydrát [6]



Obr. 3: Tobermorit [6]

V následující tabulce je uvedeno porovnání chemického složení autoklávovaného a na vzduchu tuhajícího vláknocementu.

Tab. 1: Průměrné chemické složení vláknocementových materiálů [7]

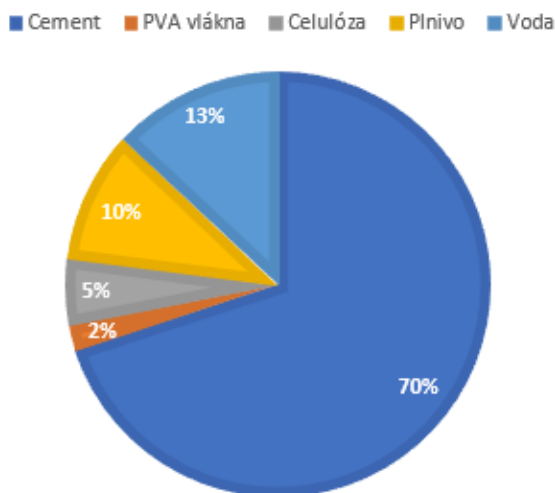
Zastoupení [%]	Na vzduchu tuhnutí vláknocement	Autoklávaný vláknocement
CaO	51,24	25,01
SiO ₂	18,85	51,06
Al ₂ O ₃	2,8	4,95
Fe ₂ O ₃	2,52	1,74
K ₂ O	0,37	0,15
Na ₂ O	0,2	0,12
SO ₃	1,87	0,61
MgO	1,38	0,71
TiO ₂	0,25	0,38
P ₂ O ₅	0,44	0,18
Cl	0,03	0,01
LOI (975°C)	19,65	14,83

Pozn.: LOI = Loss on ignition (ztráta žháním)

V následujících kapitolách již bude popisována pouze technologie na vzduchu tuhoucích vláknocementových výrobců, protože experimentální část práce je orientována na využívání kalového odpadu z této technologie výroby.

2.3 Vstupní suroviny

Mezi základní suroviny pro výrobu na vzduchu tuhacího vláknocementu patří cement, plniva, výztužná a procesní vlákna. Jako procesní vlákno, jehož hlavním úkolem je vytvoření pevné záchytné sítě pro práškové materiály, je používána celulóza (buničina). Výztužná vlákna jsou reprezentována zejména polyvinylakoholovými vlákny (PVA). Mezi další nezbytné suroviny patří také voda a flokulant (retenční prostředek). Voda má v procesu výroby vláknocementu funkci hydratační a transportní, protože celá Hatschekova technologie je založena na procesu filtrace. Retenční prostředek je nezbytnou součástí výroby vláknocementu pro zajištění správných retencí a minimálních podsítných podílů.



Obr. 4: Obecné složení na vzduchu tuhacího vláknocementu [8], [9]

2.3.1 Cement

Cement je práškové anorganické pojivo, které po smíchání s vodou tuhne a tvrdne, za současné změny chemicko-mineralogického složení. Cement obsahuje jemně rozemletý slínek s přísady a příměsi. Slínek může být portlandský, nebo hlinitanový. Portlandský slínek je zrnitá látka, která obsahuje kalciumsilikáty, kalciumalumináty a kalciumaluminátferity. Portlandský slínek se vyrábí pálením jemně rozemleté suroviny s vhodným složením při teplotách nad hranicí slinutí, která se pohybuje okolo 1450 °C. Portlandský slínek je chemicky tvořen CaO, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃. V menším množství obsahuje také MgO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, Cr₂O₃ a případně ještě další oxidy. [10]

2.3.1.1 Charakteristika portlandského slínku

Chemické složení portlandského slínku se pohybuje v širokých rozpětích. Obsah hlavních oxidů CaO, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃ bývá 95 až 97 %. Druh a množství dalších oxidů ve slínku závisí na druhu suroviny. V obyčejném portlandském slínku se obsah oxidů pohybuje v těchto intervalech:

• CaO	63 – 66 %	MgO	0,5 – 6,0 %
• SiO ₂	21 – 24 %	SO ₃	0,3 – 1 %
• Al ₂ O ₃	4 – 8 %	Na ₂ O + K ₂ O	0,4 – 1 %
• Fe ₂ O ₃	2 – 4 %	TiO ₂	0,2 – 0,5 %
• P ₂ O ₅	0,1 – 0,3 %		

Cementy vyrobené z portlandského slínku s vyšším obsahem vázaného CaO rychleji tuhnou a tvrdnou, mají vyšší počáteční a dlouhodobou pevnost, vyšší hydratační teplo a menší odolnost proti účinkům agresivní vody. Vyšší obsah SiO₂ ve slínku poukazuje na pomalejší tvrdnutí cementu v počátečním stádiu. Při dlouhodobém ošetřování tento cement dosahuje vysoké pevnosti. Tento cement vykazuje zvýšenou odolnost proti agresivním látkám. Zvýšený obsah Al₂O₃ ve slínku svědčí o rychlejším tvrdnutí cementu v počátečních stádiích ošetřování. Nižší odolnost vykazují tyto cementy proti síranům. Sloučeniny Fe₂O₃ snižují teplotu slinování. Cementy, které jsou bohaté na Fe₂O₃ a mají menší obsah Al₂O₃, se chovají jako vysokokřemičité. Tyto cementy mají vysokou odolnost proti působení síranových vod. Zvýšený obsah MgO ve slínku může způsobovat nerovnoměrné objemové změny cementu. Přítomnost SO₃ v cementu je důležitá pro regulaci tuhnutí cementu. Obsah SO₃ v cementu je limitovaný. Oxidy Na₂O a K₂O se ve slínku nacházejí v množství do 1 %. [11]

2.3.1.2 Mineralogické složení slínku

Výroba cementu je charakterizována vysokými teplotami a přítomností kyslíku. Při tvorbě slínkových minerálů se proto všechny zúčastněné prvky nacházejí v podobě oxidů. To umožňuje považovat oxidy za základní stavební kameny cementového slínku. Přehled slínkových minerálů a jejich vlastností uvádí následující tabulka. [12]

Tab. 2: Hlavní složky v cementářském slinku [13]

Název	Označení	Vzorec	Obsah [%]	Hydratační teplo [kJ/kg]	Hydratace
Trikalciumsilikát	C ₃ S	Ca ₃ SiO ₅	35 – 75	500	rychlá
Dikalciomsilikát	C ₂ S	Ca ₂ SiO ₄	5 – 40	250	střední
Trikalciumaluminát	C ₃ A	Ca ₃ Al ₂ O ₆	3 – 15	910	velmi rychlá
Tetrakalciumaluminátferit	C ₄ AF	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	9 - 14	420	rychlá

C₃S nabývá pevnosti převážně v počáteční době 28 dní. Jeho vyšší obsah je proto žádoucí pro rychlé dosažení pevností. Alitový cement je proto všeobecně používaným typem cementu. Rovněž rychlovazné cementy mají obsah C₃S co nejvyšší. C₂S, který z větší části vytvrzuje naopak až po 28 dnech, se ve zvýšené míře uplatňuje v belitovém cementu s nízkým hydratačním teplem, jenž se používá při betonáži masivních konstrukcí. Specifickou vlastností C₃A je jeho citlivost na dodatečné působení síranů. V síranovzdorných cementech se musí obsah C₃A ve slinku snižovat. Hydratace C₃A probíhá tak rychle, že by ztěžovala zpracování čerstvého betonu. Právě kvůli C₃A se do cementu přimílá sádrovec, který rychlost hydratace C₃A zpomaluje. C₄AF se vyznačuje pomalejším růstem pevností a nižším vývinem hydratačního tepla. Malé množství CaO je ve slinku přítomno v nevázané formě jako volné vápno. S ohledem na teplotu výpalu slinku se jedná o mrtvě pálené vápno, které reaguje s vodou jen neochotně. K jeho dohašování proto dochází až po dlouhé době a objemový nárůst uvnitř vytvrzeného cementu, vyvolaný tvorbou Ca(OH)₂, vede k tvorbě trhlin. Přípustné množství volného vápna je proto omezeno na 4 %. Ze stejného důvodu je nežádoucí větší obsah hořčíku, který ve slinku vystupuje převážně jako volný MgO. MgO rovněž hydratuje neochotně a jeho hydratace může vyvolat vznik trhlin. Množství MgO je proto limitováno hodnotou 6 %. [12]

2.3.1.3 Cementy používané pro výrobu vláknocementu

Pro výrobu na vzduchu tuhajícího vláknocementu se používají dva druhy cementů:

- Portlandský cement CEM I 42,5 R
- Portlandský cement s vápencem CEM II/A-LL 42,5 R

Výběr druhu cementu závisí na typu výrobku, na způsobu vytvrzování, na výrobním zařízení a v některých případech na teplotě vody. Důležitou roli má také dostupnost daného druhu cementu a ekonomické hledisko. Vlastnosti, které jsou důležité při výběru cementu:

- Vývoj hydratačního tepla
- Počátek a konec tuhnutí cementu
- Velikost a distribuce částic (Blaine)
- Závěrečné pevnostní charakteristiky [14]

2.3.2 PVA vlákna

Polyvinylalkohol (PVA) se vyrábí polymerací vinylacetátu na polyvinylacetát (PVAc) a následně hydrolyzou PVAc na PVA. Polyvinylalkohol obsahuje hydroxilové skupiny, které mají potenciál tvořit vodíkovou vazbu mezi molekulami, což vede k pozoruhodné změně pevnosti vazby mezi PVA vlákny a matricí. Při použití PVA vláken v cementových kompozitech lze pozorovat několik výhod oproti konkurenčním vláknům z jiných materiálů. PVA vlákna mají vysokou pevnost v tahu, relativně vysoký modul pružnosti, dobrou chemickou kompatibilitu s portlandským cementem, dobrou afinitu s vodou a jsou bez zdravotních rizik. [15]

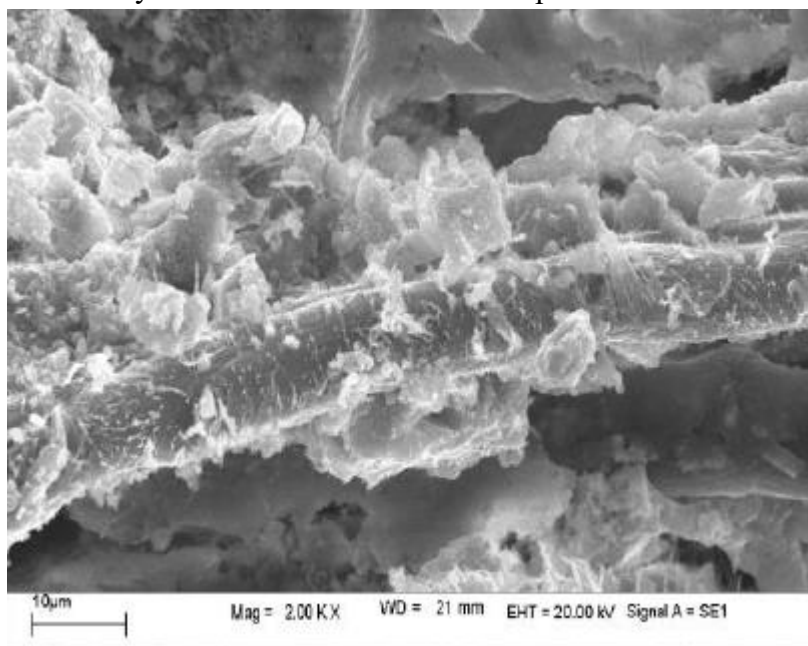


Obr. 5: PVA vlákna před použitím do výroby vláknocementu [autor]

Pro vláknocementové výrobky se používají PVA vlákna o tloušťce 0,014 mm s pevností v tahu 1600 MPa, modulem pružnosti 37 GPa a možným protažením 7 %. Zásadní vliv na výsledné fyzikálně-mechanické parametry vláknocementových výrobků má také délka samotného vlákna. Délka vlákna ovlivňuje směr jeho orientace ve finálním výrobku, čímž zásadně ovlivňuje poměr příčných a podélných pevností, tzv. Aspect ratio. Důležitou vlastností PVA vláken je také jejich správná dispergovatelnost. Vlákna by měla být v ideálním případě stejnoměrně rozptýlena a neměla by vytvářet shluky. Jednou z pozoruhodných vlastností PVA vláken je jejich silná vazba s cementovou matricí. Na obr. 6 můžeme vidět vysokou soudržnost PVA vláken s hydratačními produkty cementu.[16], [17], [18]

Rostoucí obavy o nebezpečí azbestu při vdechování přinesly PVA vlákna do středu pozornosti jako náhradu za azbestová vlákna. Studie ukazují, že PVA vlákna představují menší riziko než vlákna chryzotilu, protože jsou příliš velké na to, aby se dala dýchat. PVA vlákna nezpůsobují žádnou tkáňovou reakci. Chemická struktura PVA vlákna je

založena pouze na uhlíku, vodíku a kyslíku, takže při hoření nevznikají žádné škodlivé látky, jako jsou dioxiny a amoniak. Při hoření vzniká pouze voda a oxid uhličitý.[19]



Obr. 6: Vysoká soudržnost PVA vlákna s cementovou matricí [20]

2.3.3 Celulóza (Buničina)

2.3.3.1 Chemické složení celulózy

Celulóza je přírodní polysacharid složený z β -D-glukopyranosových jednotek lineárně spojených v polohách 1 \rightarrow 4. Řetězce celulózy jsou vzájemně spojeny vodíkovými můstky, které jsou příčinou odolnosti celulózy proti působení vody a běžných rozpouštědel. Název celulóza se často nesprávně používá pro vláknité produkty získané delignifikací dřeva. Tyto produkty vyráběné pro papírenský průmysl se správně nazývají buničina a kromě celulózy obsahují ještě hemicelulózy a zbytky ligninu. [21]

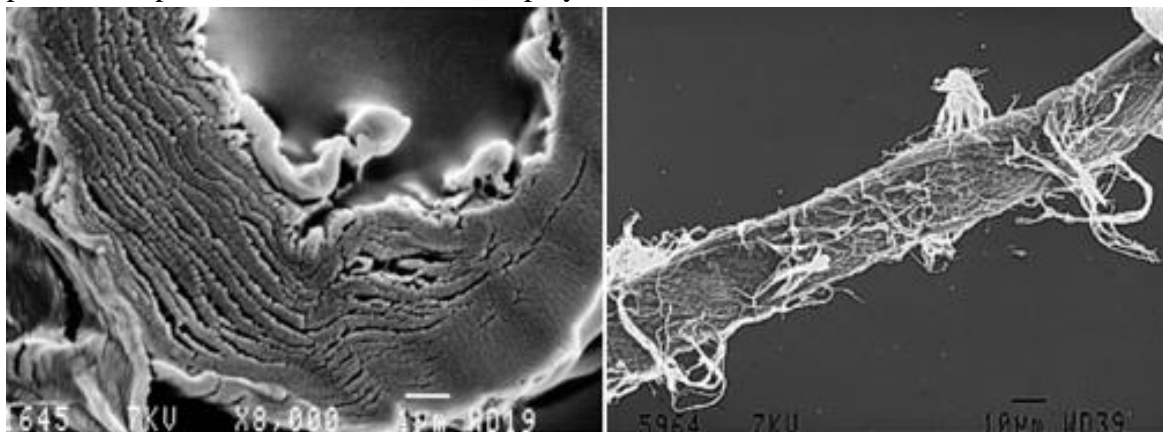
Molekuly glukózy jsou spojené ve tvaru dlouhých řetězců β -glukozidickou vazbou, proto je molekula celulózy vláknitého tvaru. V celulózových vláknech jsou tyto molekuly uloženy rovnoběžně, jsou tedy orientované a toto uložení dává vznik mikrokrystalické struktury. [22]

Celulóza je schopná vázat velké množství vody, která se váže vodíkovými vazbami na volné hydroxylové skupiny celulózy. Postupně dochází k nabobtnání a solvataci (rozpuštění) amorfních oblastí, avšak krystalické oblasti zůstávají nezměněné. Silné vodíkové vazby v krystalitech nedovolují solvataci molekulami vody ani jinými běžnými organickými rozpouštědly, což zabraňuje rozpouštění celulózy. [21]

Celulóza se získává sulfítoým způsobem, nebo sulfátovým způsobem. Získávání celulózy sulfítoým způsobem se provádí pomocí kyselého siričitanu sodného a sulfátový způsob spočívá v použití roztoku hydroxidu sodného. Výchozí surovinou je nejčastěji mladé smrkové dřevo (obsahuje malé množství ligninu). [22]

2.3.3.2 Použití buničiny pro výrobu vláknocementu

Hlavní funkcí buničiny při výrobě vláknocementu je vytvoření pevné záchytné sítě, na které dochází k zachytávání ostatních práškových materiálů. Důležitou roli pro správnou tvorbu vláknocementové monovrstvy má délka vlákna. Obecně platí, že čím je délka vlákna kratší, tím dochází k lepšímu rozptýlu v materiálu. Dalším důležitým parametrem popisující vlákna buničiny je tzv. °SR – Schopper-Riegler. Tento parametr určuje odvodňovací schopnost vláken. Odvodňovací schopnost vláken buničiny je určována především specifickým povrchem a specifickým objemem vláken a jejich plasticitou. Čím je °SR vyšší, tím je výsledné odvodnění horší, ale zároveň dochází k lepší retenci a vazebné pevnosti. Při výrobě vláknocementových výrobků je nejdůležitější dobré rozložení celulósových vláken ve vodě. Běžně se tato rozdělení provádí v rozvlákňovači během řízeného času rozvlákňování. Vlastnosti vláken buničiny se modelují v diskových mlýnech. Zde se zvyšuje specifický povrch vláken a zlepšují se technologické parametry procesní vlákniny. Při úpravě vlastností vláken buničiny se vlákna zvětší, stávají se flexibilnější a zvyšuje se plocha vnějšího povrchu vlákna. Vnější struktura vlákna se porouchá a povrch vláken se stává „chlupatý“. [23], [24], [25]



Obr. 7: Vlevo – Delaminace, bobtnání a penetrace vody, Vpravo – Tvorba vlákna s „chlupatým“ povrchem [26]

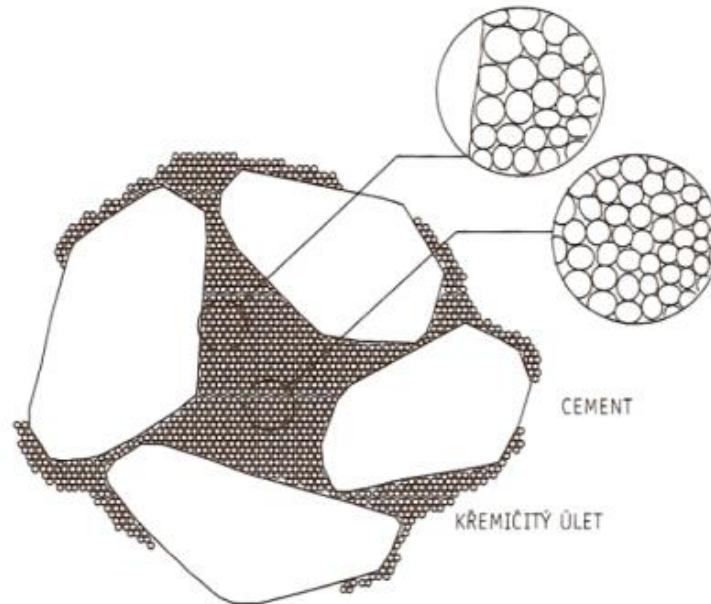
2.3.4 Mikroplniva

2.3.4.1 Mikrosilika

Mikrosilika neboli křemičité odprašky vznikají jako vedlejší produkt při výrobě křemíku, ferrosilicia a dalších slitin křemíku. Jedná se o velmi jemný šedý prášek složený především z amorfního oxidu křemičitého. Obsah SiO_2 se zpravidla pohybuje v rozmezí 80 až 98 %. Při výrobě ferrosilicia jsou přítomny často i jiné prvky, především železo. Částice jsou sférické, vyznačují se průměrem okolo 0,15 μm , přičemž často tvoří shluky.[27]

Z chemického hlediska jsou křemičité úlety tvořeny zejména silikou – SiO_2 , proto se křemičité úlety někdy označují jako mikrosilika. Obsah SiO_2 v křemičitých úletech kolísá v závislosti na typu produkované slitiny. Čím vyšší je obsah Si ve slitině, tím vyšší je obsah SiO_2 v křemičitém úletu. Úlet vznikající během výroby čistého křemíku běžně obsahuje více než 90 % SiO_2 . Úlet vznikající během výroby 75 % Fe-Si slitiny má obsah SiO_2 větší než 85 %. Ze strukturního pohledu jsou křemičité úlety tvořeny zejména sklovitou silikou. Z fyzikálního pohledu se jeví částice křemičitých úletů jako dokonale

kulovité s průměrem pohybujícím se v rozmezí 0,1 μm do 1 – 2 μm , takže průměrná částice úletu je cca 100krát menší než průměrné zrno cementu. Objemová hmotnost křemičitých úletů bývá kolem 2200 kg/m^3 . Specifický povrch křemičitých úletů nemůže být kvůli jemnosti měřen stejným způsobem jako u portlandského cementu, ale bývá určen prostřednictvím adsorpce dusíku. Typické hodnoty se pohybují v rozmezí 15000 – 25000 m^2/kg . Pokud se stejná metoda použije pro portlandský cement, pohybuje se měrný povrch kolem 1500 m^2/kg . [28]



Obr. 8: Zaplnění prostoru mezi zrny cementu křemičitým úletem [28]

Pro výrobu vláknocementu je mikrosilika dávkována do tampely formou 50% suspenze, která je připravena postupným přidáváním přesně daného množství mikrosiliky do vody. V polední fázi přípravy mikrosilikové suspenze dochází k redukci pH celé suspenze přidávkem kyseliny sírové. Hodnota pH výsledné suspenze má zásadní vliv na viskozitu. V průběhu času dochází k výraznému nárůstu viskozity, a pokud by nedošlo k redukci pH přidávkem kyseliny, tak může dojít k úplnému přechodu skupenství z tekutého na pevný. [29], [30], [31]

2.3.4.2 Vápenec

Jedná se o minerální plnivo na bázi uhličitanu vápenatého, které se vyrábí mletím drceného vápence. Na kvalitu mikromletého vápence má vliv jemnost mletí a granulometrie. Nejvýhodnější je frakce < 0,125 mm a obecně je požadováno, aby více než 70 % propadlo sítem o velikosti oka 0,063 mm. Čára zrnitosti, tvar a nasákavost minerálního plniva může ovlivnit potřebu záměsové vody. [32]

Po přidávku mikromletého vápence dochází k urychlení hydratace C_3S a C_3A a v tomto důsledku dochází k nárůstu počátečních pevností cementového tmelu. Mezi další výhody vápence patří zvýšení konzistence betonu za použití stejného množství záměsové vody. Tento efekt roste se zvyšující se jemností mletí vápence. [33]

Vliv mikromletého vápence na tvrdnutí cementu má dvojitý efekt. V prvním případě to je urychlující efekt, při kterém zrna vápence tvoří zárodky, které zvyšují pravděpodobnost,

že se částice rozpuštěné v C-S-H srazí a poté rychleji spojí. Tento efekt je patrný pouze v počátečních stádiích tvrdnutí a po 28 dnech je téměř zanedbatelný. Jako druhý efekt je označován pojící efekt. Pokud cement obsahuje velké množství hlinité fáze, pak vznikají hlinitokřemičitany, které mají pojící schopnost. [34]

2.3.4.3 Ostatní používaná mikroplniva

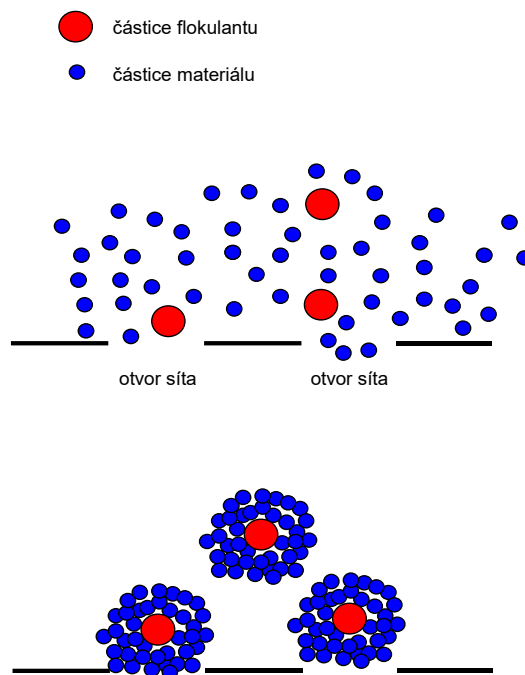
Kromě hlavních příměsí jsou při výrobě vláknocementových výrobků používány také další příměsi, které mohou zlepšovat vlastnosti finálních výrobků. Mezi nejrozšířenější z nich patří zejména wollastonit, perlit, vermikulit, popílek a slída. Účinky jednotlivých příměsí jsou popsány níže v tabulce č.3. Dávkování jednotlivých příměsí se liší v závislosti na typu finálního výrobku a použité výrobní technologii. Ve většině případů jsou příměsi dávkovány v rozsahu 5 - 10 %. [35]

Tab. 3: Vybrané příměsi a jejich vliv na finální vláknocementové výrobky [35]

Příměs	Vliv na finální vláknocementový výrobek
Slída	Eliminace smršťovacích prasklin
Popílek	Zvyšuje konečnou pevnost a trvanlivost
Popílek z rýžových slupek	Zvyšuje pevnost
Wollastonit	Eliminace smršťovacích prasklin a prasklin vznikajících při vysokých teplotách
Perlit	Snížení objemové hmotnosti
Vermikulit	Snížení objemové hmotnosti

2.3.5 Flokulant (Retenční prostředek)

Flokulant slouží k udržení drobných částic v materiálu. Působením flokulantu dochází ke tvorbě větších shluků drobných částic (tzv. flokulí) na základě elektrostatických sil a vodíkových můstků. Větší částice neprojdou otvory síta. Dávkování flokulantu probíhá ve formě silně zředěných roztoků. Výběr flokulantu se provádí na základě proměření ionogenity systému a především na základě provozní zkoušky. Každá technologie výroby vyžaduje jiný typ a dávkování flokulantu, nelze tedy obecně určit, který typ flokulantu je vhodný pro konkrétní typ výrobku. Důležité charakteristiky pro výběr vhodného typu flokulantu jsou ionogenita a molekulová hmotnost. Ve většině případů se jedná o syntetický flokulant na bázi polyakrylamidu se střední molekulovou hmotností, který je připravován z prášku v automatickém rozpouštěcím zařízení. Zde je připraven koncentrovaný roztok flokulantu, který je následně ředěn na požadovanou koncentraci ve statickém mísiči. Finální koncentrace pro použití na výrobním stroji se pohybuje na hodnotách 0,05 – 0,10 %. Na obr. 9 je uveden mechanismus působení flokulantu. [36], [37]



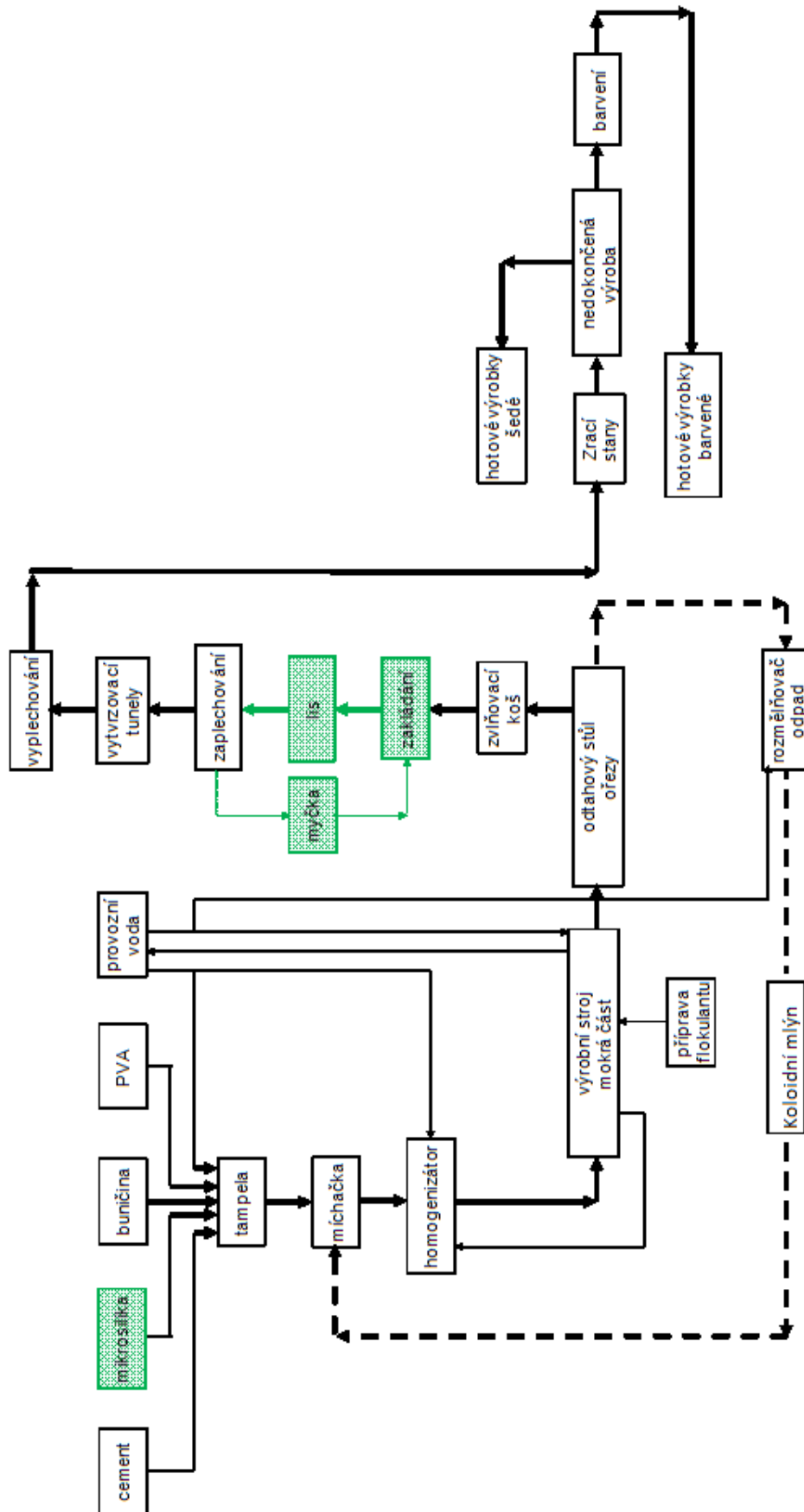
Obr. 9: Mechanismus působení flokulantu [38]

2.4 Technologie výroby vláknocementu

2.4.1 Hatschek proces

Pro výrobu vláknocementu se používá modifikovaná Hatschekova technologie. Technologie výroby vláknocementu byla vyvinuta na základě zkušeností a podobností s papírenskou výrobou. Hatschekův síťový stroj byl poprvé vyvinut v roce 1890 a ve své základní podobě se používá dodnes. [39] V Čechách a na Moravě byly azbestocementové výrobky vyráběny již od roku 1910. Sám L. Hatschek nazval tyto výrobky „eternitem“, což v překladu znamená „věčně trvající“. Krytina z azbestocementu slavila poměrně rychle velký úspěch, protože byla lehká a bylo ji možné použít i v náročných klimatických podmínkách, kde nebylo možné použít krytinu pálenou. Do devadesátých let byl na výrobu této krytiny používán azbest. Vlákna azbestu byla označena jako zdraví škodlivá, a proto byla nahrazena vlákny buničiny a syntetickými vlákny. Od roku 1996 je nahrazena azbestocementová technologie technologií vláknocementovou, která je označována na výrobcích symbolem NT. [40] Současné Hatschek výrobní stroje jsou však mnohem více produktivní, než tomu bylo na jejich začátku. Využívá se zde proces filtrace založený na odvodnění zředěné suspenze přes válcové síto. Tímto způsobem dochází na síti k oddělování primární vrstvy sestávající se z vláken, cementu a plniv, která je následně převedena na nekonečný filtrační koberec.[39]

Na obr. 10 je uvedeno technologické schéma výroby vláknocementové vlnité krytiny.



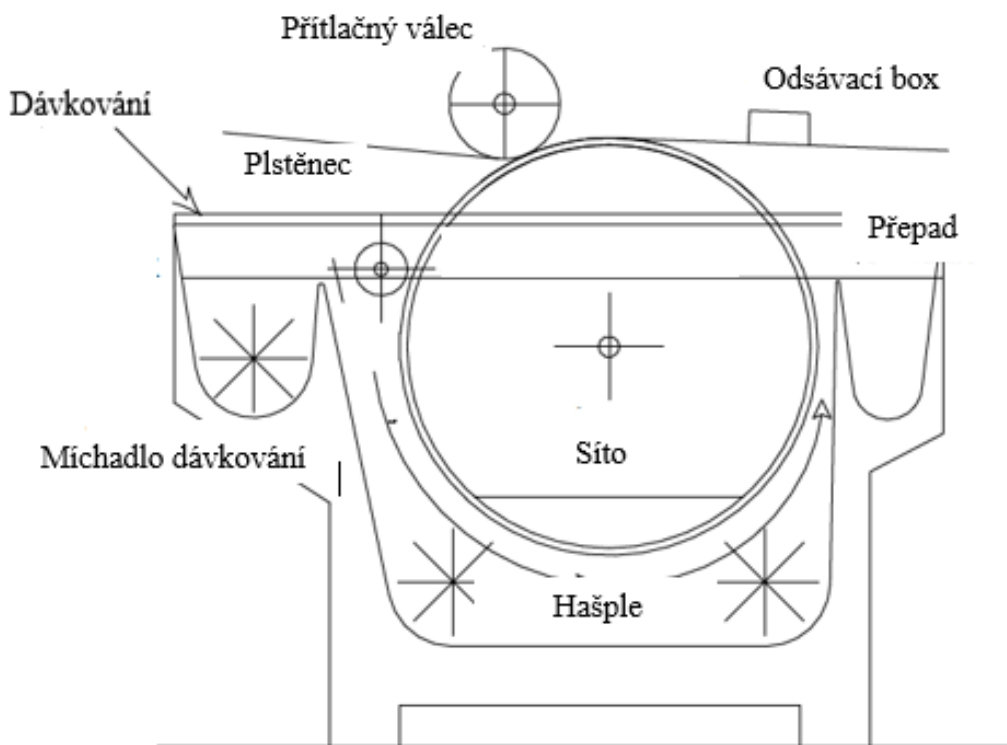
Obr. 10: Schéma technologie výroby vláknocementové vlnité krytiny [autor]

2.4.2 Příprava vláknocementové břečky

Vláknitá složka tvořená PVA vlákny a buničinou se mísí s cementem, plnivem, vodou a dalšími přísadami v tampele. Obsah suchých látek břečky v této provozní nádobě se pohybuje mezi hodnotami 100 – 180 g/l. Z tampely je směs přečerpána do míchačky, kde je společně rozmíchávána se zbytky zelených desek, které vznikají při stříhání finálních tvarů výrobků. Obsah suchých látek v míchačce je srovnatelný s předchozí provozní nádobou, tj. 100 -180 g/l.[41] Takto připravená břečka dále pokračuje do homogenizátoru, kde dochází k jejímu ředění na obsah suchých látek okolo 80 – 120 g/l. Všechny provozní nádoby jsou uvedeny na obr. 12. Hotová suspenze se dopravuje do van Hatschekova stroje (obr.11). Připravená suspenze musí zůstat homogenní až do okamžiku vytváření filtrační vrstvy na povrchu válcového síta. Při náhlé změně obsahu suchých látek může dojít ke změně tloušťek jednotlivých vrstev materiálu a tím i ke změně celkové tloušťky finálního výrobku. Proto je nutné udržovat obsahy suchých látek při vytváření monovrstvy na konstantní úrovni a stejně tak dodržovat konstantní a správnou hladinu suspenze ve vanách Hatschekova výrobního stroje. Ve vanách se otáčejí sítové válce, které vynášejí vrstvu vláknocementu na průběžný plstěnc. Do van výrobního stroje je rovněž dávkován zředěný roztok flokulantu v přesných dávkách, který zajišťuje vytváření větších shluků jemných částic práškových materiálů. Výrobní stroj Hatschek má normálně 3 nebo 4 výrobní vany a příspěvek z každé výrobní vany je cca 0,3 mm.[42], [43], [44], [45]

2.4.3 Tvorba filtrační vrstvy

Velikost otvorů na síti dosahuje hodnot okolo 0,4 mm a nevláknité složky používané při výrobě mají daleko menší velikost částic než otvory síta, a tak by mohlo dojít k jejich průchodu. Zachycení nevláknitých materiálů proto závisí na tvorbě filtrační vrstvy vláken na povrchu síta. Filtrační vrstva vláken se vytváří na povrchu síta v blízké vzdálenosti od ponoření síta do břečky. V další fázi pokračuje tvorba filmu dále na sítu, ale nyní již obsahuje nižší podíl vláken a vyšší podíl nevláknitých materiálů. Následně dochází k odvodnění filmu a jeho odstranění ze síta vynesáním na průběžný plstěnc. Hlavní odvodnění je prováděno pomocí vakuových podtlakových komor, které jsou umístěny na horní straně pásu mezi poslední výrobní vanou a formátovým válcem. Čištění pásu je prováděno pomocí velkého množství vody a vakuových komor.[46], [47], [48]



Obr.11: Schéma Hatschekova výrobního stroje – vana se síťovým válcem [autor]

2.4.4 Formátový válec

Jednotlivé vrstvy vláknocementu se přenáší na průběžný plstěnc, který poté přenáší tyto vrstvy na formátový válec. Po navinutí požadované tloušťky se materiál rozřízne a rozvine na odtahový stůl. Návin požadované tloušťky materiálu na formátovém válci se pohybuje podle vyráběného sortimentu v rozmezí 5 až 7 mm.[49], [50]

2.4.5 Formování zelené desky

Zelená deska o požadované tloušťce je následně upravována na požadované tvary. Vláknocementový materiál se řeže na požadované rozměry ocelovými kotouči, nebo se vystřihují tvary včetně rohů a děr na stříhacím lisu. Všechny odřezky, které představují cca 10 % celkové výroby, putují zpět do rozmělnovače (obr.12), kde jsou následně rozmělněny, naředěny a přes koloidní mlýn (obr.12) dopraveny zpět do míchačky. Při výrobě vlnité krytiny je nařezaná deska přenesena na zvlňovací hlavu, kde se formuje na vlnitou krytinu. V případě nelisované vlnité krytiny je takto vytvarovaná zelená deska překládána do ocelových matic, které jsou následně zavezeny do proteplovacích stanů. V případě lisované vlnité krytiny je před přeložením do ocelových matic zařazena lisovací jednotka, kde je materiál lisován v jednokontaktním lisu. Při výrobě maloformátové střešní krytiny jsou jednotlivé výrobky lisovány ve stohu. Způsob lisování má zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti finálních výrobků.[47], [51]



Obr.12: Pohled na Hatschekův výrobní stroj: 1-Tampela, 2-Míchačka, 3-Rozmělňovač, 4-Koloidní mlýn, 5-Formátový válec, 6-Mokrý část [autor]

2.4.6 Vytvrzování

Jednotlivé desky se nachází na ocelových maticích, které jsou umístěny na kolejových vozech. Vůz je převeden do proteplovacího tunelu, v němž probíhá za řízených podmínek hydratace po dobu 8 až 10 hodin při teplotě mezi 50 – 60 °C. Ocelové matrice se zahřívají, aby se částečně zabránilo proudění tepla z desek během vytvrzování a dosažení požadované manipulační pevnosti. Po vytvrzení se jednotlivé desky oddělují od ocelových matic a jsou překládány na dřevěné expediční palety. Před opětovným použitím je každá ocelová matrice kartáčována a na její povrch je proveden nástřik přesné dávky minerálního oleje v olejovacím zařízení. Je důležité použít přesně stanovené množství oleje, protože nadbytečné množství oleje by mohlo způsobit zpomalení hydratace cementu a následné potíže při barvení finálních výrobků sníženou přilnavostí barvy k povrchu šedé desky. Po 8 – 10 hodinách se jednotlivé výrobky překládají na dřevěné palety a jsou transportovány do zracích stanů, kde za řízených podmínek získávají své konečné pevnostní charakteristiky.[47], [52]

2.5 Vlastnosti vlnité vláknocementové krytiny

Vláknocement je ideálním stavebním materiálem pro ochranu vnějšího pláště budov, používá se pro pokrývání střech a na obklady fasád novostaveb i při rekonstrukcích. Vláknocement je pevný, odolný proti kapalinám, mrazu, biologickým vlivům a vůči působení povětrnostních vlivů. Výrobky z vláknocementu lze snadno opracovávat, jsou ekologicky bezpečné a zdravotně nezávadné.

Vlnitá vláknocementová krytina se používá pro zastřešení zemědělských, průmyslových, bytových a občanských objektů. Minimální sklon je 10⁰. Vlnitá krytina je vhodná i na opláštění obvodových konstrukcí s dodatečným zateplením. Základní parametry vlnité vláknocementové krytiny jsou uvedeny v tabulce č.4. [53]

Tab. 4: Technické parametry vláknocementové vlnité krytiny [53]

Parametr	Hodnota parametru
Skladovací vlhkost	6 – 13 %
Nepropustnost vody	rub bez kapek
Zásaditost	pH 10 - 12
Třída reakce na oheň	A1 (nelisované desky – barvené i nebarvené) A2-s1,d0 (lisované desky – barvené i nebarvené)
Mrazuvzdornost	min (100 cyklů)
Zatížení větrem	cca 5 kN/m ²
Složení materiálu	Vlákna, cement, silikátové přísady, výztužná páska

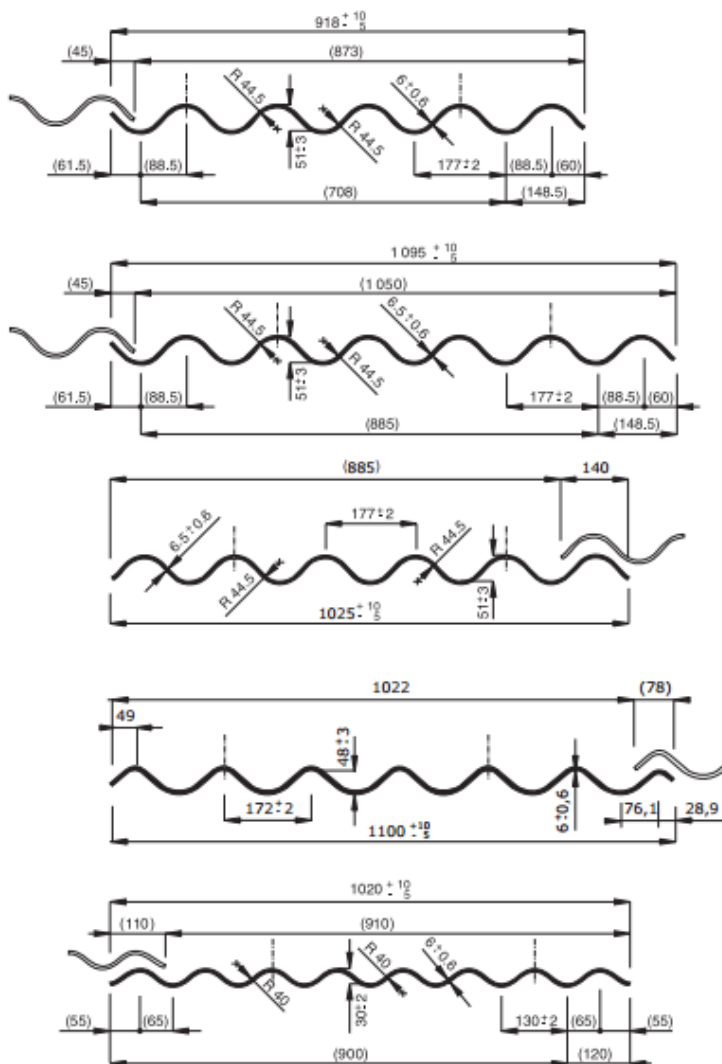
Vlnitá střešní krytina - A 5			
Základní rozměry	mm	1 250 × 918	2 500 × 918
Hmotnost vlnité desky	kg	13,95	27,90
Objemová hmotnost	g/cm ³	1,35	
Zařazení dle pevnosti		C2 - 3,5 kN/m	
C2X - ČSN EN 494		X - 55 Nm/m	

Vlnitá střešní krytina - A 6,5 RC *			
Základní rozměry	mm	1 250 × 1 095	2 500 × 1 095
Hmotnost vlnité desky	kg	18,07	36,14
Objemová hmotnost	g/cm ³	1,40	
Zařazení dle pevnosti		C1 - 4,25 kN/m	
C1X - ČSN EN 494		X - 55 Nm/m	

Vlnitá střešní krytina - A 6, A 6 Express			
Základní rozměry	mm	1 220 × 1 025	
Hmotnost vlnité desky	kg	16,55	
Objemová hmotnost	g/cm ³	1,40	
Zařazení dle pevnosti		C1 - 4,25 kN/m	
C1X - ČSN EN 494		X - 55 Nm/m	

Vlnitá střešní krytina - B7 CO-HO, B7 FS			
Základní rozměry	mm	610 × 1 100	
Hmotnost vlnité desky	kg	9,00	
Objemová hmotnost	g/cm ³	1,55	
Zařazení dle pevnosti		C - 30 Nm/m	
C - ČSN EN 494		(krátké desky)	

Vlnitá střešní krytina - B 8			
Základní rozměry	mm	1 250 × 1 020	2 500 × 1 020
Hmotnost vlnité desky	kg	14,94	29,87
Objemová hmotnost	g/cm ³	1,40	
Zařazení dle pevnosti		B2 - 2 kN/m	
B2Y - ČSN EN 494		Y - 40 Nm/m	



Obr.13: Technické parametry vláknocementové vlnité krytiny [53]

2.6 Popis systému technologických vod a kalového hospodářství

Pro výrobu vláknocementu je voda využívána nejen pro hydrataci cementu, ale zejména také v celém technologickém procesu výroby. Hatschekova technologie výroby vláknocementu je založena na procesu filtrace a voda má tedy funkci transportního média pro ostatní složky vláknocementu. Celková spotřeba vody je závislá na typu finálního výrobku a používané technologie. Pro výrobu vláknocementové vlnité krytiny celková spotřeba vody dosahuje hodnot mezi 0,80 – 1,30 m³/t finálního výrobku. Celková spotřeba vody nutné pro výrobu tedy dosahuje několik desítek tisíc m³/rok.

2.6.1 Systém technologických vod

Hlavním úkolem systému technologických vod je zásobovat jednotlivá technologická místa mokré části výroby vodou příslušné kvality. Shromáždit a vyčistit zpětnou technologickou vodu z výrobních linek, ohřát ji na požadovanou teplotu a vrátit ji zpět do jednotlivých spotřebních míst. Dále pak zpracovávat přebytečnou odpadní vodu a vypouštět ji do kanalizace.

Voda z výrobního stroje (sítové vany, odsávání, ostříky) je shromažďována v jímce podsítových vod a odtud je čerpána jednak na ředění provozní směsi v homogenizátoru a dále pak do hlavního filtru. Do podsítových vod je kontinuálně dávkován koagulant obsahující železité soli Fe^{3+} , které napomáhají při procesu sedimentace pevných částic ve filtrech.

Voda z hlavního filtru se používá na přípravu směsi v tampele a na ředění směsi v homogenizátoru. Hlavní a záložní filtr (obr.14) jsou spolu spojeny. Z hlavního filtru přetéká technologická voda přepadem do záložního filtru. Hlavní filtr je možno doplnit čistou technologickou a čistou studniční vodou.

Voda ze záložního filtru se používá jako ředící voda do rozmělnovače (obr.12) a dále pak jako ostřiková a prací voda na výrobní linku. Záložní filtr se průběžně doplňuje přes hlavní filtr. Pokud hladina vody v záložním filtru poklesne pod stanovenou minimální hladinu, je automaticky dopuštěna z filtru čisté technologické vody. Záložní filtr je možno doplnit čistou technologickou a čistou studniční vodou.

Filtr čisté technologické vody slouží jako pohotovostní zásoba k doplňování filtrů obou linek a jako zdroj vody pro přípravu buničiny. Pokud hladina vody ve filtru poklesne pod stanovenou minimální hladinu, doplní se filtr odsazenou technologickou vodou získanou při zpracování kalů. Filtr čisté technologické vody je možné doplnit čistou studniční vodou.

V systému je dále zařazen filtr vody pro praní lisovacích palet (obr.14). Voda z tohoto filtru se používá výhradně na praní lisovacích palet. Přepad tohoto filtru je sveden do filtru čisté studniční vody. V některých provozních uzlech se používá čistá studniční voda, která se čerpá z filtru čisté studniční vody. Voda z tohoto filtru se používá na přípravu a ředění flokulantu, přípravu mikrosilikové břečky, doplňování vody pro praní lisovacích matic, tlakové praní plstěnců a jako ucpávková voda. Čistou studniční vodou lze v krajním případě doplnit všechny ostatní filtry.

Všechny filtry, kromě filtru vody z lisovacích palet, je možné vytápět technologickou parou. Všechny filtry je možné odkalit do přírodního koryta usazovacích jímek (hlavní a záložní filtry obou výrobních linek musí být odkaleny přes „weekend“ tanky) (obr.14).

Pozn.: Weekend tanky – míchané zásobníky určené pro shromažďování kalů před jejich přepuštěním na ČOV

V usazovacích jímkách a na odvodňovacím stroji se voda zbavuje pevných částic a buď se vrací zpátky do výroby tím, že se čerpá do filtru čisté technologické vody, nebo se upravuje ve filtrech pro úpravu technologické vody a vypouští se přes koncovou ČOV do kanalizace. Technologické schéma zpracování kalů a uspořádání jednotlivých filtrů je uvedeno na obr. 14.

Během provozu se udržuje konstantní hladina vody v jímce podsítových vod pomocí regulace otáček čerpadla technologické vody do hlavního filtru. Technologická voda

spotřebovaná do výrobku se nahrazuje dopouštěním záložního filtru z filtru čisté technologické vody.

V průběhu výroby se provádí ve stanovených časových intervalech odkalování hlavního a záložního filtru odpouštěním usazeného kalu ze špice filtru do „weekend“ tanků.

Voda z filtru pro praní lisovacích palet je kontinuálně čerpána přes filtrační zařízení tlakovým čerpadlem do mobilních trysek myčky a z myčky (obr.10) se čerpá zpět do filtru. Filtr se pravidelně doplňuje čistou studniční vodou a odkaluje se ve stanovených časových intervalech do přírodního koryta usazovacích jímek. Přepad je sveden do filtru čisté studniční vody.[54], [55]

2.6.2 Úprava technologických vod před vypouštěním do kanalizace

Technologická voda z výrobních linek určená k vypouštění do kanalizace se střídavě shromažďuje ve třech usazovacích filtrech, ve kterých se před vypouštěním přes ČOV upravují její finální parametry, aby byly splněny limity pro vypouštění vody do kanalizace. Do filtru s technologickou vodou je nadávkován roztok síranu železnatého, jehož hlavní funkcí je redukce Cr^{6+} na Cr^{3+} .

Chrómová je nevyhnutelnou součástí surovin používaných ve výrobě portlandských cementů. V dnešní době je stále potřebnější ve slinku snižovat podíl množství chrómu, který je dráždivý a toxický nejen pro kůži. Dlouhodobá expozice sloučenin šestimocného chromu zvyšuje riziko rakoviny plic, nosu a nosních dutin, alergické kontaktní dermatitidy, poškození ledvin a možné poškození DNA a genové mutace. Z důvodu ochrany zdraví lidí a ochrany životního prostředí je účelné nebezpečné chromany eliminovat redukcí. Přidávky redukčních činidel na bázi síranu železnatého jsou v současnosti nejrozšířenější dostupnou technologií.

Po nadávkování roztoku síranu železnatého je do filtru dále nadávkován roztok flokulantu a koncentovaná kyselina sírová z důvodu redukce pH vypouštěných vod. Obsah filtru je promícháván v průběhu provzdušnění filtru stlačeným vzduchem. Po nadávkování všech pomocných činidel je vypnuto provzdušnění a obsah filtru se ponechá 12 hodin v klidu kvůli usazení kalu. Před samotným vypouštěním vody do kanalizačního systému je nutné provést stanovení obsahu Cr^{6+} na odebraném vzorku. V případě vyhovujících parametrů je obsah filtru postupně vypouštěn přes ČOV do neutralizační jímky. Sedimentovaný kal je postupně odpuštěn do sedimentačních jímek. Předčištěné technologické vody se současně s vodami z barvicí linky vypouštějí přes koncovou neutralizační stanici, odlučovač ropných látek a měřicí zařízení do kanalizace. [56], [57], [58]

Následující tabulka uvádí kvalitu a odpovídající bilanci zbytkového znečištění vypouštěných odpadních vod. Jedná se o koncentrační hodnoty vycházející z pravidelných analytických rozborů s bilancemi odvozenými z uvedených koncentrací.

Tab. 5: Požadavky na vypouštěnou vodu [59]

Ukazatel	Limit*		Připustné Max. míry znečištění**	Navržené koncentrační hodnoty ukazatelů	Vypouštěné množství znečištění	Vypouštěné množství znečištění	Vypouštěné množství znečištění
	[mg/l] (prům.)	[mg/l] (max)					
BSK ₅	165,8	558,0	400	290	661,2	57,13	18,85
CHSK _{Cr}	790,9	1167,4	800	790	1801	155,6	51,35
NL	200	400	400	200	456	39,4	13,00
EL	4,0	10,0	50	4,0	9,12	0,788	0,26
N-NH ₄	34,8	41	35	34,8	79,34	6,86	2,26
Cr _{celk.}	0,24	0,24	0,1-1,0***	0,24	0,547	0,047	0,016
Cr ^{VI}	0,017	0,02	0,05	0,017	0,039	0,003	0,001
Cu	0,1	0,1	0,2	0,1	0,228	0,02	0,007
Pb	0,05	0,05	0,1	0,05	0,114	0,01	0,003
Zn	0,3	0,5	1,0	0,3	0,684	0,059	0,02
Ni	0,05	0,05	0,1	0,05	0,114	0,01	0,003
pH	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 8,5	6,0 - 8,5	-	-	-
Teplota	max. 35°C	max. 35°C	max. 40°C	max. 35°C	-	-	-

*Dle rozhodnutí zn.186352006 ŽPR/VPU ze dne 12.1.2007 vydaného MěÚ, OŽP Šumperk

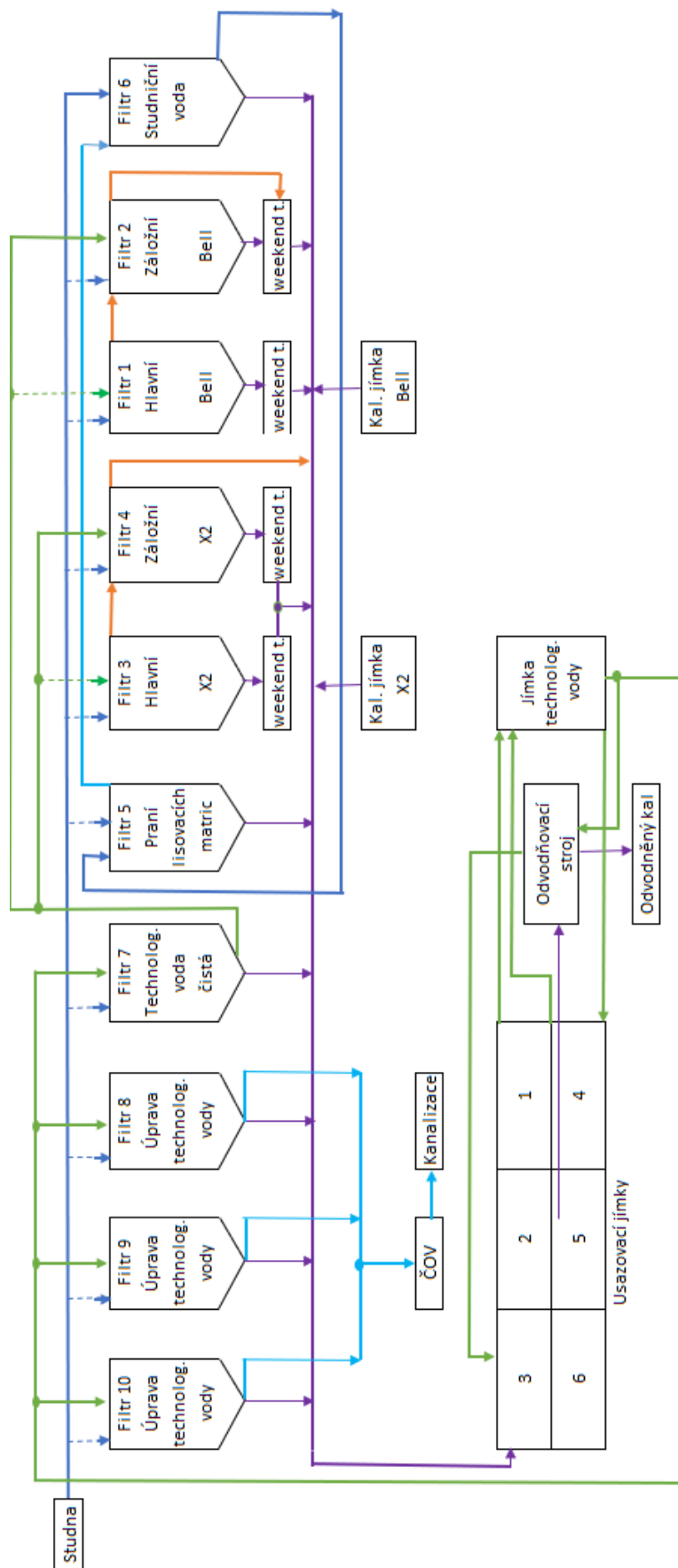
** Dle kanalizačního řádu

***Hodnota další míry znečištění ošetřené smlouvou se správcem kanalizace

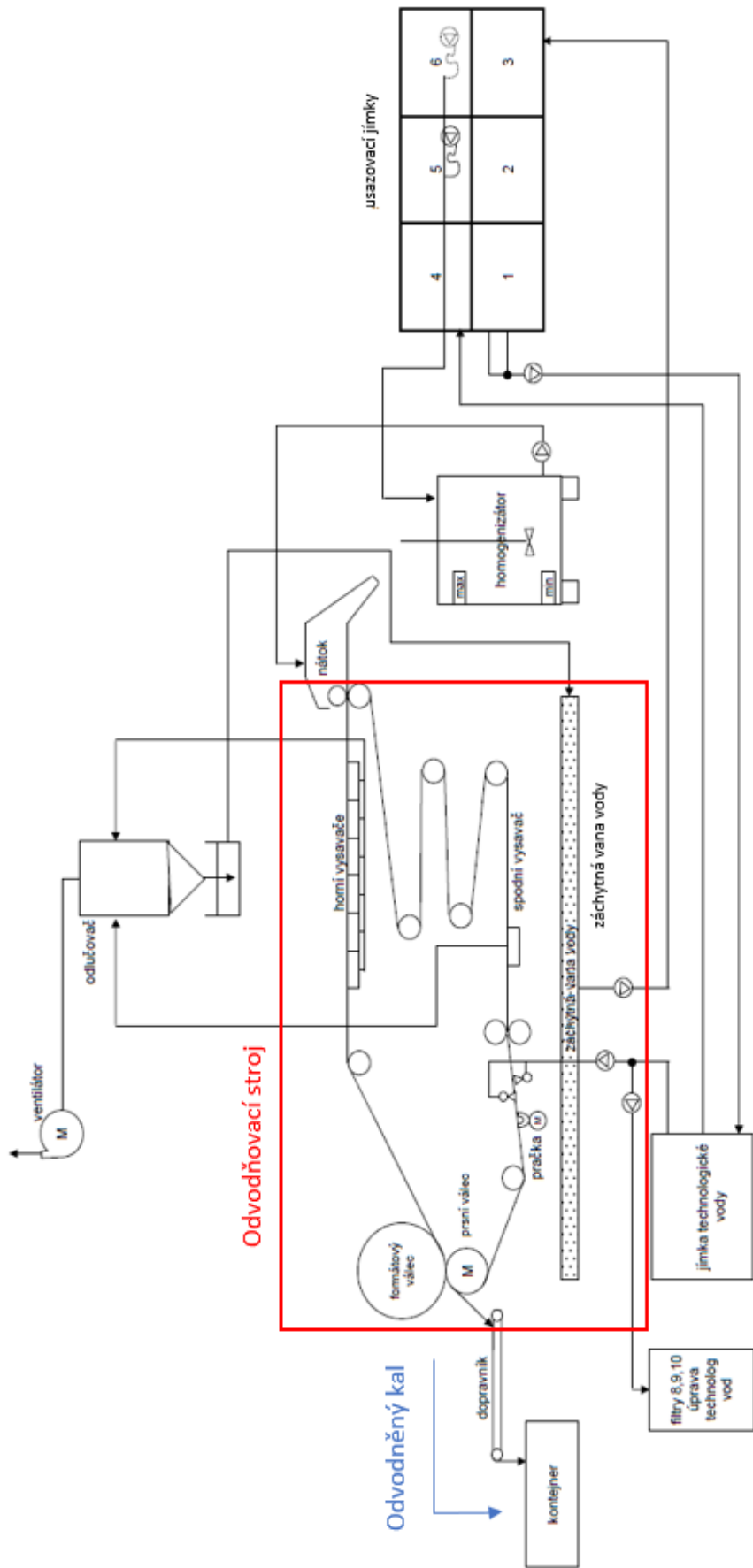
2.6.3 Separace kalů ze systému čištění odpadních vod

Kal ze všech technologických uzlů („weekend“ tanky, kalové jímky výrobních strojů a kal odpouštěný z dolní části filtrů – obr.14) je sveden do sběrného koryta, které ústí do usazovací jímky (obr.14). Přitékající kal se v řadě tří za sebou jdoucích jímek usazuje. Odsazená voda přetéká do jímky přeпадů, a nebo dochází k jejímu přečerpávání do jímky technologické vody. Odsazený kal se dále zpracovává na odvodňovacím stroji.

Odvodňovací stroj pracuje na principu bezsítového odvodňovacího stroje. Z usazovacích jímek je kal čerpán do homogenizátoru a následně pak do nátokové vany odvodňovacího stroje. Z nátokové vany kal natéká na nekonečný plstětec, kde dochází k odstraňování vody z kalu pomocí podtlakových zařízení napojených na odsávací ventilátor. Na konci odvodňovací části kal přechází do lisovací části, která je tvořena formátovým a prsním válcem. Odtud je poté mechanicky snímán na pásový dopravník, který dopravuje odvodněný kal do přistaveného kontejneru. Výstupním parametrem pro zjišťování účinnosti odvodňování kalů je sušina separovaného kalu. Technologické schéma odvodňovacího stroje je uvedeno na obr. 15. [60], [61], [62]



Obr. 14: Technologické schéma zpracování kalů a kalového hospodářství[autor]



Obr.15: Odvodňovací stroj na zpracování kalů a sedimentační jímky[autor]

3 Využití druhotných surovin pro výrobu vláknocementu

3.1 Materiály pro náhradu vláken do vláknocementu

Možné využívání kalového odpadu při výrobě vláknocementových výrobků vykazuje určité odlišnosti závislé na typu vyráběného výrobku a na technologických možnostech jednotlivých výrobních závodů. Z tohoto důvodu lze v obecné rovině posuzovat pouze možnosti využití ztvrdlého vláknocementu zpět do výrobního procesu.

Vláknocementové výrobky byly dlouhodobě vyráběny z azbestových vláken především z důvodu nízké ceny vláken a jejich vynikající kompatibilitou s cementovou matricí. Kombinací těchto dvou materiálů vznikl produkt o vysoké kvalitě s dlouhou trvanlivostí. Od 1. ledna 2005, kdy bylo používání azbestu v Evropské unii zakázáno dle směrnice [63], byla vyzkoušena řada alternativních vláken, jejichž cílem bylo vytvoření vláknocementových výrobků s podobnými vlastnostmi s co nejnižšími náklady. Jako možné alternativy vláken byly v minulosti vyzkoušena polypropylenová, polyakrylátová, polyvinylalkoholová, skleněná, uhlíková a celulózová vlákna. Celulózová a PVA vlákna jsou celosvětově nejvíce používaná vlákna pro výrobu vláknocementu, zejména v oblasti střešních výrobků. Nejobvyklejším zdrojem celulózových vláken pro výrobu vláknocementu jsou nebělená borovicová vlákna. V posledních letech byla testovaná recyklovaná vlákna považována jako jedna z alternativ pro vláknocementový průmysl. Navzdory jejich nízké ceně však bohužel vykazují zhoršené vlastnosti finálních výrobků při porovnání s konvenčními vlákny. V minulosti byly provedeny výzkumy, jejichž cílem bylo ověření původu celulózových vláken na vlastnosti finálních vláknocementových výrobků. Jedná se zejména o vlákna buničiny z měkkého dřeva, tvrdého dřeva, kokosová vlákna, odpadní vlákna z banánů, rýže a bambusu. V rámci studie [64] byl testován kal z recyklace papíru jako možná náhrada celulózových vláken. Ve složení tohoto kalu z recyklace papíru jsou zastoupena nejen vlákna celulózy, ale také uhličitany vápenaté, jíly a jiné organické a anorganické látky. Proto může být tato druhotná surovina považována za zdroj nejen vláken, ale také minerálů. [64]

3.1.1 Kal z recyklace papíru

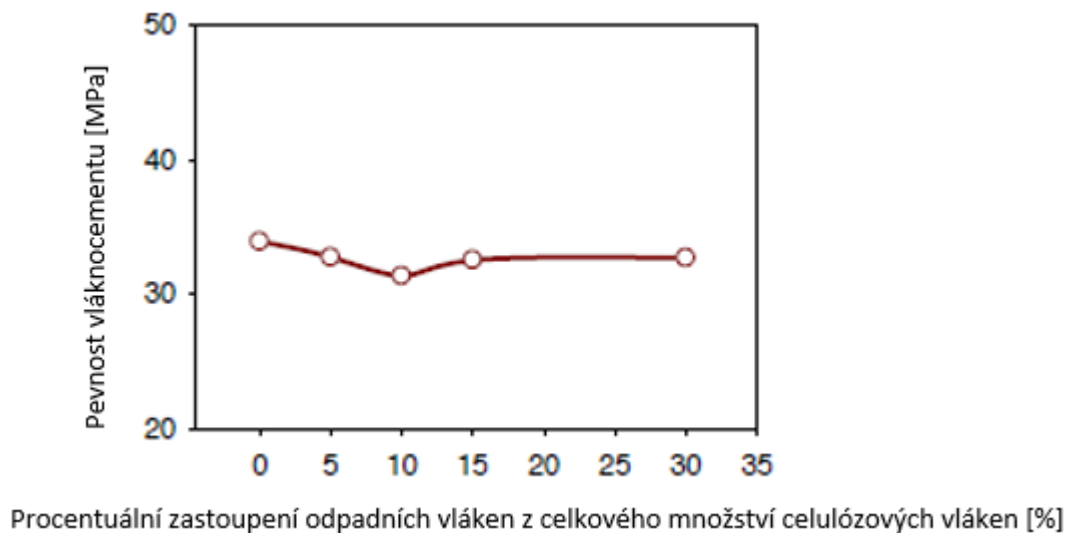
Při použití kalu z recyklace papíru nebyl zjištěn žádný zásadní rozdíl na finální vlhkost vláknocementu v porovnání se standardně používanými celulózovými vlákny. Bobtnavost celulózy, kterou lze vysvětlit jako zvětšování objemu přijímáním vody, pocházející z odpadních kalů je podobná bobtnavosti celulózových vláken. Vliv obsahu celulózy z odpadních vláken na finální pevnosti vláknocementu je zobrazena na obr. 16. Výsledky ukazují, že maximální pevnosti vláknocementu může být dosaženo nahrazením 5 % celulózových vláken z odpadního kalu z recyklace papíru. Vysvětlení zvýšení pevnosti je založeno na vzájemné interakci vláken a cementové matrice. Vlákna a jemné částice pocházející z kalu z recyklace papíru mají vyšší měrný povrch než původní vlákna. Vlákna pocházející z kalu jsou kratší a velká část z nich je tenčí. Proto může být interakce mezi vlákny a jemnými částicemi z kalu větší než s původními celulózovými vlákny. Obsah dřevních extraktů v odpadních kalech je mnohem nižší než ve standardní

buničině. Pevnost v tahu jemných vláken z kalu je však nižší, než pevnost v tahu původních celulóзовých vláken. Na obr.16 lze pozorovat, že při větším obsahu odpadního kalu z celulózy dochází k poklesu pevnosti vláknocementu.



Obr.16: Vliv obsahu celulózy z odpadního kalu na výsledné pevnosti vláknocementu [64]

Nasákavost vzorků vláknocementu ve vodě mírně poklesla při nahrazení 10 % původní celulózy odpadním kalem z recyklace papíru. To by mohlo naznačovat, že omezené množství odpadního kalu z výroby papíru neovlivňuje chování vláknocementu ve vlhkém prostředí.

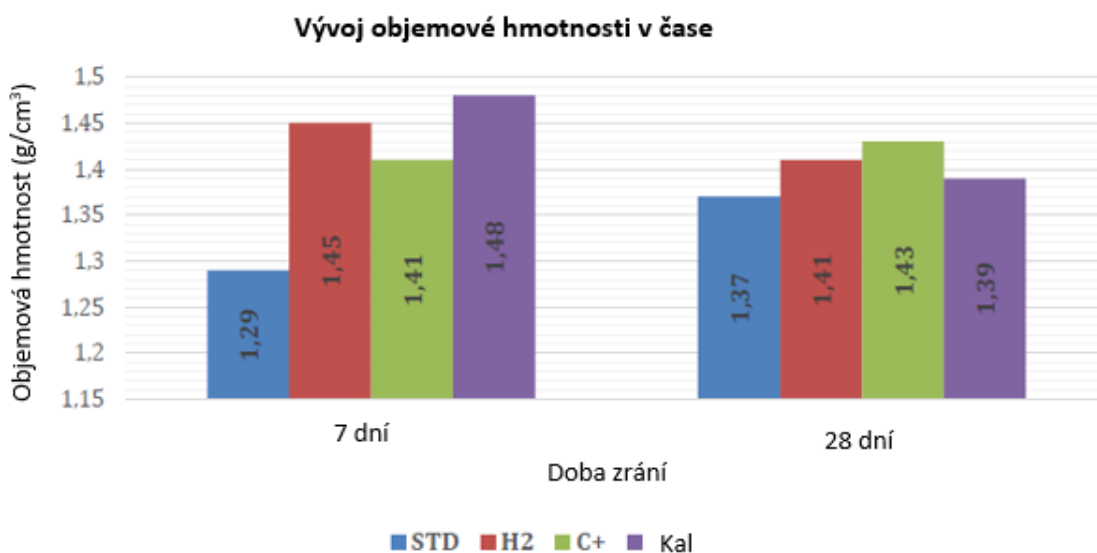


Obr.17: Vliv obsahu celulózy z odpadního kalu na nasákavost vláknocementu[64]

Při testování odpadních vláken z kukuřice a konopí jako zdroj vláken místo borovicové buničiny byla zjištěna nutná optimalizace procesu zpracování těchto vláken. Nedostatečně připravené vlákniny snižují retenci pevných látek a mohlo by dojít ke zvýšení vlhkosti vláknocementu. Navíc, lignin obsažený v kukuřičné dužině může negativně ovlivnit hydrataci cementu.[64]

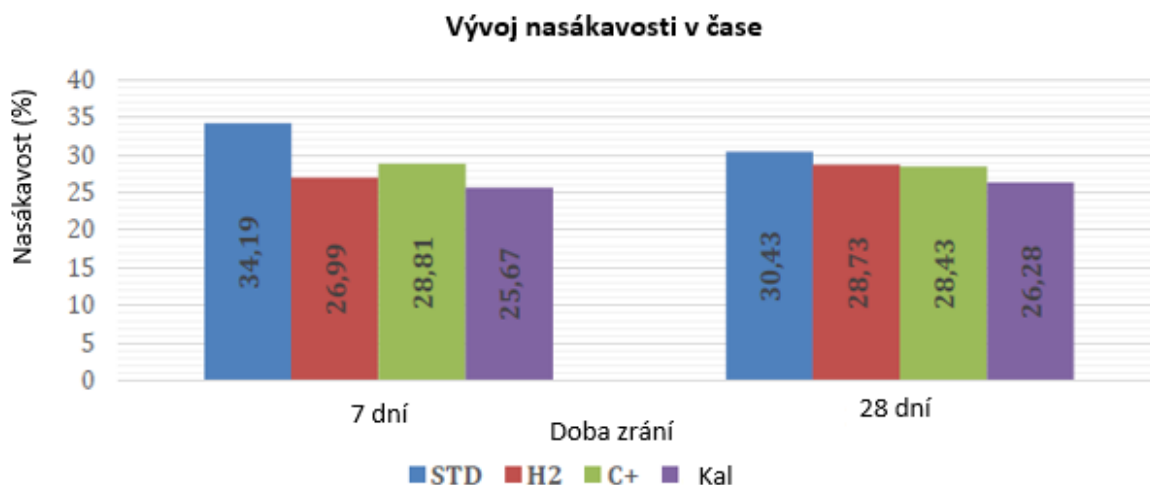
V další studii [65] byl ověřován vliv přídavku celulóзовých vláken získaných z odpadního papíru na vlastnosti vláknocementu. Jako odpadní papír byly použity staré noviny, kancelářské a tiskové papíry, krabice a papírové obaly. Kvalita celulóзовého vlákna pocházejícího z recyklovaného papíru závisí na čistotě sběrového papíru. Částečným využíváním vláken sběrového papíru při výrobě vláknocementu by mohlo dojít ke spotřebě původních celulóзовých vláken. V rámci studie byla zkoumána substituce 3 druhů celulóзовých vláken ze sběrového papíru jakostní třídy H2, C+ a odpadního kalu. S těmito vzorky byly porovnány výsledné vlastnosti vláknocementových kompozitů referenčního vláknocementu vyztuženého celulóзовými vlákny pocházejícími z dřevní buničiny. Jako materiály použité pro výrobu byly použity cement, mikrosilika, PVA vlákna, celulóзова vlákna, odpadní celulóзова vlákna a voda. Vláknocementová břečka byla připravena smícháním výše jmenovaných surovin a následně byla zpracována na Hatschekově stroji za vzniku 6 mm vzorků. Referenční vzorek byl připraven s 3 % vláken celulóзы a u všech testovaných vzorků byla původní celulóза nahrazena v celém rozsahu vlákny celulóзы z odpadního papíru. Vzorky o velikosti 250 x 250 mm byly zabaleny do smršťovací fólie a vytvrzené za atmosférických podmínek. Všechny fyzikálně-mechanické parametry byly stanovovány na vzorcích po 7 a 28 dnech vytvrzování. Důvodem stanovení těchto parametrů po 7 a 28 dnech je zjištění vývoje fyzikálně-mechanických vlastností v čase.

Na obr.18 je zobrazen vývoj objemových hmotností. Vzorky označené H2, C+ a kal vykazují po 7 dnech zrání nárůst objemové hmotnosti o 12 %, 9 % a 15 %. Po 28 dnech došlo ke snížení přírůstku objemové hmotnosti, kdy se vliv přídavků kalu projevil nejméně s nárůstem o 1,5 % ve srovnání s referenčním vzorkem. [65]



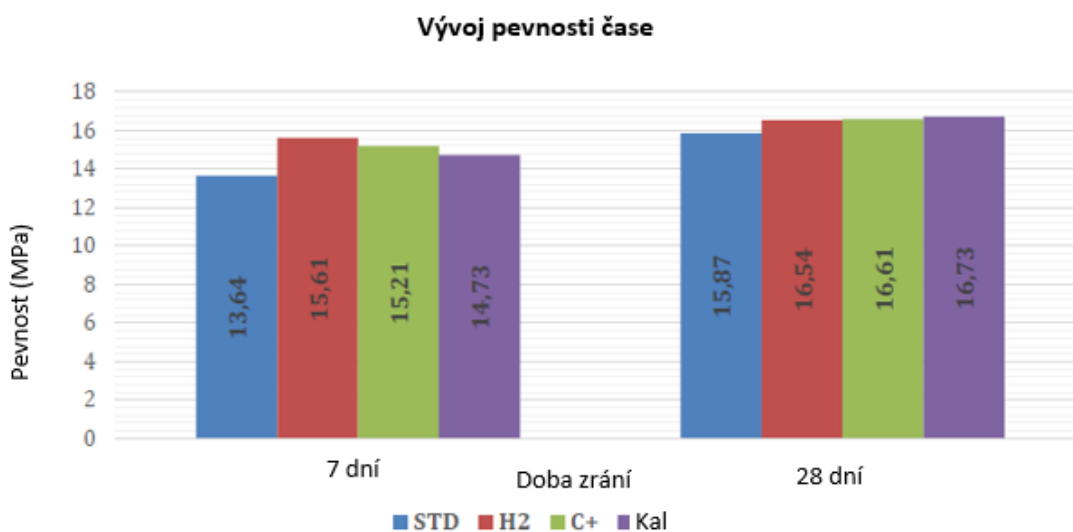
Obr.18: Vývoj objemových hmotností jednotlivých vzorků [65]

Výsledky na obr.19 ukazují snížení nasákavosti vody o 21 %, 16 % a 25 % u vzorků vytvrzených po dobu 7 dnů se vzorky H2, C+ a kalů. Jak proces vytvrzování poračoval, redukce nebyla výrazně vysoká na konci 28denního vytvrzování při porovnání se standardem. Vzorky s náhradou celulóзовých vláken jakostní třídou H2 a kalovým odpadem vykazovaly zvýšení nasákavosti ze 7 dnů na 28 dnů.



Obr.19: Vývoj nasákavosti jednotlivých vzorků [65]

Fyzikálně-mechanické vlastnosti vzorků jsou zobrazeny na obr.20. Výsledky ukazují výrazné zvýšení pevnosti u všech zkušebních variant v porovnání se standardem. Maximální nárůst pevnosti o 14 % byl pozorován u vzorku s náhradou celulóзовých vláken vláknou H2 na konci 7denního vytvrzování oproti standardu. Po 28 dnech zrání již nejsou rozdíly v pevnostech tak výrazné, jak u 7denního zrání. Stále však bylo dosaženo vyšších pevností u všech zkušebních variant.

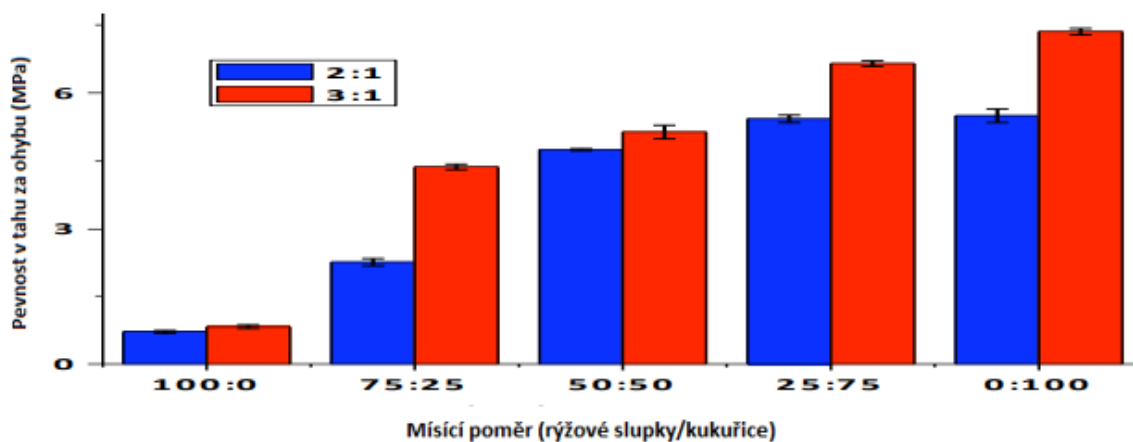


Obr.20: Vývoj pevnosti jednotlivých vzorků [65]

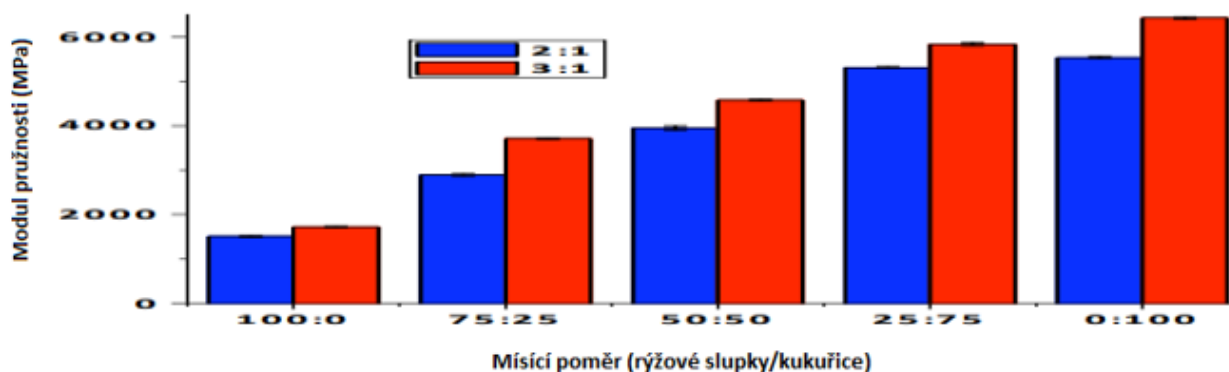
Z výše uvedených výsledků lze usoudit, že recyklovaná odpadní vlákna mají pozitivní vliv na fyzikálně-mechanické vlastnosti na vzduchu tuhajícího vláknocementu. Navzdory pozitivním výsledkům zjištěným v těchto zkouškách je třeba ještě provést zkoušky trvanlivosti, aby se vyhodnotilo chování těchto vláknocementových výrobků v čase. [65]

3.1.2 Odpadní rýžové slupky a stonky kukuřice

S rostoucí produkcí vláknitých zemědělských plodin začal být zvyšován tlak na využívání odpadních surovin z jejich produkce také k výrobě vláknocementových desek. Mezi nejčastěji využívané zemědělské produkty patří zejména zbytkový vláknitý materiál po vylišování šťávy z cukrové třtiny, stonky banánů, stonky kukuřice, stonky bavlny a odpadní kávové slupky. Vlákno-cementový kompozit je materiál vyrobený z dřevěných/zemědělských částic, anorganického pojiva a dalšího materiálu obecně označovaného jako katalyzátor. Finální výrobky je možné tvarovat do různých tvarů tak, aby vyhovovaly specifickým konečným účelům. Vlákno-cement je považován za vhodný materiál pro vnější i vnitřní stavby díky svým vlastnostem mezi které patří zejména odolnost proti napadení hmyzem a houbami, odolnost proti vlhkosti, odolnost proti působení mrazu a ohně a dobrým izolačním vlastnostem. Vlákno-cementová deska je šetrná k životnímu prostředí, protože během své výroby a po dobu své životnosti neuvolňuje škodlivé chemické látky. V rámci studie [66] byly testovány fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitu složeného z cementu, rýžových slupek, stonků kukuřice a vody. Odpadní rýžové slupky a stonky kukuřice byly smíchány v poměru 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100 ve dvou směšovacíh poměrech cementu k agroodpadu 2:1 a 3:1. Vlákno-cementová břečka byla připravena smícháním výše jmenovaných surovin a následně byla zpracována na Hatschekově stroji. V rámci fyzikálně-mechanických vlastností byly vzorky podrobeny zkoušce nasákavosti, bobtnání, pevnosti v tahu ohybem a modulu pružnosti. Průměrné hodnoty nasákavosti se pohybovaly od 12,98 % do 34,4 % a bobtnání dosahovalo hodnot od 1,93 % do 19,53 %. Deska s nejnižší nasákavostí a rychlostí bobtnání tloušťky byla získána z poměru míchání cement/agroodpad v poměru 3:1 a s poměrem mísení rýžových slupek/ kukuřičných stonků v poměru 25:75. Tyto výsledky lze přičíst zvýšenému obsahu cementu ve vzorku, který obalil všechny částice agroodpadu. Na obr.21 a obr.22 je uvedeno výsledné grafické zpracování výsledků vlivu míšícího poměru cementu/agroodpadu a míšícího poměru odpadního materiálu (rýžové slupky/kukuřičné stonky) na pevnost v tahu ohybem a modul pružnosti.[66]



Obr.21: Vliv míšících poměrů na pevnost v tahu ohybem[66]



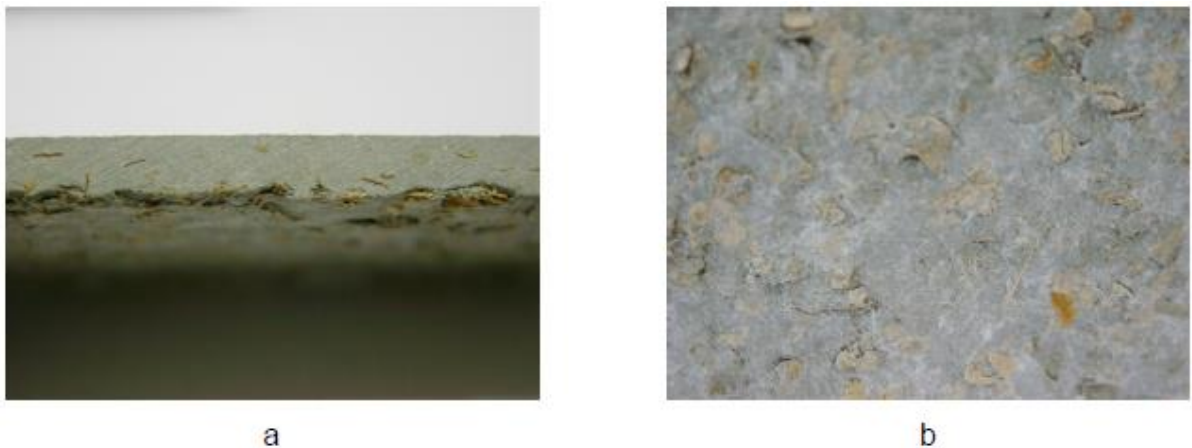
Obr.22: Vliv mísících poměrů na modul pružnosti[66]

Vliv mísícího poměru se stává stále významnější, jak se zvyšuje podíl agroodpadu a cementu v matrici. Deska s nejvyšší pevností v tahu za ohybu byla vyrobena při poměru míchání ryżové slupky/kukuřice 25:75 s nejvyšším obsahem cementu. V tomto poměru došlo k největšímu zhutnění desek v důsledku zvýšeného počtu vazeb, mezičásticových kontaktních ploch a dostatečného obalení částic cementem. Dosažené výsledky prezentují významný vliv mísících poměrů odpadů a cementu na finální fyzikální a pevnostní charakteristiky desek. Agroodpad lze při vhodném poměru s cementem využít pro výrobu vláknocementových kompozitních materiálů.[66]

3.1.3 Odpadní arašídové slupky

Vedlejší produkty agroprůmyslu, jako jsou arašídové slupky, představují významné příležitosti pro výrobu nedřevěných lignocelulózových vláknin a mají obecně malé uplatnění. Většina z nich bývá obvykle použita ve výrobcích s nízkou přidanou hodnotou, jako je krmivo pro dobytek, nebo jako palivo. Slupka arašídů chrání arašídová zrna zejména při skladování. Jedna třetina hmotnosti celkové sklizně odpovídá arašídové slupce. Produkce těchto slupek vede k tvorbě velkého množství odpadního materiálu. V současné době hlavní použití arašídových slupek spočívá ve spalování. V rámci této studie [67] bylo navrženo využití odpadních arašídových slupek pro výrobu vláknocementových obkladových panelů. Arašídové slupky byly podrceny a následně vysušeny při teplotě 32 °C po dobu 5 hodin. Částice arašídových slupek větších než 0,3 mm byly použity pro výrobu vláknocementových desek. Před začátkem výroby těchto kompozitů byly arašídové slupky povrchově ošetřeny. Hlavní důvod chemického ošetření vláken spočívá v očištění povrchu jednotlivých vláken a utěsnění pórů na povrchu vlákna. Slupky arašídů byly chemicky ošetřeny roztokem křemičitanu sodného a síranu hlinitého. Na konci procesu chemické úpravy byly arašídové slupky sušeny v sušárně po dobu 24 hodin, následně byly ochlazeny a skladovány v uzavřeném obalu. Po této úpravě byly slupky arašídů použity k výrobě cementových kompozitů. Vláknocementové desky byly připraveny odvodněním zředěné břečky na Hatschekově stroji a následným lisováním vzorků. Byly připraveny 2 zkušební varianty s povrchově ošetřenými a neošetřenými slupkami. Břečky byly připraveny ve dvou variantách, kdy v první variantě byla použita formulace s eukalyptovou buničinou, portlandským cementem, mletým vápencem a arašídovými slupkami v 4% zastoupení. V případě druhé formulace bez eukalyptové

buničiny byly použity arašídové slupky v 5% zastoupení. U obou variant byla použita destilovaná voda. Z těchto břeček byly po odvodnění na Hatschekově stroji vylisovány vzorky o rozměrech 200 x 200 mm, které byly pro následné fyzikálně-mechanické zkoušky seřezány na rozměry 165 x 40 mm s tloušťkou jednotlivých vzorků 6 mm. Vzorky byly podrobeny zkoušce nasáknutí/vyušení, která je charakterizována normou EN 494 [68] a má za cíl simulovat přirozené stárnutí s vystavením střídavým cyklům smáčení a sušení. Vzorky byly rovněž exponovány povětrnostním podmínkám po dobu 1 roku. Během procesu míchání vláknité slupky plavou na hladině a většina z nich zůstává na horním povrchu desky během procesu formování. Výsledkem jsou vzorky s atraktivním texturovaným povrchem uvedeným na obr.23.[67]



Obr.23: Zkušební vzorky po vytvrdnutí: a – průřez vzorkem, b – povrch vzorku [67]

Trvanlivost vláknocementových kompozitů vyztužených rostlinnými vlákny souvisí se schopností odolávat jak vnějšímu prostředí (kolísání teploty a vlhkosti, tak napadení chemicky korozními látkami), tak vnitřnímu prostředí (kompatibilita mezi vlákny a matricí, objemové změny). Degradace přírodních vláken v cementovém kompozitu může být způsobena vysoce alkalickým prostředím, které rozpouští ligninovou a hemicelulósovou fázi, čímž dochází k oslabení struktury vlákna. [69]

Fyzikálně-mechanické vlastnosti vzorků byly ověřeny po 28 dnech, po 365 dnech přirozeného stárnutí a po urychleném stárnutí (zkouška nasáknutí/vysušení). Výsledné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu vykazují významné rozdíly mezi vzorky připravených z ošetřených a neošetřených arašídových slupek. Výsledky objemové hmotnosti jednotlivých vzorků se pohybují okolo $1,9 \text{ g/cm}^3$. Vyrobené vzorky prezentují dostatečné mechanické vlastnosti pro použití v občanských a zemědělských stavbách. Další alternativou použití těchto vláknocementových desek bez ohledu na to, zda jsou nebo nejsou povrchově ošetřeny hydrofobizačním nátěrem, by měla být prostředí s nižší vlhkostí.[67]

3.2 Možnosti využití vláknocementu jako druhotné suroviny

3.2.1 Využití odpadního prachu z broušení fasádních desek

Cílem této studie bylo ověření možného přídavku odpadního vláknocementového prachu jako částečné náhrady surovin při výrobě vláknocementových vlnitých desek. K tvorbě vláknocementového prachu dochází při povrchové úpravě fasádních desek. Pro vytvoření strukturálního povrchu se jednotlivé desky povrchově brousí. Při tomto procesu vzniká značné množství prachu, který musí být likvidován jako odpadní materiál. Složení odpadního prachu odpovídá složení vláknocementových fasádních desek. Složení prachu zahrnuje hydratační produkty cementu, plniva a také organickou vláknitou složku.



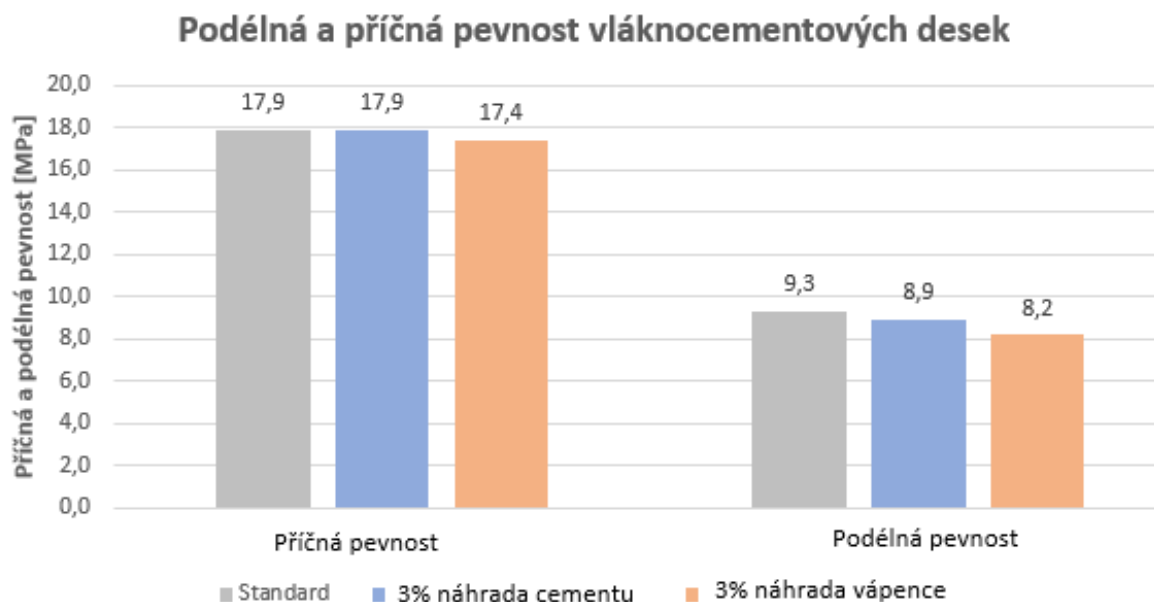
Obr.24: Odpadní vláknocementový prach použitý pro výrobu vláknocementových vlnitých desek [autor]

V rámci studie byly testovány dvě varianty náhrady surovin. V první variantě byla provedena 3% náhrada cementu a ve 2. variantě 3% náhrada vápence. Pro výrobu vlnitých desek byly jako suroviny použity portlandský cement CEM I 42,5 R, mletý vápenec, PVA vlákna a celulózová vlákna. Zkušební výroba vlnitých desek s odpadním prachem probíhala ve výrobní stroji Hatschek se 3 vanami. Jedná se o vzduchem vytvrzovanou technologii, která se běžně používá pro výrobu vláknocementových vlnitých desek. Odpadní prach byl dávkován ručně přímo do tampely. Odpadní prach byl snadno homogenizován s jinými materiály ve standardní době míchání.

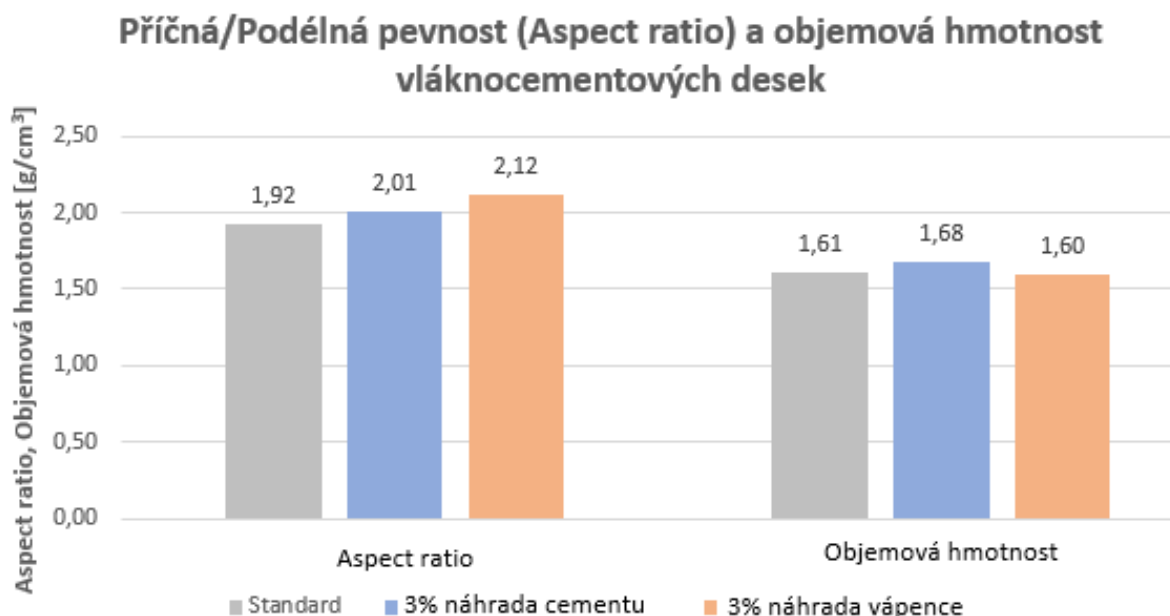
Během testu byly hodnoceny také další důležité parametry mokré výroby. Mezi tyto parametry patří podsítné podíly a retence. U žádné ze zkušebních variant s náhradou vstupních surovin odpadním prachem nebylo zjištěno výrazné zhoršení těchto parametrů. Dosahované hodnoty jsou velmi podobné standardním. Na druhou stranu je třeba zmínit, že pro validní hodnocení mokré části výroby je potřeba delší doba, ideálně několik výrobních směn. Zkušební výroba však trvala jen několik hodin.

Vyrobené vzorky byly po 12 dnech od výroby podrobeny fyzikálně-mechanickým testům. Ověřován byl především vliv příměsí odpadního prachu na pevnostní charakteristiky a objemovou hmotnost desek. Vyrobené desky byly testovány podle EN

494.[68] Na základě dosažených hodnot nebyl prokázán negativní vliv přídavku odpadního prachu na pevnost finálních desek ani v případě 3% výměny cementu, kde se očekával nejvýraznější pokles pevnosti. Dosažené hodnoty pevností a objemových hmotností odpovídají standardním hodnotám dosahovaným při standardní výrobě.



Obr.25: Vliv přídavku odpadního prachu na pevnosti vláknocementových vlnitých desek [70]



Obr.26: Vliv přídavku odpadního prachu na objemovou hmotnost vláknocementových vlnitých desek [70]

V této studii byla testována možnost využití odpadního prachu z povrchové úpravy vláknocementových fasádních desek. Odpadní prach byl snadno homogenizován s ostatními materiály ve standardní době míchání. Při použití odpadního prachu nebylo pozorováno žádné výrazné kolísání tloušťky a žádná delaminace desek ve srovnání se standardní variantou. Výsledné mechanické vlastnosti zkušebních variant jsou srovnatelné se standardní variantou i pro 3% náhradu cementu, kde byl očekáván vyšší pokles pevnosti. [71], [72]

3.2.2 Možnosti recyklace ztvrdlého vláknocementu

Při opakovaném využívání vláknocementu je nutné rozlišovat kompozity, které ve své struktuře obsahují vlákna azbestu. V Evropské unii je veškeré používání azbestu zakázáno od 1.ledna 2005. [63] V praxi však byly na Evropském trhu bezazbestové výrobky zaváděny již od roku 1980. V této době byla vláknocementovým výrobkům připisována životnost 60 let, takže v nadcházejících letech lze očekávat zvýšené množství vláknocementového odpadu. Již od počátku výroby vláknocementu byla zavedena řada interních recyklačních postupů. Většina těchto postupů se týkala přidávání drceného vláknocementu do podkladních vrstev vozovek.[73]

Při zpracování tvrdého vláknocementového odpadu lze po jeho nadrcení a pomletí identifikovat pomocí mikroskopie nezreagovaná zrna portlandského slínku. Nezreagovaný slínek je obalen hydratačními produkty cementu. Lze předpokládat, že po rozbití těchto vazeb v rámci procesu rozduřování již zhydratovaných produktů, dojde k vytvoření nových povrchů obsahující nezreagovaný slínek, který má stále určitý potenciál reaktivity. K tomuto efektu však dochází velmi zřídka a hlavním cílem drcení a mletí je získání vláknocementu s odpovídající granulometrií pro další zpracování. Během drcení vláknocementu je třeba věnovat pozornost zejména dvěma aspektům a to houževnatosti vláknocementu a v případě dlouhých desek i přítomnosti výztužných polypropylenových pásků. Vzhledem k relativně vysokému obsahu organických vláken a absenci kameniva mají vláknocementové výrobky větší tuhost, než klasický demoliční odpad. Pokud obsahuje vláknocementový odpad příliš vlhkosti a má nižší objemovou hmotnost ($< 1100 \text{ kg/m}^3$), tak dokonce ani kladivové drtiče nemusí být schopny tento materiál podrtit. Větší účinnost vykazují zařízení, ve kterých je tento materiál drcen, trhán a řezán zároveň. Přítomnost bezpečnostních polypropylenových pásků u vlnité krytiny může v procesu drcení způsobovat ucpávání jednotlivých částí drtiče, pokud nejsou pásy separovány zvlášť. Vzhledem k nepřítomnosti kameniva dochází při drcení vláknocementu k významné tvorbě prachu. Při následném mletí musí být použito správné mlecí zařízení, jinak může dojít k tvorbě vlněné hmoty, za kterou je zodpovědná přítomnost buničiny. Při mletí vláknocementu v kulovém mlýnu však k takovému jevu nedochází a výsledný materiál je velmi podobný cementu bez ohledu na přítomnost organických vláken.[73]



Obr.27: Podrcený vláknocementový materiál a PP pásy [73]

Podrcený vláknocement je možné použít jak pro podkladní, tak i pro nosné části vozovek. V rámci několika studií bylo doporučeno pro tyto aplikace používat vláknocement s velikostí částic pod 8 mm.

Vzhledem k tomu, že na vzduchu vytvrzený vláknocement se skládá hlavně z hydrátů portlandského slínku, jeho nezhydratovaných částí a plniv, tak se jako jedna z možných variant jeví jeho použití při výrobě portlandského slínku. Studie [73] dokazuje, že použitím vláknocementu při výrobě slínku je možné redukovat celkové množství CO_2 . Stejně tak bylo dokázáno, že použitím vláknocementu nebyla významným způsobem ovlivněna chemická složení a morfologie vznikajících slínkových minerálů. Pro průmyslové použití by však měl být vláknocementový odpad předeřátý, např. v předkalcinátoru, aby se zajistila úplná tepelná degradace organické složky vláknocementu. Přítomnost organické části může vést k ucpání filtračního systému a překročení úrovně organických těkavých emisí. Při použití vláknocementu jako částečné náhrady vápence je pozorován energetický zisk, který pochází z exotermické degradace organických sloučenin přítomných ve vláknocementu. Použitím na vzduchu tuhneícího vláknocementu při výrobě slínku lze snížit celkovou energetickou náročnost celého procesu bez negativního vlivu na fyzikální, chemické nebo mineralogické vlastnosti slínku.[73]

4 Cíl práce

Využívání druhotných surovin ve stavebnictví prochází významným vývojem již řadu let. V současné době je však stále větší pozornost koncových zákazníků kladena na původ surovin, energetickou náročnost výrobního procesu a vyprodukované emise CO₂ na dané množství finálního výrobku. Tzv. udržitelnost výrobního procesu se začíná v řadě zemí EU projevovat jako významný parametr při zvažování koupě jednoho či druhého výrobku. Používáním druhotných surovin ve stavebnictví dochází k významným úsporám primárních surovin nutných pro výrobu, které mohou být následně využity na místech, kde je nelze nahradit. Využíváním druhotných surovin je také předcházeno skládkování a hromadění těchto materiálů na sběrných místech. Při využívání jakékoliv druhotné suroviny však nesmí docházet ke zhoršování finálních vlastností výrobku při zachování minimálně srovnatelných nákladů na výrobu.

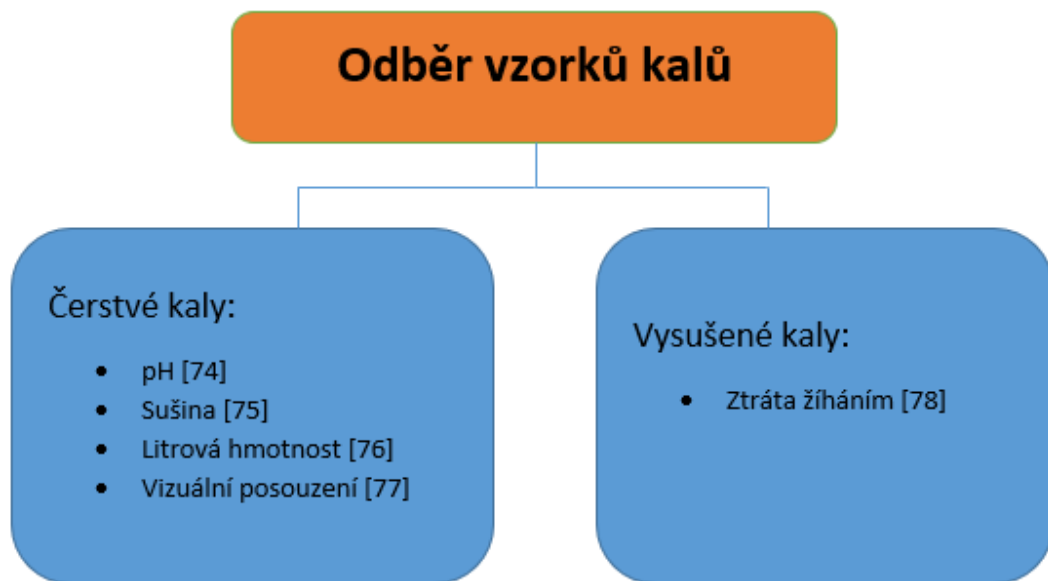
Hlavním cílem disertační práce je analýza vlastností vláknocementových kompozitních materiálů především s ohledem na posouzení možného využití kalového odpadu. Tento kalový odpad vzniká při výrobě vláknocementové střešní krytiny a jeho zařazení zpět do výroby umožňuje částečnou náhradu primárních surovin. Důležitým krokem je zjištění složení a vlastností kalového odpadu. Tyto parametry jsou následně porovnávány se standardní břečkou používanou pro výrobu. Následně je sledován vliv přídatku kalového odpadu na fyzikálně-mechanické vlastnosti vláknocementových výrobků.

5 Metodika práce

5.1 ETAPA I. – Ověření variability vlastností kalového odpadu

Hlavním úkolem první etapy bylo definování místa odběru kalového odpadu a ověření vlastností kalového odpadu. Pro zpracování kalového odpadu je nutné ověřit variabilitu jeho parametrů. Jelikož se jedná o odpadní produkt, lze předpokládat jistou proměnlivost výstupních parametrů kalů. Na základě zjištěných výsledků bylo nutné stanovit hraniční limity parametrů odebraného kalu, který lze využít pro zpětné využití ve výrobě, protože 100 % odpadního kalu nelze dle předpokladu zpracovat.

Na odebraných vzorcích kalů byly provedeny zkoušky pro zjištění jejich parametrů. Ověření proměnlivého množství obsahu suchých látek bylo provedeno na základě zkoušek litrové hmotnosti a sušiny. Zkouškou ztráta žiháním byl ověřen obsah procesních a výztužných vláken v jednotlivě odebraných vzorcích. Každý odběr kalů byl doplněn o měření celkového pH směsi. Důležitou součástí etapy je také vizuální posouzení odebraných kalů, protože jejich přídavek může způsobit celkovou změnu odstínu finálního výrobku. U nebarvených výrobků může tedy docházet k vizuálním změnám postřehnutelným okem.

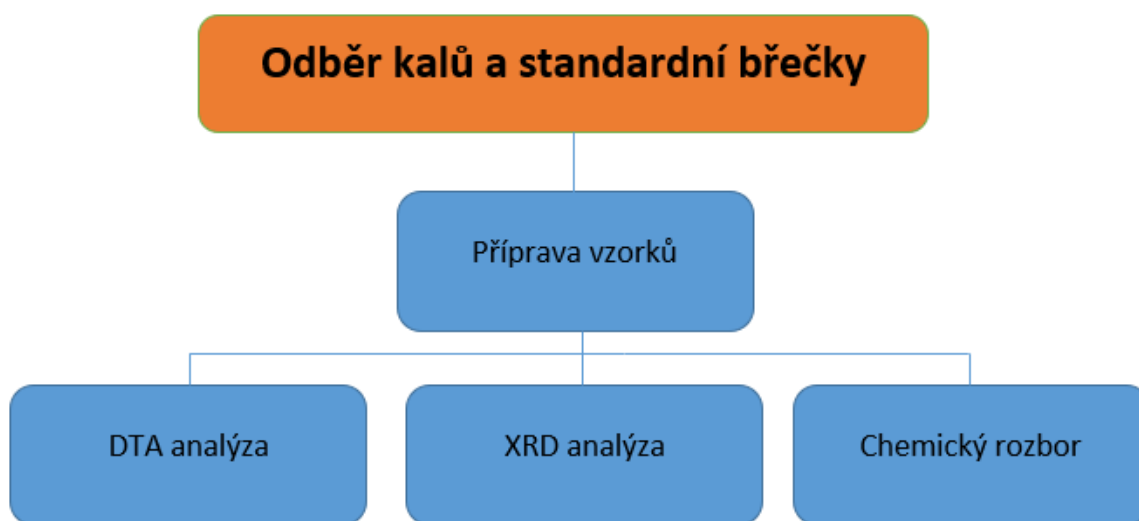


Obr.28: Diagram postupu prací v Etapě I

5.2 ETAPA II. – Porovnání složení standardní břechky a kalového odpadu

Druhá etapa byla věnována přípravě vzorků pro porovnání chemického a materiálového složení standardní břechky používané pro výrobu vláknocementu a složení odebraných kalů. Odebrané vzorky břechky a kalů byly vysušeny v laboratorní peci při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti. Vzorky byly následně mechanicky rozduženy a pomlety na požadovanou jemnost. Na odebraných vzorcích byly provedeny zkoušky chemické analýzy, diferenční termické analýzy (DTA) a rentgenové difrakční analýzy (XRD).

Cílem této etapy bylo ověření možných pojivových vlastností vzniklých kalů, které nemusí být chápány pouze jako inertní příměs.



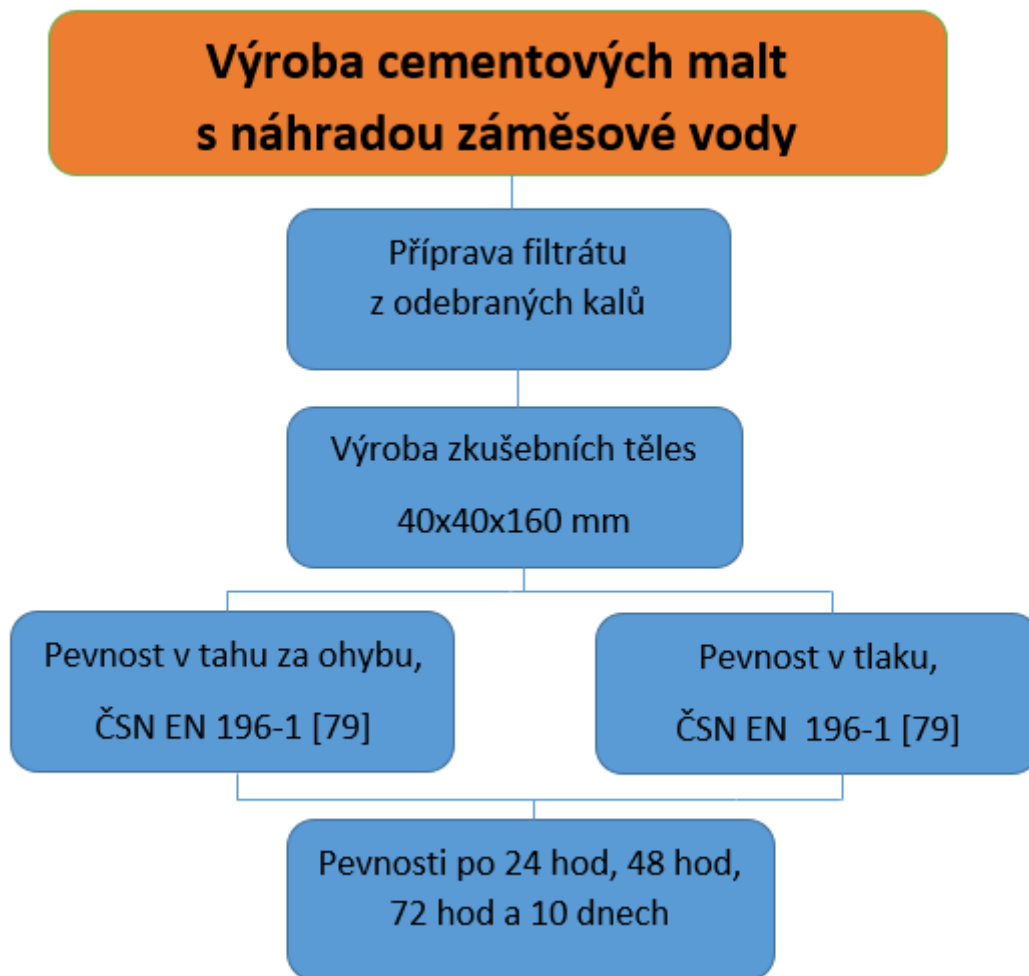
Obr.29: Diagram postupu prací v Etapě II

5.3 ETAPA III. – Výroba zkušebních těles

Cílem třetí etapy bylo ověření vlivu přísad kalů na možné zpomalení hydratačních procesů cementu. Z odebraných kalů byl připraven výluh/filtrát, který byl použit jako náhrada záměsové vody pro výrobu zkušebních těles 40x40x160 mm.

Výroba zkušebních těles proběhla po 24 hodinách od získání filtrátů. Receptura zkušebních záměsí se skládala z portlandského cementu CEM I 42,5 R, normového písku, vody z vodovodního řádu a získaného filtrátu z odebraných kalů. Na trámečcích z cementové malty byla provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku dle ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. [79]

Pevnosti byly stanoveny po 24 hod, 48 hod, 72 hod a 10 dnech.

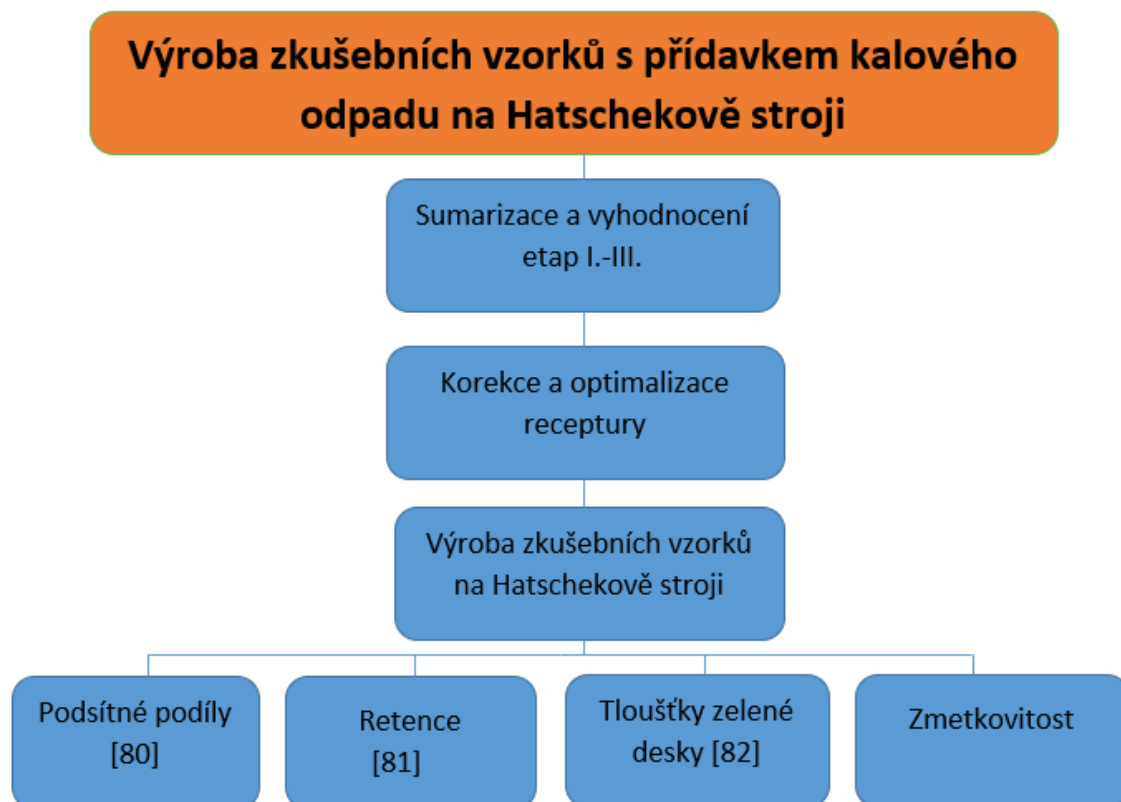


Obr.30: Diagram postupu prací v Etapě III

5.4 ETAPA IV. – Použití kalového odpadu při standardním procesu výroby vláknocementové střešní krytiny

Na základě výsledků analýz a zkoušek provedených v etapách I-III byla navržena receptura pro vláknocementovou břečku s přidavkem kalového odpadu pro standartní produkci na výrobním stroji. Tato modifikovaná břečka byla následně použita pro výrobu běžného výrobku. Výrobky s částečným zastoupením kalového odpadu byly v následující fázi podrobeny souboru zkoušek pro ověření fyzikálně-mechanických vlastností.

Cílem této etapy bylo také porovnání fyzikálních parametrů v průběhu výroby. Ověřován byl vliv zpracování kalů na podsítné podíly a retence. Při tvorbě zelené desky bylo také posuzováno možné kolísání tloušťek desky. Při zpracování kalového odpadu byl očekáván zvýšený výskyt tvrdých kousků ve směsi, čímž mohlo docházet ke zvýšení celkové zmetkovitosti výrobního procesu. Z tohoto důvodu byly odebrané vláknocementové kaly dávkovány do rozmělnovače, aby byla zajištěna eliminace tvrdých kousků průchodem přes koloidní mlýn.

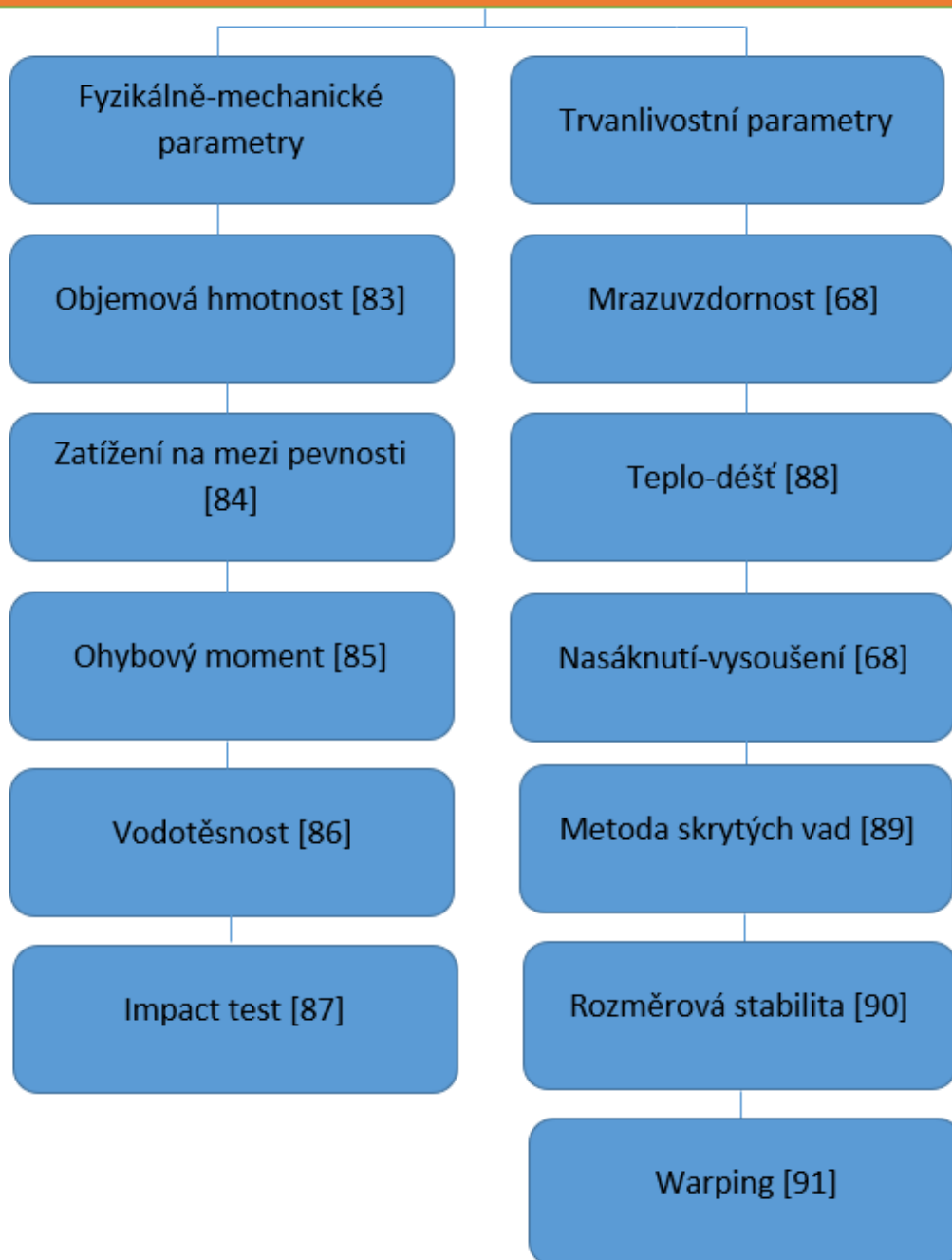


Obr.31: Diagram postupu prací v Etapě IV

5.5 ETAPA V. – Stanovení fyzikálně-mechanických a trvanlivostních parametrů na finálním výrobku s využitím kalového odpadu

V páté etapě byly porovnávány fyzikálně-mechanické vlastnosti výrobků s určitým zastoupením kalů s vlastnostmi standartních výrobků. Na zatvrdlých výrobcích byly sledovány vybrané fyzikálně-mechanické a trvanlivostní parametry. Tělesa určená pro zkoušku byla připravena a zkoušena dle standardního postupu přípravy zkušebních těles uvedeného v ČSN EN 494 [68]. Mezi základní sledované fyzikálně-mechanické charakteristiky patřila objemová hmotnost, zatížení na mezi pevnosti, ohybový moment, vodotěsnost a impact test. Ověření trvanlivosti výrobků bylo provedeno na základě zkoušek mrazuvzdornosti, zkoušky teplo-děšť, zkoušky nasáknutí-vysoušení, metody skrytých vad, rozměrové stability a warpingu. Zkoušky byly prováděny dle ČSN EN 494. [68]

Stanovení fyzikálně-mechanických a trvanlivostních parametrů výrobků s přídavkem kalového odpadu



Obr.32: Diagram postupu prací v Etapě V

6 Přehled prováděných analýz

6.1 Stanovení sušiny [75]

Před stanovením všech fyzikálních parametrů odebraného kalu byl vzorek důkladně zhomogenizován, protože ihned po jeho odběru dochází k separaci jednotlivých materiálů. Ze zhomogenizovaného vzorku bylo naváženo na analytických vahách cca 2 g vzorku, který byl následně vysušen do konstantní hmotnosti v laboratorní peci nastavené na teplotu 105 °C po dobu 5 hodin. Výsledná sušina je vypočítána dle vztahu:

$$x = \frac{b}{a} \times 100$$

Kde:

x – obsah sušiny [%]

a – navážka vzorku [g]

b – hmotnost vysušeného vzorku [g]

6.2 Stanovení litrové hmotnosti [76]

Důkladně zhomogenizovaný vzorek kalů byl přelit do odměrného válce na přesnou hodnotu 100 ml. Finální doplnění/odebrání kalů na přesný objem bylo provedeno pipetou. Naplněný odměrný válec byl následně zvážen na laboratorních vahách s přesností 0,01 g.

6.3 Stanovení pH [74]

Pro stanovení pH kalů byl použit pH metr Knick Portamess 911. Výsledná hodnota pH je zobrazena přímo na displeji přístroje.

6.4 Vizuální posouzení [77]

Pro vizuální posouzení barevnosti jednotlivých vzorků je nutné posouzení provádět při stále stejných podmínkách. Aby byla splněna podmínka konstantního zdroje osvětlení posuzovaných vzorků, byla pro jejich posouzení použita světelná kabina SpectraLight III. Tímto způsobem byl zajištěn konstantní zdroj osvětlení a jediné co se měnilo, byl posuzovaný vzorek.



Obr.33: Světelná kabina SpectraLight III [autor]

6.5 Ztráta žiháním [78]

Před samotným stanovením ztráty žiháním (LOI) byly jednotlivé vzorky kalového odpadu vysušeny do konstantní hmotnosti. Prázdné, vyžíhané kelímky byly určitou dobu ponechány v exikátoru, kde byly ochlazeny. Do vyžíhaného kelímku byl navážen 1 g vysušených kalů s přesností $\pm 0,0001$ g. Kelímky s kaly byly žihány v peci při teplotě 550 °C po dobu 45 minut. Vyžíhané kelímky byly opět zváženy. Ztráta žiháním je vypočítána dle vztahu:

$$LOI = 100 \times [(m_k + m_s) - (m_k + m_v)]/m_s$$

Kde:

LOI – ztráta žiháním [%]

m_k – hmotnost kelímku [g]

m_s – hmotnost vysušených kalů [g]

m_v – hmotnost vyžíhaných kalů [g]



Obr.34: Žihací pec s kelímky [autor]

6.6 Diferenčně termická analýza (DTA)

Diferenčně termická analýza je analytická metoda založená na měření rozdílu teplot mezi zkoušeným vzorkem a inertním standardem současně zahříváním v peci měřícího přístroje. Při měření je analyzovaný vzorek umístěn do pece přístroje, kde dochází k jeho zahřívání. V důsledku nárůstu teploty v peci dochází v analyzovaném vzorku k exotermickým nebo endotermickým reakcím. Při těchto reakcích je pak zaznamenávána diference mezi teplotou analyzovaného vzorku a inertního standardu.

Výsledkem analýzy je záznam, který obsahuje následující křivky:

- DTA křivka – vyjadřuje rozdíl teplot mezi analyzovaným vzorkem a inertním standardem. Slouží pro stanovení, zda je daná reakce exotermní nebo endotermní.
- DTG křivka – Jedná se o první derivaci křivky TG. V mnoha případech je problematické určit počátek a konec reakce. Pro tento účel slouží křivka DTG, respektive její inflexní body.

- TG křivka – křivka, která zachycuje změnu hmotnosti analyzovaného vzorku v závislosti na teplotě.[92]

6.7 Rentgenová difrakční analýza (XRD)

XRD analýza je založena na následujícím principu: Pokud známe vlnovou délku λ a změříme-li úhel θ , můžeme určit vzdálenosti d krystalových rovin, které udávají polohu rovin v krystalové mřížce. Jestliže známe hodnoty souboru mezirovinných vzdáleností různých minerálů poté můžeme určit, jaké minerály jsou ve zkoumané látce obsaženy. Tato metoda slouží k mineralogickému složení všech látek, které mají krystalický charakter. Výsledkem zkoušky je rentgenogram s píky jednotlivých minerálů.[92]

Výsledky DTA a XRD analýzy byly doplněny chemickým rozbohem dle ČSN EN 196-2 Metody zkoušení cementu. Část 2: Chemický rozbor cementu.[93]

6.8 Stanovení pevnosti cementových malt [79]

Z navržených receptur byly vyrobeny trámečky 40x40x160 mm. Na trámečcích z cementové malty byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a na zlomcích zkušebních těles pevnost v tlaku dle ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. [79]

Pevnost v tahu za ohybu se stanoví na sadě tří trámečků o rozměrech 40x40x160 mm kolmo na směr hutnění do okamžiku jejich porušení. Trámečky jsou osazeny do zkušebního zařízení. Trámeček je uložen ve smyslu trojbodového ohybu na dvou válcových podporách a třetí je shora vyvíjen tlak. Pevnost v tahu za ohybu se vypočítá dle vztahu:

$$f = 1,5 \frac{F * l}{b * h^2}$$

Kde:

F – zatěžovací síla [N]

l – rozpětí podpor [mm] – 100 mm

b – šířka zatěžovacího tělesa [mm]

h – tloušťka zatěžovacího tělesa [mm]

Pevnost v tlaku se stanoví na zlomcích zkušebních těles po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. K zatěžování dochází vlivem zkušebního zařízení, které působí na těleso dvěma tlačnými destičkami o rozměrech 40x40 mm. Zkušební vzorek je do zkušebního zařízení vložen kolmo na směr hutnění a je zatěžován až do úplného porušení. Pevnost v tlaku se vypočítá dle vztahu:

$$f = \frac{F}{A}$$

Kde:

F – zatěžovací síla [N]

A – tlačná plocha [mm²]

6.9 Stanovení podsítných podílů [80]

Podsítné podíly byly stanoveny dle následujícího postupu. Nejdříve byly zváženy prázdné plastové nádoby o objemu 0,5 l. Poté byly z výtoku každého síta do těchto nádob odebrány vzorky podsíťových vod. Následně byly jednotlivé nádoby zváženy. Jednotlivé vzorky podsíťových vod byly kvantitativně přefiltrovány přes Büchnerovu nálevku s vloženým a předem zváženým filtračním papírem. Filtrační papír se vzorkem byl následně vysušen do konstantní hmotnosti při teplotě 105°C a následně zvážen.

Podsítné podíly byly stanoveny dle níže uvedeného vztahu.

$$s = 100 \times \frac{(d - c)}{(b - a)}$$

Kde:

s – obsah suchých částic [%]

d – hmotnost filtračního papíru s vysušeným vzorkem [g]

c – hmotnost vysušeného filtračního papíru [g]

b – hmotnost plastové nádoby s odebraným vzorkem [g]

a – hmotnost prázdné plastové nádoby [g]

6.10 Stanovení retencí [81]

Pro stanovení hodnoty retence je nutné znát sušinu provozní břečky v homogenizátoru a sušinu podsítných podílů. Výsledné hodnoty retencí byly stanoveny dle níže uvedeného vztahu.

$$r = 100 \times \frac{(s_h - s_p)}{s_h}$$

Kde:

r – retence [%]

s_h – sušina provozní břečky v homogenizátoru [%]

s_p – sušina podsítného podílu [%]

6.11 Objemová hmotnost [83]

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno v souladu s ČSN EN 494. [68]

Z vlnité desky se vyřízne zkušební těleso o délce alespoň 40 mm a šířce jedné vlny. Ponořením do vody se stanoví objem zkušební tělesa. Stanoví se hmotnost zkušební tělesa po vysušení v sušárně při teplotě 105°C po dobu 24 hodin. Objemová hmotnost d se stanoví podle vztahu:

$$d = \frac{m}{V}$$

Kde:

d – objemová hmotnost [g/cm³]

m – hmotnost vysušeného vzorku [g]

V – objem zkušební tělesa [cm³].

6.12 Zatížení na mezi pevnosti [84]

Zkouška zatížení na mezi pevnosti byla provedena v souladu s ČSN EN 494. [68]
Zkušební tělesem je buď celá vláknocementová deska, nebo příčně uříznutý kus o délce 1,20 m. Zkoušení se provádí na zkušebním tělese v mokřém stavu. Zkušební těleso se uloží vlnami kolmo na podpory (horní stranou do tlakového pásma) a po vložení měkkého materiálu se uprostřed rozpětí zatíží plochým hranolem, přičemž síla, působící uprostřed, rovnoměrně rozloží přes hranol. Zaznamená se síla F při porušení. Zatížení na mezi pevnosti se stanoví dle vztahu:

$$F_s = \frac{F}{b} \times \frac{l_s}{1100} \times 10^3$$

Kde:

F_s – zatížení při porušení [N/m]

F – síla při porušení [N]

b – rozměr zkušebního tělesa měřený rovnoběžně s podporami [mm]

l_s – světlé vzdálenosti podpor [mm].

6.13 Ohybový moment [85]

Zkouška ohybového momentu byla provedena v souladu s ČSN EN 494. [68]
Zkušební těleso délky alespoň 0,3 m vyřezané z desky o konstantní tloušťce musí mít vrcholy vlny uprostřed a na každou stranu jednu úplnou vlnu plus takový přídavek, aby na každé straně byl přesah přes podporu nejvýše jednu půlvlnu. Zkoušení se provádí na zkušebním tělese v mokřém stavu. Zkušební těleso se uloží na podpory (horní stranou do tlakového pásma) a po vložení měkkého materiálu se uprostřed, na vrcholu vlny, zatíží podle typu desky zatěžovacím břemenem nebo poddajným hranolem. Zaznamená se síla F při porušení. Ohybový moment se stanoví dle vztahu:

$$M = \frac{F \times l_s}{4 \times b}$$

Kde:

M – ohybový moment při porušení [Nm/m]

F – síla při porušení [N]

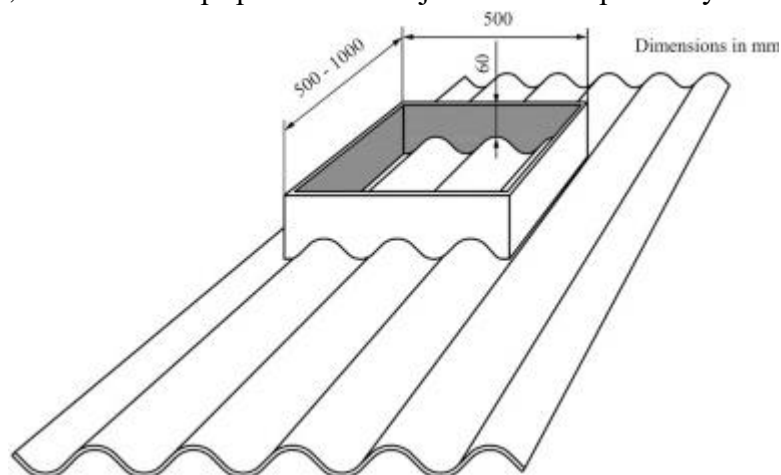
b – délka zkušebního tělesa [mm]

l_s – rozpětí mezi středy podpor [mm].

6.14 Vodotěsnost [86]

Zkouška vodotěsnosti byla provedena v souladu s ČSN EN 494. [68]

Zkouška se provádí na celé desce nebo na odřezku desky s nejmenší délkou 1,20 m. Na horní stranu zkušebního tělesa se přilepí rám o délce mezi 0,5 až 1,0 m. Rám se naplní vodou tak, aby hladina dosahovala nejméně 60 mm nad vrchol vln. Po 24 hodinách se prohlédne spodní strana zkušebního tělesa. Na spodním povrchu desky se mohou objevit stopy vlhkosti, ale v žádném případě nesmí dojít k tvorbě kapek vody.



Obr.35: Zkouška vodotěsnosti vláknocementových desek [68]

6.15 Mrazuvzdornost [68]

Pro zkoušku mrazuvzdornosti je zapotřebí 20 těles. Tělesa se podélně vyříznou ze středu celé desky tak, aby obsahovala dvě úplné vlny. Zkušební tělesa se náhodně rozdělí do dvou sad po 10 ks. Po kondicionování se první sada 10 zkušebních těles podrobí zkoušce zatížení na mezi pevnosti nebo zkoušce ohybového momentu. Druhá sada zkušebních těles se ponoří na 48 hodin do vody o teplotě okolí. Zkušební tělesa druhé sady se podrobí 100 cyklům, které se skládají ze:

- zmrazování v mrazničce, kde musí být během 1-2 hodin dosaženo teploty $-20 \pm 4^{\circ}\text{C}$ a udržet tuto teplotu další 1 hodinu
- rozmrazování ve vodní lázni, kde musí být během 1-2 hodin dosaženo teploty $20 \pm 4^{\circ}\text{C}$ a udržet tuto teplotu další 1 hodinu

Každý cyklus musí trvat 4-6 hodin. Po uplynutí 100 cyklů se vzorky kondicionují a podrobí se zkoušce zatížení na mezi pevnosti nebo zkoušce ohybového momentu. Pro každou sadu se vypočítá střední hodnota zatížení na mezi pevnosti nebo ohybového momentu a odhad směrodatné odchylky. Vypočítá se poměr R_L dle vztahu:

$$R_L = \frac{L_2}{L_1}$$

Kde:

R_L – výsledný poměr [-]

L_2 – dolní odhad střední hodnoty zatížení na mezi pevnosti nebo ohybového momentu po zmrazovacích cyklech (druhá sada)

L_1 – horní odhad střední hodnoty zatížení na mezi pevnosti nebo ohybového momentu referenční sady (první sada).

6.16 Zkouška nasáknutí-vysoušení [68]

Pro zkoušku je zapotřebí 20 zkušebních těles. Tělesa se podélně vyříznou ze středu celé desky tak, aby obsahovala dvě úplné vlny. Zkušební tělesa se náhodně rozdělí do dvou sad po 10 ks. Po kondicionování se první sada 10 zkušebních těles podrobí zkoušce zatížení na mezi pevnosti nebo zkoušce ohybového momentu. Druhá sada zkušebních těles se vystaví 50 cyklům nasáknutí-vysoušení, které se skládají z:

- ponoření na 18 hodin do vody o teplotě okolí, vyšší než 5°C
- sušení po dobu 6 hodin v sušárně při teplotě $60 \pm 5^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti menší než 20 %.

Po 50 cyklech se zkušební tělesa kondicionují a podrobí se zkoušce zatížení na mezi pevnosti nebo zkoušce ohybového momentu. Pro každou sadu se vypočítá střední hodnota zatížení na mezi pevnosti nebo ohybového momentu a odhad směrodatné odchylky. Vypočítá se poměr R_L dle vztahu:

$$R_L = \frac{L_2}{L_1}$$

Kde:

R_L – výsledný poměr [-]

L_2 – dolní odhad střední hodnoty zatížení na mezi pevnosti nebo ohybového momentu po cyklech nasáknutí-vysoušení (druhá sada)

L_1 – horní odhad střední hodnoty zatížení na mezi pevnosti nebo ohybového momentu referenční sady (první sada).

6.17 Zkouška teplo-děšť [88]

Zkouška teplo-děšť byla provedena v souladu s ČSN EN 494. [68]

Zkušební tělesa musí obsahovat nejméně jednu celou desku, která je překrytá zespoda i shora deskami nebo pruhy, které ji přesahují nejméně o polovinu šířky. Zkušební tělesa se dle předpisů uchyty na rám tak, aby dosahovala sklonu $25 \pm 5^\circ$. Horní strana desek se vystaví bez přerušování 50 cyklům teplo-děšť dle níže uvedené tabulky.

Tab. 6: Průběh jednotlivých cyklů zkoušky teplo-děšť

Cykly	Trvání
Děšť 2,5 l/(m ² . minuta)	2 hodiny 50 minut
Přestávka	10 minut
Ohřívání ($70 \pm 5^\circ\text{C}$)	2 hodiny 50 minut
Přestávka	10 minut
Celkem	6 hodin

Po 50 cyklech teplo-děšť se desky kontrolují na:

- trhliny (podélné, příčné)
- delaminace

- ostatní zjevné vady.



Obr.36: Zkouška teplo-děšť [autor]

6.18 Stanovení odolnosti proti nárazu (Impact test) [87]

Odolnost proti nárazu měkkého tělesa se stanoví spuštěním pytle sférokonického tvaru o hmotnosti 50 kg z výšky 1200 mm bez počáteční rychlosti kolmo na střed desky v předem stanoveném uspořádání a změří se doba, po kterou udrží zkoušená deska pytel. Zkušební desky jsou umístěny do zkušebního rámu popsaného v ČSN EN 15057 [94] a jsou připevněny pomocí hákových šroubů v přesně definovaných pozicích.



Obr.37: Stanovení odolnosti proti nárazu [autor]

Na jednu zkoušku je třeba připravit sadu 3 vzorků – 1x vlastní zkušební vzorek a 2x doplňkový vzorek. Břemeno musí po dopadu setrvat na povrchu makety střešky po dobu minimálně 60 sekund. V takovém případě je výsledek zkoušky vyhovující. Ze zkoušeného vzorku je odebráno těleso a ploše minimálně 100 cm², které je následně podrobena stanovení vlhkosti. Vzorek musí mít průměrný obsah vlhkosti v rozmezí 8-16 %. Odolnost zkoušeného sortimentu se klasifikuje dle vypočtené hodnoty energie dopadu.

$$E = g \times m \times h$$

Kde:

E – energie dopadu [J]

m – hmotnost měkkého tělesa [kg]

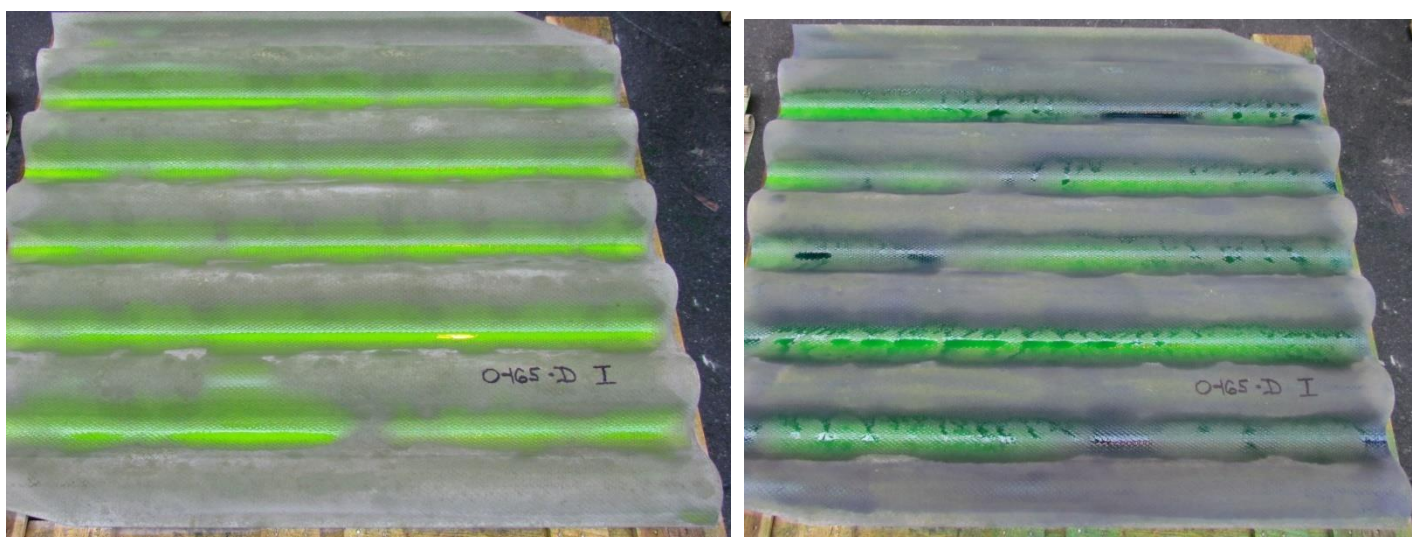
g – gravitační zrychlení [9,81 m/s²]

h – výška mezi bodem dopadu a dnem sférokonického pytle [m]

6.19 Metoda skrytých vad [89]

Cílem této metody je ověření přítomnosti skrytých vad reprezentovaných zejména příčnými a podélnými prasklinami ve vláknocementové střešní krytině pomocí indikačních činidel fluoresceinu sodného a methylenové modři. Zkušební deska se umístí na vodorovnou podložku rubem nahoru. Na rub desky je ve stejnoměrné vrstvě aplikován roztok indikačního činidla fluoresceinu sodného. Rubová strana vlnovky rychle vysychá a v místě výskytu prasklin se objeví tmavší skvrny, které je nutné označit. Počet a délky prasklin se zaznamenávají a povrch desky je vyfotografován. Poté je na rub

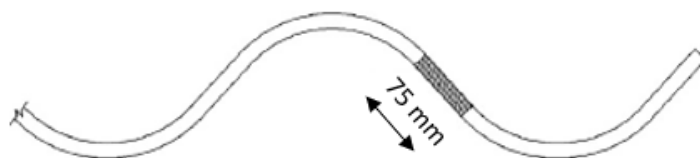
zkoušené desky ve stejnoměrné vrstvě aplikován roztok indikačního činidla methylenové modři. Reakce činidla trvá přibližně 20 minut a po této době se zkušební deska obrátí lící stranou nahoru a jsou zaznamenány všechny známky provlhnání povrchu a případné skryté praskliny viditelné na lici. Povrch desky je opět vyfotografován. Po aplikaci obou indikačních činidel je lící strana zkušebních desek postříkána vodou a po 5 minutách se zaznamená počet a maximální délka prasklin viditelných v lící straně vlnovky. Následně je povrch výrobku opět vyfotografován. Výsledkem zkoušky je zjištění přítomnosti skrytých prasklin ve výrobku. Tato metoda umožňuje bližší pohled na strukturu a možné defekty výrobků bez nutnosti provedení destruktivní zkoušky. Jedná se o rychlou a finančně nenáročnou zkušební metodu.



Obr.38: Aplikace indikačních činidel na rubovou stranu desky při zkoušce metody skrytých vad [autor]

6.20 Rozměrová stabilita [90]

Cílem zkoušky je stanovení délkové změny vzorku plně nasyceného vodou, který je následně vysušen. Zkouška je prováděna na vzorcích o rozměrech 200x75 mm. Při testování vlnité krytiny jsou tyto vzorky připraveny vyřezáním ze šikmin vlnité krytiny. Před zkouškou jsou vzorky uloženy 7 dní v laboratorních podmínkách. Před samotným měřením zkušebních vzorků je digitální měřidlo seřízeno tak, aby ukazovalo přesnou specifikaci skleněné desky. Po kalibraci digitálního měřidla je změřena délka vzorků v laboratorních podmínkách. Následně jsou zkušební vzorky ponořeny na 7 dní do vody. Vzorky jsou ponořeny ve stojanu, který zajišťuje nasycení vzorků vodou ze všech stran. Po 7 dnech jsou vzorky vyjmuty z vody, ořeny hadříkem a opět je provedeno měření jejich délky. Poté jsou vzorky umístěny do stojanu a sušeny v peci při teplotě 105°C po dobu 7 dní. Po 7 dnech jsou vzorky umístěny do exikátoru, ochlazeny na laboratorní teplotu a opět je změřena jejich délka. Po vysušení vzorků je dokončen 1 cyklus namočení-vysušení. Vzorky jsou celkem podrobeny 3 zkušebním cyklům.



Obr.39: Schématický nákres výřezu zkušebního tělesa z vlnité krytiny pro zkoušku rozměrové stability

Výsledná rozměrová stabilita je vypočítána z následujícího vztahu.

$$RS = \frac{(L_W - L_D) \times 1000}{L_D + 184,436}$$

Kde:

RS – rozměrová stabilita [mm/m]

L_W – délka vzorku nasáklého vodou [mm]

L_D – délka vysušeného vzorku [mm]

184,436 – konstanta



Obr.40: Kalibrace digitálního měřidla pomocí skleněné destičky a následné měření délky zkušební vzorku [90]

6.21 Deformace vzorku působením vlhkosti (Warping) [91]

Pro zkoušku warpingu jsou používána zkušební tělesa o rozměrech 200x75 mm, která jsou připravena výřezem ze šikmin vlnovek stejně jako v předchozí zkoušce rozměrové stability. Po přípravě vzorků jsou zatřeny jejich hrany alkydovou barvou. Cílem zkoušky je zjistit maximální průhyb vzorku, který je podroben jednostrannému působení vlhkosti. Dalším důležitým ukazatelem je také doba, za kterou je dosaženo maximálního průhybu zkoušeného vzorku. Před samotnou zkouškou jsou zkušební vzorky vysušeny v sušárně při teplotě 105°C po dobu 48 hodin. Po vychladnutí vzorků je změřena jejich tloušťka ve 3 místech. Hodnoty tloušťky jsou zaznamenány společně s pozicí, na kterou jsou umístěny ve zkušebním zařízení. Dále je zaznamenán počáteční datum a čas začátku zkoušky. Vzorky se umístí na tři opěrné body do plastové misky, v které je nalita demineralizovaná voda. Na povrch vzorků se umístí filtrační papír tak, aby byl snímač délky v přímém kontaktu s povrchem vzorku. Konce filtračního papíru jsou překlopeny do vodní lázně a postupně smáčí celý povrch zkušebního tělesa. V tomto bodě je zahájeno samotné měření. Snímače v pravidelném intervalu zaznamenávají deformaci v daném čase. Ze získaných hodnot je následně sestavena křivka, z které je možné graficky odečíst hodnotu maximální deformace v určité době od začátku zkoušky.



Obr.41: Sestava pro měření deformace vzorků působením vlhkosti (warping) [91]

7 Výsledky

7.1 Etapa I. - Ověření variability vlastností kalového odpadu

Hlavním cílem této etapy bylo ověření variability parametrů u jednotlivě odebíraných vzorků kalového odpadu. Sedimentovaný vláknocementový kal je postupně shromažďován v usazovacích jímkách, odkud je následně přečerpáván do homogenizační nádrže odvodňovacího stroje. Všechny vzorky kalového odpadu byly odebírány právě z této homogenizační nádrže. Jednotlivé vzorky byly odebírány po dobu 7 měsíců tak, aby byla zajištěna co možná největší variabilita ve složení kalového odpadu.



Obr.42: Odběr vzorků kalového odpadu z homogenizátoru a stanovení litrové hmotnosti [autor]

7.1.1 Sušina kalového odpadu [75]

Stanovení obsahu sušiny kalového odpadu bylo provedeno v laboratorní peci při teplotě 105 °C. Doba sušení byla experimentálně stanovena na 5 hodin, protože při standardní době sušení, tj. 1 hodina, nebylo možné dosáhnout konstantní hmotnosti vzorku. Graficky zpracované výsledky jsou uvedeny na obr.43.

Jednotlivé hodnoty sušin kalového odpadu jsou ve většině případů velmi blízké průměrné hodnotě za celé sledované období - 15,0 %. Rozpětí dosažených výsledků se pohybuje v hodnotách 10,4 –21,9 % sušiny kalového odpadu. Tyto minimální a maximální hodnoty jsou pravděpodobně způsobeny zpracováním kalového odpadu, který má jiné poměrové složení jednotlivých vstupních surovin.

7.1.2 Litrová hmotnost kalového odpadu [76]

Litrová hmotnost kalového odpadu byla stanovena na důkladně zhomogenizovaném vzorku pomocí odměrného válce a laboratorních vah. Výsledky litrové hmotnosti odpovídají výsledkům sušin jednotlivých vzorků. Průměrná litrová hmotnost jednotlivých vzorků kalového odpadu, jejíž hodnota je 1075 g/l, se pohybuje v rozsahu litrové hmotnosti standardně používané břečky pro výrobu vláknocementové střešní krytiny. Graficky zpracované výsledky jsou uvedeny na obr.43.

7.1.3 pH kalového odpadu [74]

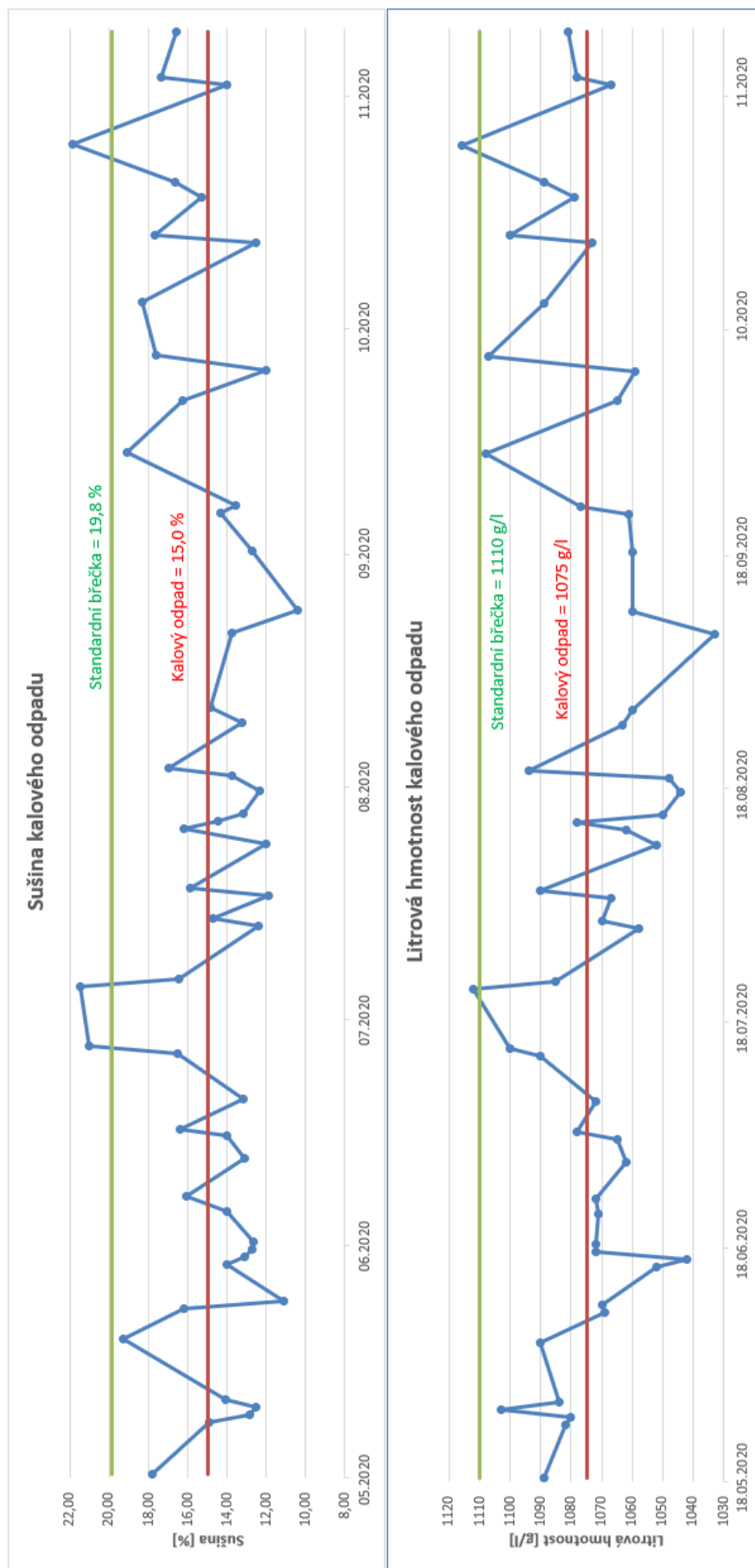
Stanovení pH kalového odpadu bylo provedeno pomocí pH metru Knick Portamess 911. Výsledná hodnota pH byla zobrazena přímo na displeji přístroje. Graficky zpracované výsledky jsou uvedeny na obr.44.

Z grafického vyjádření je patrné, že jednotlivé výsledky pH vykazují stabilní hodnoty pohybující se v rozsahu od 12,2-12,9. Tyto výsledky potvrzují původní předpoklad, kdy nebylo v tomto souboru výsledků očekáváno výrazných odchylek, protože se jedná z velké části o hydratační produkty cementu. Získané hodnoty pH kalového odpadu jsou prakticky totožné s hodnotami standardní břečky, u které se pohybují mezi 12 – 13.

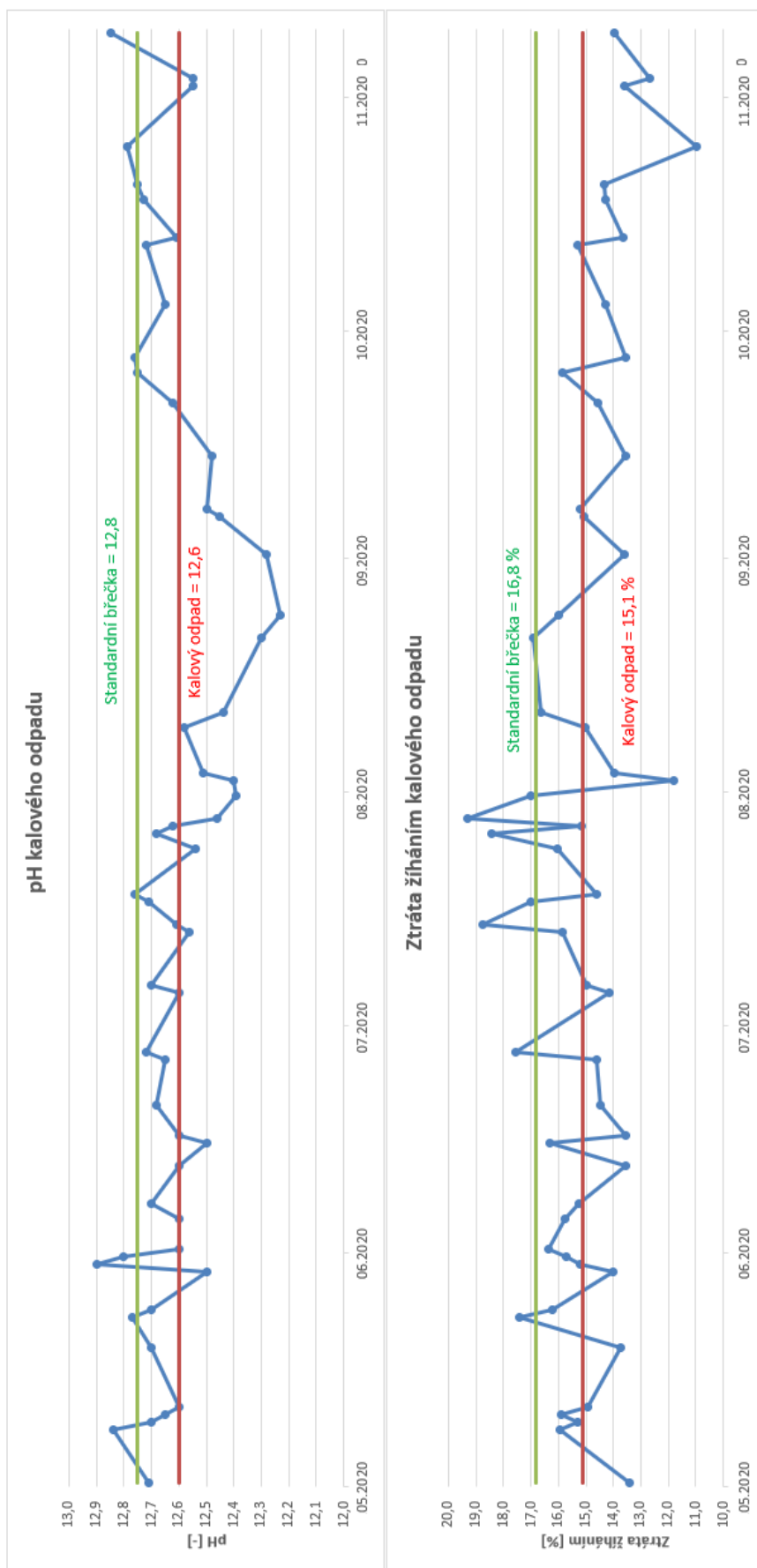
7.1.4 Ztráta žiháním kalového odpadu [78]

Před samotnou zkouškou byly jednotlivé vzorky kalového odpadu vysušeny. Vysušené vzorky byly následně žihány v peci při teplotě 550 °C po dobu 45 minut. Graficky zpracované výsledky jsou uvedeny na obr.44.

Cílem této analýzy bylo zjištění poměrného zastoupení vláken v kalovém odpadu. Vláknocementový kal je složen z anorganických a organických látek. Organická část kalu je tvořena vlákny. Ve vzorku jsou zastoupena jak vlákna procesní (celulósová), tak výztužná (PVA). Při ztrátě žiháním všechna tato organická vlákna vyhoří a lze tak stanovit jejich poměrové zastoupení ve zkoumaném vzorku. Z grafického vyjádření je patrné, že většina analyzovaných vzorků dosahuje ztráty žiháním hodnoty blízké 15 %, což je průměrná hodnota této zkoušky blízká se průměrné hodnotě ztráty žiháním standardní břečky, která je 16,8 %. Extrémní hodnoty jsou způsobeny zpracováním kalového odpadu s nestandardním složením, které může souviset s výjimečnými situacemi při výrobě vláknocementové střešní krytiny.



Obr.43: Grafické vyjádření výsledků sušiny a litrové hmotnosti kalového odpadu



Obr. 44: Grafické vyjádření výsledků pH a ztráty žháním kalového odpadu

Souhrnné vyjádření výsledků kvalitativních analýz vláknocementového kalu je uvedeno v následující tabulce č. 7.

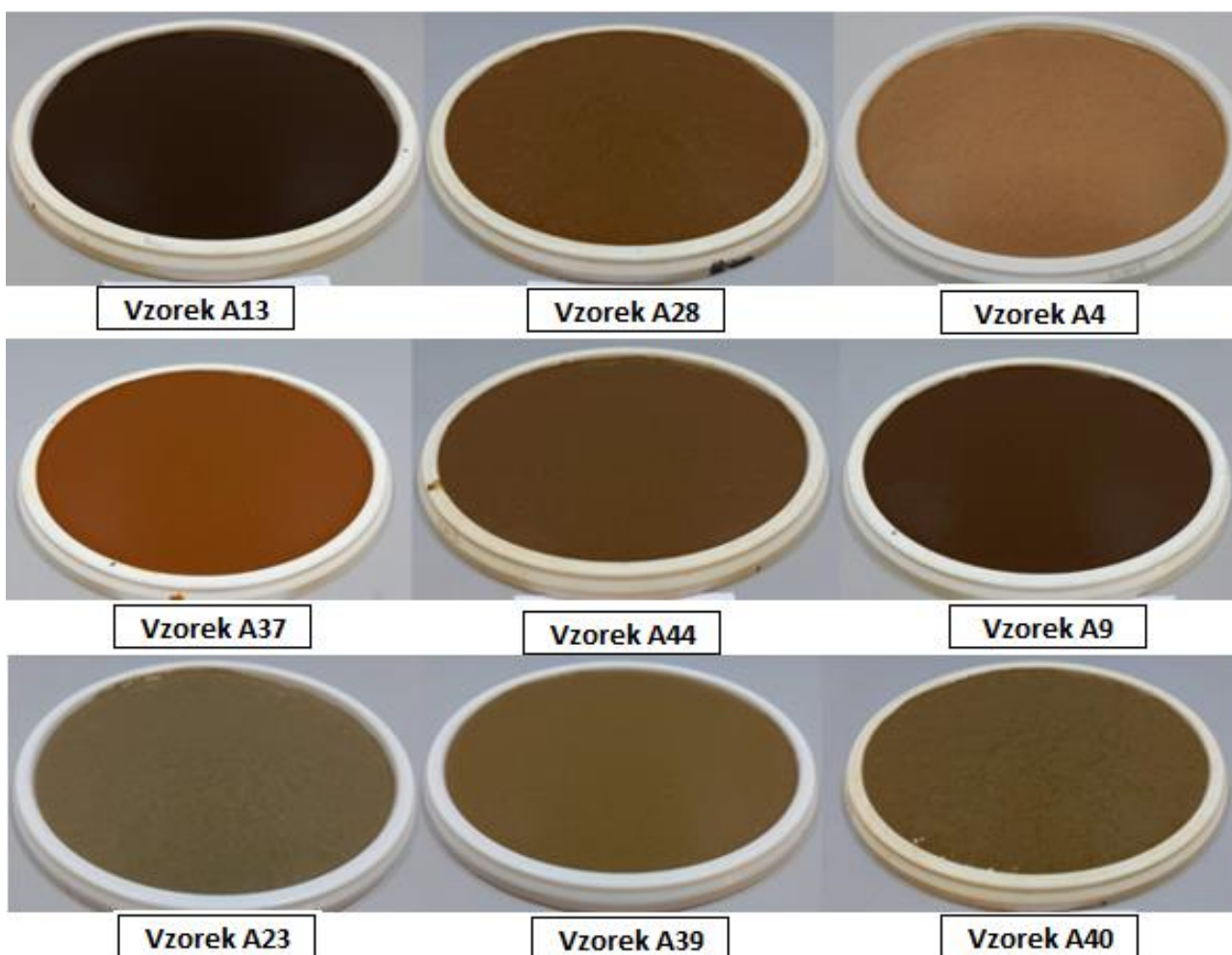
Tab. 7: Výsledky fyzikálních analýz vláknocementových kalů

Vzorek	Teplota (°C)	Litrová hmotnost (g/l)	Sušina (%)	pH (-)	ZŽ (%)
A1	28,9	1089	17,79	12,7	13,4
A2	28,4	1082	14,92	12,8	15,9
A3	26,3	1080	12,86	12,7	15,3
A4	26,7	1103	12,50	12,7	15,9
A5	26,9	1084	14,06	12,6	15,0
A6	29,6	1090	19,28	12,7	13,7
A7	28,9	1069	16,22	12,8	17,4
A8	24,8	1070	11,10	12,7	16,2
A9	32,6	1052	13,99	12,5	14,0
A10	28,2	1042	13,12	12,9	15,2
A11	29,1	1072	12,71	12,8	15,7
A12	29,0	1072	12,67	12,6	16,4
A13	29,2	1071	13,98	12,6	15,8
A14	24,3	1072	16,06	12,7	15,3
A15	30,0	1062	13,11	12,6	13,6
A16	31,3	1065	14,00	12,5	16,3
A17	30,9	1078	16,40	12,6	13,6
A18	27,0	1072	13,14	12,7	14,5
A19	23,6	1090	16,53	12,7	14,6
A20	24,6	1100	21,05	12,7	17,6
A21	27,0	1112	21,45	12,6	14,2
A22	27,3	1085	16,47	12,7	15,0
A23	29,8	1058	12,42	12,6	15,9
A24	25,6	1070	14,70	12,6	18,7
A25	29,6	1067	11,87	12,7	17,0
A26	27,7	1090	15,90	12,8	14,6
A27	32,0	1052	12,00	12,5	16,0
A28	28,0	1062	16,17	12,7	18,5
A29	28,0	1078	14,44	12,6	15,2
A30	27,7	1050	13,14	12,5	19,3
A31	28,6	1044	12,30	12,4	17,0
A32	30,6	1048	13,76	12,4	11,8
A33	28,6	1094	16,97	12,5	14,0
A34	26,1	1063	13,23	12,6	15,0
A35	26,2	1060	14,87	12,4	16,6
A36	29,5	1033	13,72	12,3	16,9
A37	24,8	1060	10,41	12,2	16,0
A38	25,6	1060	12,70	12,3	13,6
A39	28,1	1061	14,31	12,5	15,1

Vzorek	Teplota (°C)	Litrová hmotnost (g/l)	Sušina (%)	pH (-)	ZŽ (%)
A40	29,3	1077	13,52	12,5	15,2
A41	27,4	1108	19,09	12,5	13,6
A42	27,5	1065	16,27	12,6	14,6
A43	24,1	1059	12,01	12,8	15,9
A44	24,2	1107	17,62	12,8	13,6
A45	27,4	1089	18,31	12,7	14,3
A46	22,0	1073	12,50	12,7	15,3
A47	24,3	1100	17,65	12,6	13,7
A48	26,9	1079	15,30	12,7	14,3
A49	24,7	1089	16,67	12,8	14,3
A50	22,3	1116	21,90	12,8	11,0
A51	25,3	1067	13,98	12,6	13,6
A52	26,0	1078	17,36	12,6	12,7
A53	24,4	1081	16,60	12,9	14,0
Průměr	27,3	1075	15,0	12,6	15,1
Min	22,0	1033	10,4	12,2	11,0
Max	32,6	1116	21,9	12,9	19,3
Směrodatná odchylna	2,4	18	2,6	0,1	1,6

7.1.5 Vizuální posouzení kalového odpadu [77]

Pro výrobu vláknocementové střešní krytiny je používána řada vstupních surovin, jejichž použití je závislé na konkrétní výrobní technologii. Významný vliv na odstín finálního výrobku má zejména použití mikrosiliky. Mikrosiliková suspenze má výrazně černou barvu a podílí se na tmavším odstínu finálních výrobků. Během dlouhých výrobních kampaní s použitím mikrosiliky lze očekávat i výrazně tmavší kalový odpad. Zpětným využíváním kalového odpadu lze předpokládat jeho vliv na odstín finálních výrobků. Proto bylo stanovení parametrů u každého odběru vzorku doplněno o vizuální posouzení odstínu. Příklady jednotlivých vzorků jsou uvedeny na obr. 45.



Obr.45: Vizuální posouzení kalového odpadu

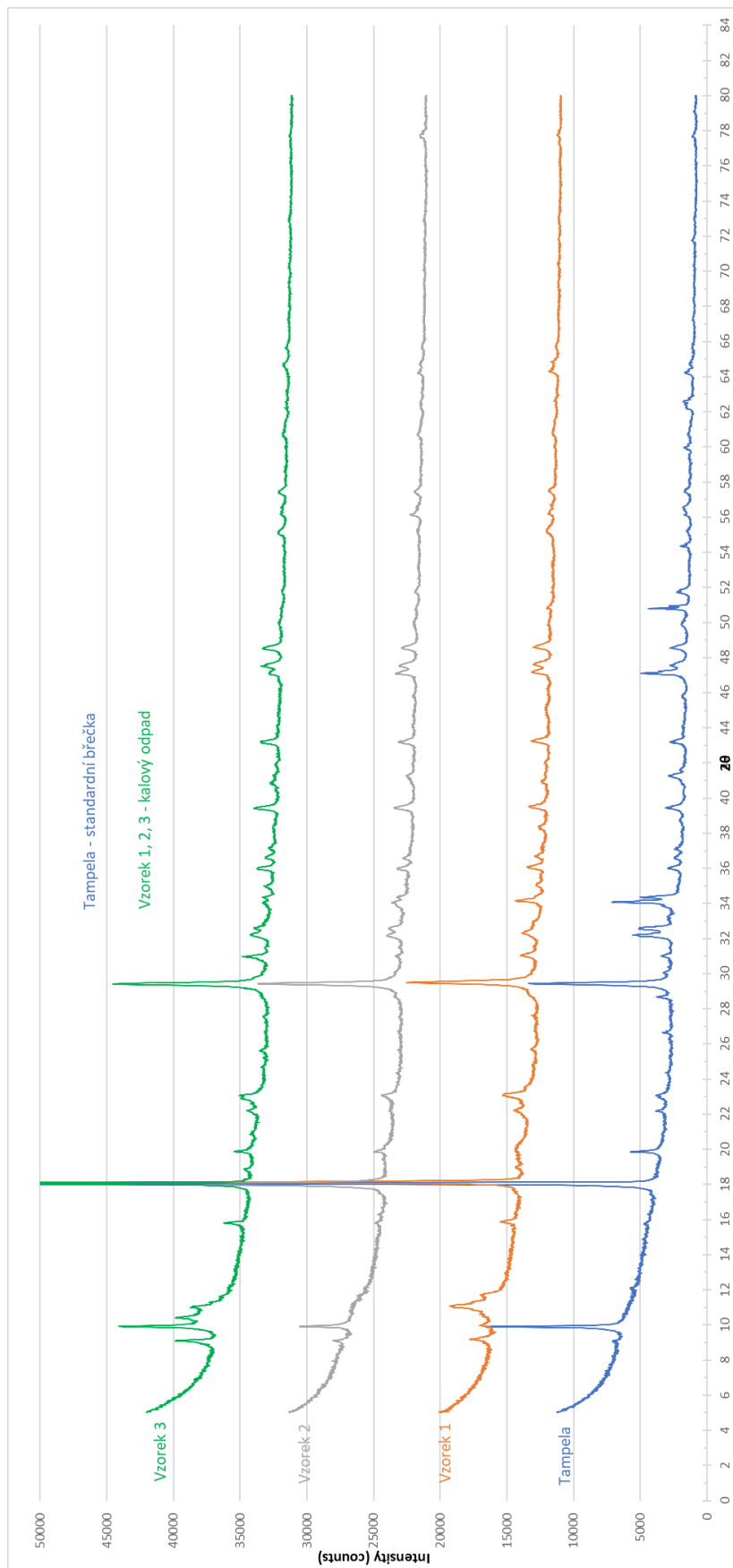
Před možným využitím kalového odpadu zpět do výrobního procesu je nutné provést základní kvalitativní zkoušky. Jedná se zejména o zkoušku litrové hmotnosti a sušiny, na základě kterých je možné ověřit použitelnost kalů. Tyto zkoušky jsou jednoduché a časově nenáročné, což je velmi důležité pro výrobní proces. Na základě všech odebraných vzorků lze považovat ještě za využitelný kalový odpad s litrovou hmotností pohybující se mezi 1050 – 1200 kg/m³ a sušinou v rozsahu 15 – 20 %. Analýza vlastností kalového odpadu byla ještě doplněna parametry pH a ztrátou žíhání. Všechny odebrané vzorky kalů dosahovaly prakticky stejnou hodnotu pH se standardní břečkou. Z tohoto důvodu není třeba věnovat pH kalového odpadu další pozornost. Ztráta žíháním je časově náročná zkouška, která poskytuje pouze doplňující informaci o složení kalového odpadu. Z vizuálního posouzení je zřejmé, že všechny kalový odpad nebude možné zpracovat. V případě použití kalového odpadu s mikrosilikou by mohlo dojít ke změně odstínu finálního výrobku. Zpracováván by tedy mohl být pouze kalový odpad, který nebude obsahovat mikrosilikou.

7.2 Etapa II. – Porovnání složení standardní břečky a kalového odpadu

V rámci této etapy výzkumu byly odebrány vzorky standardní břečky z tampely (obr.10) a vzorky kalového odpadu z homogenizátoru odvodňovacího stroje (obr.42) dle [95]. Vzorkované materiály byly vysušeny do konstantní hmotnosti při teplotě 105°C, mechanicky rozdruženy a pomlety na požadovanou jemnost. Takto připravené vzorky byly podrobeny rentgenové difrakční analýze (XRD), diferenčně termické analýze (DTA) a chemickému rozboru. Na základě výsledků těchto analýz lze určit podobnost materiálového a chemického složení mezi standardní břečkou a kalovým odpadem.

7.2.1 Rentgenová difrakční analýza (XRD)

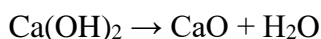
XRD analýza byla provedena za účelem identifikace hydratačních produktů surovinové břečky a kalového odpadu. XRD analýza umožňuje identifikovat hydratační produkty cementu v různém stupni hydratace a s odlišným materiálovým složením analýzou pozic jednotlivých píků a jejich intenzit na získaném difraktogramu.[96] XRD difraktogram standardní břečky ukazuje přítomnost očekávaných hydratačních produktů Portlandského cementu. Jedná se zejména o portlandit, C-S-H fáze a nezreagované části alitu. Dále je možné identifikovat minerál Ettringit a monosulfát, které vznikají reakcí se sírany. Na difraktogramech všech vzorků lze identifikovat také CaCO_3 . Přítomnost CaCO_3 lze přisuzovat zejména dávkováním mletého vápence přímo do surovinové zanášky. Je však třeba brát v úvahu, že přítomnost CaCO_3 může být chápána jako jeden z hydratačních produktů reakce portlanditu s oxidem uhličitým. S největší pravděpodobností se však jedná o identifikaci vápence v zanášce. V rámci kvalitativního vyhodnocení lze jednotlivé difraktogramy považovat téměř za stejné. Jednotlivé vzorky kalového odpadu byly odebírány nezávisle na sobě, tak aby reprezentovaly různé stáří kalového odpadu. Při pohledu na výsledné difraktogramy lze pozorovat odlišné intenzity jednotlivých hydratačních produktů. U všech vzorků lze identifikovat jako hlavní hydratační produkt reakce portlandit. U vzorku standardní zanášky je možné identifikovat portlandit s největší intenzitou, což odpovídá původnímu předpokladu, kdy do reakce vstupuje přesně definované množství portlandského cementu. Vzorky kalového odpadu již mají jiné poměrové složení surovin a tím pádem i jiné množství výsledných hydratačních produktů. Souhrnné porovnání výsledků XRD analýzy standardní břečky a kalového odpadu je uvedeno na obr. 46. Vyhodnocení jednotlivých vzorků je uvedeno v přílohách č. 1 – 4.



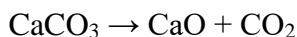
Obr.46: XRD difraktogramy testovaných vzorků standardní břecha a kalového odpadu

7.2.2 Diferenční termická analýza (DTA)

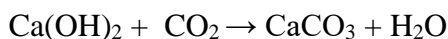
Na obr.47 je zobrazeno grafické vyhodnocení DTA analýzy vzorku odebraného ze standardní zanášky. Vzorek je z největší části tvořen portlandským cementem CEM I 42,5 R. Dále je ve vzorku zastoupen vápenec, vlákna buničiny a PVA vlákna. Na grafu je možné identifikovat 3 oblasti spojené se změnou hmotnosti při zahřívání vzorku. Oblast 1 nacházející se v rozsahu teplot 200-250 °C se projevuje jako konkávní pík, který charakterizuje exotermickou reakci. Tato reakce je v tomto případě spojena s vyhoříváním organických vláken. Oblast 2 a 3 je velmi podobná i u vzorků kalového odpadu (obr.48 a 49). Jednotlivé píky se však liší svojí velikostí. Oblast 2 je popisována jako dehydratace Portlanditu (CH), která je charakterizována následující reakcí:



Dehydratační reakce CH probíhá při teplotě mezi 450-500 °C. [97] CH vzniká jako jeden z hlavních hydratačních produktů cementu. CH společně s C-S-H fázemi vytváří konečné produkty reakce alitu a belitu s vodou. CH je přítomen ve formě krystalů přesně stanoveného složení, takže lze díky CH určit stupeň hydratace cementové pasty. Oblast 3 je možné identifikovat na všech grafických výstupech DTA analýzy a jedná se o dekarbonataci CaCO_3 , která probíhá při teplotách mezi 750-800°C. [98] Dekarbonatace CaCO_3 probíhá dle následující reakce:

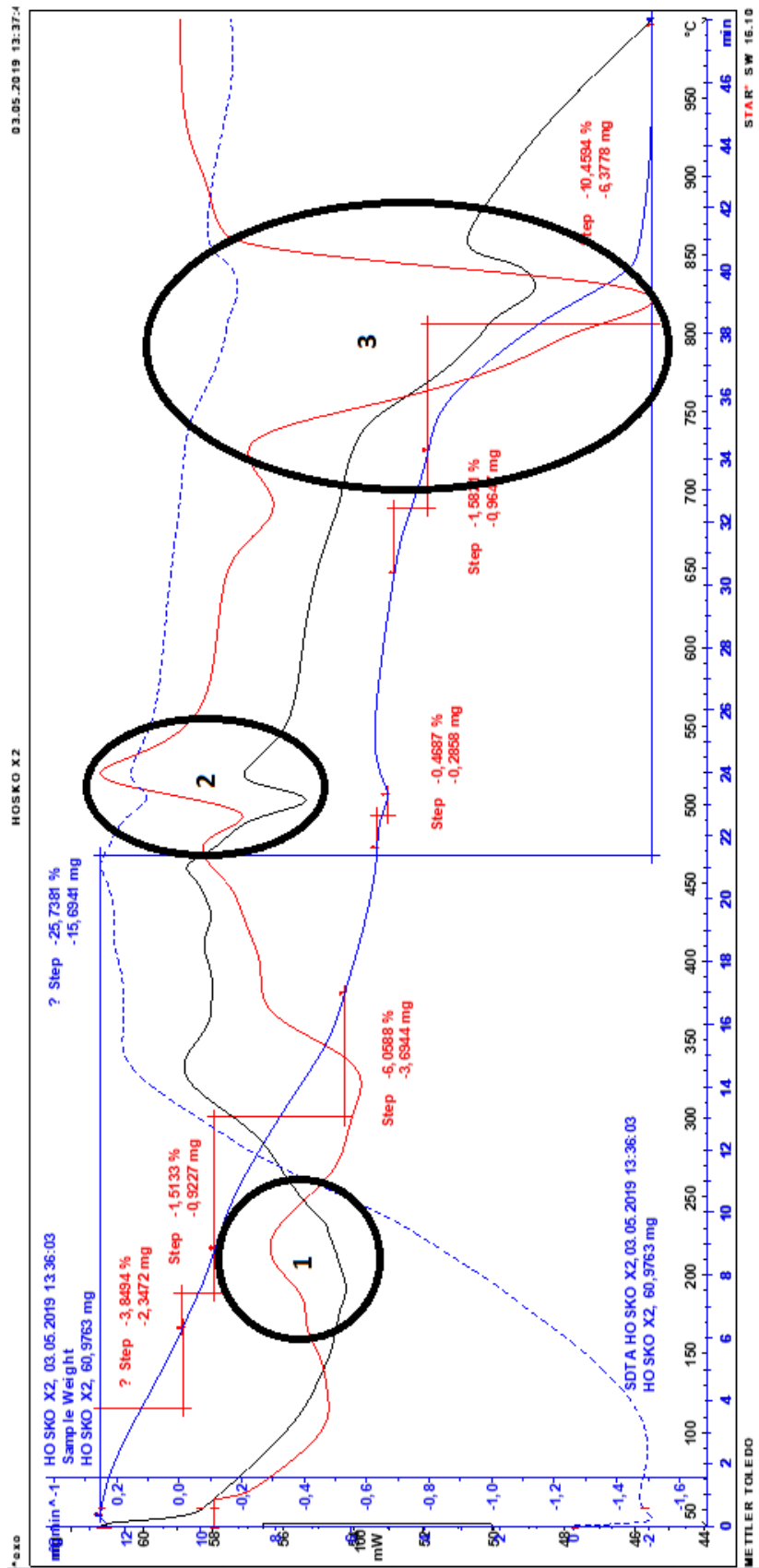


U vzorků kalového odpadu A a B není tento pík tak intenzivní jako u vzorku standardní zanášky. To lze vysvětlit přítomností mletého vápence v surovinové zanášce. U vzorků kalového odpadu se jedná spíše o produkty karbonatační reakce, která je popsána následující reakcí: [99]

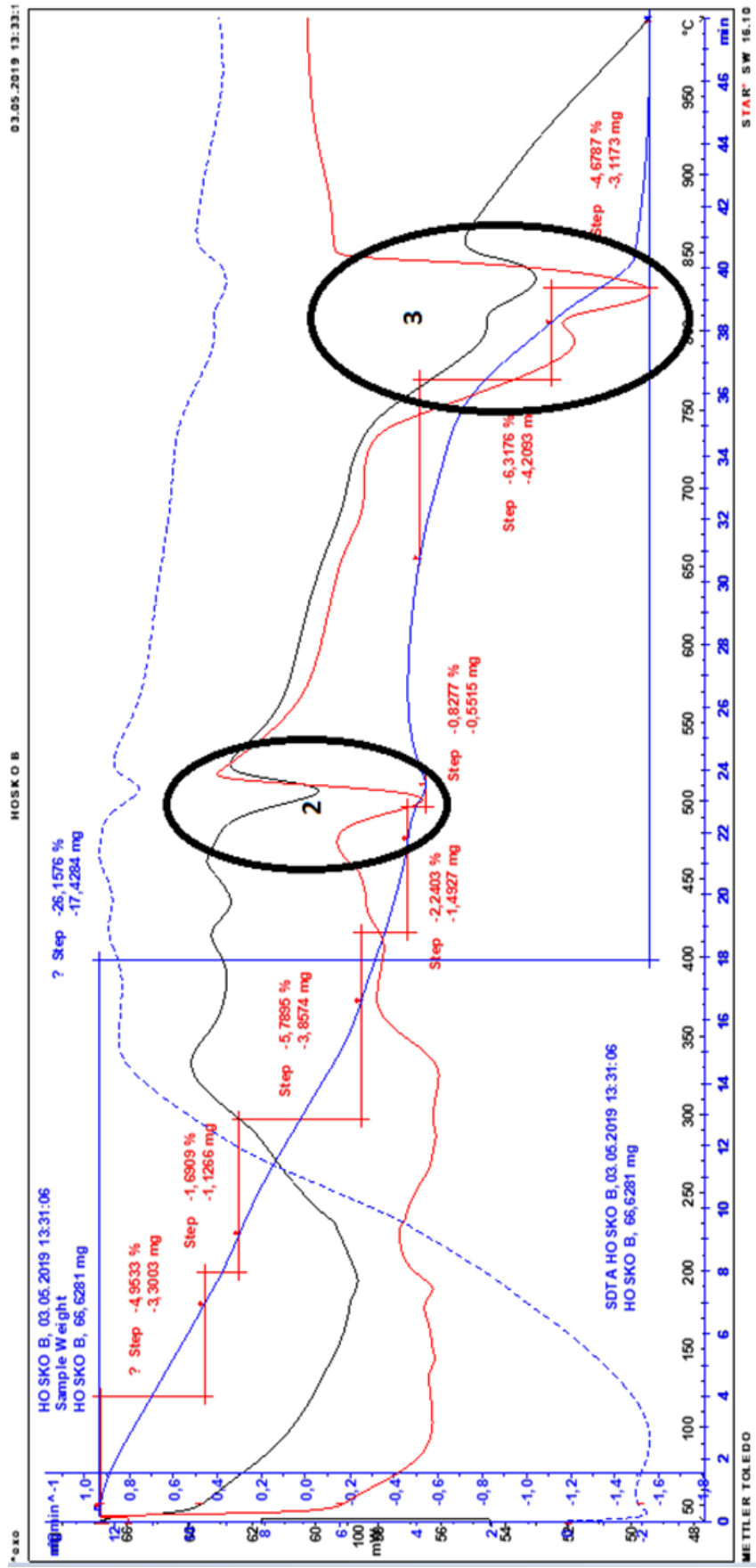


Na obr.49 u vzorku kalového odpadu B je vidět výrazný endotermický pík v oblasti 4. Tento endotermický děj probíhá při teplotách v rozsahu 100-150 °C a může být vysvětlen odchodem vody (zbytková voda v kapilárních pórech) při vysušování vzorku nebo s dehydratací ettringitu. Výskyt této oblasti pouze u jednoho ze vzorků kalů může být vysvětlen rozdílným složením a stářím kalového odpadu. V případě výrazného úbytku hmotnosti v oblasti mezi 100-150 °C se může jednat o čerstvější kalový odpad v porovnání se vzorkem A. V rané fázi hydratační reakce lze očekávat výrazně větší přítomnost ettringitu ve vzorku. Stejně tak lze tento úbytek hmotnosti vysvětlit výrazně větší přítomností vody ve vzorku.

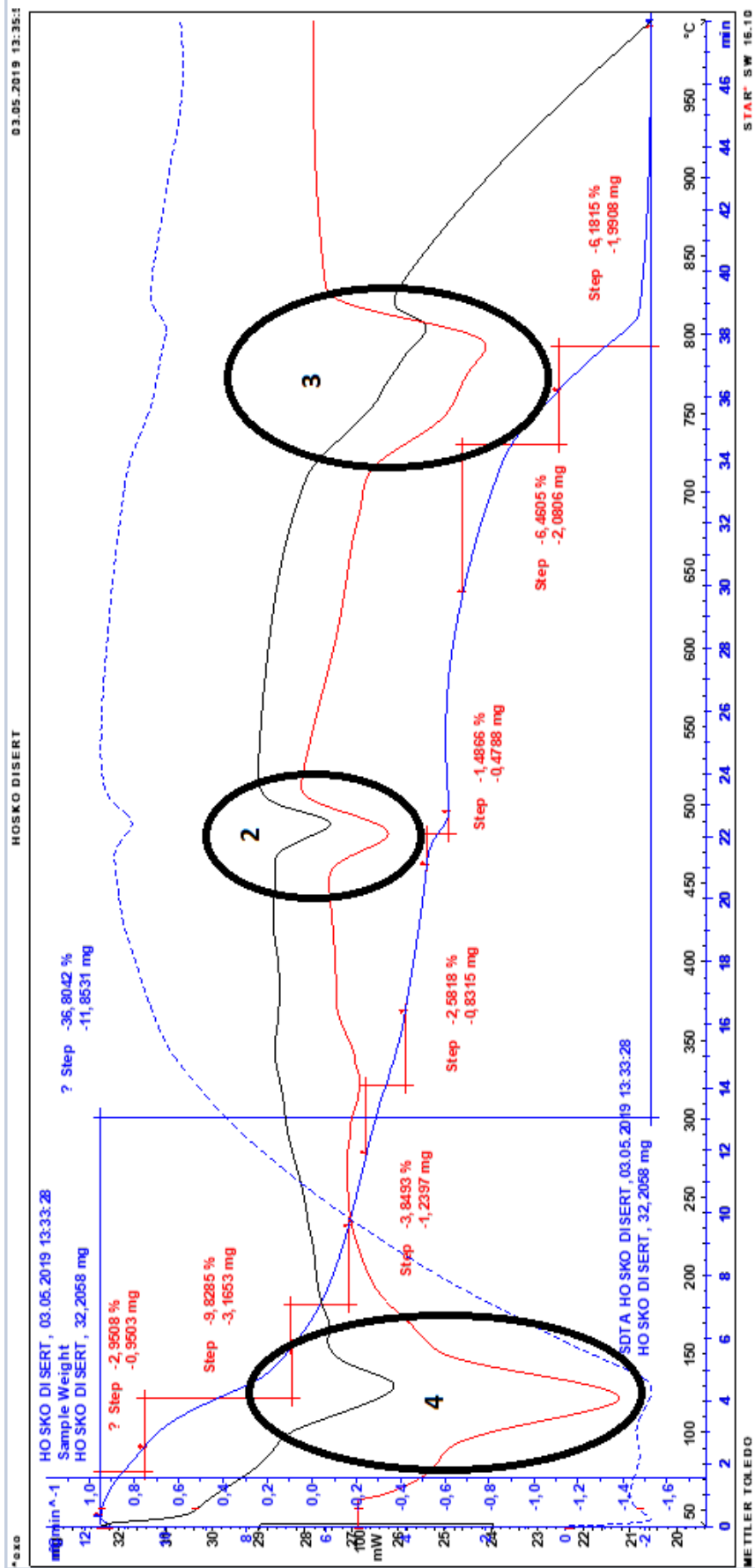
Všechny grafické výstupy DTA analýzy ukazují na 3 významné oblasti spojené s endotermickým procesem. V průběhu endotermického procesu je tepelná energie absorbována z okolí při zahřívání vzorku.



Obr.47: DTA analýza standardní zanášky – tampela



Obr.48: DTA analýza kalového odpadu – Vzorek A



Obr.49: DTA analýza kalového odpadu – Vzorek B

7.2.3 Chemický rozbor

Výsledky rentgenové difrakční a diferenčně termické analýzy byly doplněny chemickým rozbohem. Na základě chemického rozboru lze určit podobnost standardní břčky a vláknocementových kalů. Vláknocementový výrobek je tvořen cca z 80 % cementem, proto byly výsledky těchto analýz pro srovnání doplněny o výsledky chemického rozboru používaného cementu. Chemické rozborby byly provedeny akreditovanou zkušební laboratoří LABTECH s.r.o., Brno. Protokoly z chemických rozborů odebraných vzorků kalového odpadu a standardní břčky jsou uvedeny v přílohách č.5 a č.6.

Tab. 8: Porovnání chemického složení standardní břčky, kalového odpadu a cementu

Parametr	Jednotka	Břčka	Kalový odpad	CEM I 42,5 R
Oxid vápenatý (CaO)	% hm.	43,3	41,1	63,6
Oxid křemičitý (SiO ₂)	% hm.	11,8	11,1	19,6
Oxid hlinitý (Al ₂ O ₃)	% hm.	4,2	5,0	4,6
Oxid železitý (Fe ₂ O ₃)	% hm.	2,0	2,5	2,8
Oxid draselný (K ₂ O)	% hm.	2,6	2,2	0,9
Oxid sodný (Na ₂ O)	% hm.	0,3	0,3	0,2
Oxid manganatý (MnO)	% hm.	0,05	0,05	0,08
Oxid hořečnatý (MgO)	% hm.	0,8	0,7	1,3
Sírany (SO ₃) celk.	% hm.	2,6	4,2	3,0
Chrom šestimocný (Cr ⁶⁺)	ppm	0,022	0,015	<0,010
Chrom (Cr)	mg/kg	50,6	74,3	76,6

Na základě provedených XRD, DTA analýz a chemického rozboru lze konstatovat, že se složení kalového odpadu významně neliší od složení standardní břčky. Proto je možné uvažovat o opětovném zpracování tohoto kalového odpadu při standardní výrobě.

7.3 Etapa III. - Výroba zkušebních těles

V tomto oddíle je souhrnně popsán vliv přídavku filtrátu získaného z odebraného kalového odpadu na sledované pevnostní charakteristiky zkušebních těles o rozměrech 40x40x160 mm. Z důvodu problematické výroby malých zkušebních těles vláknocementových výrobků bylo rozhodnuto o testování vlivu přídavku kalů na zkušebních tělesech pro stanovení pevnosti cementu. Simulací výroby zkušebních těles Hatschekovým způsobem je velmi obtížné v malém měřítku zajistit taková tělesa, která by mohla dosahovat odpovídající opakovatelnosti jednotlivých výsledků. Hatschekův způsob výroby je založen na odvodnění zředěné suspenze přes válcová síta. Následně je tento materiál přenášen na plstěnc (nekonečný filtrační pás), který převádí jednotlivé vrstvy na formátový válec. Tento způsob výroby na Hatschekově stroji má přímý vliv na výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti výrobků. Při výrobě malých vzorků dochází k odlišnému způsobu odvodnění a uspořádání jednotlivých vláken, což má zásadní vliv na pevnostní charakteristiky. Z těchto důvodů byl pro výrobu zkušebních těles navržen následující způsob. Z odebraného vláknocementového kalu byl připraven výluh/filtrát, který byl použit jako náhrada záměsové vody pro výrobu zkušebních těles 40x40x160 mm. Zkušební malta byla připravena dle normou stanoveného postupu výroby zkušebních těles, tedy 450±2 g cementu, 1350±5 g normového písku a 225±1 g vody. Na vyrobených trámečcích byly stanoveny pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku dle ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Pevnosti byly stanoveny po 24 hod, 48 hod, 72 hod a 10 dnech.

V rámci této zkoušky byly provedeny také chemické rozborů odebraného filtrátu kalů použitého pro výrobu zkušebních těles a procesní vody používané pro výrobu břecčky v tampele. Chemické rozborů byly provedeny akreditovanou zkušební laboratoří Agrovýzkum Rapotín s.r.o. Protokoly z chemických rozborů vod použitých pro výrobu zkušebních těles jsou uvedeny v přílohách č.9 a č.10.

Níže uvedená tabulka zobrazuje receptury použité pro výrobu zkušebních těles.

Tab. 9: Receptury zkušebních trámečků

Receptura	Standard	Test	Standard	Test	Standard	Test	Standard	Test
	S1_24	T1_24	S1_48	T1_48	S1_72	T1_72	S1_240	T1_240
Vstupní materiál	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Cement CEM I 42,5 R	450	450	450	450	450	450	450	450
Normový písek	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Voda	225	-	225	-	225	-	225	-
Filtrát/Výluh z kalů	-	225	-	225	-	225	-	225
Celkem	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025
40x40x160 [ks]	3	3	3	3	3	3	3	3
Δ 40x40x160 [ks]	24							

7.3.1 Chemický rozbor procesní vody a filtrátu kalů

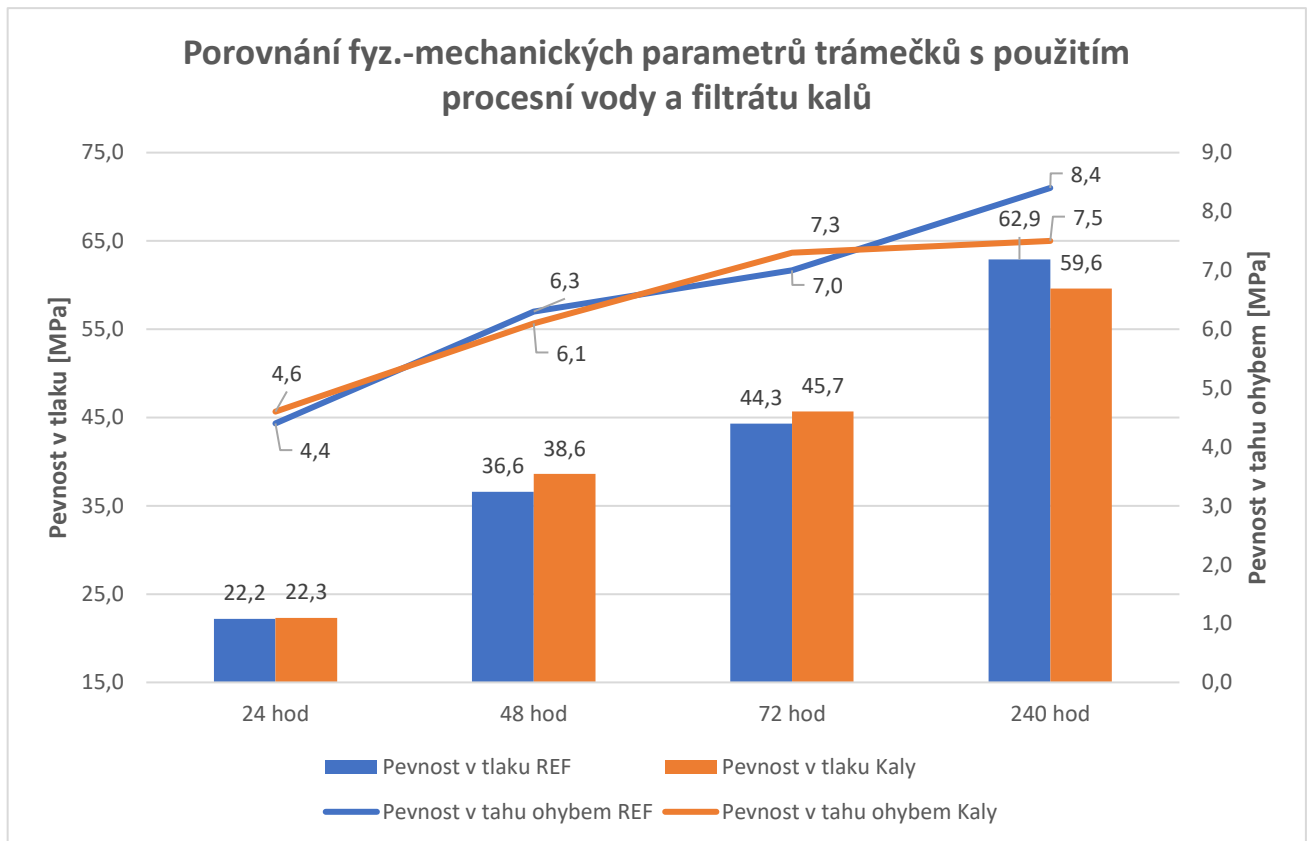
V rámci této etapy byl proveden chemický rozbor odebraného filtrátu kalů a procesní vody používané pro standardní výrobu vláknocementu. Cílem tohoto rozboru bylo prokázání podobnosti procesní vody a filtrátu kalů na základě zastoupení jednotlivých vybraných chemických látek a parametrů. Filtrát z kalů obsahuje zvýšené množství síranů a cca 14 násobně vyšší obsah železa. Zvýšený obsah těchto látek lze přisuzovat činidlům, používaným pro úpravu vody před jejich vypouštěním. Jedním z hlavních parametrů pro vypouštění přebytečné vody do kanalizace je obsah Cr^{6+} , jehož maximální limit je stanoven hodnotou 0,02 mg/l. Aby bylo splněno toto kritérium, je nutné redukovat odpadní přebytečnou vodu. Jako redukční činidlo se používá Fe^{2+} sůl (zelená skalice). Přídavkem zelené skalice dochází k redukci Cr^{6+} za současné oxidace Fe^{2+} na Fe^{3+} . Tím dochází k celkovému zvýšení obsahu Fe. Zvýšený obsah síranů lze vysvětlit přídavkem koncentrované kyseliny sírové k odpadní přebytečné vodě. Kyselina sírová se přidává za účelem snížení hodnoty pH před jejím vypouštěním do kanalizace. Hodnota procesních a odpadních vod se pohybuje okolo pH 12 a před svým vypuštěním musí být okyseleny na neutrální hodnoty. V tabulce č.10 jsou uvedeny výsledné hodnoty vybraných parametrů. Ostatní stanovované parametry jsou uvedeny v přílohách č.9 a 10.

Tab. 10: Porovnání chemického složení filtrátu kalů a procesní vody

Parametr	Jednotka	Filtrát kalů	Procesní voda
Chloridy (Cl^-)	mg/l	622	662
Sírany (SO_4^{2-})	mg/l	4760	3240
Draslík (K)	mg/l	4080	4380
Sodík (Na)	mg/l	438	375
Nerozpuštěné látky	mg/l	203	91
Rozpuštěné látky-sušina (105°C)	mg/l	9960	11800
Rozpuštěné anorganické soli-RAS	mg/l	9420	10800
Železo (Fe)	mg/l	5,42	0,38
Vápník (Ca)	mg/l	669	841
Hořčík (Mg)	mg/l	0,52	0,44
Chrom (Cr)	mg/l	0,037	0,016

7.3.2 Pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku

Pevnost v tahu ohybem byla stanovena třibodovým ohybem na zkušebních tělesech ve tvaru trámce o rozměrech 40x40x160 mm. Pevnost v tlaku byla zkoušena na zlomcích zkušebních těles ve tvaru trámců po provedení pevnosti v tahu ve třibodovém ohybu. Všechny pevnosti byly stanoveny po 24 hod, 48 hod, 72 hod a 10 dnech. Graficky zpracované výsledky jsou uvedeny v souhrnném grafu na obr.50.



Obr.50: Souhrnné grafické vyjádření vlivu náhrady záměsové vody za filtrát z kalů na pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku

Vliv použití filtrátu z kalů místo standardní záměsové vody se u počátečních pevností v rozmezí 1 až 3 dnů neprojevil žádným zásadním poklesem pevností a výsledné hodnoty jsou srovnatelné. Po 48 a 72 hodinách vykazovaly zkušební vzorky s filtrátem z kalů vyšší pevnosti v tlaku o 5,5 % a 3,2 % ve srovnání s referenčním vzorkem. Tento nárůst pevností však nelze přisuzovat použití filtrátu získaného z kalů. Důležitou hodnotou jsou pevnostní charakteristiky zkušované po 10 dnech zrání. V reálném provozu při výrobě vláknocementové střešní krytiny s využitím na vzduchu tuhnoucí technologie jsou u výrobků stanoveny pevnosti po 10 dnech od výroby. Proto byl u zkušebních trámů kladen důraz zejména na 10 denní pevnosti. Pevnost v tlaku po 10 dnech zrání u trámů s kalovým filtrátem poklesla oproti referenčním trámům o 3,3 MPa, což představuje 5,2% pokles pevnosti. U pevnosti v tahu ohybem je pokles pevnosti ještě výraznější a dosahuje snížení oproti referenci o 10,7 %.

7.4 Etapa IV. - Použití kalového odpadu při standardním procesu výroby vláknocementové střešní krytiny

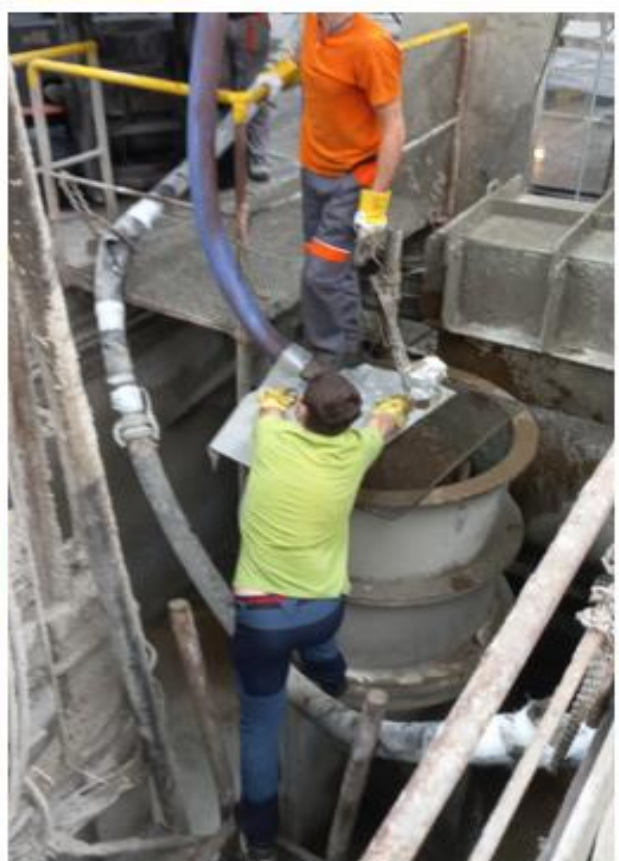
V tomto oddíle je popsán postup odběru vláknocementových kalů, jejich zpracování a samotné použití na výrobním stroji. Důraz je kladen zejména na vyhodnocení fyzikálních parametrů důležitých pro ekonomičnost celého výrobního procesu. Mezi tyto parametry patří zejména podsítné podíly a retence. Další část tohoto oddílu se věnuje také vlivu použití kalového odpadu na možné kolísání tloušťek zelených desek. Použitím kalového odpadu lze předpokládat nárůst zmetkovitosti v podobě jedné z nejméně zastoupených vad a to tzv. tvrdých kousků. Postup použitý při zkušební výrobě s kaly, jehož úkolem bylo zajištění srovnatelné zmetkovitosti se standardní výrobou, je také popsán v kapitole 7.4.5. Na základě vyhodnocení předchozích etap byly navrženy 2 zkušební receptury pro výrobu na výrobním stroji. V první zkušební variantě byly nahrazeny 3 % cementu kalovým odpadem (VAR I) a v druhé variantě byly nahrazeny 3 % vápence kalovým odpadem (VAR II). Obě zkušební varianty byly porovnávány se standardní recepturou používanou na výrobním stroji. V rámci zkušební výroby byl vyráběn výrobek B6 RC 1180 co/ho o délce 1180 mm a šířce 1086 mm. Označení „co/ho“ znamená výrobek s připravenými otvory pro šrouby a uříznutými rohy. Z každé zkušební varianty bylo vyrobeno 60 ks zelených desek, tj. jeden vůz. Z jedné zelené desky jsou následně naformátovány 3 ks finálních výrobků.

Tab. 11: Zkušební receptury použité na výrobním stroji

Surovina	Standard				VAR I – Cement				VAR II – Vápenec			
	Dávka	Dávka	Sušina	Dávka	Dávka	Dávka	Sušina	Dávka	Dávka	Dávka	Sušina	Dávka
	%	kg	%	%	%	kg	%	%	%	kg	%	%
Voda		xxxx				xxxx				xxxx		
Celulóza	xx	xxxx	x	xxx	xx	xxxx	x	xxx	xx	xxxx	x	xxx
Vápenec	xx	xxxx	100	xxx	xx	xxxx	100	xxx	xx - 3	xxxx	100	xxx
Cement	xx	xxxx	100	xxx	xx - 3	xxxx	100	xxx	xx	xxxx	100	xxx
PVA	xx	xxxx	100	xxx	xx	xxxx	100	xxx	xx	xxxx	100	xxx
Kaly	-	-	-	-	3	xxxx	15	xxx	3	xxxx	15	xxx
Celkem	100	xxxx	-	xxx	100	xxxx		xxx	100	xxxx		xxx

7.4.1 Postup odběru kalového odpadu [100]

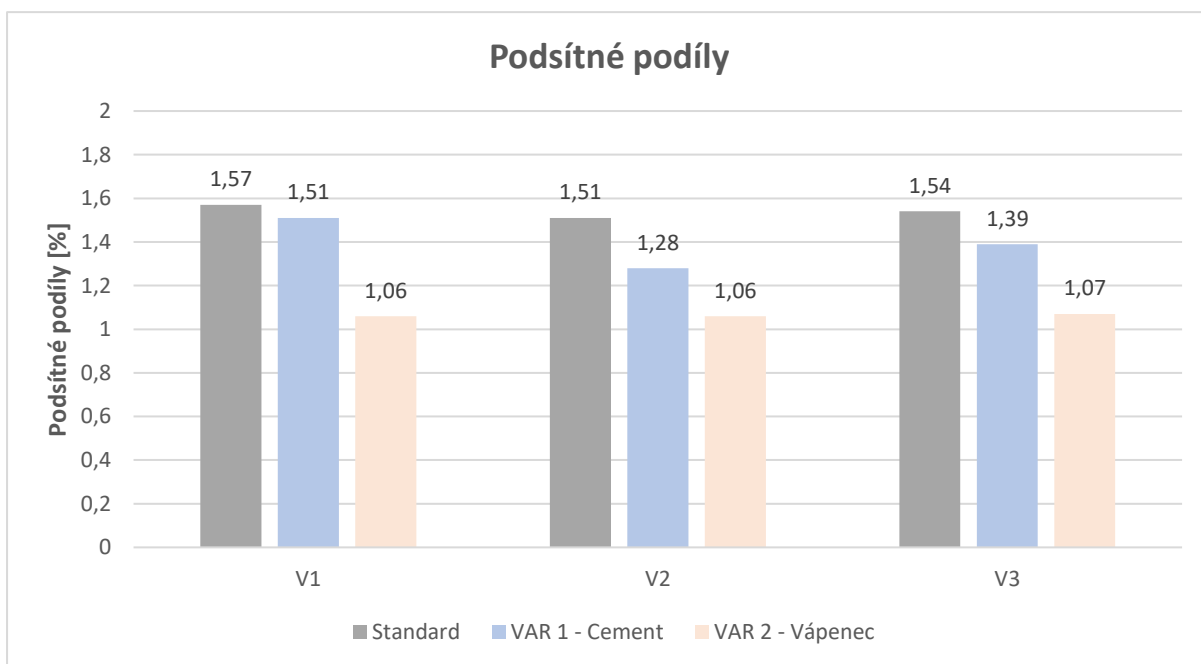
Vláknocementové kaly použité pro zkoušku byly přečerpány z homogenizátoru odvodňovacího stroje do připravených IBC kontejnerů (obr.51). Ihned po přečerpání byly jednotlivé kontejnery s kaly míchány tak, aby byla po celou dobu zkoušky zajištěna jejich homogenita. Z důvodu zajištění stejného obsahu suchých látek v záměsi byly kaly podrobeny kvalitativním zkouškám. Vláknocementový kal je směs jemných podílů, vláken a ostatních složek distribuovaných ve vodě. Kaly byly dávkovány ve formě kapaliny o dané sušině, proto bylo nutné ověřit jejich obsah suchých látek. Na základě těchto hodnot byla provedena korekce receptury tak, aby byl zajištěn stejný obsah suchých látek a vody se standardní recepturou. Z důvodu zvýšené obavy o navýšení zmetkovitosti nebyly kaly dávkovány přímo do tampely. Jejich dávkování proběhlo do rozmělnovače. Místo dávkování kalů je popsáno v kapitole 7.4.5.



Obr.51: Odběr kalů do IBC kontejnerů, jejich míchání a dávkování do rozmělnovače

7.4.2 Podsítné podíly [80]

Jedním z klíčových parametrů pro zajištění stabilního, ekonomického a kontinuálního provozu výroby vláknocementu je dosahování konstantních hodnot podsítných podílů. Standardní podsítné podíly se pohybují v rozmezí hodnot 0,8 – 2,0 %. Podsítnými podíly jsou myšleny všechny pevné částice používané při výrobě, které se dostanou s přepadovou vodou přes otvory ok na sítěch do přebytečné vody. Velikost ok na síťových válciích je 0,4 mm a při výrobě jsou používány materiály s daleko menším průměrem částic. Proto dochází k částečnému průchodu těchto materiálů do odpadní přepadové vody. Množství vyprodukovaného kalového odpadu je přímo závislé na dosahovaných úrovních podsítných podílů. Podsítné podíly jsou obvykle stanovovány pro každou vanu zvlášť, bez ohledu na to, zda se jedná o 3 nebo 4 síťový stroj.

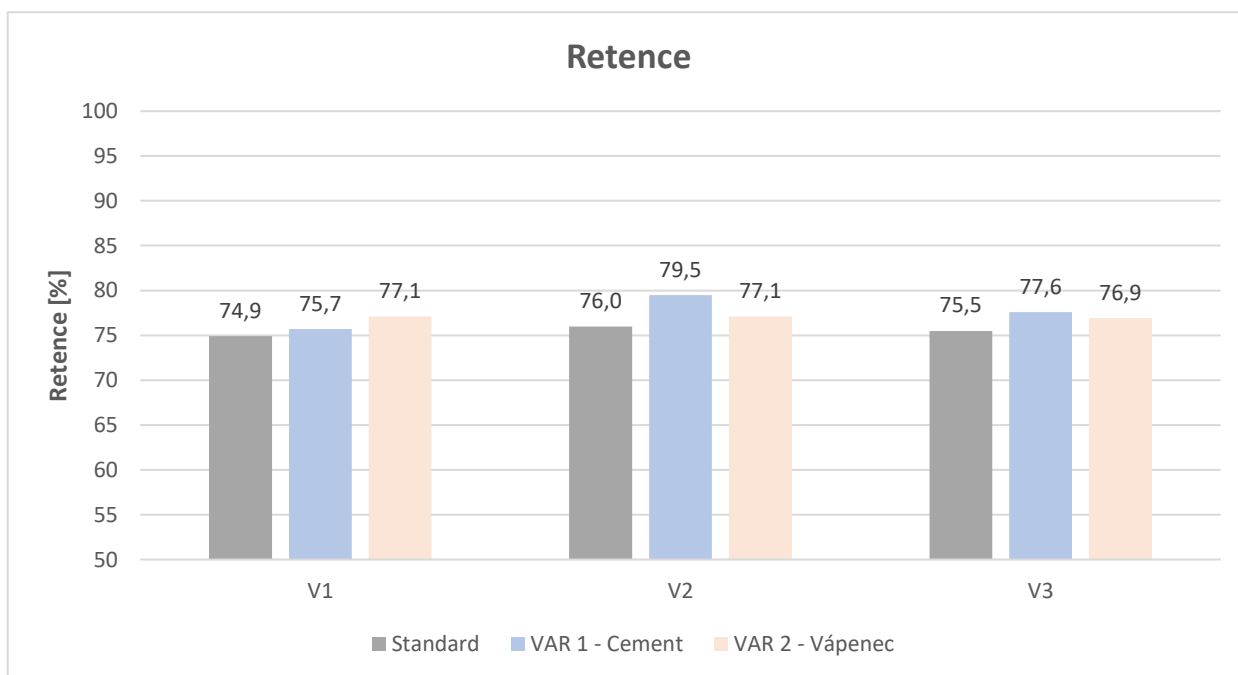


Obr.52: Grafické vyjádření výsledků podsítných podílů jednotlivých zkušebních variant

Z grafického vyjádření výsledků je patrné, že nejnižších hodnot podsítných podílů bylo dosaženo u zkušební varianty s náhradou 3 % vápence vláknocementovými kaly. Při porovnání se standardní variantou představuje tento rozdíl téměř 30 %. Tento rozdíl je nad očekávání výrazný a lze ho vysvětlit nižším obsahem vápence v záměsi. Vápenec je v tomto případě reprezentován nejmenšími částicemi ze všech ostatních materiálů. Jeho měrný povrch se pohybuje v rozmezí hodnot 5600 – 6000 cm²/g. V porovnání s cementem, u kterého se měrné povrchy pohybují v rozmezí hodnot 3600 – 4000 cm²/g, je to významný rozdíl. Snížení množství nejjemnějších podílů v záměsi reprezentovanými vápencem s největší pravděpodobností ovlivnilo výsledné hodnoty podsítných podílů. Snížení podsítných podílů bylo dosaženo i u zkušební varianty s náhradou cementu. V tomto případě však tento rozdíl není tak výrazný.

7.4.3 Retence [81]

Stanovení retence provozní břečky je dalším důležitým ukazatelem při hodnocení vláknocementové výroby. Retence jsou opět stanovovány pro každou výrobní vanu zvlášť a jejich hodnoty by měly odpovídat výsledkům podsítných podílů. To znamená, že při dosažení nižších podsítných podílů lze očekávat vyšší retence. Hodnota retencí slouží také k určování dávkovaného množství retenčního prostředku. Jako retenční prostředek je pro výrobu vláknocementu v tomto případě používán syntetický, anionaktivní flokulant na bázi polyakrylamidu. Flokulant je do jednotlivých van výrobního stroje dávkován ve formě silně zředěného roztoku a jeho dávkované množství je pravidelně monitorováno. Bez tohoto prostředku není možné dosahovat nízkých podsítných podílů a požadovaných retencí. Jednotlivé částice materiálů používaných pro výrobu mají menší průměr než je velikost ok na síťových válcích. Hlavním úkolem flokulantu je tyto částice shlukovat do větších aglomerátů, které jsou poté zachyceny na povrchu síta a dále převedeny na nekonečný plstěnc. Hodnoty retencí nejsou ovlivňovány pouze množstvím a typem dávkovaného retenčního prostředku. Na retence má významný vliv také proudění břečky v síťových vanách. Promíchávání provozní břečky v každé výrobní vaně je prováděno pomocí tzv. hašplí. Nastavením rychlosti a směru otáčení jednotlivých hašplí lze významným způsobem ovlivnit nejen retence, ale také směr a orientaci vláken ve směsi. V tomto případě byly u všech zkušebních variant dodrženy stejné otáčky hašplí a konstantní dávka flokulantu dávkovaného do jednotlivých van.



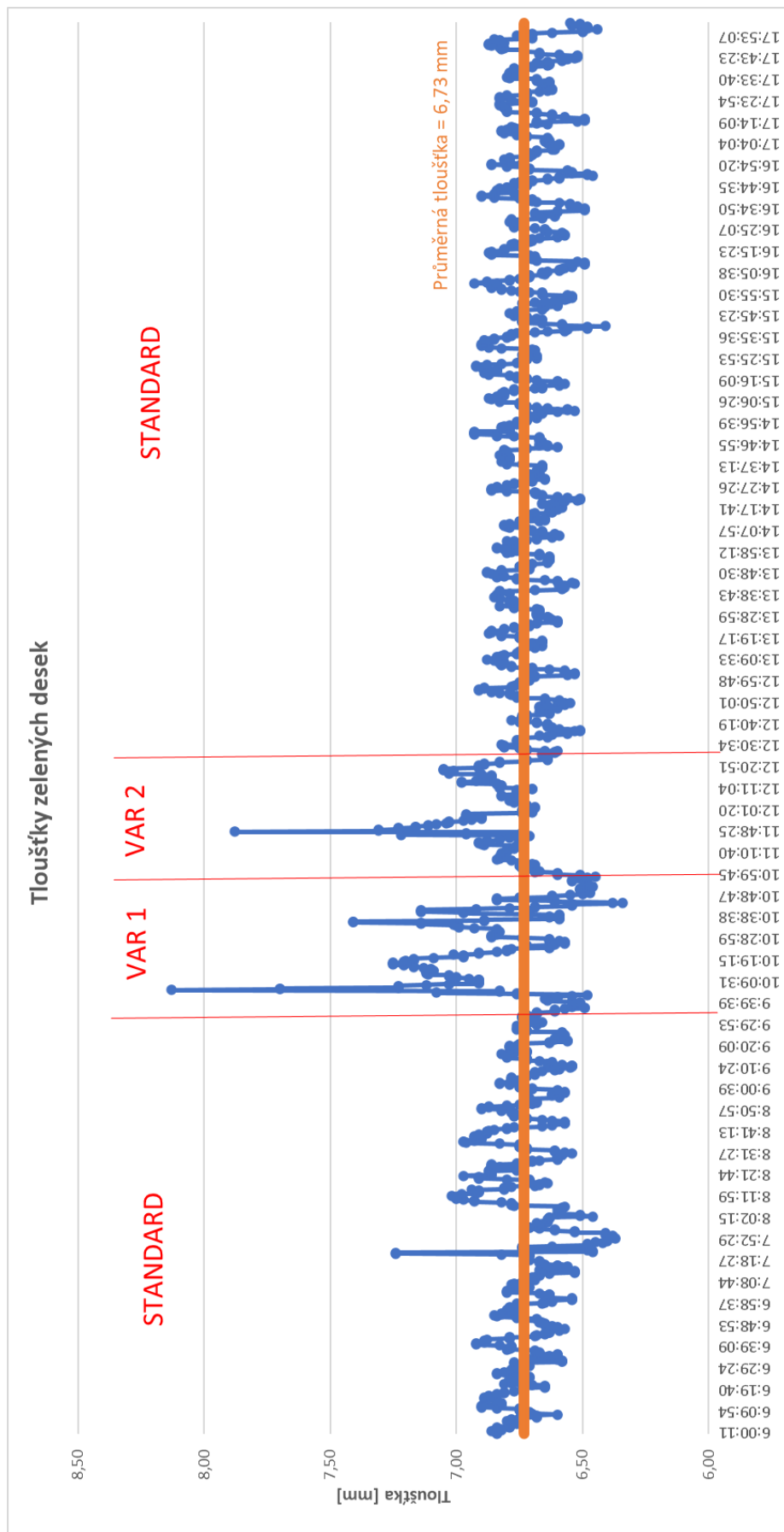
Obr.53: Grafické vyjádření výsledků retencí jednotlivých zkušebních variant

Na základě výsledků podsítných podílů byly očekávány největší hodnoty retencí u zkušební varianty s 3% náhradou kalů za vápenec. Tento předpoklad byl však potvrzen pouze u první vany. Výsledné hodnoty retencí u výrobních van 2 a 3 zcela nekorespondují s výsledky podsítných podílů. Pro stanovení stabilních hodnot retencí je však potřeba delšího a ustáleného provozu výrobního stroje, který však při krátké zkoušce nelze zajistit.

7.4.4 Tloušťka zelené desky [82]

Během výroby jsou pravidelně monitorovány tloušťky zelených desek před lisováním i po lisování. Nominální tloušťka finálního výrobku je 6 mm. Odchylka daná normou EN 494 povoluje $\pm 10\%$ odchylku. V praxi to znamená, že se tloušťka výrobku může pohybovat v rozmezí hodnot od 5,4 do 6,6 mm. Udržování stabilní tloušťky výrobků při zachování požadovaných fyz.-mechanických parametrech je důležitým ekonomickým ukazatelem celé výroby. Měření tloušťky zelených desek před lisováním probíhá na odtahovém páse po odvinutí desky z formátového válce. Během stání odtahového pásu je tloušťka zelené desky měřena laserem. Při standardní výrobě pracuje systém měření tloušťky desek v součinnosti s navazující regulací tloušťky desek. Systém sleduje a archivuje data ze snímání tloušťky a porovnává aktuální hodnotu s hodnotou požadované tloušťky. V případě odchylky provádí korekci. Regulačním prvkem je v tomto případě změna litrové hmotnosti směsi v homogenizátoru a následně změna tloušťky. Změna litrové hmotnosti se provádí změnou množství surovinové směsi dávkované z míchačky nebo změnou otevření regulačního ventilu řídící vratné technologické vody. Všechna data o tloušťkách jednotlivých zelených desek jsou pravidelně vyhodnocována a archivována. Na obr. 54 je uvedeno grafické vyhodnocení tloušťky zelených desek v průběhu zkoušky s náhradou cementu a vápence kalovým odpadem.

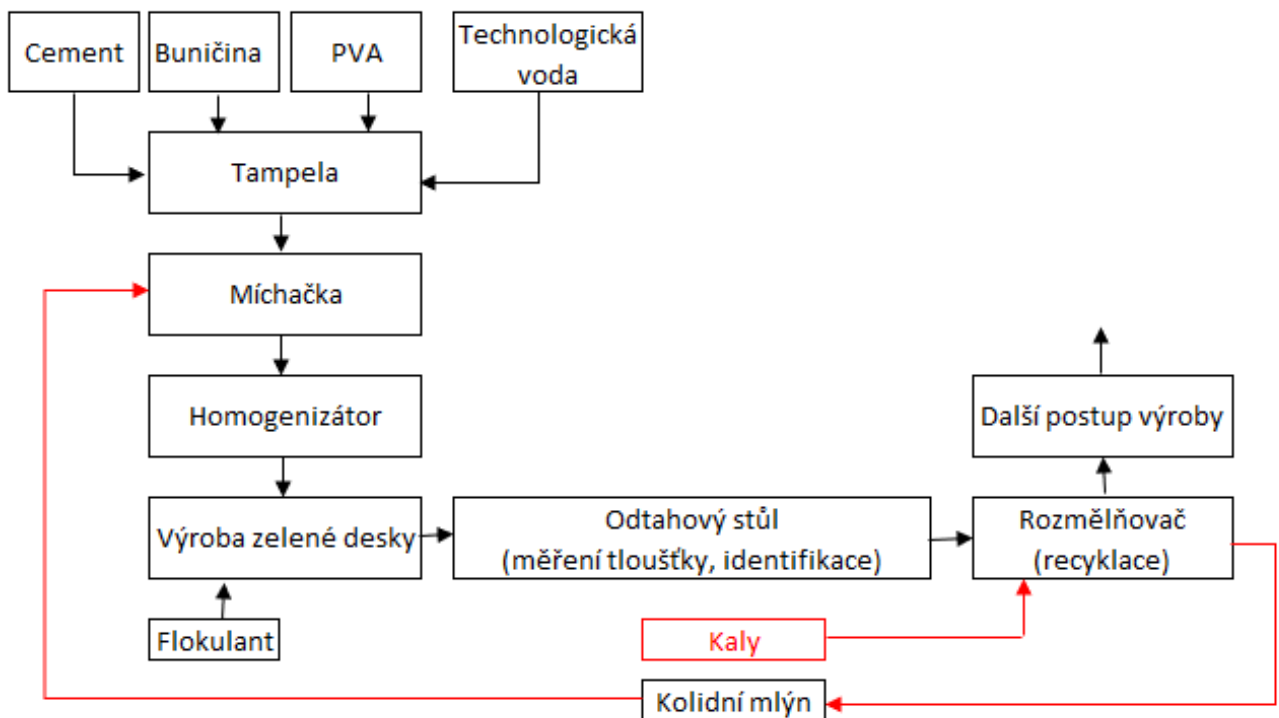
Z grafického vyjádření výsledků tlouštěk zelených desek je zřejmé, že změnou receptury s využitím kalů došlo k výraznému rozkolísání stabilně udržovaných hodnot tlouštěk. Z naměřených hodnot je patrné, že mezi jednotlivými zkušebními variantami nejsou žádné zásadní odlišnosti. Změna tloušťky zelené desky u zkušebních variant však není způsobena pouze přidáním kalů do surovinové směsi, ale jejich způsobem zpracování. Zkušební receptury s náhradou cementu a vápence vláknocementovými kaly byly připravovány v jiném režimu, než standardní výroba. Standardní výroba probíhala při kontinuálním provozu bez prostojů. V běžném režimu výroby je provozní břečka kontinuálně přečerpávána z tampely do míchačky, následně do homogenizátoru a z homogenizátoru je směs čerpána přímo do van výrobního stroje. U všech provozních nádob je v průběhu výroby udržována konstantní hladina břečky s plynulým přečerpáváním do navazujících procesů. Začátek míchání surovin v tampele a počátek přečerpávání do míchačky a homogenizátoru je závislí na úrovni hladiny břečky v navazující provozní nádobě. Z tohoto důvodu lze u standardní výroby pozorovat stabilní hodnoty tlouštěk zelených desek s minimální odchylkou od průměrné hodnoty. U zkušebních variant nebyly kaly přidávány do tampely, ale do rozmělnovače. Následně byly přečerpány do míchačky průchodem přes koloidní mlýn. Samotné dávkování kalů do rozmělnovače a jejich následné přepouštění trvalo déle, než běžný cyklus při standardní výrobě. Z tohoto důvodu nelze přisuzovat kolísání tloušťky zelených desek pouze samotnému použití kalů, ale také prostojům na lince způsobených jejím zpracováním.



Obr.54: Grafické vyjádření tloušťky zelených desek v průběhu zkoušky

7.4.5 Zmetkovitost

Jedním z nejvíce zastoupených defektů při výrobě vláknocementu jsou tzv. tvrdé kousky. Jedná se o zatvrdlé části cementu s vlákny, které se mohou dostat až na povrch finálního výrobku, kde po zalisování narušují kompaktní strukturu povrchu výrobku. Velmi často jsou tyto tvrdé kousky ohraničeny prasklinami, přes které může procházet voda do materiálu a tím dochází ke snížení životnosti celého výrobku. Proto musí být finální desky obsahující tyto defekty vyřazeny do zmetků. Ze všech druhů defektů představují tvrdé kousky cca dvě třetiny. V kalovém odpadu lze očekávat zvýšené množství těchto tvrdých kousků. Proto byl pro použití kalů navržen jiný způsob jejich zpracování, který spočíval v jejich odlišném místě dávkování. Defektní surové desky a zbytky vystríženého materiálu jsou dopravovány do shredderu. Materiál se ve shredderu nejdříve „natrhá“ na větší kusy a ty jsou pomocí dopravních pásů přemístěny do rozmělnovače. Rozmělnovač je nádrž opatřená míchadlem, kde s přidávkem technologické vody dochází k naředění rozmělněného materiálu na hustotu odpovídající břečce v míchačce. Rozmělněný materiál je přečerpán do míchačky průchodem přes koloidní mlýn, který zajistí rozmělnění a podrcení případných defektních tvrdých kousků materiálu. Koloidní mlýn je zařízení určené k mokrému mletí, dispergování a emulgaci materiálů. K rozmělnění částecek dochází působením střížných, tlačných a třecích sil v mlecí šterbině klínového tvaru vytvořené mezi statorem a rotorem. Z důvodu zajištění eliminace zvýšeného množství tvrdých kousků při provozní zkoušce byly odebrané kaly dávkovány do rozmělnovače. Následně byly kaly přečerpány do míchačky průchodem přes koloidní mlýn. Tímto způsobem bylo zajištěno stejné úroveň zmetkovitosti jako při standardní výrobě. Na obr. 55 je uvedeno zjednodušené schéma dávkování kalů.



Obr.55: Zjednodušené schéma dávkování kalů [autor]



Obr.56: Povrch vylisovaných výrobků: vlevo – kalový odpad, vpravo – standardní břecha [autor]

Na obr. 56 je patrné, že po přidavku kalového odpadu nedošlo ke změně vzhledu finálního výrobku. Jednou z největších obav při použití kalového odpadu je tvorba tvrdých kousků. Proto byl při řešení disertační práce navržen speciální postup dávkování kalového odpadu, který zajistil eliminaci vzniku tvrdých kousků. Tento navržený postup bude využíván i při budoucím zpracování kalového odpadu. Na základě vizuální kontroly jednotlivých výrobků se tento postup ukázal jako správný, protože na vyrobených deskách nebyly zjištěny žádné desky s tvrdými kousky.

7.5 Etapa V. – Stanovení fyzikálně-mechanických a trvanlivostních parametrů na finálním výrobku s využitím kalového odpadu

Hlavním cílem této etapy bylo porovnání dosažených fyzikálně-mechanických a trvanlivostních parametrů finálních výrobků s kalovým odpadem a standardních výrobků. Navržené testy byly rozděleny do dvou skupin podle zjišťovaného parametru výrobku. Mezi přijímací zkoušky prováděné u každé výrobní směny patří zejména pevnostní charakteristiky, objemová hmotnost a geometrie jednotlivých výrobků. U pevnostních charakteristik jsou minimální mechanické požadavky charakterizovány normou EN 494 [68], která stanovuje jejich hodnoty pro daný typ vlnitých desek. V případě této zkušební výroby s využitím kalového odpadu byly vyráběny výrobky B6 1180 co/ho, které jsou zařazeny do kategorie výrobků C1X. Označení C znamená výšku vlny, jejíž hodnota je stanovena v rozmezí 40 – 80 mm. Označení číslicí 1 znamená třídu pevnosti, pro niž je stanoveno nejmenší zatížení na mezi pevnosti 4250 N/m. Konečné označení X určuje třídu ohybového momentu, která musí v tomto případě splňovat minimální požadavek 55 Nm/m. Stejně tak maximální povolené odchylky od geometrických parametrů jsou stanoveny normou EN 494 [68]. Délky jednotlivých výrobků musí dosahovat hodnot ± 10 mm a šířka výrobku musí splňovat parametry +10 mm a -5 mm. Minimální hodnoty objemových hmotností jednotlivých výrobků jsou stanoveny pouze výrobcem a jejich limity nejsou specifikovány normou EN 494 [68]. Pro výrobky vyrobené v rámci zkušební výroby s vláknocementovými kaly je stanovena minimální objemová hmotnost $1,60 \text{ g/cm}^3$.

7.5.1 Vizuální porovnání [77]

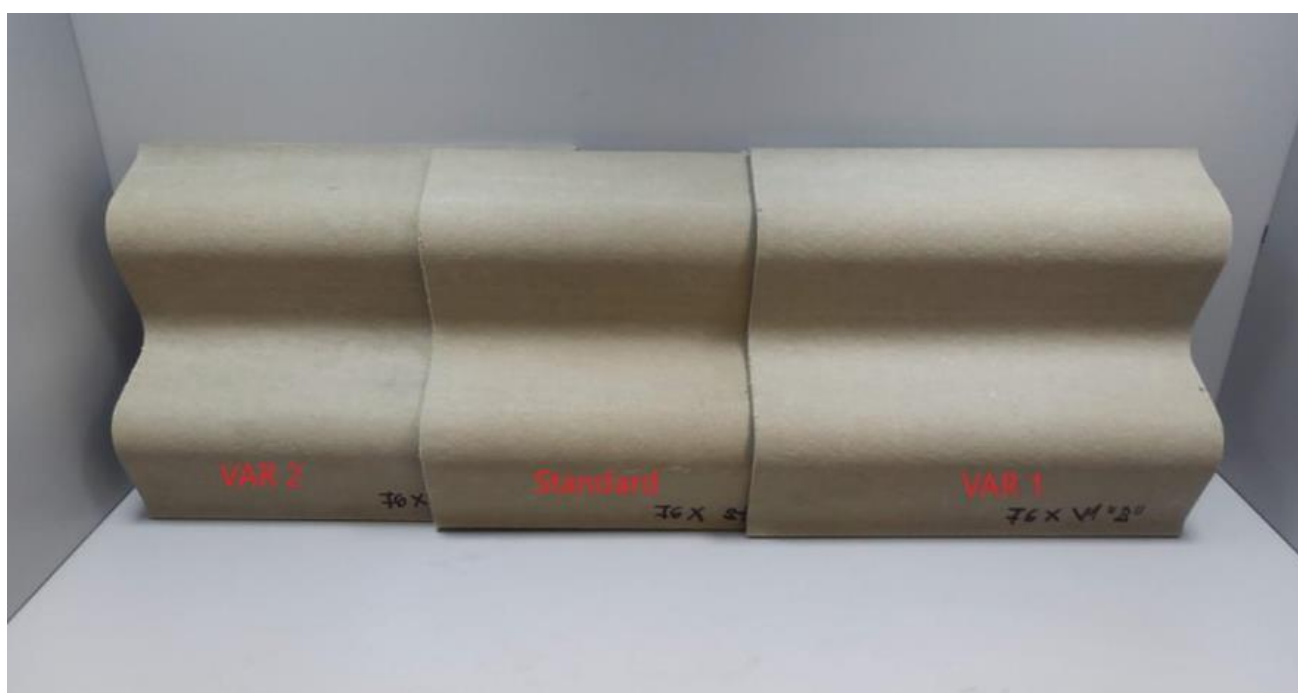
Z důvodu obavy změny odstínu finálního výrobku byly vyrobené vláknocementové desky s kalovým odpadem vizuálně porovnány se standardní výrobou. Většina sortimentu je určena k barvení, ale cca 25 – 30 % produkce je určena k prodeji jako nebarvená. V předchozí kapitole 7.1.5 je uvedeno souhrnné foto barevného porovnání analyzovaných vzorků kalového odpadu. Cílem vizuálního porovnání bylo zjištění možných odchylek v barevnosti finálního výrobku při využití 3% náhrady kalového odpadu. Vizuální porovnání finálních výrobků bylo doplněno také měřením koloristických hodnot spektrálním přístrojem. Výsledné koloristické hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.9.

Tab. 12: Koloristické hodnoty zkušebních variant

	Standard	VAR 1 - Cement	VAR 2 - Vápenec
L	60,07	59,88	60,71
a	0,22	-0,05	0,17
b	8,01	7,21	7,37



Obr.57: Vizuální porovnání finálních výrobků



Obr.58: Vizuální porovnání odstínu zkušebních variant ve světelném boxu při standardním osvětlení D65

Výsledky vizuálního porovnání jednotlivých zkušebních variant neukazují žádné zásadní odlišnosti v barevnosti finálních výrobků, které by bylo možné rozeznat pouhých okem. Stejně tak výsledné koloristické hodnoty získané spektrálním přístrojem nedosahují zásadních rozdílů. Použitím kalového odpadu pro výrobu vlnité vláknocementové krytiny v tomto případě nevedlo ke změně finálního vzhledu výrobku.

7.5.2 Fyzikálně-mechanické parametry

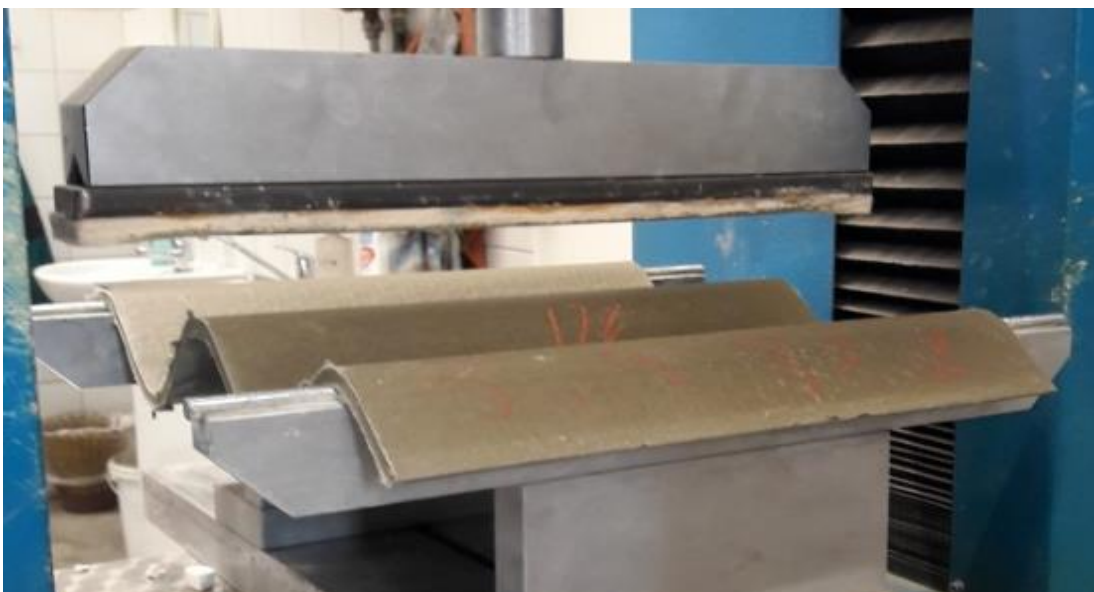
7.5.2.1 Pevnostní charakteristiky [84], [85]

Mezi stanovované pevnostní charakteristiky patří zkoušky zatížení na mezi pevnosti a zkouška ohybového momentu. Před zkouškou pevnostních charakteristik byly zkušební vzorky kondicionovány ponořením ve vodě po dobu 24 hodin. Pro stanovení zatížení na mezi pevnosti (únosnost) [84] byly použity celé vláknocementové vlnité desky. Zkoušené desky byly umístěny na dvojici podpěr a byly vycentrovány v podélném i příčném směru tak, aby byl střed příčnicku nad středem zkoušeného vzorku. Zatížení příčnicku bylo zvyšováno tak, aby k porušení vzorku došlo mezi 10 s a 45 s od počátku zatěžování.



Obr.59: Zkouška zatížení na mezi pevnosti [autor]

Pro zkoušku ohybového momentu [85] byly zkušební vzorky připraveny výřezem z celých vláknocementových desek. Zkušební těleso musí dosahovat délky alespoň 0,3 m a musí být z celé desky vyříznuto tak, aby neobsahovalo krajní vlny. Poté byly jednotlivé vzorky umístěny rovnoběžně s podpěrami a vycentrovány. Zatížení příčnicku bylo zvyšováno tak, aby k porušení vzorku došlo mezi 10 s a 30 s od počátku zatěžování.

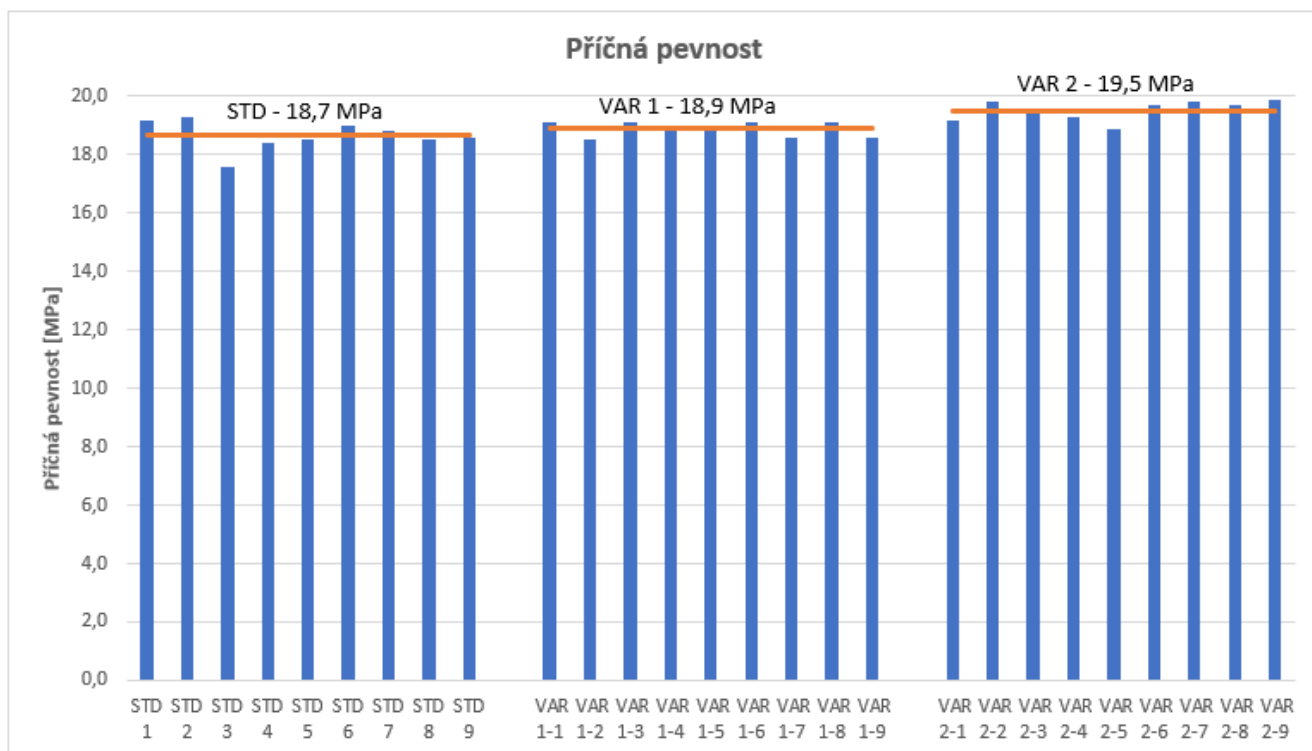


Obr.60: Zkouška ohybového momentu [autor]

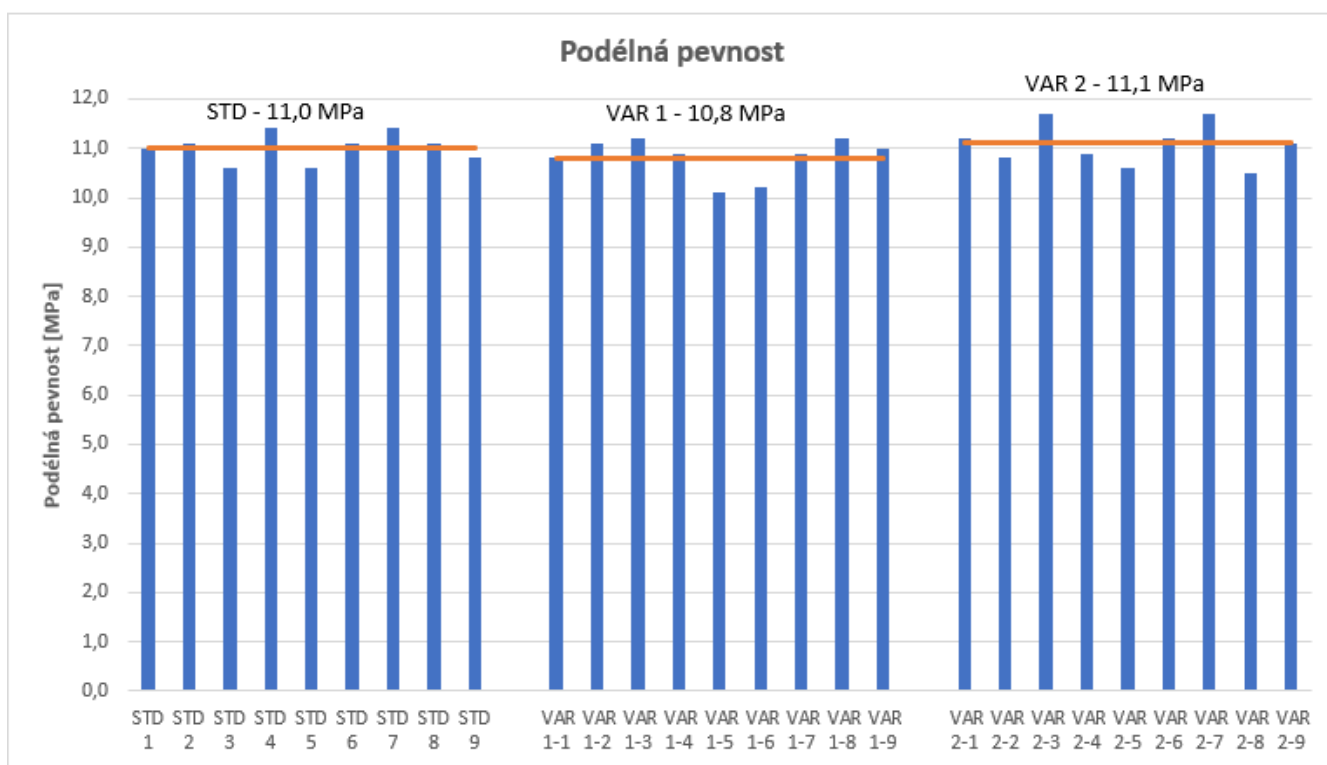
Z každé zkušební varianty bylo vybráno a následně podrobena zkouškám zatížení na mezi pevnosti a ohybovému momentu celkem 9 ks vlnovek. Hodnoty získané při fyzikálně-mechanických zkouškách byly následně použity pro výpočet podélné a příčné pevnosti. Na základě těchto hodnot byla získána hodnota poměru příčné a podélné pevnosti, tzv. Aspect ratio. V tabulce číslo 13 jsou uvedeny výsledné hodnoty příčných a podélných pevností jednotlivých variant. Finální hodnoty pevností jsou uvedeny i v grafickém zpracování.

Tab. 13: Výsledné hodnoty pevnostních charakteristik

Vzorek	Zatížení na mezi pevnosti [84]			Ohybový moment [85]			Aspect ratio
	Tloušťka	Únosnost	Příčná pevnost	Tloušťka	Ohybový moment	Podélná pevnost	Příčná/Podélná
	[mm]	[kN/m]	[MPa]	[mm]	[Nm/m]	[MPa]	[-]
STD 1	6,2	5,19	19,2	5,9	63,8	11,0	1,75
STD 2	6,0	5,06	19,3	5,8	62,3	11,1	1,74
STD 3	5,9	4,55	17,6	5,8	59,6	10,6	1,66
STD 4	5,9	4,76	18,4	5,8	63,8	11,4	1,61
STD 5	6,3	5,07	18,5	5,8	59,5	10,6	1,75
STD 6	5,6	4,66	19,0	5,7	60,2	11,1	1,71
STD 7	6,0	4,91	18,8	5,8	64,0	11,4	1,65
STD 8	6,2	5,01	18,5	5,9	64,5	11,1	1,67
STD 9	6,0	4,86	18,6	5,9	62,8	10,8	1,72
STD Průměr	6,0	4,90	18,7	5,8	62,3	11,0	1,69
VAR 1-1	6,1	5,09	19,1	6,2	68,9	10,8	1,77
VAR 1-2	6,1	4,93	18,5	6,1	68,6	11,1	1,67
VAR 1-3	6,1	5,07	19,1	6,0	67,4	11,2	1,71
VAR 1-4	6,0	4,94	18,9	6,1	67,4	10,9	1,73
VAR 1-5	6,0	4,96	18,9	6,0	60,6	10,1	1,87
VAR 1-6	6,0	5,00	19,1	6,0	61,4	10,2	1,87
VAR 1-7	6,1	4,95	18,6	6,0	65,3	10,9	1,71
VAR 1-8	6,0	5,00	19,1	6,1	69,3	11,2	1,71
VAR 1-9	6,2	5,02	18,6	6,1	68,5	11,0	1,69
VAR 1 Průměr	6,1	5,00	18,9	6,1	66,4	10,8	1,75
VAR 2-1	6,2	5,18	19,2	6,0	67,1	11,2	1,71
VAR 2-2	6,1	5,25	19,8	6,1	64,6	10,8	1,83
VAR 2-3	6,1	5,17	19,4	6,1	62,9	11,7	1,66
VAR 2-4	6,1	5,14	19,3	6,1	60,6	10,9	1,77
VAR 2-5	6,1	5,03	18,9	6,0	65,1	10,6	1,78
VAR 2-6	6,1	5,25	19,7	6,0	61,4	11,2	1,76
VAR 2-7	6,3	5,41	19,8	6,0	60,0	11,7	1,69
VAR 2-8	6,2	5,31	19,7	6,1	61,6	10,5	1,88
VAR 2-9	6,1	5,30	19,9	6,1	64	11,1	1,79
VAR 2 Průměr	6,1	5,23	19,5	6,1	63,0	11,1	1,76



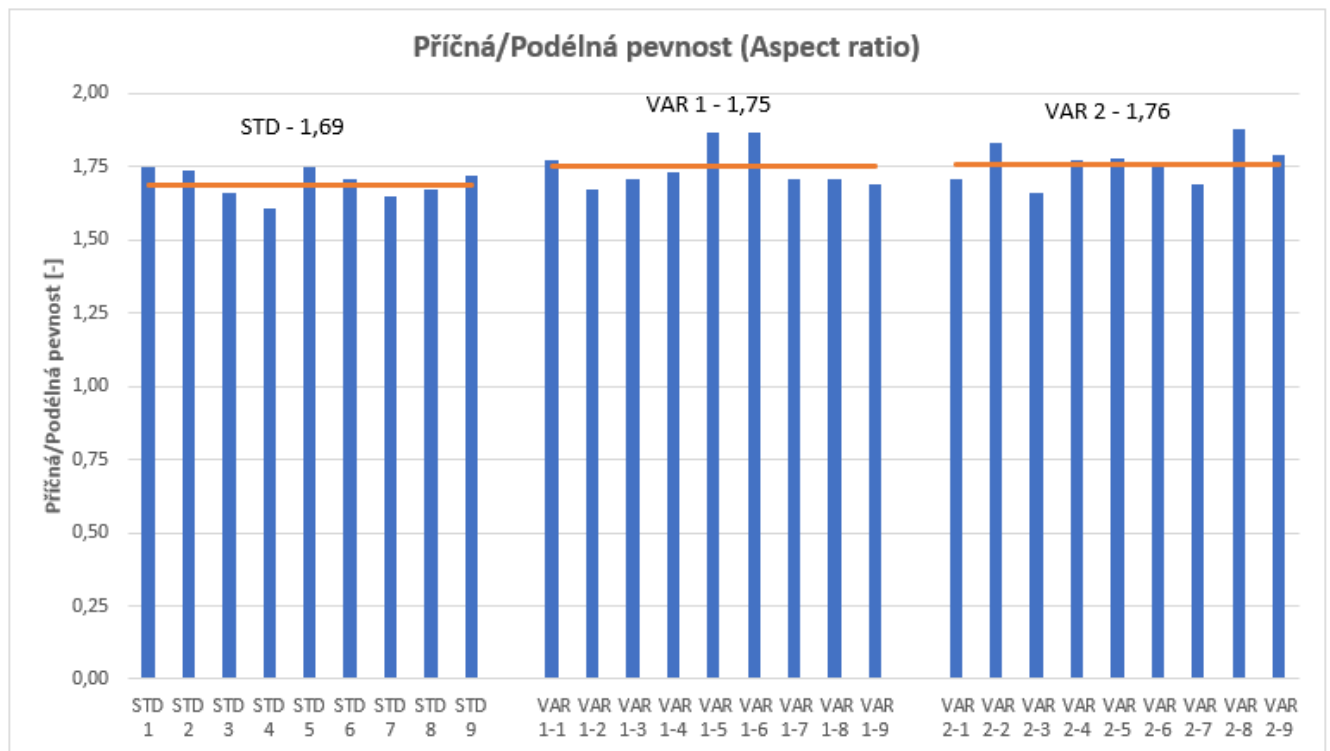
Obr.61: Grafické vyjádření výsledků příčných pevností jednotlivých zkušebních variant



Obr.62: Grafické vyjádření výsledků podélných pevností jednotlivých zkušebních variant

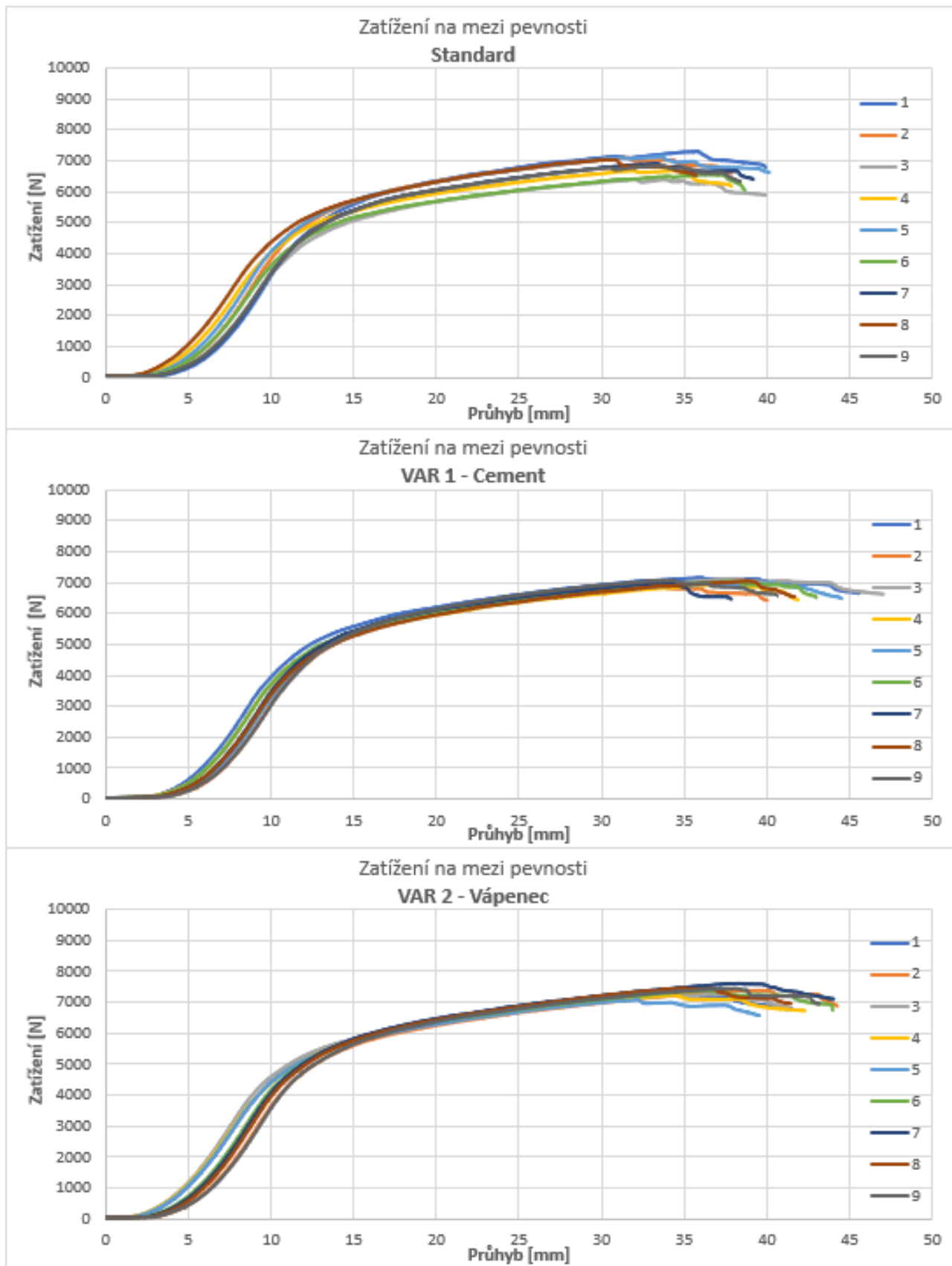
U příčných pevností nedošlo k poklesu ani u jedné zkušební varianty s náhradou vstupních surovin kalovým odpadem. U obou zkušebních variant byl zaznamenán dokonce mírný nárůst příčných pevností. Varianta 1 s náhradou cementu kalovým odpadem získala nárůst průměrné příčné pevnosti o 1,1 %. Varianta 2 s náhradou vápence kalovým odpadem získala nárůst příčné pevnosti o 4,3 % při porovnání se standardem. U všech testovaných vzorků byla zjištěna taková hodnota únosnosti, která splňuje minimální normativní požadavky pro tyto výrobky. Obecně lze tedy říci, že 3% náhradou vstupních surovin odpadními kaly nedošlo k zásadnímu poklesu příčné pevnosti jednotlivých vzorků.

Výsledné hodnoty průměrných podélných pevností jednotlivých zkušebních variant nevykazují žádný zásadní pokles při porovnání se standardní variantou. U varianty 1 s náhradou cementu kalovým odpadem byla získána nejnižší průměrná hodnota podélné pevnosti. Tato hodnota je však s největší pravděpodobností ovlivněna nižšími hodnotami podélných pevností u vzorků 5 a 6. Pozitivním zjištěním je fakt, že snížením množství původních vstupních surovin a jejich náhradou kalovým odpadem nedošlo k významnému snížení finálních podélných pevností. A to dokonce ani u varianty s náhradou cementu. Při pohledu do tabulky výsledných hodnot pevnostních charakteristik lze vidět dosažené hodnoty ohybových momentů, které splňují u všech zkušebních variant minimální normativní požadavky 55 Nm/m. Náhradou vstupních surovin kalovým odpadem nebylo prokázáno zásadní snížení podélných pevností.

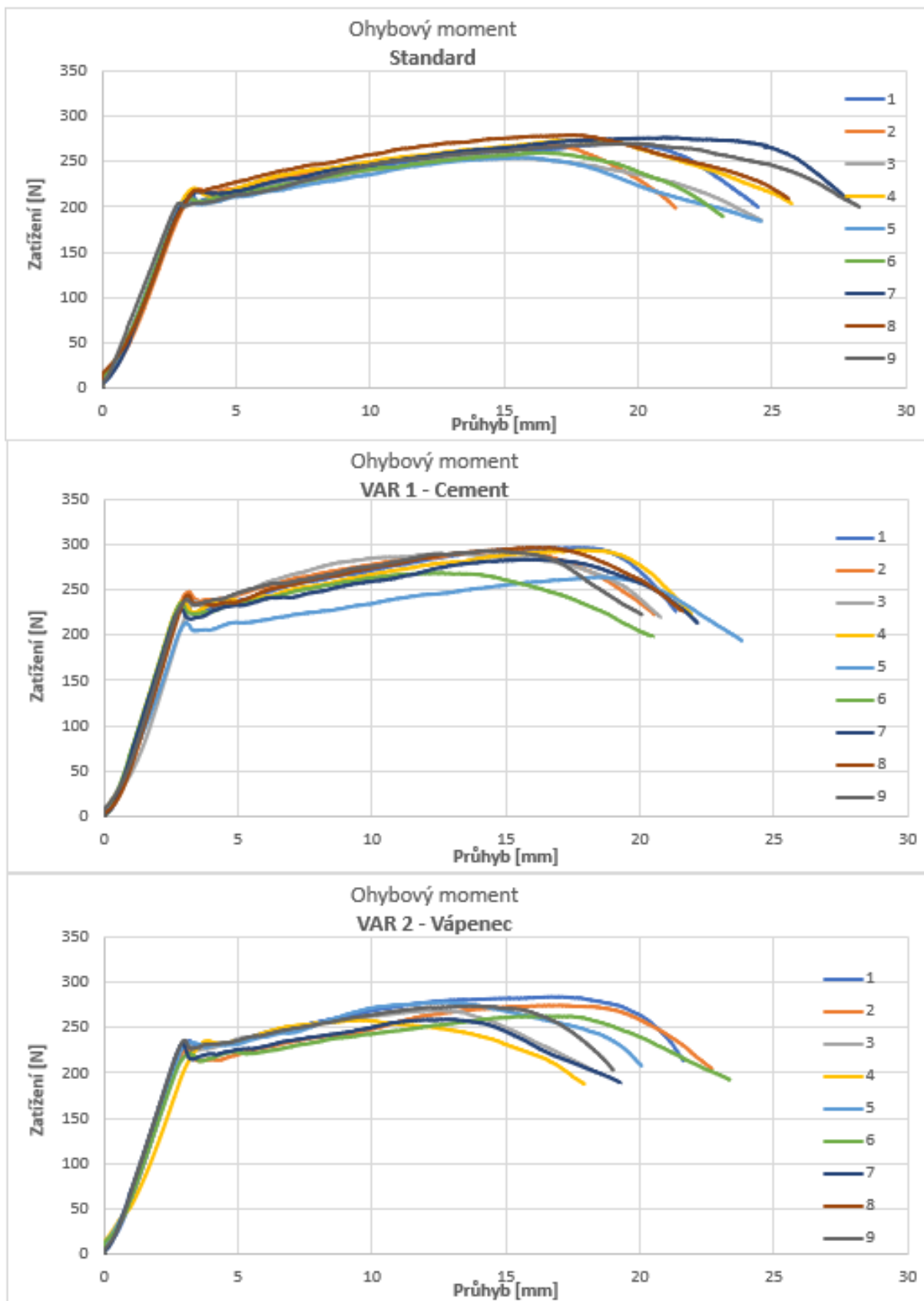


Obr.63: Grafické vyjádření výsledků Aspect ratio jednotlivých zkušebních variant

Na obr.63 je uvedeno grafické vyjádření výsledků poměru příčné a podélné pevnosti, tzv. Aspect ratio. U velkoformátových dílců, mezi které patří i vláknocementové vlnité desky, je obvykle stanovován i poměr mezi příčnou a podélnou pevností. U vláknocementu je tento parametr pravidelně stanovován a lze pomocí něho určit orientaci výztužných vláken v matrici. Pevností charakteristiky vláknocementu nejsou dány pouze pevností cementové matrice, ale také působením vláken. Důležitý není pouze směr a orientace vláken, ale také jejich dispergovatelnost a rozptýlení v matrici. Z tohoto důvodu patří tento parametr mezi klíčové při vyhodnocení pevnostních charakteristik vláknocementových výrobků. Při porovnání výsledných hodnot tohoto parametru se standardem lze u obou zkušebních variant pozorovat velmi podobné hodnoty Aspect ratio. Chování výztužných vláken v matrici lze popsat pomocí zatěžovacích grafů získaných při stanovení pevností.



Obr.64: Grafické vyjádření zatížení na mezi pevnosti jednotlivých variant



Obr.65: Grafické vyjádření ohybového momentu jednotlivých variant

7.5.2.2 Objemová hmotnost [83]

Stanovení objemové hmotnosti patří mezi přejímací parametry pro každou výrobní směnu a společně s tloušťkami finálních výrobků hraje důležitou roli při vyhodnocování spotřeb vstupních surovin. Každý výrobce deklaruje minimální objemovou hmotnost, kterou musí splňovat všechny výrobky. Vlákno-cementové vlnité desky jsou vyráběny lisované nebo nelisované. Minimální hodnota objemové hmotnosti u nelisovaného sortimentu je $1,40 \text{ g/cm}^3$ a u lisovaných vlnovek $1,60 \text{ g/cm}^3$. V případě zkušební výroby s kalovým odpadem byly vyráběny lisované desky. Objemová hmotnost zkušebních vzorků byla stanovena hydrostatickým vážením. Nejdříve byla z celých desek vyřezána zkušební tělesa o délce minimálně 40 mm a šířce jedné celé vlny. Poté byly zkušební vzorky namočené do vody po dobu 24 hod. Po 24 hod byly zkušební vzorky vyjmuty z namáčecí lázně a zváženy ve vodě, na vzduchu a po vysušení do konstantní hmotnosti v peci při teplotě 105°C . Výsledná objemová hmotnost byla stanovena dle vztahu.

$$d = \rho \times \frac{m_S}{(m_V - m_H)}$$

Kde:

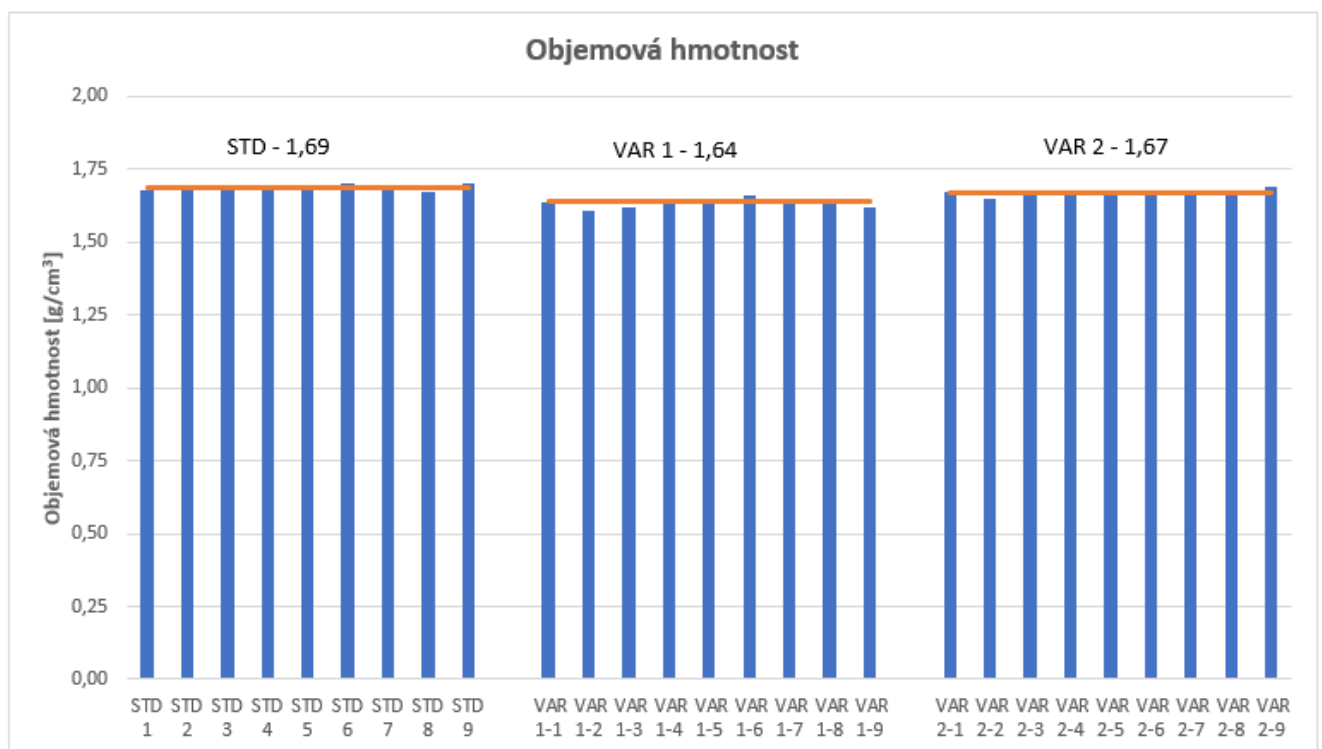
d – objemová hmotnost vzorku [g/cm^3]

ρ – hustota vody [g/cm^3]

m_S – hmotnost vysušeného vzorku [g]

m_V – hmotnost nasáklého vzorku váženého na vzduchu [g]

m_H – hmotnost nasáklého vzorku váženého ve vodě [g].



Obr.66: Grafické vyjádření výsledků objemových hmotností jednotlivých zkušebních variant

Stanovené objemové hmotnosti u obou zkušebních variant jsou nepatrně nižší, než u standardní varianty. V případě varianty s náhradou cementu tento pokles představuje 3 %. Obě zkušební varianty však splňují minimální požadavky objemových hmotností pro tento sortiment. Z dlouhodobých trendových hodnot lze tyto získané objemové hmotnosti zařadit do skupiny běžně dosahovaných hodnot.

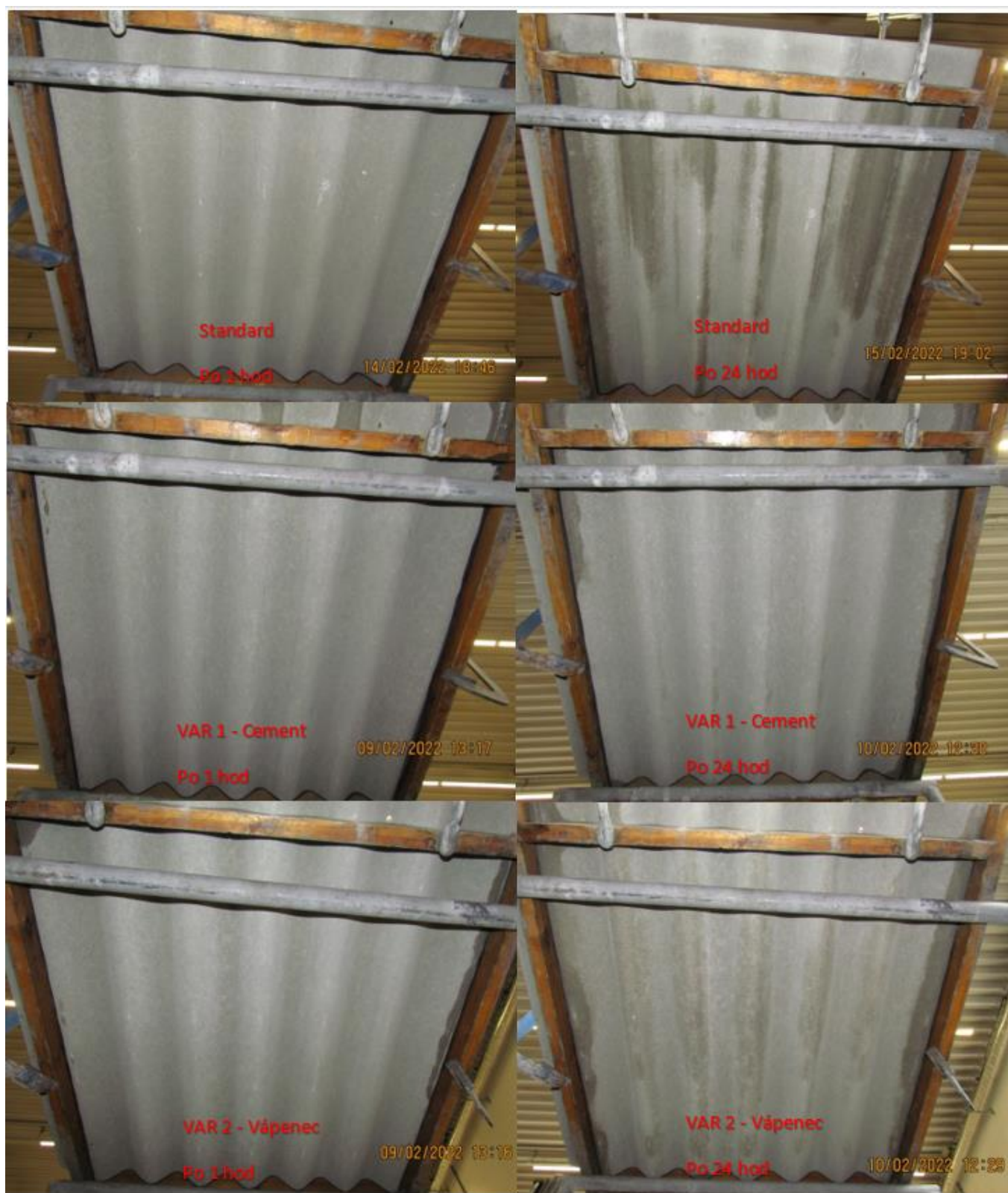
7.5.2.3 Vodotěsnost [86]

Zkouška vodotěsnosti byla provedena na celých deskách B6 1180 co/ho. Zkouška byla provedena vždy na 3 vzorcích pro každou zkušební variantu. Na jednotlivé zkušební vzorky byl postupně přilepen dřevěný rám, který byl naplněn vodou tak, aby hladina nad vrcholy jednotlivých vln dosahovala alespoň 60 mm. Po 24 hodinách bylo vyhodnoceno působení vody na rubové straně vlnovek.

Všechny zkušební varianty vyhověly požadavkům normy dle EN 494 [68]. Na všech zkušebních vzorcích je možné identifikovat stopy vlhkosti, ale ani u jedné ze zkušebních variant nedošlo k tvorbě kapek vody na rubové straně. Negativní vliv kalového odpadu na výsledky vodotěsnosti nebyl prokázán. Na obr. 67 je zobrazeno vyhodnocení zkoušky vodotěsnosti po 24 hodinách.

Tab. 14: Vyhodnocení zkoušky vodotěsnosti

Varianta	Po 24 hod		
	Provlhání na rubové straně	Tvorba kapek	Vyhodnocení dle EN 494 [68]
Standard 1	ano	ne	OK
Standard 2	ano	ne	OK
Standard 3	ano	ne	OK
Var 1 – 1	ano	ne	OK
Var 1 – 2	ano	ne	OK
Var 1 – 3	ano	ne	OK
Var 2 - 1	ano	ne	OK
Var 2 - 2	ano	ne	OK
Var 2 - 3	ano	ne	OK



Obr.67: Vyhodnocení zkoušky vodotěsnosti jednotlivých zkušebních variant

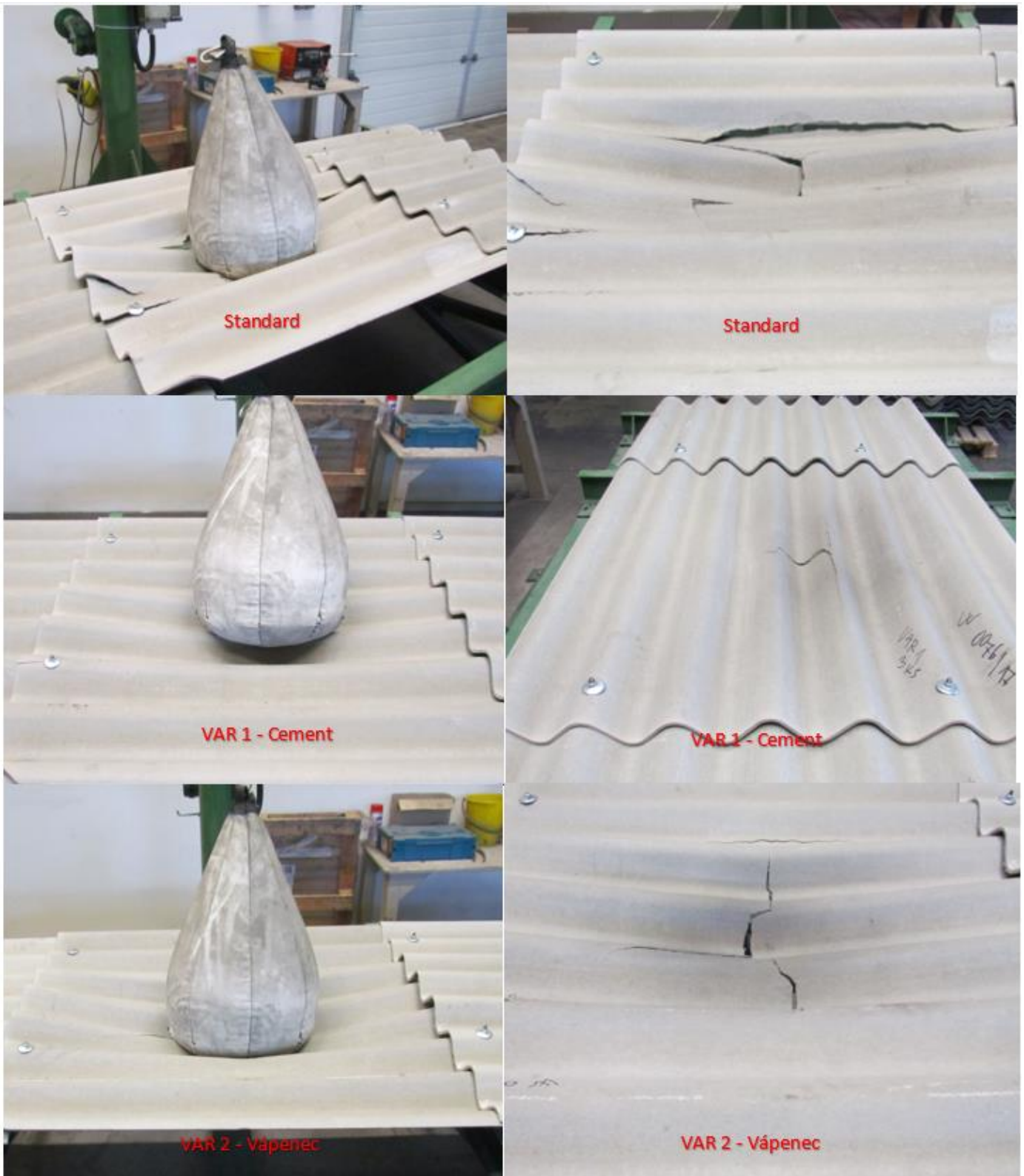
7.5.2.4 Stanovení odolnosti proti nárazu (Impact test) [87]

Zkušební vzorky desek byly uloženy do rámu zkušebního zařízení. Zkouška byla provedena vždy na 3 vzorcích pro každou zkušební variantu. Celá zkušební deska byla umístěna vždy doprostřed a kratší vzorky byly použity na překryvnou vrstvu. Desky byly připevněny ke zkušebnímu rámu pomocí háků. Zatěžovací břemeno bylo vyzdviženo a vycentrováno nad střed zkušebního vzorku. Výška zkušebního břemene nad zkušební střechou byla upravena pomocí měřicí tyče na hodnotu 1200 mm. Poté bylo zkušební břemeno odjištěno a následoval pád na zkušební střechu, kde došlo k jejímu poškození. Všechny testované vzorky vyhověly požadavkům normy EN 15057 [94]. Ani v jednom případě nedošlo k propadu zkušebního tělesa maketou střechy. V tabulce č.15 je uvedeno závěrečné vyhodnocení zkoušky i s výsledky vlhkostí jednotlivých desek.

Tab. 15: Vyhodnocení zkoušky odolnosti proti nárazu

Varianta	Vlhkost [%]	Energie [J]	Výška pádu břemene [mm]	Impact test dle EN 15057 [94]
Standard 1	8,6	600	1200	OK
Standard 2	9,1			OK
Standard 3	8,9			OK
Var 1 – 1	9,3	600	1200	OK
Var 1 – 2	9,1			OK
Var 1 – 3	9,0			OK
Var 2 - 1	10,9	600	1200	OK
Var 2 - 2	9,5			OK
Var 2 - 3	9,8			OK

Energie dopadu sférokoničného pytle naplněného skleněnými kuličkami je větší než energie dopadu osoby padající ze stoje. Hlavním cílem této zkoušky je zajištění bezpečnosti osob provádějících pokládku střešní krytiny. Při pádu může dojít k poškození samotné desky, ale v žádném případě nesmí dojít k přímému propadnutí zkušebního tělesa. Z tohoto pohledu všechny testované vzorky vyhověly předepsaným požadavkům. Při hodnocení zkoušky je posuzována také soudržnost vláknocementové matrice s polypropylenovými výztužnými páskami. K porušení může dojít buď nesoudržností výztužných pásek s matricí, nebo přetržením výztužného pásku. Způsob porušení testovaných vzorků byl u všech variant stejný. Přítomnost 3 % kalového odpadu neovlivnila negativním způsobem odolnost desek proti nárazu.

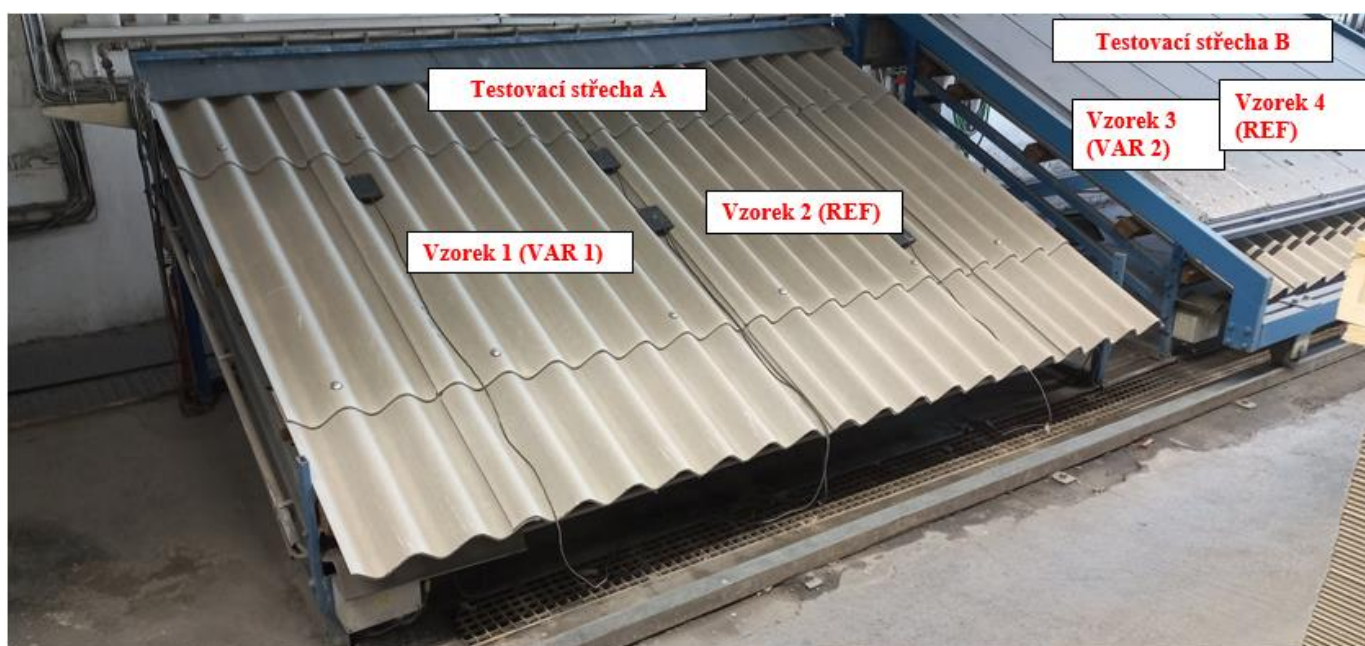


Obr.68: Vyhodnocení zkoušky odolnosti proti nárazu

7.5.3 Trvanlivostní parametry

7.5.3.1 Zkouška teplo-děšť [88]

Pro zkoušku teplot-děšť byly použity celé zkušební desky, které byly umístěny do rámu zkušebního zařízení. Rám zkušebního zařízení je tvořen dvěma střechami, na kterém je možné testovat 4 zkušební vzorky zároveň. Na zkušební střechu A byl umístěn vzorek vlnovky testované varianty s kalovým odpadem s náhradou cementu (VAR 1) a vzorek standardní vlnovky. Zkušební střecha B byla tvořena vlnovkou s testovanou variantou s kalovým odpadem s náhradou vápence (VAR 2) a opět vzorkem standardní vlnovky. Zkušební střechy byly podrobeny 50 cyklům ohřívání a zkrápění přesným množstvím vody. Po uplynutí daného počtu cyklů byly zkušební vzorky podrobeny analýze, jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce č.16. Na obr.69 je uvedeno rozložení testovaných vzorků.



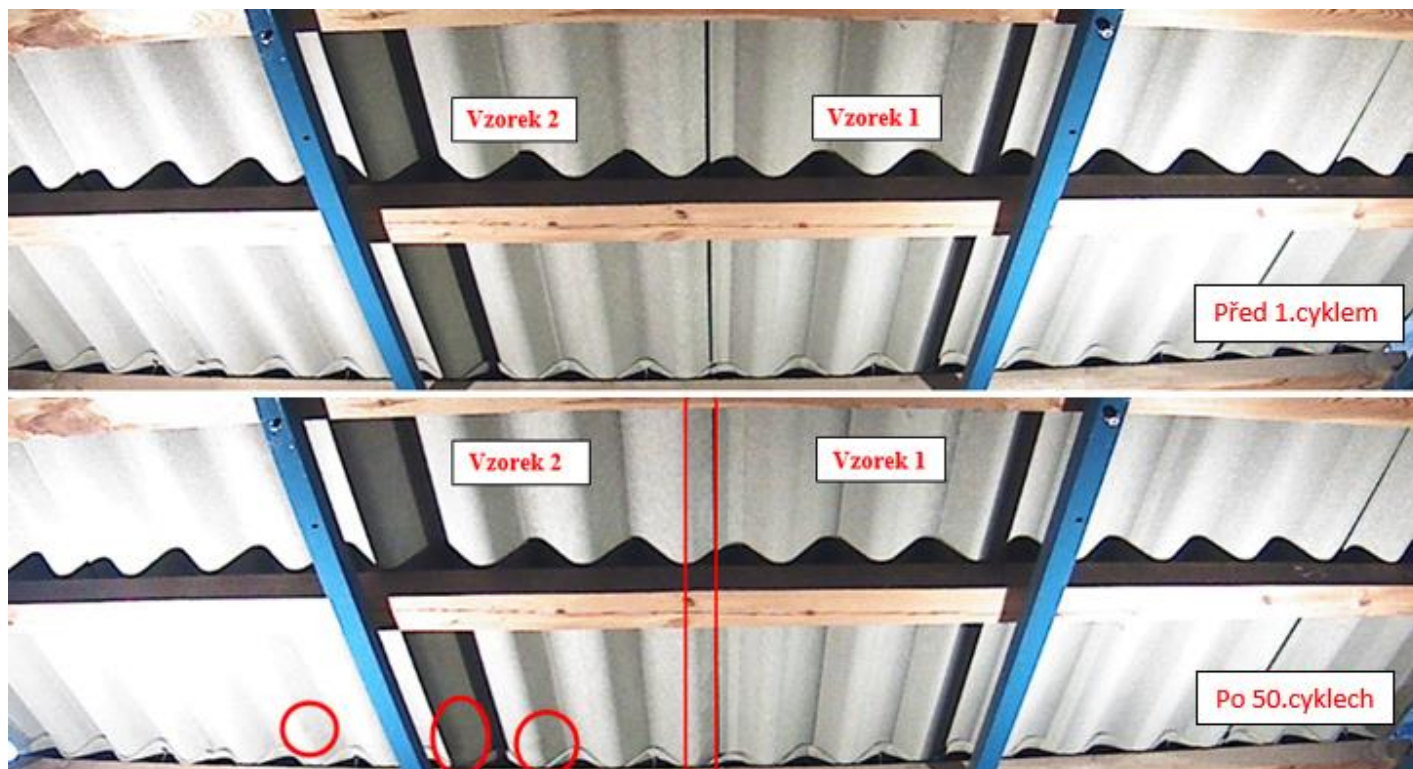
Obr.69: Rozložení zkušebních vlnovek v průběhu zkoušky teplo-děšť

Tab. 16: Vyhodnocení zkoušky teplo-děšť po 50 cyklech

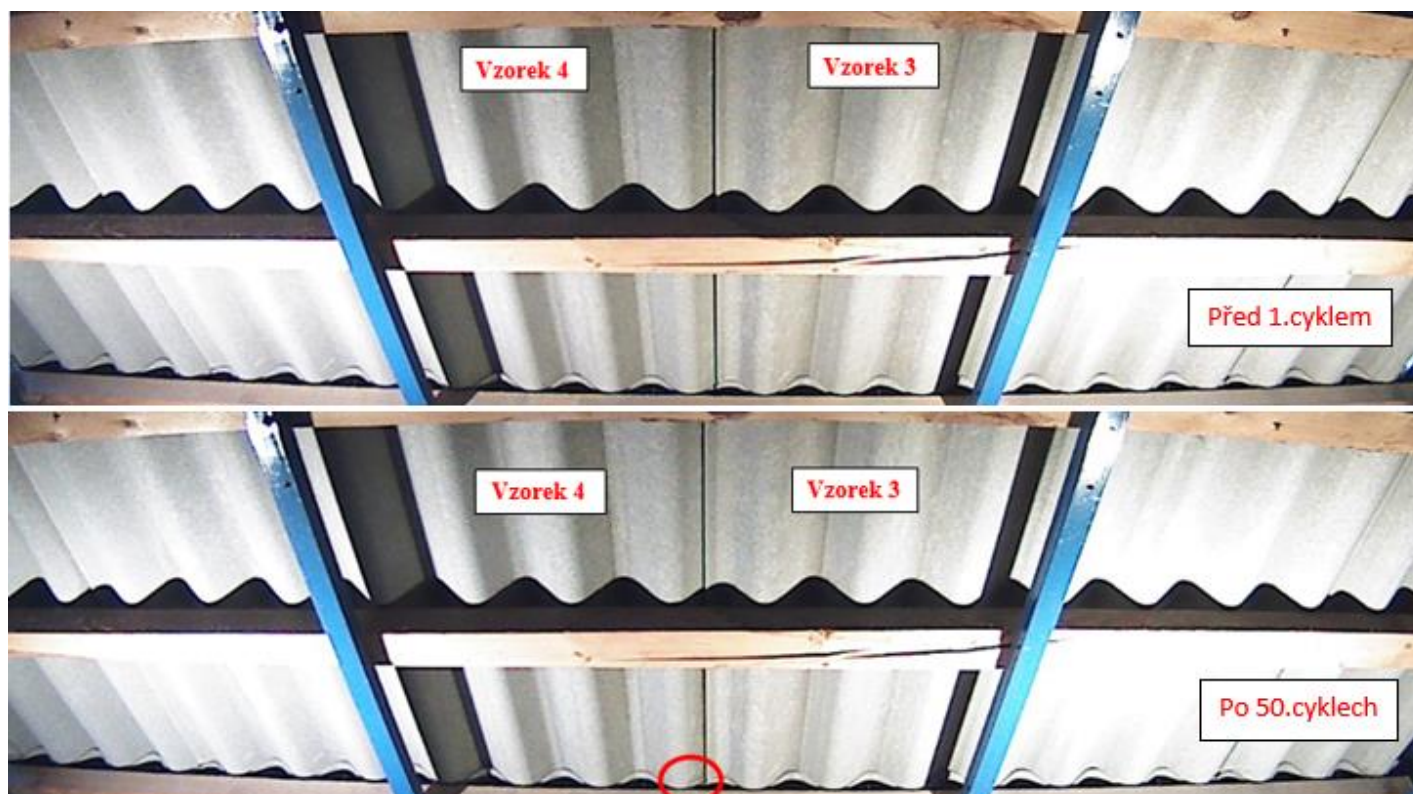
Líc/Rub	Parametr	Zkušební střecha A		Zkušební střecha B	
		Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4
		(VAR 1)	(REF)	(VAR 2)	(REF)
Lícová strana	Změna vzhledu	ANO	ANO	ANO	ANO
	Výkvěty	Částečné	Částečné	Částečné	Částečné
	Praskliny	NE	NE	NE	NE
	Delaminace	NE	NE	NE	NE
Rubová strana	Provlhání	NE	ANO	NE	ANO
	Kapky vody	NE	NE	NE	NE
	Praskliny	NE	NE	NE	NE
EN 494 [68]	Teplo-děšť	ANO	ANO	ANO	ANO



Obr.70: Lícová strana testovaných vlnovek po 50 cyklech



Obr.71: Rubová strana vlnovek zkušební střechy A



Obr.72: Rubová strana vlnovek zkušební střechy B

7.5.3.2 Metoda skrytých vad [89]

Pro metodu skrytých vad byly použity zkušební vzorky vystavené simulaci klimatickému působení při zkoušce teplo-déšť. Zkušební činidla byla tedy aplikována celkem na 4 vzorky označené stejným způsobem jako v předchozí zkoušce. Podrobný postup této zkoušky je popsán v kapitole 6.19. Jednotlivá indikační činidla byla na vzorky aplikována v následujících krocích popsaných v tabulce č.17.

Tab.17: Postup zkoušky metoda skrytých vad

Krok	Prováděná činnost
1	Vizuální prohlédnutí suchých desek
2	Aplikace indikačního činidla fluorescinu na rubovou stranu, vizuální kontrola
3	Aplikace indikačního činidla methylenové modři na rubovou stranu, vizuální kontrola
4	Otočení vzorku lící stranou nahoru, vizuální inspekce lící strany
5	Pokropení lící strany desek vodou, vizuální inspekce

Skryté praskliny bylo možné identifikovat u všech testovaných vzorků. Při vyhodnocení této zkoušky jsou prasklinami myšleny velmi drobné, vlasové praskliny v materiálu, které nejsou za normálních podmínek viditelné a nemají zásadní vliv na fyzikálně-mechanické parametry výrobku. Tyto drobné praskliny nám však mohou přinést cenné informace o vnitřní struktuře testovaného vzorku. Množství těchto mikroprasklin bylo výrazně větší u testovaných vzorků s kalovým odpadem. Celkové vyhodnocení zkoušky je uvedeno v tabulce č.18.

Tab.18: Vyhodnocení zkoušky metoda skrytých vad

Postup/Vzorek	1 (VAR 1)	2 (REF)	3 (VAR 2)	4 (REF)
Krok 1 Suchá - líc, rub	žádné praskliny	žádné praskliny	žádné praskliny	žádné praskliny
Krok 2 Fluorescein - rub	žádné praskliny	žádné praskliny	zvlňovací praskliny	zvlňovací praskliny
Krok 3 Methylen - rub	žádné praskliny	žádné praskliny	žádné praskliny	žádné praskliny
Krok 4 Suchá - líc	podélná prasklina 6.vlna	podélná prasklina 6.vlna	Podélná prasklina 2.,3.,5. a 6. vlna	žádné praskliny
Krok 5 Mokrá - líc	Podélná prasklina 5.,6. a 7. vlna	Podélná prasklina 6.vlna	Podélná prasklina 2.,3.,5. a 6. vlna	Podélná prasklina 5.vlna

Součástí vyhodnocení této zkoušky je i pořízená fotodokumentace každého provedeného kroku pro každý vzorek. Vzhledem k velkému počtu fotek a nutnosti dodržení určité velikosti pro zachycení detailu jsou všechny tyto obrázky uvedeny v příloze č.11. Na jednotlivých fotkách je možné pozorovat defekty na zkušebních deskách popsané v tabulce č.18.

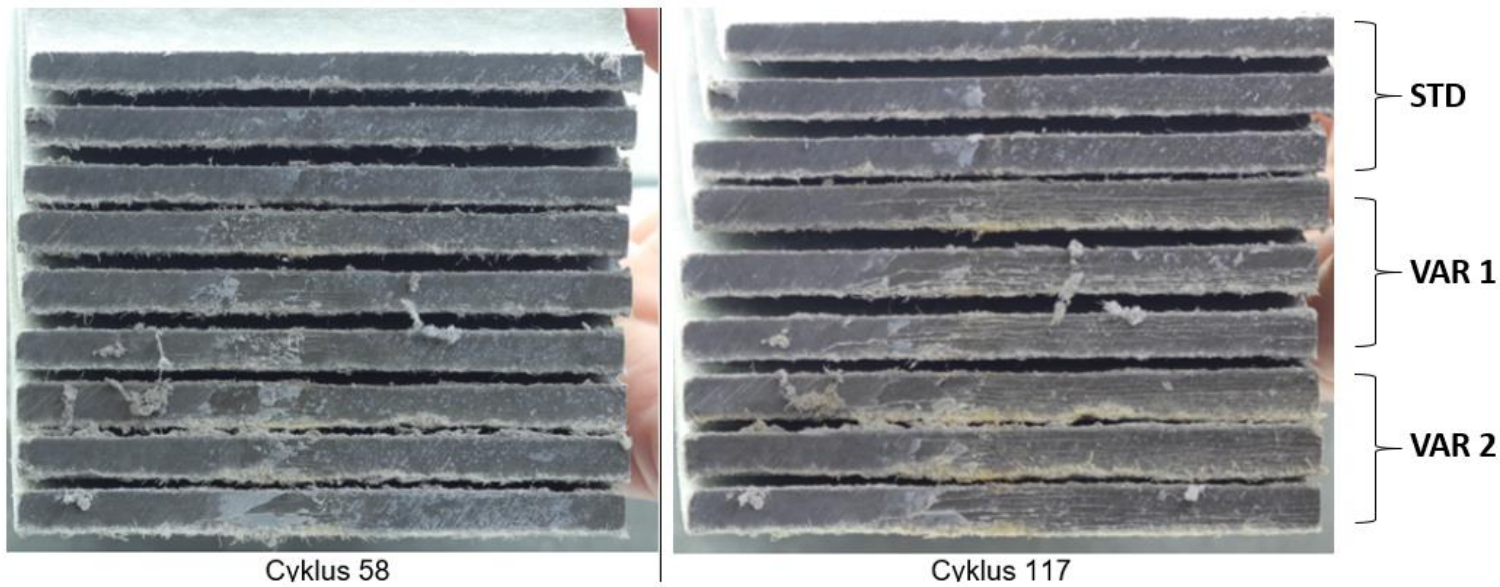
7.5.3.3 Mrazuvzdornost [68]

Pro zkoušku mrazuvzdornosti bylo z každé zkušební varianty vybráno 20 ks vzorků. Zkušební vzorky byly připraveny vyříznutím ze středu celých desek vždy tak, aby obsahovala alespoň dvě úplné vlny. Z každé testované varianty byla zkušební tělesa náhodně rozdělena do dvou sad po 10 ks. První sada vzorků byla po kondicionování podrobena zkoušce zatížení na mezi pevnosti. Druhá sada vzorků byla podrobena 100 cyklů zmrazování a rozmrazování. Po 100 cyklech byly tyto vzorky opět podrobeny zkoušce zatížení na mezi pevnosti. Ze získaných hodnot byl stanoven výsledný poměr R_L a naměřené deformace byly použity pro stanovení modulu pružnosti jednotlivých vzorků. Souhrnné výsledky mrazuvzdornosti jsou uvedeny v následující tabulce.

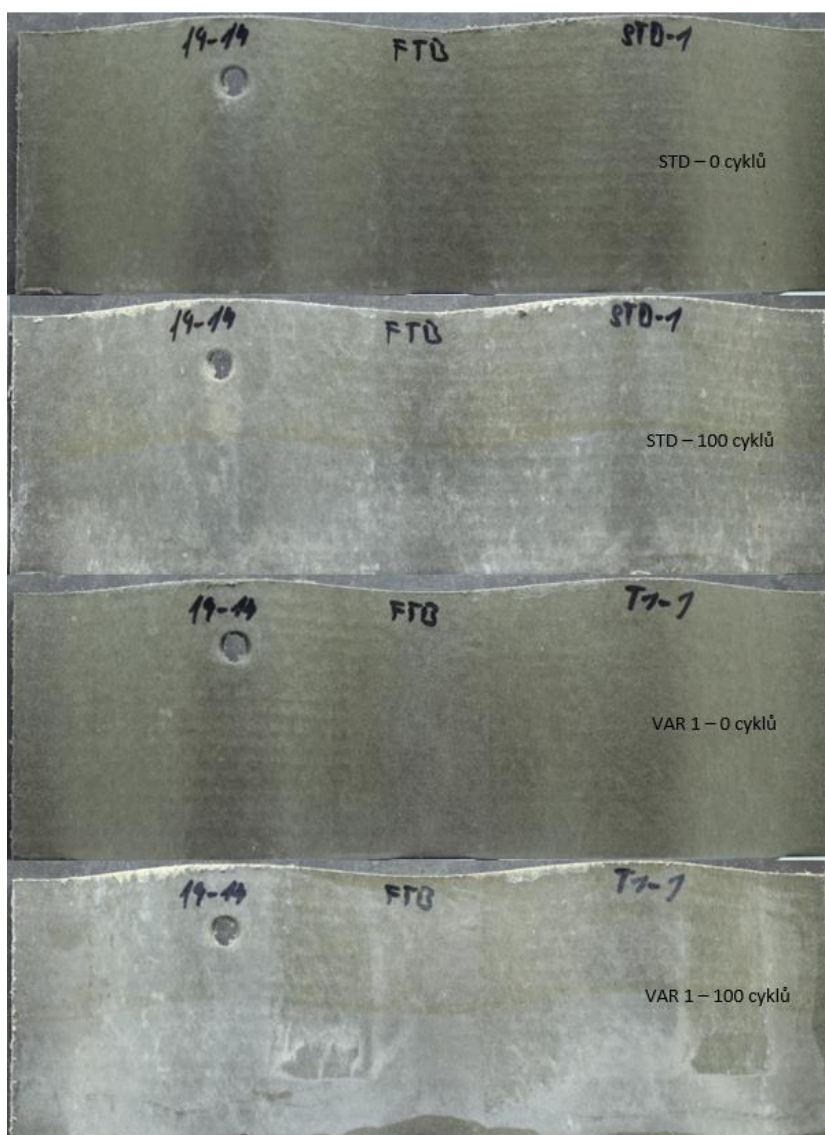
Tab.19: Výsledné hodnoty mrazuvzdornosti po 100 cyklech

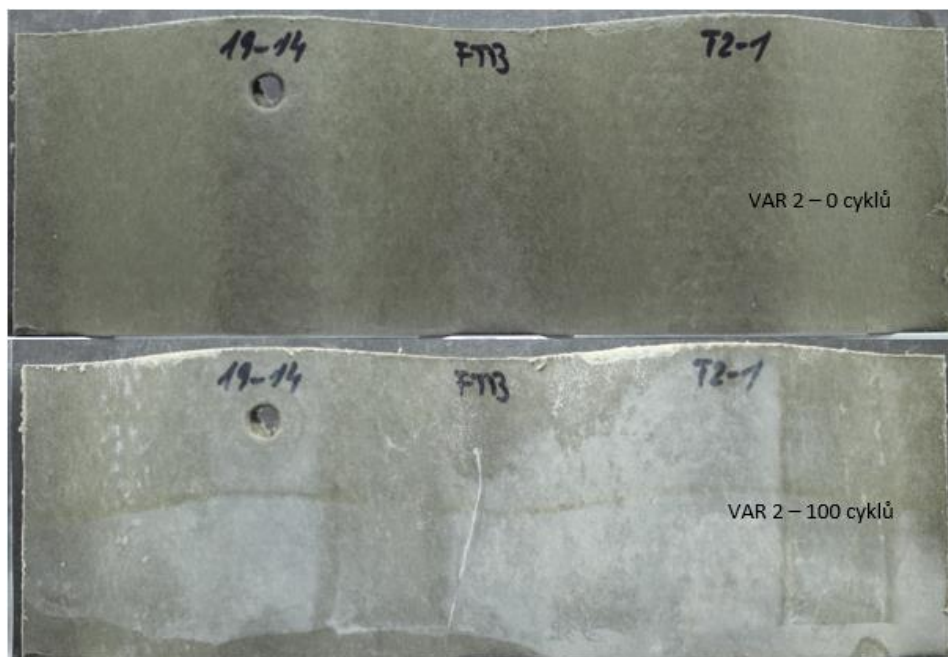
Mrazuvzdornost – 100 cyklů			
Vzorek	Lineární zatížení	Deformace	Modul pružnosti
	[kN/m]	[mm]	[GPa]
Ref - STD	5,47	42,5	5,8
Ref- VAR 1	5,21	47,3	5,2
Ref – VAR 2	5,14	46,9	5,5
STD - Ref	5,47	42,5	5,8
STD – 100 cyklů	5,77	45,3	6,1
R_L	1,05		
VAR 1 - Ref	5,21	47,3	5,2
VAR 1 - Ref	5,60	47,3	6,1
R_L	1,07		
VAR 2 - Ref	5,14	46,9	5,5
VAR 2 - Ref	5,72	50,3	6,0
R_L	1,11		

Výsledné hodnoty koeficientu pevnosti R_L u všech testovaných variant splňují minimální požadavek daný normou EN 494 [68], kdy nesmí po 100 cyklech zmrazování/rozmrazování dojít k poklesu koeficientu R_L pod hodnotu 0,70. Všechny testované varianty vykazují dokonce vyšší hodnoty lineárního zatížení ve srovnání s referenčními vzorky. V rámci zkoušky nebyly hodnoceny pouze finální koeficienty R_L , ale pozornost byla věnována také vzhledu jednotlivých vzorků v průběhu zkoušky. U vláknocementových výrobků je velmi důležitá soudržnost jednotlivých vrstev, tzv. poloh. Vlnitá krytina je vyráběna nejčastěji z 9 poloh materiálu a po celou dobu životnosti výrobku musí být zajištěna jejich dokonalá soudržnost. Proto byla v rámci zkoušky mrazuvzdornosti věnována pozornost příčným řežům vzorků po určitém množství cyklů zmrazování/rozmrazování. U obou testovaných variant s kalovým odpadem byla zjištěna přítomnost delaminace již při 58 cyklu. Standardní receptura začala vykazovat první zmínky delaminace až při 117 cyklu. Během 117 cyklu již byly vzorky s využitím kalového odpadu velmi silně delaminovány a docházelo k jejich degradaci struktury materiálu. Porovnání delaminace testovaných vzorků je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr.73: Delaminace jednotlivých vzorků v průběhu zkoušky mrazuvzdornosti





Obr.74: Vzhled povrchů testovaných vzorků v průběhu mrazuvzdornosti

Standardní zkouška mrazuvzdornosti byla doplněna zkouškou mrazuvzdornosti v 3% roztoku NaCl, kdy lze předpokládat urychlené výsledky standardní mrazuvzdornosti zejména vzhledem k delaminaci jednotlivých vrstev. Jeden cyklus u zkoušky mrazuvzdornosti v roztoku NaCl trval 24 hod, během kterých byla dosažena teplota -20°C s výdrží 18 hod a následným ohřevem na $+60^{\circ}\text{C}$ a výdrží 6 hodin. Výrazné delaminace u testovaných vzorků s kalovým odpadem bylo dosaženo již při 5 cyklu.



Obr.75: Delaminace jednotlivých vzorků při 5.cyklu mrazuvzdornosti v 3% roztoku NaCl

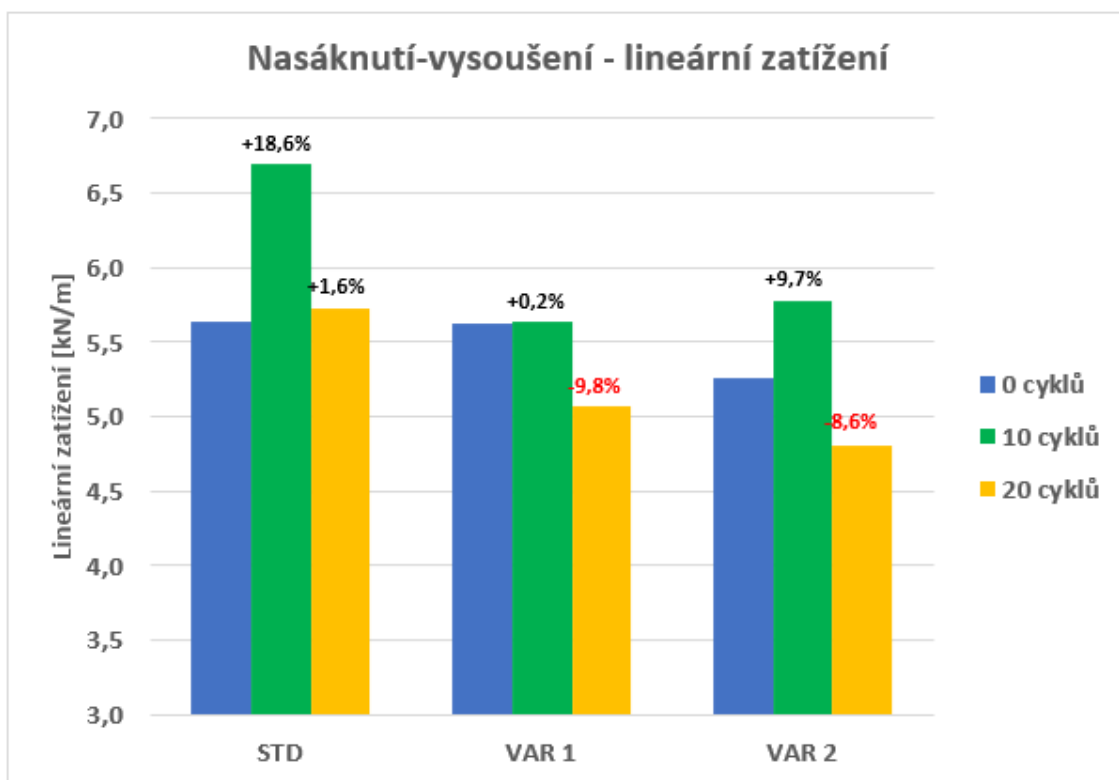
7.5.3.4 Zkouška nasáknutí-vysoušení [68]

Zkouška nasáknutí-vysoušení nebyla provedena v plném rozsahu dle normy EN 494 [68], ale její postup byl doplněn pro získání většího množství důležitých dat pro její vyhodnocení. Dle normy je výsledkem zkoušky opět koeficient pevností R_L , který je stanoven z příčných nebo podélných pevností pro sadu vzorků před vystavením cyklů a po 50 cyklech namáhání. Pro každou zkušební variantu bylo v tomto případě vybráno celkem 18 ks vzorků. Po kondicionování bylo 12 z nich podrobena zatížení na mezi pevnosti a zbylé vzorky byly testovány až po uplynutí 10 a 20 cyklů nasáknutí-vysoušení. Další cykly zatěžování již nebyly nutné, protože výrazná změna u obou testovaných variant s kalovým odpadem nastala již po 20 cyklu namáhání. Souhrnné výsledky zkoušky nasáknutí-vysoušení jsou uvedeny v následující tabulce.

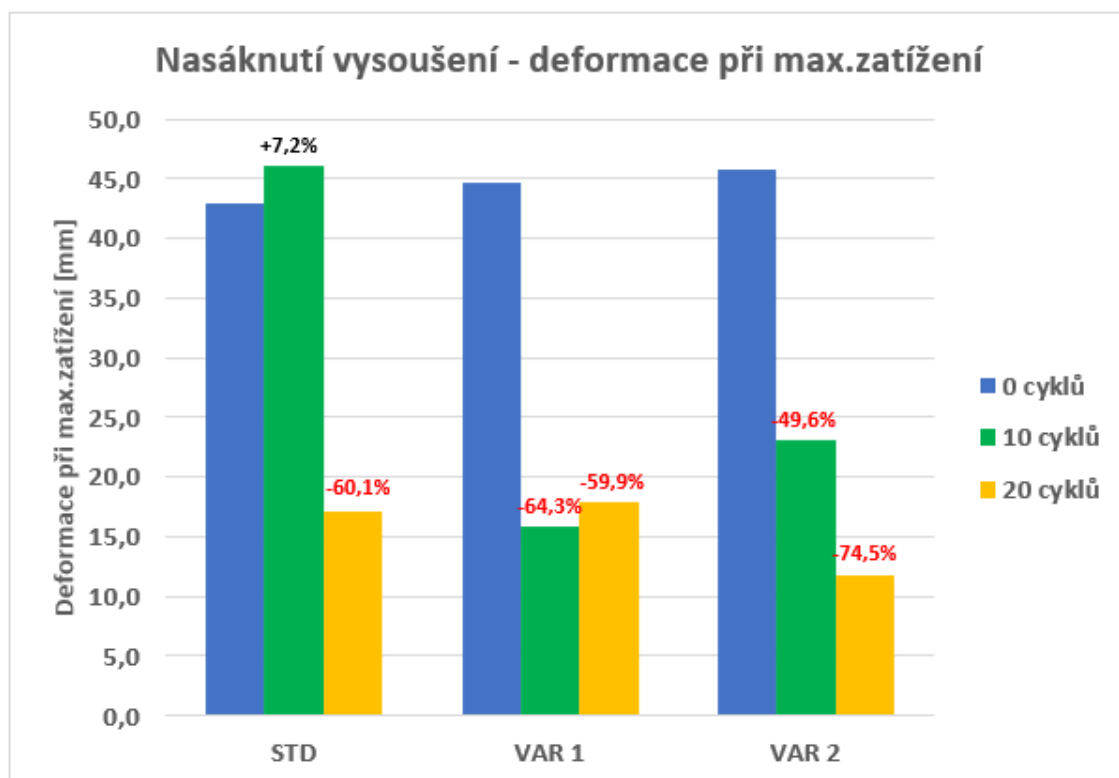
Tab.20: Výsledné hodnoty zkoušky nasáknutí-vysoušení po 20 cyklech

Nasáknutí-vysoušení – 20 cyklů			
Vzorek	Lineární zatížení	Deformace	Modul pružnosti
	[kN/m]	[mm]	[GPa]
Ref - STD	5,64	42,9	6,0
Ref- VAR 1	5,62	44,6	5,4
Ref – VAR 2	5,26	45,8	5,8
STD - Ref	5,64	42,9	6,0
STD – 10 cyklů	6,69	46,0	6,8
STD – 20 cyklů	5,73	17,1	6,5
R_{L20}	1,02		
VAR 1 - Ref	5,62	44,6	5,4
VAR 1 – 10 cyklů	5,63	15,9	6,9
VAR 1 – 20 cyklů	5,07	17,9	6,7
R_{L20}	0,90		
VAR 2 - Ref	5,26	45,8	5,8
VAR 2 – 10 cyklů	5,77	23,1	6,3
VAR 2 – 20 cyklů	4,81	11,7	6,9
R_{L20}	0,91		

Pokud bychom zkoušku hodnotili pouze dle požadavků normy EN 494 [68], tak lze stále po 20 cyklech považovat testované varianty s vláknocementovými kaly za vyhovující. Pokud se však podíváme na hodnoty lineárního zatěžování jednotlivých variant, tak můžeme pozorovat u variant s kalovým odpadem významný pokles lineárního zatížení již po 20 cyklu namáhání. Tento pokles příčných pevností dosahuje hodnoty téměř 10 % a je zobrazen na obr 76. Významný rozdíl mezi standardními vzorky a vzorky s kalovým odpadem můžeme pozorovat i na hodnotách deformací při maximálním zatížení. Zatímco u standardních vzorků podrobených pouze 5 cyklům namáhání nedochází k významným deformacím, tak u vzorků s kalovým odpadem dochází až k 50% změně deformace. Takto výrazná změna má zásadní vliv na celkové snížení životnosti vláknocementové krytiny. Změna deformací vzorků při maximálním zatížení je zobrazena na obr.77.



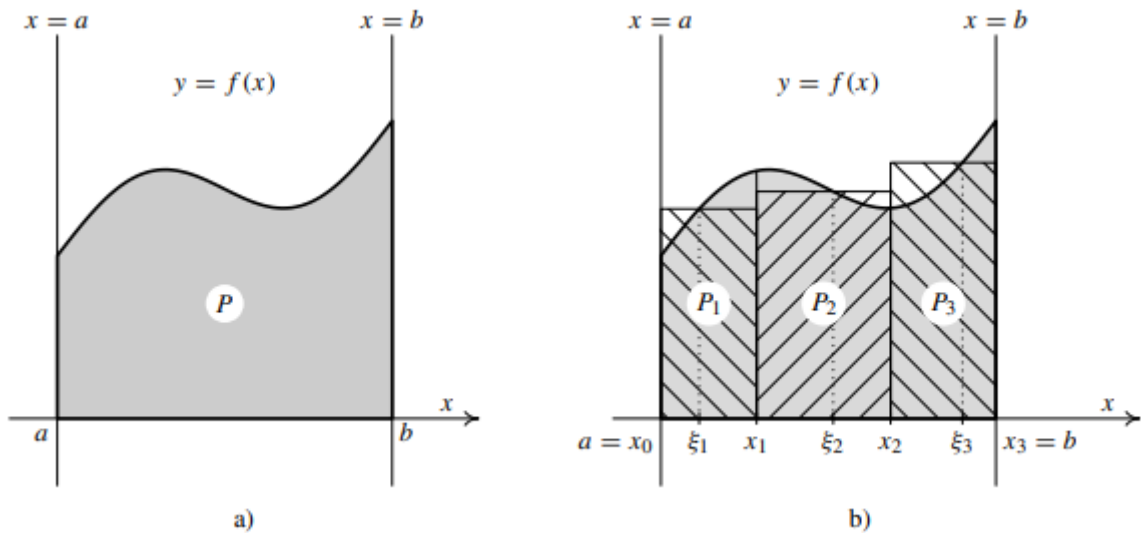
Obr.76: Zkouška nasáknutí-vysoušení – lineární zatížení



Obr.77: Zkouška nasáknutí-vysoušení – deformace při max. zatížení

Energie nutná k porušení vzorku (Energy to rupture)

Energii nutnou k porušení zkoušeného vzorku (E_{tR}) lze vyjádřit jako určitý integrál, který bude dané funkci přiřazovat číslo. Dle vyjádření funkce lze tímto způsobem získat výslednou hodnotu, která bude v tomto případě vyjadřovat obsah obrazce pod křivkou. Představme si, že máme nezápornou ohraničenou funkci $f(x)$, definovanou na intervalu $\langle a, b \rangle$, která je spojitá. Graf této funkce společně se dvěma svislými přímkami $x = a$ a $x = b$ a osou x ohraničuje jistý rovinný obrazec P (obr.78 a). Cílem je zjistit obsah obrazce.



Obr. 78: Výpočet obsahu rovinné množiny [101]

Postup výpočtu je následující. V prvním kroku rozdělíme množinu P rovnoběžkami s osou y na obdélníky (obr.78 b), které jsou označeny P_1 , P_2 a P_3 . V dalším kroku spočítáme obsahy jednotlivých obdélníků. Bohužel však není možné získat přesný výpočet, neboť ze tří stran jsou ohraničené sice úsečkami, ale ze čtvrté grafem funkce $f(x)$. Výpočet bude tedy přibližný. Uvnitř základny každého obdélníka zvolíme bod, vypočteme v něm funkční hodnotu a v této výšce ho zarovnáme s rovnoběžkou s osou x na obdélník. Tím se však při výpočtu dopustíme chyby, protože někde obdélník přesahuje, někde ho zase nepokrývá. Lze však předpokládat, že čím více obdélníků uděláme a čím budou užší, tím bude výsledná chyba menší. Provedeme-li tedy jakýsi limitní přechod, tj. budeme-li neomezeně zvětšovat počet obdélníků a současně je zužovat, měla by se přibližná hodnota daná součtem ploch jednotlivých obdélníků čím dál více přibližovat k přesné hodnotě obsahu P . [101]

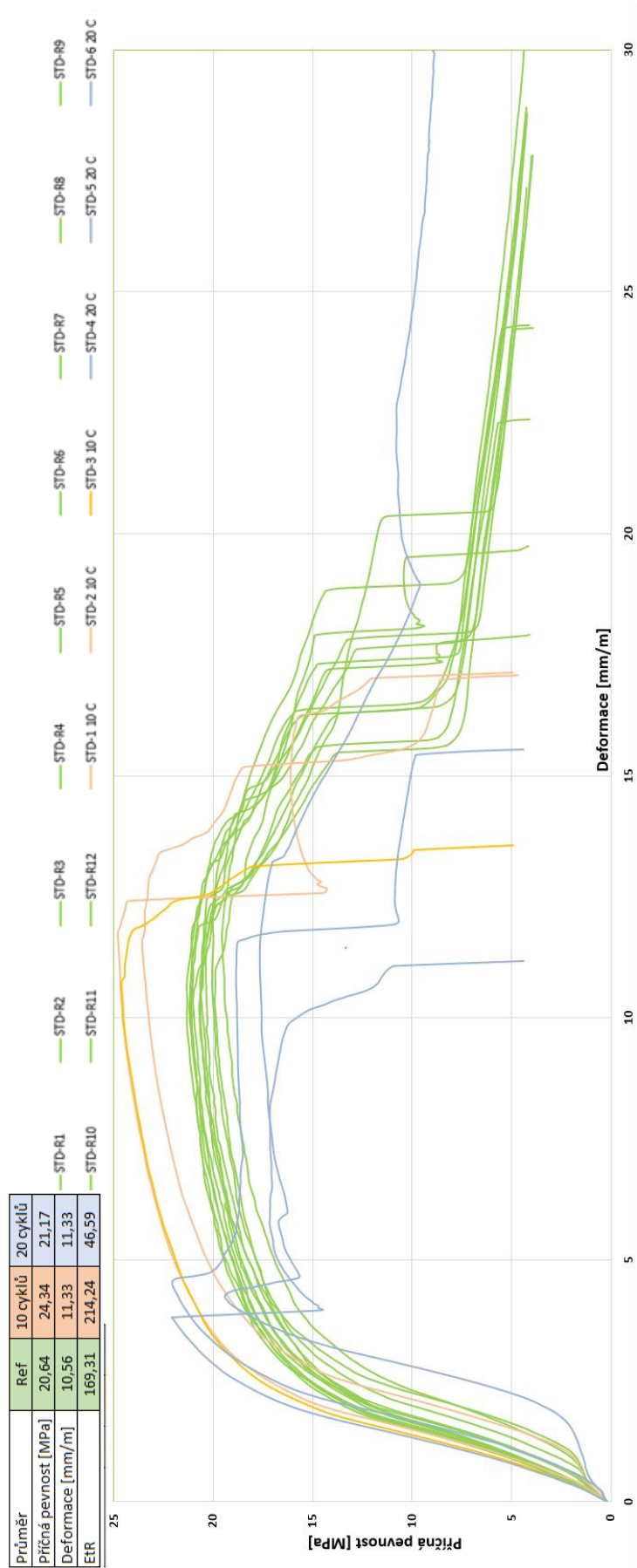
Stejný postup výpočtu E_{tR} byl aplikován i pro vyhodnocení pevností, protože informace o pevnosti vzorku je získána pouze z maximálního zatížení při porušení vzorku. Z tvaru zatěžovací křivky však můžeme získat daleko komplexnější informace o chování vzorku v průběhu zatěžování. E_{tR} je vypočtena softwarovým způsobem z deformačních křivek jednotlivých vzorků při zatěžování. Jedná se o výpočet plochy pod deformační křivkou s okrajovými podmínkami od začátku zatěžování (30 N) až do porušení vzorku. Normativní požadavky EN 494 [68] kladou podmínky pouze na minimální podélné a příčné pevnosti. Z tvarů jednotlivých křivek při zatěžování lze však vyčíst velmi cenné informace, které není možné získat pouze z finální hodnoty maximálního zatížení.

Vyhodnocení zkoušky nasáknutí-vysoušení bylo doplněno také stanovením EtR. Pro všechny testované vzorky v rámci této zkoušky byla vypočtena EtR. Ze získaných hodnot je patrné, že vzorky s využitím kalového odpadu vykazují při zatěžování výrazný pokles EtR nutný k porušení vzorku. U obou testovaných variant dochází k poklesu EtR již po 5 cyklech zatěžování. Tento pokles je velmi výrazný. U varianty s náhradou kalového odpadu za cement dosahuje tento pokles -73 %. Varianta s náhradou vápence za kalový odpad vykazuje pokles EtR -55 % oproti standardu. Přídavek kalového odpadu zcela mění chování vzorků při zatěžování a negativně tak ovlivňuje jejich odolnost vůči povětrnostním vlivům. Souhrnné výsledky EtR jednotlivých testovaných variant jsou uvedeny v následující tabulce.

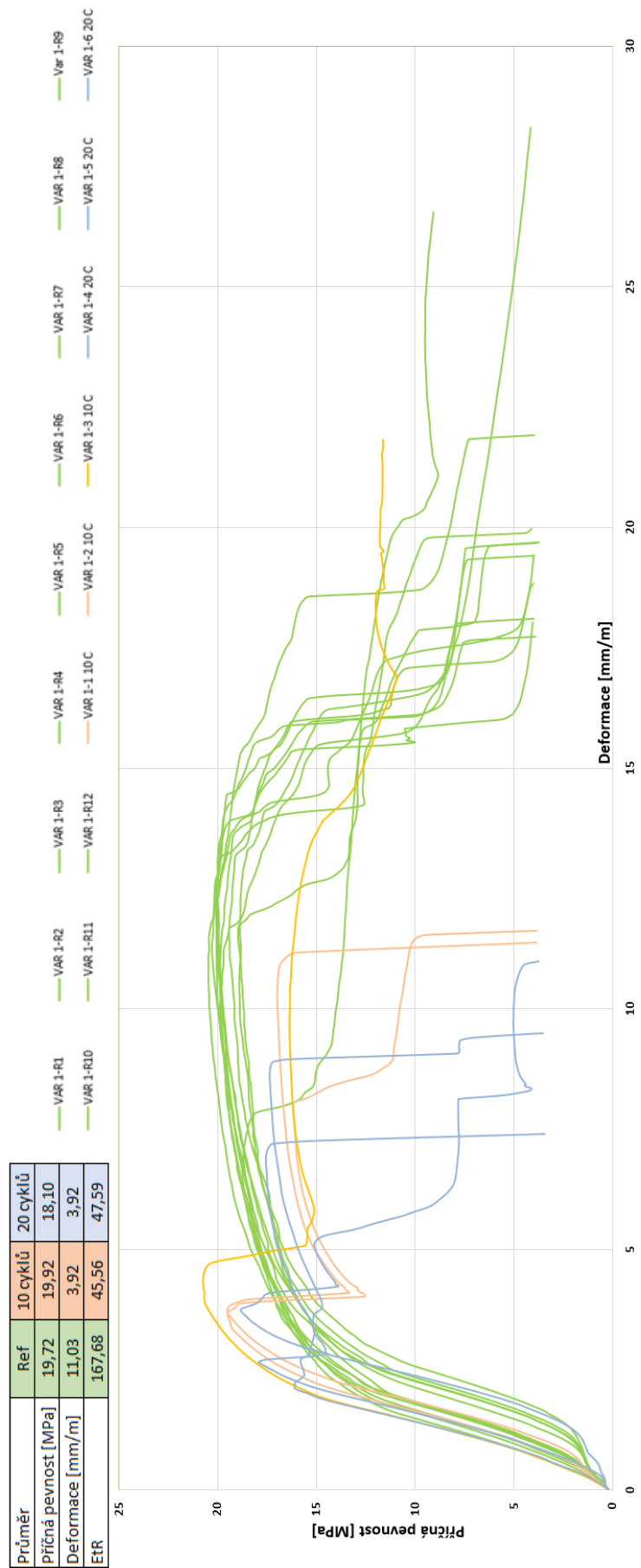
Tab.21: Výsledné hodnoty EtR jednotlivých variant při zkoušce nasáknutí-vysoušení

Zkouška nasáknutí-vysoušení - EtR			
Zatížení/ deformace při max.zatížení			
Vzorek	0 cyklů	10 cyklů	20 cyklů
STD	169	214	47
VAR 1	168	46	48
VAR 2	172	78	25
STD	-	+27 %	-72 %
VAR 1	-	-73 %	-72 %
VAR 2	-	-55 %	-86 %

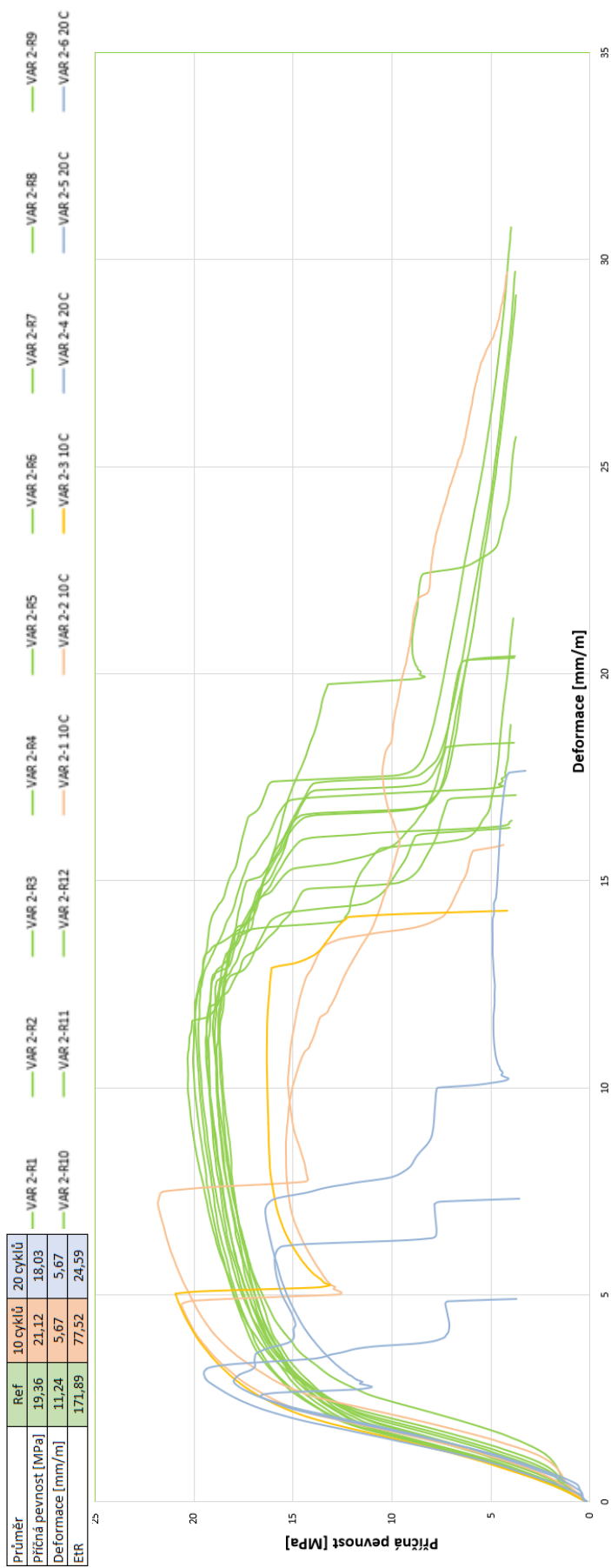
Tvary jednotlivých zatěžovacích křivek a vypočtené hodnoty EtR jsou uvedeny na následujících grafech. Z jednotlivých křivek je patrné, že k výraznému poklesu EtR dochází u zkušebních variant již po 5 cyklech zkoušky nasáknutí-vysoušení.



Obr.79: EtR – Zkouška nasáknutí -vysoušení – STD – 0, 10 a 20 cyklů



Obr.80: EtR – Zkouška nasáknutí -vysoušení – VAR 1 – 0, 10 a 20 cyklů



Obr.81: EtR – Zkouška nasáknutí -vysoušení – VAR 2 – 0, 10 a 20 cyklů

7.5.3.5 Rozměrová stabilita [90]

V rámci zkoušky rozměrové stability byly testovány vždy od každé zkušební varianty 3 zkušební vzorky, které byly podrobeny 3 cyklům namočení ve vodě po dobu 7 dní a následného vysušení v peci při teplotě 105°C po dobu 7 dní. Při namáčení a vysoušení vzorků byly jednotlivé vzorky umístěny do rámu, který zajišťuje přístup vody nebo teplého vzduchu ze všech stran zkušebnímu vzorku. Zkoušce rozměrové stability byly podrobeny kromě nově připravených vzorků také vzorky připravené ze zkušebních těles, které byly před tím použity pro zkoušku nasáknutí-vysoušení. Výsledné hodnoty rozměrové stability jednotlivých zkušebních variant jsou uvedeny v tabulce č.22.

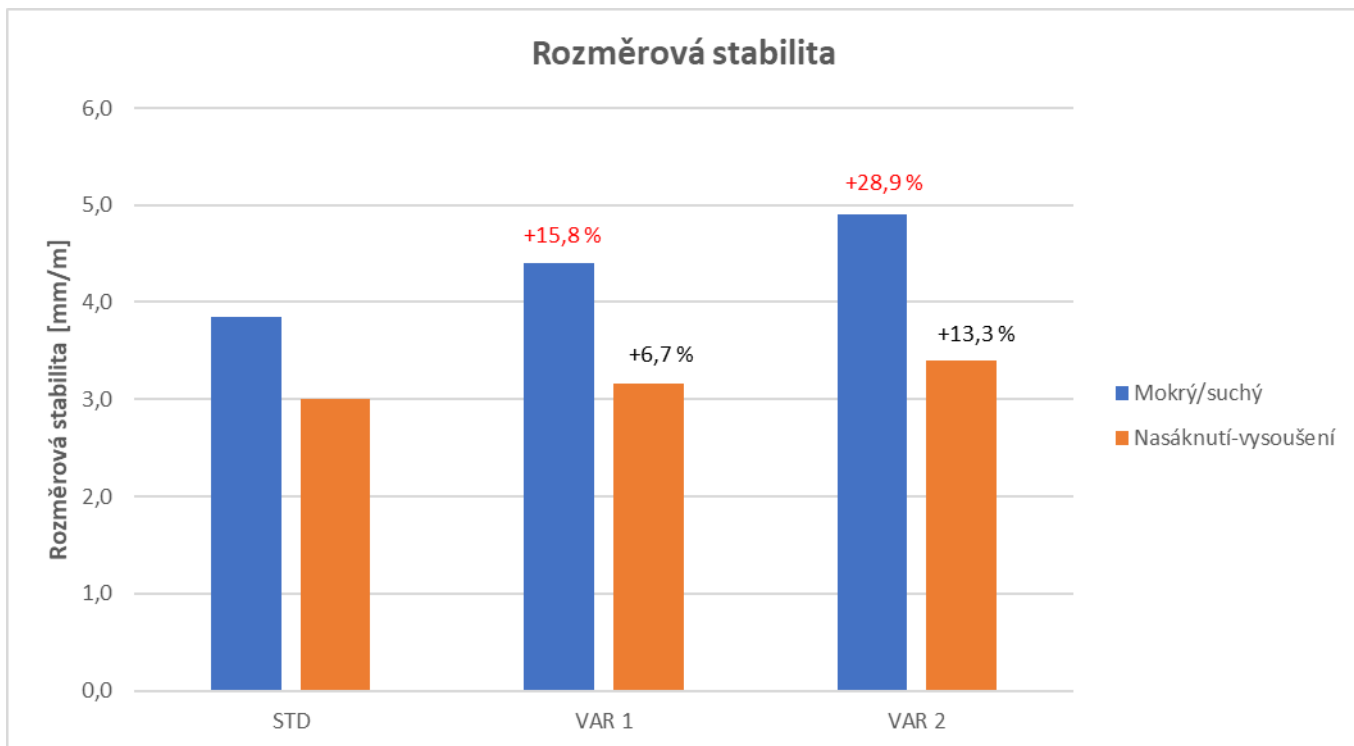


Obr.82: Namáčení zkušebních vzorků umístěných v rámu ve vodě

Tab.22: Výsledné hodnoty rozměrové stability jednotlivých variant

Rozměrová stabilita – Mokrý/suchý [mm/m]					
Vzorek	1.	2.	3.	Průměr	Rozdíl [%]
STD	4,0	3,8	3,8	3,8	-
VAR 1	4,3	4,3	4,5	4,4	+15,8
VAR 2	4,8	5,0	4,9	4,9	+28,9
Rozměrová stabilita – Nasáknutí-vysoušení [mm/m]					
STD	3,1	3,0	2,9	3,0	-
VAR 1	3,1	3,3	3,1	3,2	+6,7
VAR 2	3,4	3,4	3,4	3,4	+13,3

Ze získaných hodnot je zřejmé, že použitím kalového odpadu dochází k zásadní změně struktury materiálu, která vede k výraznému nárůstu rozměrových změn. U obou zkušebních variant dosahuje výsledná hodnota téměř 4,5 mm/m, což je pro vláknocementové výrobky neakceptovatelná hodnota, která může být v pozdější fázi zdrojem výrazného napětí ve výrobku. V kombinaci se špatnou montáží, při které nebude zajištěna dilatace výrobků, může dojít až k tvorbě prasklin vláknocementových desek. V případě náhrady kalového odpadu za vápenec dosahuje hodnota změny délky vzorků téměř 30 %. Za bezpečné výrobky z pohledu rozměrové stability lze považovat takové, které dosahují hodnot do 3,0 mm/m. Grafické zpracování výsledných hodnot je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr.83: Výsledné hodnoty rozměrové stability jednotlivých zkušebních variant

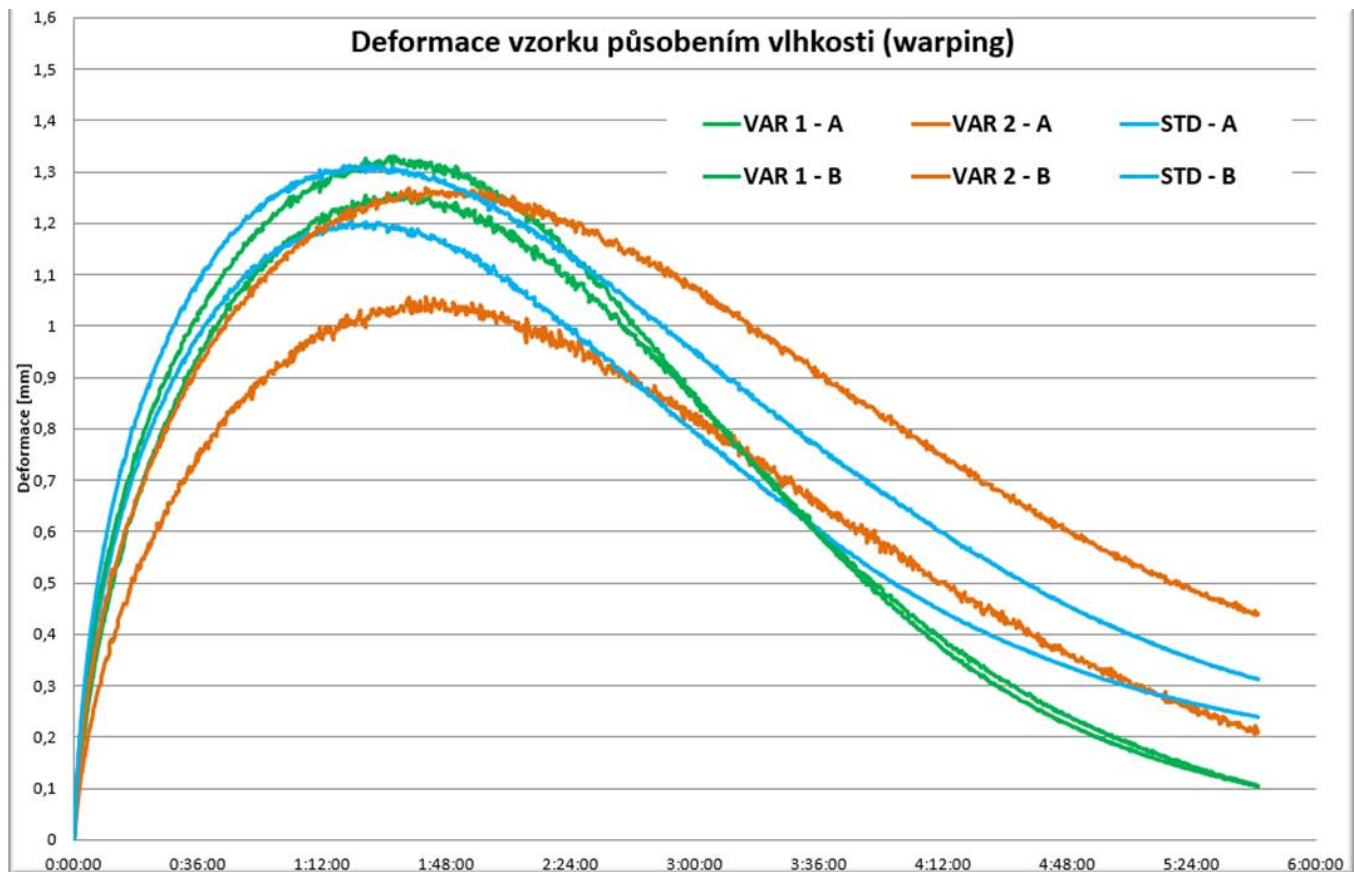
7.5.3.6 Deformace vzorku působením vlhkosti (Warping) [91]

Pro zkoušku warpingu byla připravena vždy 2 zkušební tělesa od každé varianty o rozměrech 200x75 mm vyřezáním ze šikmin vlnité krytiny. Po vyřezání byly hrany zkušebních vzorků zatřeny alkydovou barvou. Po umístění vzorků do plastové misky s demineralizovanou vodou a připojení zkušební aparatury bylo zahájeno snímání deformací v pravidelných časových intervalech. Výsledné hodnoty maximálního průhybu vzorků a doby nutné pro dosažení maximálního průhybu od začátku zkoušky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab.23: Výsledné hodnoty warpingu jednotlivých variant

Max. warping [mm]				
Vzorek	Pozice	Tloušťka [mm]	Čas – max.warping [hod]	Max. warping [mm]
VAR 1-A	1	5,9	1,52	1,26
VAR 1-B	4	5,7	1,53	1,33
VAR 2-A	2	6,2	1,70	1,06
VAR 2-B	A	6,2	1,70	1,27
STD-A	3	5,9	1,34	1,20
STD-B	B	6,1	1,40	1,31

Grafické vyjádření naměřených hodnot je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr.84: Grafické vyjádření výsledků warpingu jednotlivých zkušebních variant

Výsledky warpingu přináší často důležité informace zejména při hodnocení povrchových úprav vláknocementových výrobků, kdy je hodnocena zejména propustnost jednotlivých vrstev. U barvených výrobků je dosaženo maximálního průhybu po delší době, než u nebarvených výrobků. V tomto případě, kdy byly testovány výrobky s částečnou náhradou cementu a vápence kalovým odpadem nebyly zjištěny zásadní odlišnosti jednotlivých zkušebních variant jako u předchozích trvanlivostních testů. Jednotlivé zkušební varianty dosahují velmi podobných hodnot maximálního průhybu, kterého bylo dosaženo za téměř stejnou dobu od zahájení zkoušky. Na základě této zkoušky nebyly potvrzeny zásadní odlišnosti mezi testovanými a standardními vzorky.

8 Diskuze výsledků

V první etapě bylo provedeno ověření variability fyzikálních parametrů vznikajícího kalového odpadu. Jednou z největších nevýhod při zpracování odpadních surovin je proměnná variabilita jejich kvalitativních parametrů. Proto byly vzorky kalového odpadu odebírány po dobu cca 7 měsíců tak, aby bylo možné určit limitní hodnoty odpadního kalu, který bude možné ještě využít při výrobě. Mezi sledované parametry kalů patřila stanovení sušiny, litrové hmotnosti, pH, ztráty žiháním a v neposlední řadě také vizuálního posouzení. Na základě výsledků těchto zkoušek je možné stanovit nominální a hraniční hodnoty kalového odpadu, který lze ještě využít zpět při výrobě. Výrazné odchylky od nominálních hodnot jsou způsobeny nestandardním složením kalového odpadu, ke kterému může dojít například při mimořádném odpouštění vod z přípravy buničiny. V takovém případě lze očekávat ve složení kalového odpadu větší podíl vláknitých složek na úkor práškových materiálů. Pro zachování konstantních vlastností vláknocementových výrobků by měl být vždy zachován stejný poměr mezi vlákny a cementem. Pozornost byla věnována také vizuálnímu posouzení, při kterém byly porovnávány jednotlivé vzorky kalového odpadu. Výsledky ukazují širokou škálu odstínů kalů, které jsou závislé na surovinové zanášce. Zejména přítomnost mikrosiliky prakticky znemožňuje zpětné využívání kalů, protože zásadním způsobem změní odstín finálního výrobku.

Výsledky první etapy byly doplněny porovnáním chemického a materiálového složení kalového odpadu a standardní zanášky. Výsledky XRD a DTA analýzy ukazují na přítomnost stejných hydratačních produktů, které se však liší svojí intenzitou. To lze s největší pravděpodobností vysvětlit rozdílným poměrovým zastoupením jednotlivých složek u kalového odpadu. Odebrané vzorky byly podrobeny také chemické analýze, jejíž cílem bylo určení chemického složení kalového odpadu a standardní zanášky. Pozornost byla věnována zejména hlavním oxidům zastoupených v Portlandském cementu. Výsledné hodnoty obsahů oxidů CaO, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃ dosahují velmi podobných hodnot u kalů i standardní zanášky.

Cílem třetí etapy bylo ověření vlivu přídavku kalového odpadu na sledované pevnostní charakteristiky vláknocementových výrobků. Způsob výroby na Hatschekově stroji má přímý vliv na výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti výrobků a při výrobě malých vzorků dochází k odlišnému uspořádání jednotlivých vláken, což má zcela zásadní vliv na pevnostní charakteristiky a opakovatelnost vzorků. Z těchto důvodů byl navržen alternativní způsob přípravy laboratorních zkušebních těles o rozměrech 40x40x160 mm. Z odebraného kalu byl připraven výluh (filtrát), který byl použit jako náhrada záměšové vody pro výrobu zkušebních těles. Druhá sada zkušebních těles byla připravena s demineralizovanou vodou. Obě sady těles byly podrobeny stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 24 hod, 48 hod, 72 hod a 240 hod. Pevnostní charakteristiky byly záměrně testovány po 10 dnech tak, aby byla zajištěna stejná doba testování od výroby jako v praxi. Náhrada záměšové vody filtrátem z kalů se u počátečních pevností od 1 do 3 dnů neprojevila žádným zásadním poklesem pevností. Pevnosti v tahu za ohybu

a v tlaku dosahují velmi podobných hodnot. Pevnost v tlaku po 10 dnech zrání u trámců s kalovým filtrátem poklesla oproti referenčním trámcům o 5,2 %. U pevnosti v tahu ohybem je pokles pevnosti ještě výraznější a dosahuje snížení oproti referenci o 10,7 %.

Na základě sumarizace dosavadních výsledků byly ve čtvrté etapě navrženy zkušební receptury s kalovým odpadem pro zkoušky na výrobním stroji. Jednalo se o 2 zkušební receptury s 3% náhradou cementu a vápence kalovým odpadem. Dávkování kalů bylo vypočteno tak, aby byl zajištěn stejný obsah suchých látek ve směsi. Během mokrého procesu výroby bylo monitorováno a následně vyhodnoceno několik důležitých aspektů výroby.

Nejnižších podsítných podílů bylo dosaženo u zkušební varianty s náhradou vápence kalovým odpadem. Oproti standardní variantě došlo k poklesu podsítných podílů cca o 30 %. Pokles lze vysvětlit přítomností menšího množství nejmenších částic v surovinové zanášce. Měrný povrch vápence se pohybuje v hodnotách mezi 5500 – 6000 cm²/g a měrný povrch cementu dosahuje hodnot 3500 – 4000 cm²/g. Náhradou vápence kalovým odpadem došlo ke snížení množství jemných podílů ve směsi a tím i k dosažení nejnižších podsítných podílů.

Na základě výsledků podsítných podílů byly očekávány nejvyšší retence u zkušební varianty s náhradou vápence. Tento předpoklad byl však naplněn pouze u první vany, kde dosahovaly hodnoty retencí u standardní varianty 74,9 %, varianty s náhradou cementu 75,7 % a varianty s náhradou vápence 77,1 %. Výsledky retencí u 2. a 3. výrobní vany zcela neodpovídají výsledkům podsítných podílů. Pro získání odpovídajících hodnot retencí je však třeba delšího a ustáleného provozu, kterého při krátké zkoušce nelze dosáhnout.

Během provozní zkoušky s kalovým odpadem byly sledovány také tloušťky zelených desek. Z grafického vyjádření, uvedeného na obr. 54, je zřejmé, že došlo k poměrně výraznému rozkolísání jednotlivých hodnot tlouštěk. Při standardním režimu bylo dosaženo průměrné tloušťky 6,7 mm. U obou zkušebních variant byly naměřeny hodnoty dosahující 8,0 mm. Je třeba však dodat, že samotná přítomnost kalů v břečce nemusí být přímou příčinou výrazného rozkolísání tlouštěk. Kalový odpad byl dávkován ve speciálním režimu, při kterém došlo k pozastavení výroby. Tento prostoj je s největší pravděpodobností odpovědný za výrazné rozkolísání tlouštěk zelených desek.

Předpokladem při používání kalů je nárůst zmetkovitosti s největším zastoupením tvrdých kousků. Z důvodu snížení rizika nárůstu zmetkovitosti byl navržen alternativní způsob dávkování kalů, kterým bylo zajištěno dosažení minimální zmetkovitosti použitím kalového odpadu.

V páté etapě byly porovnávány fyzikálně-mechanické a trvanlivostní parametry vzorků jednotlivých zkušebních variant. Použitím kalového odpadu nedošlo k žádnému zásadnímu poklesu příčných a podélných pevností při porovnání se standardním výrobkem. Všechny testované vzorky dosahují minimálních požadovaných hodnot stanovených EN 494 [68]. Objemové hmotnosti jednotlivých variant dosahují také velmi podobných hodnot. U standardní varianty bylo dosaženo objemové hmotnosti 1,69 g/cm³, varianta s náhradou cementu dosahuje hodnoty 1,64 g/cm³ a varianta s náhradou vápence

1,67 g/cm³. Všechny varianty splňují požadavek na minimální objemovou hmotnost výrobku deklarovanou výrobcem, která musí být alespoň 1,60 g/cm³. Zkouška vodotěsnosti neprokázala žádné zásadní odlišnosti mezi jednotlivými variantami. Ani u jednoho ze zkoušených vzorků nedošlo po 24 hod k tvorbě kapek na rubové části vlnovek. Všechny zkoušené vzorky vyhověly požadavkům EN 494 [68]. Vyhodnocení této zkoušky je na obr.67. Stejně tak zkouška odolnosti proti nárazu neprokázala žádné odlišnosti mezi jednotlivými vzorky. Všechny testované vzorky vyhověly požadavkům dle EN 15057 [94]. Vyhodnocení zkoušky je na obr.68. Přídavkem kalového odpadu nebyl na základě všech provedených fyzikálně-mechanických zkoušek prokázán negativní vliv na výsledné kvalitativní parametry finálních výrobků.

Jednou z prováděných trvanlivostních zkoušek byla zkouška teplo-děšť. Při této zkoušce dochází k simulaci podmínek střešního pláště, při které dochází k cyklickému střídání působení vody a následného ohřevu povrchu vlnovek. Při této zkoušce nebyly prokázány žádné zásadní odlišnosti mezi testovanými vzorky. Všechny testované vzorky splňují požadavky dané normou EN 494 [68]. Po absolvování 50 cyklů teplo-děšť byly vzorky podrobeny ještě doplňující zkoušce s názvem metoda skrytých vad. Pomocí této metody lze identifikovat velmi drobné, vlasové praskliny v materiálu, které by nebyly za normálních podmínek viditelné. Tyto praskliny však mohou přinést cenné informace o vnitřní struktuře vzorků. U vzorků s kalovým odpadem byl prokázán větší výskyt drobných mikroprasklin, než u standardní receptury. Součástí vyhodnocení je detailní fotodokumentace uvedená v příloze č.11.

Při vyhodnocení zkoušky mrazuvzdornosti dle EN 494 [68] obě testované varianty splňují normativní požadavky týkající se koeficientu pevnosti R_L . Během zkoušky však byla věnována pozornost také možné delaminaci jednotlivých vrstev (poloh). U obou testovaných variant byla zjištěna přítomnost delaminace již po 58 cyklu. Naproti tomu standardní receptura bez kalů vykazovala delaminaci až při 117 cyklu. V průběhu 117 cyklu již vzorky s kalovým odpadem vykazovaly výraznou delaminaci a docházelo k degradaci struktury materiálu. Standardní zkouška mrazuvzdornosti byla doplněna ještě zkouškou mrazuvzdornosti v 3% roztoku NaCl. Výrazné delaminace u vzorků s kalovým odpadem bylo dosaženo již během 5. cyklu.

Zkouška nasáknutí-vysoušení opět splňuje normativní požadavky při hodnocení koeficientu pevnosti R_L . Při hodnocení lineárního zatížení zkušebních těles s kalovým odpadem po 20 cyklech však u obou testovaných variant dochází k zásadnímu poklesu zatížení téměř o 10 %. Hodnocena byla také deformace vzorku, při které dochází během maximálního zatížení. Zatímco u standardních vzorků nedochází k zásadnějším deformacím ani po uplynutí 20 cyklů, tak u obou zkušebních variant s kalovým odpadem již po 5 cyklech lze pozorovat změnu v deformaci o více než 50 %. Takto zásadní změna velmi negativně ovlivňuje celkovou životnost vláknocementového výrobku a v této mezi je neakceptovatelná. Deformační křivky jednotlivých vzorků byly použity pro výpočet energie nutné k porušení vzorku, tzv. Energy to Rupture (EtR). Z tvarů deformačních křivek lze poznat chování vzorků v průběhu zatěžování. Zatímco standardní vzorky nevykazují po 10 cyklech žádný zásadní pokles EtR, tak u obou testovaných variant s kalovým odpadem dochází k velmi výraznému poklesu. U varianty s náhradou cementu pokles EtR dosahuje 73 % a u varianty s náhradou vápence je tento pokles 55%. Z hodnot

EtR a tvarů jednotlivých křivek lze jednoznačně prokázat negativní vliv kalů na celkovou životnost vláknocementového výrobku.

Při zkoušce rozměrové stability byl u obou zkušebních variant prokázán zásadní nárůst rozměrových změn. U varianty s náhradou cementu dosahuje změna 15,8 % (4,4, mm/m) a u varianty s náhradou vápence dokonce 28,9 % (4,9, mm/m). Hodnoty rozměrových změn vláknocementové střešní krytiny pohybující se okolo 4,5 mm/m jsou z pohledu trvanlivosti výrobku velmi riskantní a v kombinaci se špatnou montáží výrobku mohou být zdrojem výrazného napětí vedoucího až k tvorbě prasklin.

Deformace vzorku působením vlhkosti (warping) je jednou z dalších důležitých metod pro hodnocení trvanlivosti vláknocementových výrobků. Při této zkoušce však nebyl prokázán negativní vliv kalového odpadu na výsledné hodnoty. Vzorky s kalovým odpadem dosahují srovnatelných hodnot max. deformací a doby nutné k dosažení této deformace v porovnání se standardní recepturou.

9 Závěr

Disertační práce byla zaměřena na aktuální téma alternativního využívání odpadních surovin vznikajících při průmyslové výrobě. Pro ověření možnosti využívání kalového odpadu zpět do vláknocementové matrice je nutné nejdříve analyzovat technologii výroby a vznik samotného kalového odpadu. V teoretické části práce jsou shrnuty poznatky o současně používaných technologiích pro výrobu vláknocementových výrobků. Detailně byla popsána zejména na vzduchu tuhnoucí technologie výroby společně se systémem technologických vod a kalového hospodářství s následnou separací kalového odpadu ze systému. V teoretické části práce jsou dále popsány vstupní suroviny používané pro výrobu vláknocementové střešní krytiny. Jedna z kapitol je věnována obecnému popisu vlastností vláknocementu. Dále jsou v této části práce uvedeny možnosti experimentálního využívání odpadních surovin při výrobě vláknocementu.

Experimentální práce řešila problematiku zakomponování kalového odpadu do vláknocementových výrobků. V první fázi byla provedena analýza vlastností kalového odpadu, která byla následně doplněna XRD a DTA analýzou, jejíž účelem bylo ověřit případnou podobnost ve složení kalového odpadu a standardní břečky. Následně byla navržena metoda pro výrobu laboratorních vzorků, na kterých bylo možné provést ověření vlivu kalového odpadu na fyzikálně-mechanické parametry výrobku. Výsledkem práce v etapách I.-III. je ucelený soubor informací o vlastnostech a dávkování kalového odpadu, který byl použit v následujících etapách pro výrobu na Hatschkově stroji. V rámci výroby zkušebních těles s kalovým odpadem byl navržen alternativní způsob jejich dávkování tak, aby byl vyloučen zvýšený výskyt zmetkových desek. Během zpracování kalového odpadu v rámci mokrého procesu výroby bylo hodnoceno několik důležitých ukazatelů výroby. V rámci mokrého procesu výroby byl prokázán negativní vliv pouze na tloušťky zelených desek. V tomto případě je však za rozkolísání tlouštěk odpovědný alternativní způsob dávkování kalového odpadu, při kterém došlo ke krátkému přerušení výroby. Téměř všechny fyzikálně-mechanické testy prováděné ve standardním režimu, tj. ve stejné době od výroby, neprokazují žádné zásadní změny v kvalitativních parametrech. Zásadní zlom však nastává u trvanlivostních zkoušek, kde zejména při zkouškách mrazuvzdornosti, nasáknutí-vysoušení a rozměrové stability lze pozorovat velmi výrazný pokles kvalitativních parametrů při porovnání se standardní recepturou. Vliv kalového odpadu na sledované vlastnosti je uveden v tabulce č.24.

Ze sumarizovaných výsledků je patrné, že s využitím 3 % kalového odpadu náhradou za cement nebo vápenec, dochází k zásadnímu poklesu zejména trvanlivostních parametrů finálních výrobků. U některých sledovaných parametrů tento pokles dosahuje desítek % a má zcela zásadní vliv na celkovou životnost výrobků. Zpětné využití 3 % kalového odpadu se ukazuje jako příliš vysoká hodnota a pro budoucí pokračování projektu by bylo vhodné snížit tuto dávku na hodnotu okolo 1 %.

Tab. 24: Shrnutí dosažených fyzikálně-mechanických a trvanlivostních vlastností na zkušebních tělesech s využitím kalového odpadu

Sledovaná vlastnost	VAR 1 – náhrada cementu	VAR 2 – náhrada vápence
Podsítné podíly	pokles o 9,7 %	Pokles o 30,0 %
Retence	srovnatelné	srovnatelné
Tloušťka zelené desky	rozkolísání hodnot	rozkolísání hodnot
Příčná pevnost	srovnatelné	srovnatelné
Podélná pevnost	srovnatelné	srovnatelné
Objemová hmotnost	srovnatelné	srovnatelné
Vodotěsnost	srovnatelné	srovnatelné
Impact test	srovnatelné	srovnatelné
Teplo-déšť	srovnatelné	srovnatelné
Metoda skrytých vad	větší výskyt prasklin	větší výskyt prasklin
Mrazuvzdornost	delaminace	delaminace
Mrazuvzdornost v CHRL	výrazná delaminace	výrazná delaminace
Nasáknut-vysoušení (zatížení 20 cyklů)	pokles o 9,8 %	pokles o 8,6 %
Nasáknut-vysoušení (deformace 10 cyklů)	pokles o 64,3 %	pokles o 49,6 %
EtR (10 cyklů)	pokles o 73,0 %	pokles o 55,0 %
Rozměrová stabilita	změna o 15,8 %	změna o 28,9 %
Warping	srovnatelné	srovnatelné

10 Přínos pro vědní obor

Pro vědní obor je největším přínosem identifikace metod, kterými je možné posoudit kvalitativní parametry kalového odpadu nebo vláknocementové standardní břečky. Jedná se zejména o stanovení litrové hmotnosti a sušiny kalového odpadu. V praxi jde o velmi jednoduché a rychlé zkoušky, které poskytují důležité informace o složení kalového odpadu. Na základě výsledků těchto analýz lze velmi rychle určit vhodnost použití kalového odpadu zpět do výroby. Výhodou těchto metod je také jejich finanční a časová nenáročnost.

Problémem v oboru vláknocementu je příprava laboratorních vzorků. Technologie výroby vláknocementu na Hatschekově stroji je natolik specifická, že nelze laboratorním způsobem vyrobit kvalitativně srovnatelné vzorky s výrobním strojem. Přímo na výrobním stroji dochází k formování vnitřní struktury finálního výrobku, která je daná právě způsobem přenosu vláknocementové složky na plstěnc a následným odvodněním. Ostatní postupy výroby laboratorních vzorků nereprezentují skutečný stav, kterého je dosaženo pouze na výrobním stroji. Proto byl navržen alternativní způsob přípravy laboratorních vzorků, který vychází ze standardní zkoušky pevností v tlaku a v tahu za ohybu s přesně definovanými vzorky 160x40x40 mm. Pro přípravu těchto vzorků byl však použit filtrát (výluh) získaný z kalového odpadu. Tímto způsobem bylo možné ještě před provozními zkouškami na výrobním stroji zjistit vliv kalového odpadu na pevnostní charakteristiky.

Dalším přínosem pro vědní obor je implementace metody skrytých vad, pomocí které je možné pozorovat velmi malé, vlasové praskliny v materiálu, které významně ovlivňují celkovou životnost finálních výrobků. Tato metoda může být uvedena v praxi jako doplňková zkouška k ostatním trvanlivostním zkouškám. Metodu je možné provádět jak na standardních tělesech, tak na tělesech, která byla podrobena nějakému vlivu zatěžování. V takovém případě je význam této metody ještě výraznější.

Mezi další přínosy pro vědní obor patří zavedení doplňkové zkoušky mrazuvzdornosti v 3% roztoku NaCl. Norma EN 494 definuje zkoušku mrazuvzdornosti, kde jsou prováděny zmrazovací cykly pouze ve vodě. Vláknocementové výrobky jsou vyráběny postupným navíjením daného počtu poloh až do dosažení požadované tloušťky výrobku. Právě soudržnost mezi jednotlivými polohami hraje klíčovou roli na fyzikálně-mechanické parametry finálního výrobku. Zkouška mrazuvzdornosti v roztoku NaCl výrazně urychluje průběh případné delaminace mezi jednotlivými polohami a urychluje získání výsledků v průběhu testování mrazuvzdornosti.

Dalším přínosem pro vědní obor je zavedení metod DTA a XRD do vláknocementové praxe. Pomocí těchto metod lze zjistit materiálové složení až u kalového odpadu, nebo standardní vláknocementové břečky.

11 Přínos pro praxi

Pro praxi je největším přínosem ověření možného použití kalového odpadu zpět do výroby. Výsledky trvanlivostních zkoušek popsanych v tabulce č.24 sice ukazují významný pokles kvalitativních parametrů, ale je potřeba dodat, že se jednalo o 3% dávkování, které představuje náhradu 45 kg cementu nebo vápence na každou záměs. Ve vláknocementovém průmyslu panuje obecná shoda na bezproblémovém využití kalového odpadu do 1 %. U fyzikálně- mechanických parametrů, vodotěsnosti a impact testu však nebyl prokázán žádný negativní vliv ani při dávkování 3 % kalového odpadu. Velmi pozitivních výsledků bylo dosaženo zejména při hodnocení mokré části výroby, kde nebyl zjištěn žádný negativní vliv na podsítné podíly a retence.

Dalším přínosem pro praxi je zavedení metody, při které je stanovena energie nutná k porušení vzorku, tzv. Energy to rupture (EtR). Tato metoda vychází ze zatěžovacích křivek při stanovení pevností výrobků a poskytuje velmi cenné informace o daném materiálu. Vzorky s velmi podobnou hodnotou maximálního zatížení se však mohou zásadně lišit v energii nutné k porušení vzorku. Tato metoda byla zavedena do praxe v rámci řešení disertační práce a stala se nezbytnou metodou pro získání komplexních informací o chování vzorků v průběhu zkoušek pevností. V rámci automatizace procesu byl vytvořen software, který automaticky generuje hodnoty EtR přímo s hodnotami finálních pevností. Nejedná se o normovou metodu a lze ji snadno uvést v praxi v jakémkoli jiném výrobním závodě. Díky této metodě lze prokázat zásadní odlišnosti v chování zatěžovaných vzorků, u kterých je určena velmi podobná hodnota pevností.

Roční produkce kalového odpadu, ve výrobním závodě pro vlnitou střešní krytinu, představuje cca 800 - 1200 tun v závislosti na vyrobeném množství. 3% náhradou kalového odpadu za cement nebo vápenec by bylo možné měsíčně uspořit cca 110 tun cementu nebo vápence. Výsledky trvanlivostních zkoušek s využitím 3 % kalového odpadu však prokázaly výrazné snížení kvalitativních parametrů. Proto je třeba v dalším pokračování projektu počítat s možným využitím kalového odpadu pouze ve výši 1 %. 1% náhrada kalového odpadu za cement nebo vápenec by vedla k měsíční úspoře cca 37 tun cementu nebo vápence.

V následující tabulce č.25 je uvedena produkce kalového odpadu za rok 2022 ve všech výrobních závodech, které jsou součástí holdingu.

Tab. 25: Produkce kalového odpadu za rok 2022 ze všech výrobních závodů v rámci holdingu

Výrobní závod	1	2	3	4	5	Celkem
Hrubá výroba [t]	70 115	74 199	51 198	64 226	29 191	288 929
Kalový odpad [t]	1 467	885	669	707	1 772	5 500
Kalový odpad [%]	2,10	1,20	1,30	1,10	6,10	1,90
30% využití - kal.odpad [t]	440	266	201	212	532	1650
30% využití - kal.odpad [%]	1,46	0,83	0,91	0,77	4,25	1,33
50% využití - kal.odpad [t]	734	443	335	354	886	2750
50% využití - kal.odpad [%]	1,05	0,60	0,65	0,55	3,04	0,95

Jako další alternativa pro využití kalového odpadu se nabízí řešení využití kalového odpadu do jiného výrobku, např. sendvičové akustické panely, kde by tento kalový odpad nebyl součástí nosné matrice, ale tvořil by pouze výplň. Tímto způsobem by byl eliminován negativní dopad kalového odpadu na objemové změny finálního výrobku.

12 Seznam použitých zdrojů

- [1] Aktualizace politiky druhotných surovin České republiky. Textová multimediální část: *Aktualizace politiky druhotných surovin České republiky pro období 2019-2022* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2019/1/IV_Politika-druhotnych-surovin-CR.pdf
- [2] ČSN EN 15804+A2 *Udržitelnost staveb – Environmentální prohlášení o produktu – Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů*, 2022.
- [3] Vyhláška č. 294/2005 Sb. *Vyhláška o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady*.
- [4] Internetové stránky společnosti Cembrit a.s. [online]. Šumperk, 2021. Dostupné z: <https://www.cembrit.cz/>
- [5] COOKE A.M. *Durability of Autoclaved Cellulose Fiber Cement Composites* [online]. Sydney, Australia: 7th Inorganic-Bonded Wood and Fiber Conference, 2000 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://www.fibreconsulting.com/publications/990925.durabilitypaper.pdf>
- [6] COOKE, A.M., AKERS, S.A.S. *The effect of aluminous additives on the properties of Autoclaved Cellulose Fibre Cement* [online]. Madrid, Spain: 11th Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference, 2000 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://www.fibreconsulting.com/publications/080812.Addition%20of%20Aluminous%20Additives%20to%20Autoclaved%20Fibre%20Cement.pdf>
- [7] SCHOON, J., HEYDEN, L.V., ELOY, P., GAIGNEUX, E.M., BUYSSER, K.D. *Waste fibercement: An interesting alternative raw material for a sustainable Portland clinker production*. Construction and building materials, Volume 36, 2012, str. 391-403, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.095.
- [8] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC, P. *PCZS-R-PRO.20.05 Příprava směsi Wehrhahn*. Receptura - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [9] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC, P. *PCZS-R-PRO.20.06 Příprava směsi Bellisovaná výroba*. Receptura - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [10] BÁRTA, R. *Chemie a technologie cementu*. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1961, ISBN 978-80-214-3475-2.
- [11] BAJZA, A., ROUSEKOVÁ, I. *Technologie betonu*. Nakladatelství Jaga group, Bratislava, 2006, ISBN 80-8076-032-2.
- [12] SVOBODA, L. A KOLEKTIV. *Stavební hmoty*. Nakladatelství Jaga group, Praha, 2013, ISBN 978-80-260-4972-2.

- [13] KHUDHAIR, M. H., EL YOUBI, M. S., ELHARFI, A. *Comparative study of the influence of inorganic additions on the physical-chemical properties and mechanical performance of mortar and/or concrete* [online]. Maroko: Moroccan Journal of Chemistry, 2017 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/318795527_Comparative_study_of_the_influence_of_inorganic_additions_on_the_physicalchemical_properties_and_mechanical_performance_of_mortar_andor_concrete
- [14] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *PCZS-R-QUM.10.01 Vstupní kontrola – specifikace používaných surovin pro výrobu*. Receptura - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [15] NOUSHINI A., SAMALI, S., VESSALAS K. *Effects of PVA fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete*. Construction and building materials, Volume 49, 2013, str. 374-383, DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035
- [16] BODNAROVA, L., HOŠKO, M. *Effects of type of PVA fibres on the properties of fibre-cement composites*, Special concrete and composites, 16th International conference, 2019, DOI.10.1063/5.0000479
- [17] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *Use of alternative PVA fibers for fibercement corrugated sheets production*. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2021
- [18] ZHANG, L., YONGBIAO, X., JIANG, W., GAO, W., FUYUBAI, W. *Study of the effect of PVA fiber lenght distribution on the fiber cement product*. 15th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference: Fuzhou, China, Paper 08, 2016, str. 1-7
- [19] HORIKOSHI, T., OGAWA, A., SAITO, T., HOSHIRO, H. *Properties of Polyvinylalcohol Fiber as Reinforcing Materials for Cementitious Composites..* International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications, 2006, str. 145-153, DOI. 10.1617/2912143942.016
- [20] ZHANG, L., YONGBIAO, X., JIANG, W., LIANG, L. *Effect of PVA fiber on air-cured cement product..* 14th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference: Da Nang, Vietnam, 2014, str. 253-259
- [21] VANĚREK, J. A KOLEKTIV. *Kovové a dřevěné materiály*. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2006
- [22] DROCHYTKA, R. *Plastické látky*. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2007
- [23] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *Use of alternative cellulose for fibercement corrugated sheets production*. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2019

- [24] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC, P. *PCZS-R-PRO.20.02 Přípravná buničiny Bell*. Receptura - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [25] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC, P. *PCZS-R-PRO.20.03 Přípravná buničiny Wehrhahn.* Receptura - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [26] BODNAROVA, L., HOŠKO, M., PIKNA, O. *Using of Limestone cement in Fibre-Cement corrugated sheets production*, Solid State Phenomena, 21th International Conference on Silicate Binders, ICBM 2022 Brno, 8 December 2022 through 8 December 2022 (in print)
- [27] MELICHAR, T., PROCHÁZKA, D. *Studium vlivu jemnozrnných příměsí z alternativních zdrojů na fyzikálně-mechanické parametry*. Časopis Beton TKS, Materiály a technologie, 2011
- [28] AITCIN, P. C. *Vysokohodnotný beton*. Edice betonové stavitelství, Praha, 2005, ISBN 80-86769-39-9
- [29] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC, P. *A different way of preparing a microsilica suspension for the production of fibercement boards*. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2018
- [30] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC, P. *PCZS-R-PRO.20.01 Příprava 50% suspenze mikrosiliky*. Receptura - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [31] HOŠKO, M. *PCZS-TP-QUM.016 Zkušební výroba se zanáškovou suspenze mikrosiliky stabilizované přidavkem dispergačního činidla*. Technologický pokyn - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2019
- [32] HELA, R. *Technologie betonu II*. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2007
- [33] BOUASKER, M., MOUNANGA, P., TURCRY, P., LOUKILI, A., KHELIDJ, A. *Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions*. Cement and Concrete Composites, Volume 30, 2008, str. 13-22, DOI.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.004
- [34] OPRAVILOVÁ, L., STANĚK, T., KUBÁTOVÁ, D., VŠIANSKÝ, D. *Vliv přidavku alternativních surovin na užité vlastnosti cementových kompozitů.* Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., Brno, 2009, str. 187-191, ISBN 978-80-254-4447-4
- [35] L. ZHEN, Y. ZHANG, L. XINMENG; *Development of air-cured fiber cement technology in China and the application of microsilica*, 15th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference: Fuzhou, China, Paper 03, 2016

- [36] HOŠKO, M., MARTINEC, P. *Use of an alternative flocculant for the treatment of wastewater from the painting line. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2018*
- [37] HAERING, CH. *Application of flocculants to facilitate dewatering. 16th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference: Cape Town, South Africa, 2018, str. 108-113*
- [38] HOŠKO, M. *TP-MAH-11-17 Zkušební provoz ČOV F1 s využitím flokulantu z výrobní linky. Technologický pokyn - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2017*
- [39] COOKE, T. *Formation of Films on Hatschek Machines [online]. Australia: Building Materials and Technology Pty Ltd., 2007 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <http://www.fibreconsulting.com/publications/011011.hatschekfilmsummary.pdf>*
- [40] BODNÁROVÁ, L. *Kompozitní materiály. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2007*
- [41] AKHAVAN, A., CATCHMARK, J., RAJABIPOUR, F. *Ductility enhancement of autoclaved cellulose fiber reinforced cement boards manufactured using a laboratory method simulating the Hatschek proces. Construction and Building Materials, Volume 135, 2017, str. 251–259, DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.001*
- [42] HEYDEN, L.V.D. *Technical specifications of matrix raw materials for Hatschek technology based fibercement – A pragmatic approach. Construction and Building Materials, Volume 24, 2010, str. 147-157, DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.017*
- [43] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *The influence of different stirrers speed in the vats with cylindrical sieve on the strength characteristic of final products. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2022*
- [44] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *Pigmented matrix of fibercement corrugated sheets. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2021*
- [45] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *Top layer application on the surface of corrugated sheets. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2021*
- [46] HOŠKO, M. *PCZS-TP-QUM.00.116 Zkouška nastavení hašplí Wehrhahn. Technologický pokyn - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2021*
- [47] HOŠKO, M., MALÁ, J., POJMON, V. *PCZS-P-PRO.30.01 Výroba vláknocementu. Popis procesu - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2019*

- [48] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC, P. *PCZS-KPL-QUM.40.01 Kontrola vláknocementových vlnitých desek*. Kontrolní plán - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2019
- [49] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC, P. *PCZS-KPL-QUM.40.04 Výrobky z linky Bell*. Kontrolní plán - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [50] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC, P. *PCZS-KPL-QUM.40.05 Výrobky z linky Wehrhahn*. Kontrolní plán - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [51] IKAI, S., REICHERT, J.R., RODRIGUES, A.V., ZAMPIERI, V.A. *Azbestos-free technology with new high toughness polypropylen (PP) fibers in air-cured hatschek proces*. Construction and Building Materials, Volume 24, 2010, str.171-180, DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.019
- [52] HOŠKO, M., MARTINEC, P. *Influence of steel templates quality on the final appearance of corrugated sheets*. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2018
- [53] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *PCZS-PN-QUM.40.01 Podniková norma*. Podniková norma - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2022
- [54] CAHLÍKOVÁ, Z., HRDLIČKA, B., NOVOTNÝ, Z. *OS-S 21.2 Nakládání s vodami a ochrana vod*. Organizační směrnice - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2007
- [55] MALÁ, J., HRDLIČKA, B. *NO 2110 Systém technologických vod*. Návod na obsluhu - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2013
- [56] MALÁ, J., PÍREK, I., POJMON, V. *NO 2086 Úprava technologických vod v sedimentačních filtrech*. Návod na obsluhu - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2015
- [57] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *Modified proces of wastewater treatment from fibercement production*. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2022
- [58] HOŠKO, M. *PCZS-TP-QUM.00.130 Úprava vody před jejich vypouštěním do kanalizace*. Technologický pokyn - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2022
- [59] CAHLÍKOVÁ, Z., MALÁ, J., NOVOTNÝ, Z. *MPŘ 4036 Provozní řád čistírny odpadních vod*. Místní provozní řád - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2017

- [60] HOŠKO, M., MALÝ, J., POJMON, V. *PCZS-S-PRO.30.02 Čerpání kalů z weekend tanku do hlavního filtru (Wehrhahn)*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2019
- [61] HOŠKO, M., KRÁTKÝ, R., POJMON, V. *PCZS-S-PRO.30.03 Čerpání kalů z weekend tanku do hlavního filtru (Bell)*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2019
- [62] MARTINEC, P., HROCH, P., POJMON, V. *PCZS-NO-PRO.30.07 Odvodňovací stroj na zpracování kalů*). Návod na obsluhu - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2022
- [63] Směrnice Komise 1999/77/ES, Úřední věstník Evropské unie, 1999
- [64] NEGRO, C., FUENTE, E., JARABO, R. *Use of wastes as a source of minerals and cellulose in fiber reinforced cement*. 12th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference: Aalborg, Denmark, 2010, str. 98-105
- [65] BEAUTY, M. *Partial substitution of cellulose with tissue waste paper in fibercement sheets*. 16th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference: Cape Town, South Africa, 2018, str. 54-61
- [66] BATATUNDE, A., TAIWO, A., OLUFEMI, B., AKINBODUNSE, V.A., O.R.ADAMOLEKUN, O.R. *Physico-mechanical properties of cement bonded board from mixture of agro-waste*, 13th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference: Canberra, Australia, 2012, str. 95-101
- [67] GATANI, M.P., TONOLI, G.H.D., FIORELLI, J., CRAVO, C.M., H.SALVASTONE, H. *Durability evaluation of cementitious boards with peanut husks*, 13th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference: Canberra, Australia, 2012, str. 189-198
- [68] ČSN EN 494+A1 *Vláknocementové vlnité desky a tvarovky – Specifikace výroby a zkušební metody*, 2016.
- [69] GRAM, H.E. *Durability of natural fibres in concrete* [online]. Stockholm, Švédsko: Cement and Concrete Research Institute at the Institute of Technology, 1983 [cit. 2021-04-20] Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:960479/FULLTEXT01.pdf>
- [70] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *Reuse of fibercement dust for corrugated sheets production*. Závěrečná zpráva - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2021
- [71] HOŠKO, M. *PCZS-TP-QUM.00.124 Zkušební výroba X2 – Využití odpadního prachu z PHU*. Technologický pokyn - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2022

- [72] BODNAROVA, L., HOŠKO, M., PIKNA, O. *Use of alternative raw materials for the production of fiber cement product*, Solid State Phenomena, 21th International Conference on Silicate Binders, ICBM 2022 Brno, 8 December 2022 through 8 December 2022 (in print)
- [73] HEYDEN, L.V.D. *Fibre cement: A perfectly recyclable building material*, 13th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference: Canberra, Australia, 2012, str. 211-225
- [74] HOŠKO, M., HRDLIČKA, B., MARTINEC, P. *PCZS-S-QUM.20.19 Stanovení pH*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [75] MALÁ, J., VEČERKOVÁ, I. *PCZS-S-QUM.20.24 Stanovení sušiny provozní břečky v míchačce a tampele*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [76] HOŠKO, M., MALÁ, J., MARTINEC. *PCZS-S-QUM.20.20 Stanovení hustoty provozní břečky*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [77] HOŠKO, M., MALÁ, J. *PCZS-NO-QUM.20.02 Světelný box X-Rite Macbeth Spectralight III*. Návod na obsluhu - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [78] HOŠKO, M., MALÁ, J. *PCZS-S-QUM.10.09 Stanovení ztráty žiháním (LOI)*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [79] ČSN EN 196-1: *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*, 2016
- [80] HOŠKO, M., MALÁ, J. *PCZS-S-QUM.10.21 Stanovení sušiny v podsítových vodách z výrobních van*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [81] HOŠKO, M., MALÁ, J. *PCZS-S-QUM.10.23 Stanovení retence provozní břečky na výrobním stroji*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [82] HOŠKO, M., MALÁ, J. *PCZS-S-QUM.10.37 Stanovení profilu vlhkosti a tloušťky surové desky*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [83] MARTINEC, P., HOŠKO, M., MALÁ, J. *PCZS-S-QUM.40.07 Stanovení profilu tloušťky, vlhkosti a objemové hmotnosti hotových výrobků*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020

- [84] MARTINEC, P., HOŠKO, M., MALÁ, J. *PCZS-S-QUM.40.02 Zkouška zatížení na mezi pevnosti a průhybu*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [85] MARTINEC, P., HOŠKO, M., MALÁ, J. *PCZS-S-QUM.40.03 Zkouška ohybového momentu*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [86] MARTINEC, P., HRDLIČKA, B. *ZP 3001 Zkouška nepropustnosti vody*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2012
- [87] MARTINEC, P., HOŠKO, M., HRDLIČKA, B. *PCZS-S-QUM.40.04 Impact test*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2020
- [88] MARTINEC, P., HRDLIČKA, B. *ZP 3017 Zkouška teplo/děšť (heat/rain)*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2012
- [89] MARTINEC, P., HRDLIČKA, B. *ZP 3022 Stanovení skrytých vad ve vlnité krytině pomocí fluoresceinu sodného a methylenové modři*. Standardní operační postup - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2012
- [90] ROJKA, T. *LI 4407 Dimension stability – moisture movements*. Laboratorní instrukce - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2016
- [91] KUBÍN, Z. *LI 4404 Warping*. Laboratorní instrukce - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2016
- [92] DUFKA, A., NOVÁK, J. *Laboratorní experimentální metody*. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2007
- [93] ČSN EN 196-2: *Metody zkoušení cementu – Část 2: Chemický rozbor cementu*, 2016
- [94] ČSN EN 15057: *Vláknocementové vlnité desky – Zkušební metoda pro stanovení odolnosti proti nárazu*, 2006
- [95] HOŠKO, M. *PCZS-TP-QUM.00.070 Test dávkování kalů na lince Wehrhahn*. Technologický pokyn - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2021
- [96] KONTOLEONTOS F., TSAKIRIDIS P., MARINOS A., KATSIOTIS N., KALOUIDAS V., KATSIOTI M. *Dry-grinded Ultrafine Cements Hydration. Physicochemical and Microstructural Characterization*. Materials research, Volume 16, 2013, DOI.10.1590/S1516-14392013005000014
- [97] ESTEVES L.P. *On the hydration of water-entrained cement-silica systems: Combined SEM, XRD and thermal analysis in cement pastes*. Thermochemica Acta, Volume 518, 2011, str. 27-35, DOI.org/10.1016/j.tca.2011.02.003

[98] DIAS,C.M.R., CINCOTTO, M.A., SAVASTANO H., JOHN, V.M. *Long-term aging of fiber-cement corrugated sheets – The effect of carbonation, leaching and acid rain*. Cement and Concrete Composites, Volume 30, 2008, str. 255-265, DOI.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.11.001

[99] MUSA, N.M. *Thermal Analysis of Cement Paste Partially Replaced With Neem Seed Husk Ash*. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, 2014, str.1101-1105, ISSN 2229-5518

[100] HOŠKO, M. *PCZS-TP-QUM.00.124 Zkušební výroba X2 – Použití kalového odpadu*. Technologický pokyn - Interní dokument společnosti Cembrit a.s., Šumperk, 2021

[101] HOŠKOVÁ, Š., KUBEN, J., RAČKOVÁ, P. *Integrální počet funkcí jedné proměnné*. Studijní opory s převažujícími distančními prvky pro předměty teoretického základu studia, Vysoká škola Báňská, Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2006

13 Seznam tabulek

- Tab. 1: Průměrné chemické složení vláknocementových materiálů
- Tab. 2: Hlavní složky v cementářském slínku
- Tab. 3: Vybrané příměsi a jejich vliv na finální vláknocementové výrobky
- Tab. 4: Technické parametry vláknocementové vlnité krytiny
- Tab. 5: Požadavky na vypouštěnou vodu
- Tab. 6: Průběh jednotlivých cyklů zkoušky teplo-děšť
- Tab. 7: Výsledky fyzikálních analýz vláknocementových kalů
- Tab. 8: Porovnání chemického složení vláknocementové břečky, kalového odpadu a cementu
- Tab. 9: Receptury zkušebních trámečků
- Tab. 10: Porovnání chemického složení filtrátu kalů a procesní vody
- Tab. 11: Zkušební receptury použité na výrobním stroji
- Tab. 12: Koloristické hodnoty zkušebních variant
- Tab. 13: Výsledné hodnoty pevnostních charakteristik
- Tab. 14: Vyhodnocení zkoušky vodotěsnosti
- Tab. 15: Vyhodnocení zkoušky odolnosti proti nárazu
- Tab. 16: Vyhodnocení zkoušky teplo-děšť po 50 cyklech
- Tab. 17: Postup zkoušky metoda skrytých vad
- Tab. 18: Vyhodnocení zkoušky metoda skrytých vad
- Tab. 19: Výsledné hodnoty mrazuvzdornosti po 100 cyklech
- Tab. 20: Výsledné hodnoty zkoušky nasáknutí-vysoušení po 20 cyklech
- Tab. 21: Výsledné hodnoty EtR jednotlivých variant při zkoušce nasáknutí-vysoušení
- Tab. 22: Výsledné hodnoty rozměrové stability jednotlivých variant
- Tab. 23: Výsledné hodnoty warpingu jednotlivých variant
- Tab. 24: Shrnutí dosažených fyzikálně-mechanických vlastností na zkušebních tělesech s využitím kalového odpadu
- Tab. 25: Produkce kalového odpadu za rok 2022 ze všech výrobních závodů v rámci holdingu

14 Seznam obrázků

- Obr. 1: Příklady použití vláknocementu: Vlnitá krytina, skládána krytina a fasádní deska
Obr. 2: α -C₂S hydrát
Obr. 3: Tobermorit
Obr. 4: Obecné složení na vzduchu tuhnoucího vláknocementu
Obr. 5: PVA vlákna před použitím do výroby vláknocementu
Obr. 6: Vysoká soudržnost PVA vlákna s cementovou maticí
Obr. 7: Vlevo – Delaminace, bobtnání a penetrace vody, Vpravo – Tvorba vlákna s „chlupatým“ povrchem
Obr. 8: Zaplnění prostoru mezi zrny cementu křemičitým úletem
Obr. 9: Mechanismus působení flokulantu
Obr. 10: Schéma technologie výroby vláknocementové vlnité krytiny
Obr. 11: Schéma Hatschkova výrobního stroje – vana se síťovým válcem
Obr. 12: Pohled na Hatschekův výrobní stroj: 1-Tampela, 2-Míchačka, 3-Rozmělnovač, 4-Koloidní mlýn, 5-Formátový válec, 6-Mokrá část jednotky a zvlňovací proces
Obr. 13: Technické parametry vláknocementové vlnité krytiny
Obr. 14: Technologické schéma zpracování kalů a kalového hospodářství
Obr. 15: Odvodňovací stroj na zpracování kalů a sedimentační jímky
Obr. 16: Vliv obsahu celulózy z odpadního kalu na výsledné pevnosti vláknocementu
Obr. 17: Vliv obsahu celulózy z odpadního kalu na nasákavost vláknocementu
Obr. 18: Vývoj objemových hmotností jednotlivých vzorků
Obr. 19: Vývoj nasákavosti jednotlivých vzorků
Obr. 20: Vývoj pevnosti jednotlivých vzorků
Obr. 21: Vliv mísících poměrů na pevnost v tahu ohybem
Obr. 22: Vliv mísících poměrů na modul pružnosti
Obr. 23: Zkušební vzorky po vytvrnutí: a – průřez vzorkem, b – povrch vzorku
Obr. 24: Odpadní vláknocementový prach použitý pro výrobu vláknocementových vlnitých desek
Obr. 25: Vliv přídatku odpadního prachu na pevnosti vláknocementových vlnitých desek
Obr. 26: Vliv přídatku odpadního prachu na objemovou hmotnost vláknocementových vlnitých desek
Obr. 27: Podrcený vláknocementový materiál a PP pásy
Obr. 28: Diagram postupu prací v Etapě I
Obr. 29: Diagram postupu prací v Etapě II
Obr. 30: Diagram postupu prací v Etapě III
Obr. 31: Diagram postupu prací v Etapě IV
Obr. 32: Diagram postupu prací v Etapě V
Obr. 33: Světelná kabina SpectraLight III
Obr. 34: Žíhací pec s kelímky
Obr. 35: Zkouška vodotěsnosti vláknocementových desek
Obr. 36: Zkouška teplo-děšť
Obr. 37: Stanovení odolnosti proti nárazu

Obr. 38: Aplikace indikačních činidel na rubovou stranu desky při zkoušce metody skrytých vad

Obr. 39: Schématický nákres výřezu zkušebního tělesa z vlnité krytiny pro zkoušku rozměrové stability

Obr. 40: Kalibrace digitálního měřidla pomocí skleněné destičky a následné měření délky zkušební vzorku

Obr. 41: Sestava pro měření deformace vzorků působením vlhkosti (warping)

Obr. 42: Odběr vzorků kalového odpadu z homogenizátoru a stanovení litrové hmotnosti

Obr. 43: Grafické vyjádření výsledků sušiny a litrové hmotnosti kalového odpadu

Obr. 44: Grafické vyjádření výsledků pH a ztráty žíháním kalového odpadu

Obr. 45: Vizuální posouzení kalového odpadu

Obr. 46: XRD difraktoqramy testovaných vzorků břechky a kalů

Obr. 47: DTA analýza standardní zanášky – tampela

Obr. 48: DTA analýza kalového odpadu – Vzorek A

Obr. 49: DTA analýza kalového odpadu – Vzorek B

Obr. 50: Souhrnné grafické vyjádření vlivu náhrady záměsové vody za filtrát z kalů na pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku

Obr. 51: Odběr kalů do IBC kontejnerů, jejich míchání a dávkování do rozmělnovače

Obr. 52: Grafické vyjádření výsledků podsítných podílů jednotlivých zkušebních variant

Obr. 53: Grafické vyjádření výsledků retencí jednotlivých zkušebních variant

Obr. 54: Grafické vyjádření tloušťky zelených desek v průběhu zkoušky

Obr. 55: Zjednodušené schéma dávkování kalů

Obr. 56: Povrch vylisovaných výrobků: vlevo – kalový odpad, vpravo – standardní břecha

Obr. 57: Vizuální porovnání finálních výrobků

Obr. 58: Vizuální porovnání odstínu zkušebních variant ve světelném boxu při standardním osvětlení D65

Obr. 59: Zkouška zatížení na mezi pevnosti

Obr. 60: Zkouška ohybového momentu

Obr. 61: Grafické vyjádření výsledků příčných pevností jednotlivých zkušebních variant

Obr. 62: Grafické vyjádření výsledků podélných pevností jednotlivých zkušebních variant

Obr. 63: Grafické vyjádření výsledků Aspect ratio jednotlivých zkušebních variant

Obr. 64: Grafické vyjádření zatížení na mezi pevnosti jednotlivých variant

Obr. 65: Grafické vyjádření ohybového momentu jednotlivých variant

Obr. 66: Grafické vyjádření výsledků objemových hmotností jednotlivých zkušebních variant

Obr. 67: Vyhodnocení zkoušky vodotěsnosti jednotlivých zkušebních variant

Obr. 68: Vyhodnocení zkoušky odolnosti proti nárazu

Obr. 69: Rozložení zkušebních vlnovek v průběhu zkoušky teplo-děšť

Obr. 70: Lícová strana testovaných vlnovek po 50 cyklech

Obr. 71: Rubová strana vlnovek zkušební střechy A

Obr. 72: Rubová strana vlnovek zkušební střechy B

Obr. 73: Delaminace jednotlivých vzorků v průběhu zkoušky mrazuvzdornosti

Obr. 74: Vzhled povrchů testovaných vzorků v průběhu mrazuvzdornosti

- Obr. 75: Delaminace jednotlivých vzorků při 5.cyklu mrazuvzdornosti v 3% roztoku NaCl
- Obr. 76: Zkouška nasáknutí-vysoušení – lineární zatížení
- Obr. 77: Zkouška nasáknutí-vysoušení – deformace při max. zatížení
- Obr. 78: Výpočet obsahu rovinné množiny
- Obr. 79: EtR – Zkouška nasáknutí -vysoušení – STD – 0, 10 a 20 cyklů
- Obr. 80: EtR – Zkouška nasáknutí -vysoušení – VAR 1 – 0, 10 a 20 cyklů
- Obr. 81: EtR – Zkouška nasáknutí -vysoušení – VAR 2 – 0, 10 a 20 cyklů
- Obr. 82: Namáčení zkušebních vzorků umístěných v rámu ve vodě
- Obr. 83: Výsledné hodnoty rozměrové stability jednotlivých zkušebních variant
- Obr. 84: Grafické vyjádření výsledků warpingu jednotlivých zkušebních variant

15 Seznam příloh

Příloha č. 1: Vyhodnocení XRD analýzy – Standardní břecha

Příloha č. 2: Vyhodnocení XRD analýzy – Kalový odpad – vzorek 1

Příloha č. 3: Vyhodnocení XRD analýzy – Kalový odpad – vzorek 2

Příloha č. 4: Vyhodnocení XRD analýzy – Kalový odpad – vzorek 3

Příloha č. 5: Chemický rozbor LABTECH Kalový odpad

Příloha č. 6: Chemický rozbor LABTECH Standardní břecha

Příloha č. 7: Pevnosti zkušebních trámečků Standard

Příloha č. 8: Pevnosti zkušebních trámečků Kaly

Příloha č. 9: Chemický rozbor vod Provozní voda

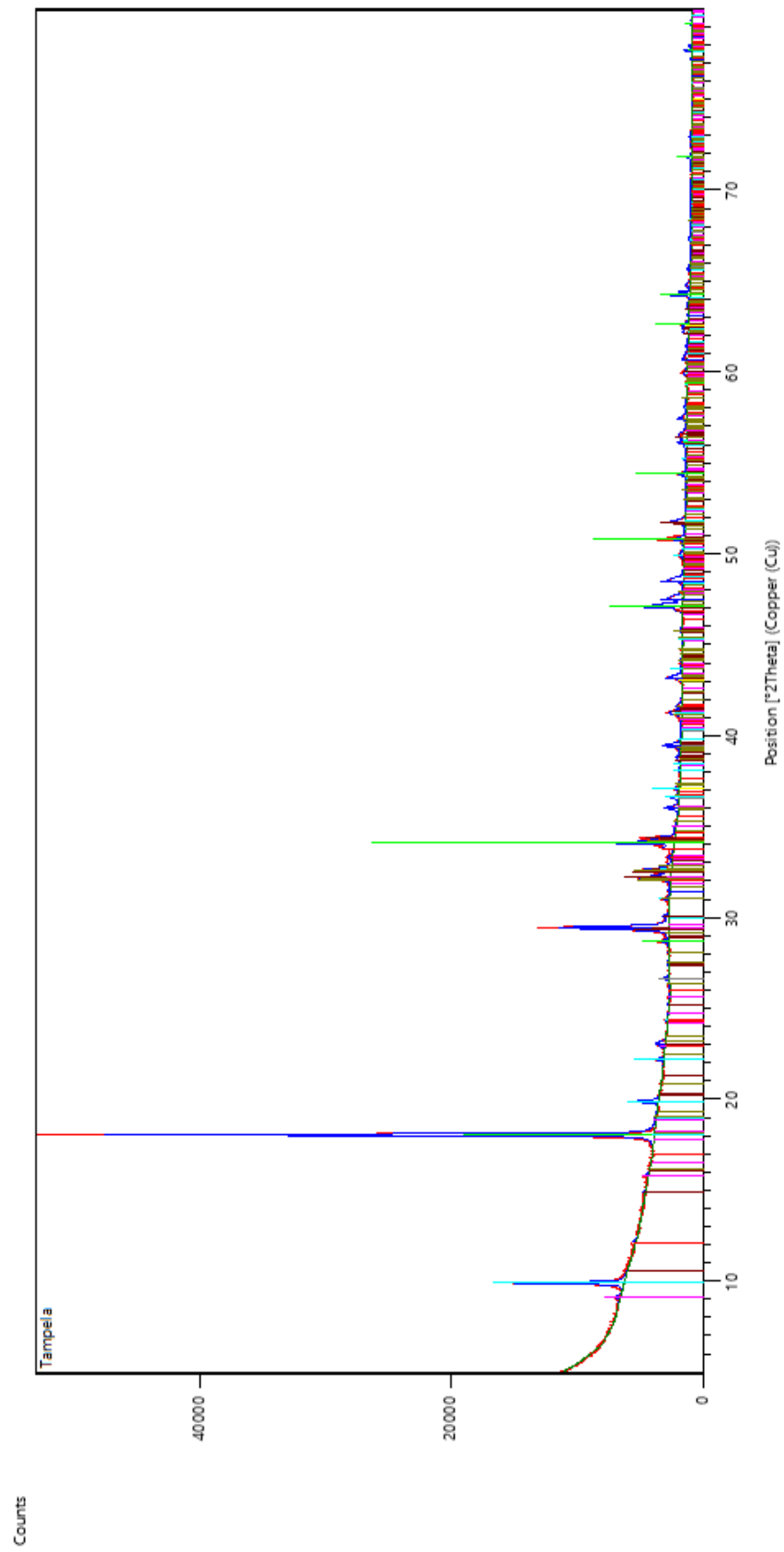
Příloha č. 10: Chemický rozbor vod Filtrát z kalů

Příloha č. 11: Metoda skrytých vad

Přílohy

Příloha č. 1: Vyhodnocení XRD analýzy – Standardní břečka

Main Graphics, Analyze View:

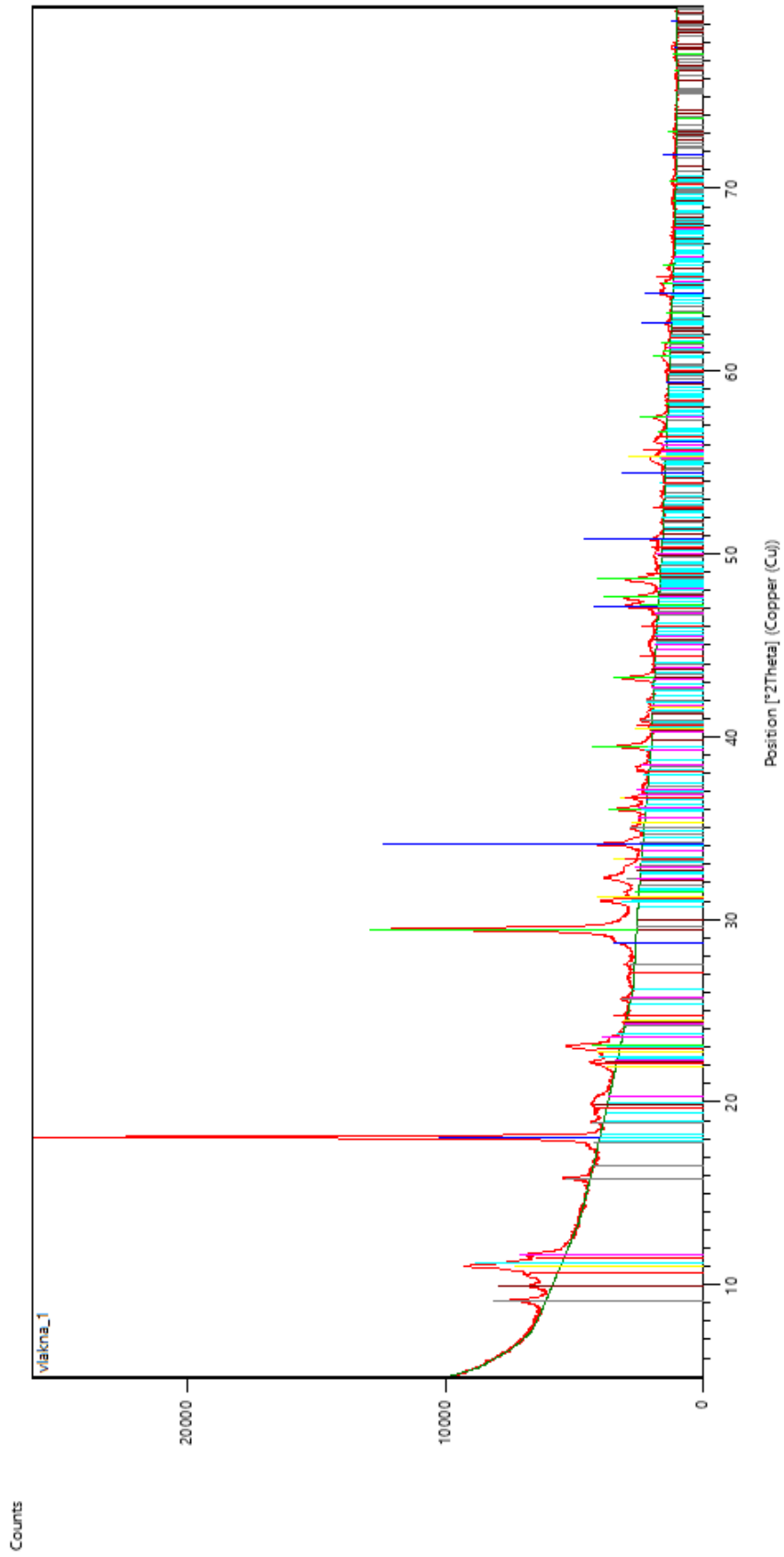


Pattern List:

Display Color	Mineral Name	Compound Name	Chemical Formula	Ref. Code
clBlue	Calcite	Calcite	C1 Ca1 O3	98-008-0869
clLime	Portlandite	Portlandite	H2 Ca1 O2	98-006-4950
clGray	Quartz low	Quartz low	O2 Si1	98-002-7834
clMaroon	Hatrumite	Hatrumite	Ca3 O5 Si1	98-008-1100
clAqua	Kuzelite	Kuzelite	H12 Al1 Ca2 O11 S0.5	98-010-0138
clFuchsia	Ettringite	Ettringite	H64 Al2 Ca6 O50 S3	98-002-7039
clOlive	Larnite	Larnite	Ca2 O4 Si1	98-007-9550
clYellow	Periclase	Periclase	Mg1 O1	98-003-1051
clRed	Brownmillerite	Brownmillerite	Al1 Ca2 Fe1 O5	98-000-9197

Příloha č. 2: Vyhodnocení XRD analýzy – Kalový odpad - vzorek 1

Main Graphics, Analyze View:

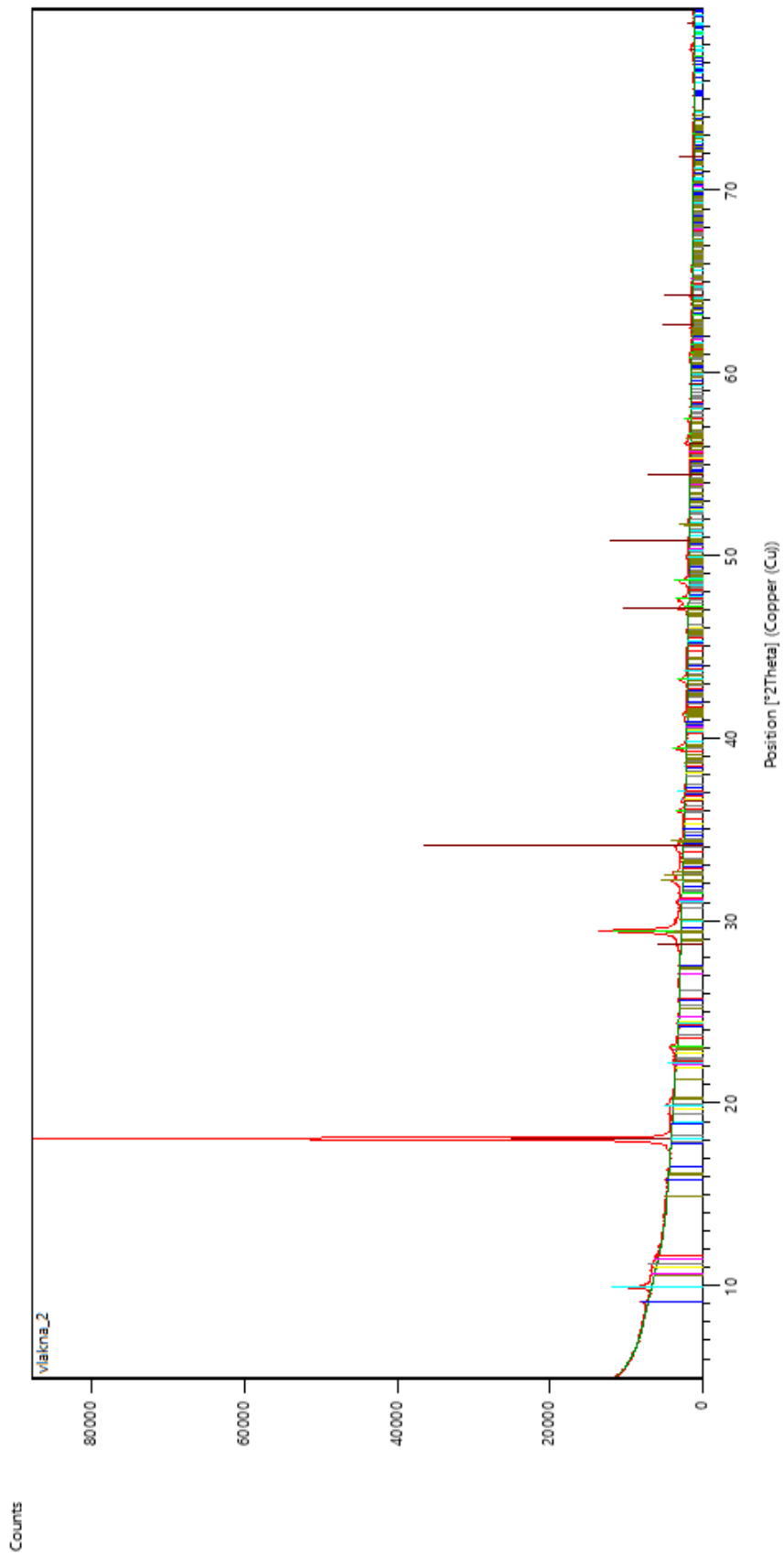


Pattern List:

Display Color	Mineral Name	Compound Name	Chemical Formula	Ref. Code
clBlue	Portlandite	Portlandite	H2 Ca1 O2	98-006-4951
clLime	Calcite	Calcite	C1 Ca1 O3	98-002-8827
clGray	Ettringite	Ettringite	H64 Al2 Ca6 O50 S3	98-002-7039
clMaroon	Kuzelite	Kuzelite	H12 Al1 Ca2 O11 S0.5	98-010-0138
clAqua	Hydrocalumite	Hydrocalumite	C0.92 H44.64 Al4 Ca8 Cl1.92 O37.2	98-006-3250
clFuchsia		Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate	Ca4 Al2 C O9 !11 H2 O	00-014-0083
clYellow		Calcium Aluminum Hydrate	Ca4 Al2 O7 !13 H2 O	00-011-0203
clRed		Calcium Aluminum Oxide Hydrate	Ca4 Al2 O7 !x H2 O	00-002-0077

Příloha č. 3: Vyhodnocení XRD analýzy – Kalový odpad – vzorek 2

Main Graphics, Analyze View:

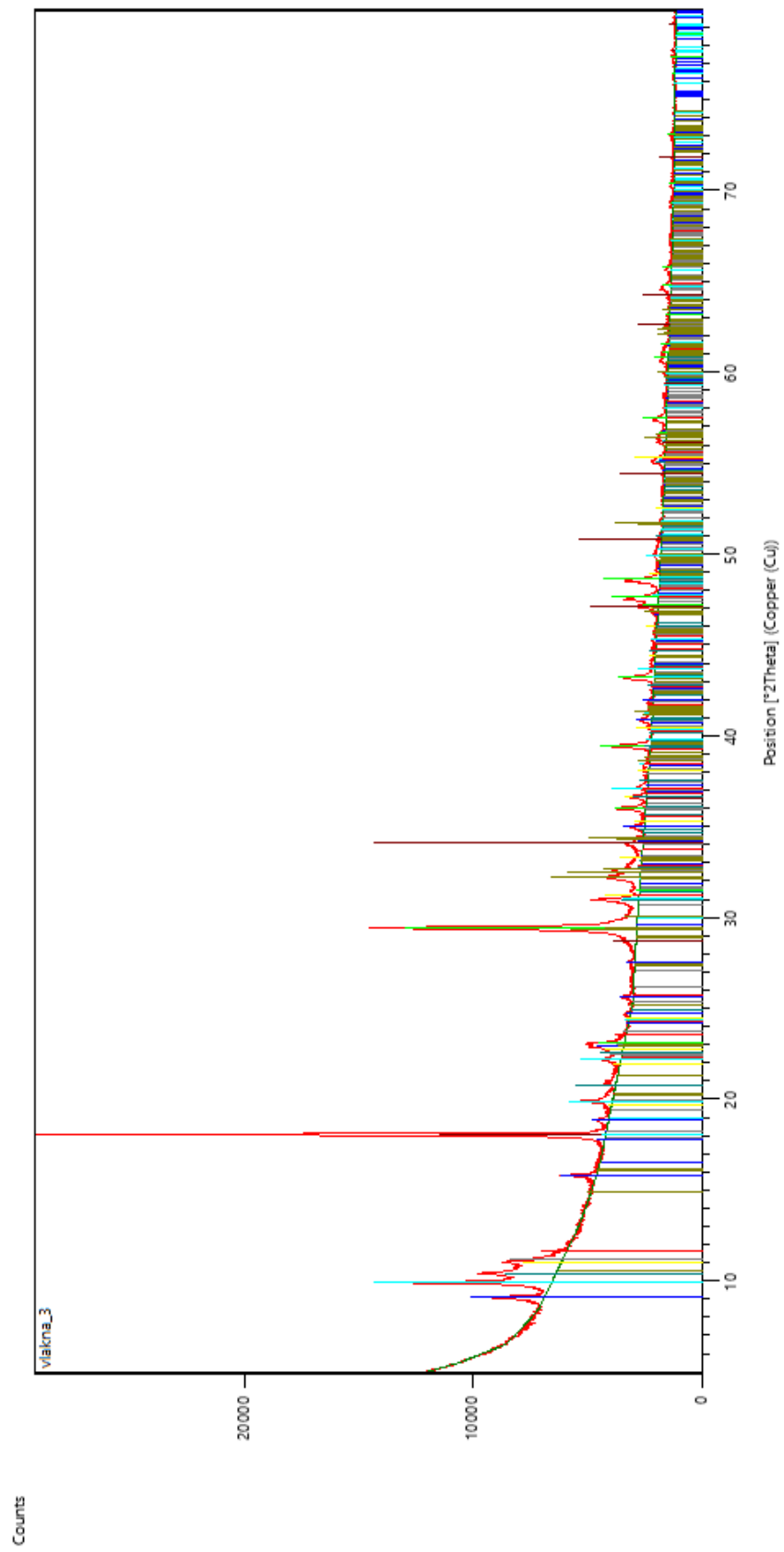


Pattern List:

Display Color	Mineral Name	Compound Name	Chemical Formula	Ref. Code
clBlue	Ettringite	Ettringite	H64 Al2 Ca6 O50 S3	98-002-7039
clLime	Calcite	Calcite	C1 Ca1 O3	98-002-8827
clGray	Hydrocalumite	Hydrocalumite	C0.92 H44.64 Al4 Ca8 Cl1.92 O37.2	98-006-3250
clMaroon	Portlandite	Portlandite	H2 Ca1 O2	98-006-4951
clAqua	Kuzelite	Kuzelite	H12 Al1 Ca2 O11 S0.5	98-010-0138
clFuchsia		Calcium Aluminum Oxide Hydrate	Ca4 Al2 O7 !x H2 O	00-002-0077
clYellow		Calcium Aluminum Hydrate	Ca4 Al2 O7 !13 H2 O	00-011-0203
clRed		Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate	Ca4 Al2 C O9 !11 H2 O	00-014-0083
clOlive	Hatrurite	Hatrurite	Ca3 O5 Si1	98-008-1100

Příloha č. 4: Vyhodnocení XRD analýzy – Kalový odpad – vzorek 3

Main Graphics, Analyze View:



Pattern List:

Display Color	Mineral Name	Compound Name	Chemical Formula	Ref. Code
clBlue	Ettringite	Ettringite	H64 Al2 Ca6 O50 S3	98-002-7039
clLime	Calcite	Calcite	C1 Ca1 O3	98-002-8827
clGray	Hydrocalumite	Hydrocalumite	C0.92 H44.64 Al4 Ca8 Cl1.92 O37.2	98-006-3250
clMaroon	Portlandite	Portlandite	H2 Ca1 O2	98-006-4951
clAqua	Kuzelite	Kuzelite	H12 Al1 Ca2 O11 S0.5	98-010-0138
clYellow		Calcium Aluminum Hydrate	Ca4 Al2 O7 !13 H2 O	00-011-0203
clRed		Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate	Ca4 Al2 C O9 !11 H2 O	00-014-0083
clTeal		Calcium Aluminum Oxide Sulfite Hydrate	Ca4 Al2 O6 S O3 !11 H2 O	00-041-0477
clOlive	Hatrurite	Hatrurite	Ca3 O5 Si1	98-008-1100

Příloha č. 5: Chemický rozbor LABTECH Kalový odpad

LABTECH s.r.o., Zkušební laboratoř, Polní 340/23, 639 00 Brno
Zkušební laboratoř č. 1147 akreditovaná ČIA dle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018



Zkušební laboratoř Brno
Polní 340/23, 639 00 Brno



PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 7303/2021

Strana: 1
Stran celkem: 1

Zákazník: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební, Ustav technologie stavebních
hmot a dílců
Veveří 95
602 00 Brno

Analyzovaný materiál: Stavební materiály
Datum a čas příjmu: 10.5.2021 9:43
Datum analýzy: 10.5.2021 - 20.5.2021
Odběr provedl: zákazník

Č. vzorku	Označení vzorku				
8974	Kaly				
Parametr	jednotka	č.vzorku: 8974	NM	Identifikace zkušební metody SOP	Akr
Sušina	%	91,30	10%	GRA 03A:ČSN 720102, ČSN EN 14346:2007	(1) A
Chloridy	mg/kg suš.	<100		VOL 10B:ČSN EN 1015-17,ČSN EN 196-2, ČSN EN 14620	(1) A
Chrom šestimocný	mg/kg suš.	1,52	20%	SPE 11:ČSN ISO 11083	(1) A
Síra celková vyjádřená jako SO ₃	% suš.	4,62	10%	SIL 17:ČSN 720118,ČSN EN 1744-1+A1	(1) A
Sířany vyjádřené jako SO ₃	% suš.	4,16	10%	SIL 16:ČSN 720117,ČSN EN 196-2,ČSN EN 1744-1+A1	(1) A
Oxid vápenatý	% suš.	41,1	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid hořečnatý	% suš.	0,744	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid draselný	% suš.	2,15	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid hlinitý	% suš.	5,03	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid železitý	% suš.	2,53	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Chrom	mg/kg suš.	74,3	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885,ČSN EN 13346:2001, ČSN465735, ČSN EN ISO 16968	(1) A
Oxid manganatý	% suš.	0,054	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid sodný	% suš.	0,265	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid křemičitý	% suš.	11,1	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A

Poznámka:

Výsledky analýz se vztahují na vzorek, jak byl přijat.

Informace uvedené v označení vzorku byly převzaty od zákazníka, Zkušební laboratoř za ně nenes odpovědnost.

Vzorek byl pro stanovení oxidů kovů vytaven s LiBO₂.

Číslice u označení zkušební metody označuje pracoviště LABTECH s.r.o., na kterém byl parametr stanoven: 1 - Zkušební laboratoř Brno,

Polní 340/23, 639 00 Brno; 2 - Zkušební laboratoř Paskov, Rudé Armády 637, 739 21 Paskov; 4 - Hygienická laboratoř Klatovy,

Pod Nemocnicí 683, 339 01 Klatovy.

Nejistota měření (NM) je definována jako rozšířená nejistota měření na hladině významnosti 95% s koeficientem rozšíření $k=2$ a nezahrnuje nejistotu odběru. Nejistota je vyjádřena v souladu s EA-4/16. K hodnotám výsledků pod spodní a nad horní mezi stanovitelnosti se nejistota nevztahuje

Informace "Akr" rozlišuje standardní operační postupy (SOP) v rozsahu akreditace (A), postupy mimo rozsah akreditace jsou označeny (N).

Zkoušky s uplatněným flexibilním rozsahem akreditace jsou označeny FRA. Zkoušky v rozsahu akreditace provedené v jiné laboratoři jako subdodávky jsou označeny SA.

Výsledky zkoušek se týkají pouze zkoušených předmětů uvedených výše.

Protokol nenahrazuje jiné dokumenty, např. správního charakteru a státního odborného dozoru.

Tento protokol může být reprodukován pouze celý, jinak jen s písemným souhlasem laboratoře.

Protokol vystaven:
24.5.2021

Ing. Pavel Hradil
vedoucí Zkušební laboratoře Brno

Příloha č. 6: Chemický rozbor LABTECH Standardní břečka

LABTECH s.r.o., Zkušební laboratoř, Polní 340/23, 639 00 Brno
Zkušební laboratoř č. 1147 akreditovaná ČIA dle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018



Zkušební laboratoř Brno
Polní 340/23, 639 00 Brno



PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 7304/2021

Strana: 1
Stran celkem: 1

Zákazník: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních
hmot a dílců
Veveří 95
602 00 Brno

Analyzovaný materiál: Stavební materiály
Datum a čas příjmu: 10.5.2021 9:43
Datum analýzy: 10.5.2021 - 20.5.2021
Odběr provedl: zákazník

Č. vzorku	Označení vzorku				
8975	Tampela				
Parametr	jednotka	č.vzorku: 8975	NM	Identifikace zkušební metody SOP	Akr
Sušina	%	95,08	10%	GRA 03A:ČSN 720102, ČSN EN 14346:2007	(1) A
Chloridy	mg/kg suš.	1260	20%	VOL 10B:ČSN EN 1015-17,ČSN EN 196-2, ČSN EN 14629	(1) A
Chrom šestimocný	mg/kg suš.	2,21	20%	SPE 11:ČSN ISO 11083	(1) A
Síra celková vyjádřená jako SO ₃	% suš.	2,75	10%	SIL 17:ČSN 720118,ČSN EN 1744-1+A1	(1) A
Sírany vyjádřené jako SO ₃	% suš.	2,64	10%	SIL 16:ČSN 720117,ČSN EN 196-2,ČSN EN 1744-1+A1	(1) A
Oxid vápenatý	% suš.	43,3	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid hořečnatý	% suš.	0,767	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid draselný	% suš.	2,61	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid hlinitý	% suš.	4,16	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid železitý	% suš.	1,98	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Chrom	mg/kg suš.	50,6	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885,ČSN EN 13346:2001, ČSN465735, ČSN EN ISO 16968	(1) A
Oxid manganatý	% suš.	0,052	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid sodný	% suš.	0,329	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A
Oxid křemičitý	% suš.	11,8	10%	ICP 05:ČSN EN ISO 11885,ČSN 720101	(1) A

Poznámka:

Výsledky analýz se vztahují na vzorek, jak byl přijat.

Informace uvedené v označení vzorku byly převzaty od zákazníka, Zkušební laboratoř za ně nenes odpovědnost.

Vzorek byl pro stanovení oxidů kovů vytaven s LiBO₂.

Číslice u označení zkušební metody označuje pracoviště LABTECH s.r.o., na kterém byl parametr stanoven: 1 - Zkušební laboratoř Brno, Polní 340/23, 639 00 Brno; 2 - Zkušební laboratoř Paskov, Rudé Armády 637, 739 21 Paskov; 4 - Hygienická laboratoř Klatovy,

Pod Nemocnicí 683, 339 01 Klatovy.

Nejistota měření (NM) je definována jako rozšířená nejistota měření na hladině významnosti 95% s koeficientem rozšíření $k=2$ a nezahrnuje nejistotu odběru. Nejistota je vyjádřena v souladu s EA-4/16. K hodnotám výsledků pod spodní a nad horní mezi stanovitelnosti se nejistota nevztahuje

Informace "Akr" rozlišuje standardní operační postupy (SOP) v rozsahu akreditace (A), postupy mimo rozsah akreditace jsou označeny (N). Zkoušky s uplatněným flexibilním rozsahem akreditace jsou označeny FRA. Zkoušky v rozsahu akreditace provedené v jiné laboratoři jako subdodávky jsou označeny SA.

Výsledky zkoušek se týkají pouze zkoušených předmětů uvedených výše.



Protokol nenahrazuje jiné dokumenty, např. správního charakteru a státního odborného dozoru.

Tento protokol může být reprodukován pouze celý, jinak jen s písemným souhlasem laboratoře.

Protokol vystaven:
24.5.2021

Ing. Pavel Hradil
vedoucí Zkušební laboratoře Brno

Příloha č. 7: Pevnosti zkušebních trámečků Standard

Vysoké učení technické v Brně, Zkušební laboratoř při UTHD FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno, Pracoviště Purkyňova Zkušební laboratoř č. 1396 akreditovaná ČIA podle CSN EN ISO/IEC 17025:2018		
 	Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku zkušebních těles ČSN EN 196-1	list 1/3
Výtisk č. 1 2 3	Protokol o zkoušce č.: 1174/21	

Objednatel:	Cembit a.s. Výrobní závod Šumperk Příčná 26 787 55 Šumperk	Místo provedení zkoušky:	Pracoviště Purkyňova Purkyňova 139, Brno 612 00
Údaje dodané objednatelem:		Datum dodání vzorku do ZL:	20. 4. 2021
Datum odběru cementu:	-	Datum výroby vzorků:	20. 4. 2021
Úprava vzorku:	Neuvedeno	Označení objednatelem:	Standart S1_24, S1_48, S1_72, S1_240
Druh zkoušek:	Kontrolní zkoušky	Označení vzorků ZL:	P6481 – a až l
		Druh zkušební těles:	Trámečky (40x40x160) mm
		Číslo objednávky:	Ze dne 20. 4. 2021
		Zkušební pracovníci:	Ing. Martin Tažký
		Odběr vzorků:	Neakreditovaným způsobem

1. Zkušební metody a postupy

ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti

2. Zkušební zařízení

Posuvné měřítko, váhy, 2 x zkušební lis, stopky.

Zkušební zařízení byla řádně ověřena nebo kalibrována.

3. Údaje o zkoušení

Vzorek cementu byl dodán objednatelem zkoušky do ZL a zkušební tělesa byla vyrobena pracovníky ZL. Zkoušky byly provedeny bez anomálií dle výše uvedených postupů.

4. Výsledky zkoušek

Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulkách číslo 1 až 8.

Tab. 1: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Hmotnost [g]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
ZL	Objednatelem			l	b	h	
P6481-a	Standart S1_24	20. 4. 2021	580,26	150,4	40,4	40,2	2250
P6481-b		21. 4. 2021	592,97	150,2	41,2	40,3	2250
P6481-c		1	585,57	150,2	40,4	40,2	2270
Průměr			586,27	150,3	40,6	40,2	2260

Tab. 2: Výsledky stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku			
ZL	Objednatelem		Zatížení [kN]	Pevnost [N.mm ⁻²]	Zatížení [kN]		Pevnost [N.mm ⁻²]	
P6481-a	Standart S1_24	20. 4. 2021	1,88	4,3	34,70	35,40	21,7	22,1
P6481-b		21. 4. 2021	1,97	4,4	35,90	35,70	22,4	22,3
P6481-c		1	1,94	4,5	35,80	35,90	22,4	22,4
Průměr			1,93	4,4	35,57		22,2	



Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku zkušebních těles
ČSN EN 196-1

list 2/3

Protokol o zkoušce č.: 1174/21

Tab. 3: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Hmotnost [g]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
ZL	Objednatelem			l	b	h	
P6481-d	Standart S1_48	20. 4. 2021	585,38	159,6	40,2	40,1	2280
P6481-e		22. 4. 2021	596,87	159,3	40,9	40,3	2280
P6481-f		2	595,99	159,4	40,9	40,1	2280
Průměr			592,75	159,4	40,6	40,2	2280

Tab. 4: Výsledky stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku			
ZL	Objednatelem		Zatížení	Pevnost	Zatížení		Pevnost	
			[kN]	[N.mm ⁻²]	[kN]	[kN]	[N.mm ⁻²]	[N.mm ⁻²]
P6481-d	Standart S1_48	20. 4. 2021	2,67	6,2	57,50	56,70	35,9	35,4
P6481-e		22. 4. 2021	2,85	6,5	59,40	59,00	37,1	36,9
P6481-f		2	2,80	6,4	59,20	59,80	37,0	37,4
Průměr			2,77	6,3	58,60		36,6	

Tab. 5: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Hmotnost [g]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
ZL	Objednatelem			l	b	h	
P6481-g	Standart S1_72	20. 4. 2021	594,00	160,2	40,5	40,1	2280
P6481-h		23. 4. 2021	594,30	160,0	41,0	40,1	2270
P6481-i		3	591,68	160,2	40,6	40,1	2270
Průměr			593,33	160,1	40,7	40,1	2270

Tab. 6: Výsledky stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku			
ZL	Objednatelem		Zatížení	Pevnost	Zatížení		Pevnost	
			[kN]	[N.mm ⁻²]	[kN]	[kN]	[N.mm ⁻²]	[N.mm ⁻²]
P6481-g	Standart S1_72	20. 4. 2021	3,36	7,7	70,40	74,10	44,0	46,3
P6481-h		23. 4. 2021	2,84	6,5	71,60	70,30	44,8	43,9
P6481-i		3	2,97	6,8	69,70	69,60	43,6	43,5
Průměr			3,06	7,0	70,95		44,3	

Tab. 7: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Hmotnost [g]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
ZL	Objednatelem			l	b	h	
P6481-j	Standart S1_240	20. 4. 2021	588,02	159,9	39,9	40,1	2300
P6481-k		30. 4. 2021	596,31	159,5	40,8	40,2	2290
P6481-l		10	596,25	159,7	40,6	40,2	2290
Průměr			593,53	159,7	40,4	40,1	2290



Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku zkušebních těles
ČSN EN 196-1

list 3/3

Protokol o zkoušce č.: 1174/21

Tab. 8: Výsledky stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku			
ZL	Objednatel		Zatížení [kN]	Pevnost [N.mm ⁻²]	Zatížení [kN]		Pevnost [N.mm ⁻²]	
P6481-j	Standart S1_240	20. 4. 2021	3,36	7,9	101,60	101,50	63,7	63,6
P6481-k		30. 4. 2021	3,79	8,7	101,10	102,80	63,2	64,3
P6481-l		10	3,74	8,6	100,00	96,80	62,5	60,5
Průměr			3,63	8,4	100,63		62,9	

5. Prohlášení zkušební laboratoře

Výsledky zkoušek se týkají pouze zkoušených vzorků a protokol neznamená schválení výrobku orgánem udělujícím akreditaci ani žádným jiným orgánem. Tam, kde zkušební laboratoř není odpovědná za odběr vzorků, se výsledky zkoušek vztahují ke vzorkům, jak byly přijaty. Protokol může být reprodukován jedině celý, jinak s písemným souhlasem zkušební laboratoře. Protokol nebo jeho části nesmí být měněny.

Zodpovědný zpracovatel:

Ing. Martin Ťažký

Vedoucí ZL při ÚTHD FAST VUT v Brně, Pracoviště Purkyňova:


prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

V Brně dne:

6. 5. 2021

- Konec protokolu o zkoušce -

Příloha č. 8: Pevnosti zkušebních trámeček Kaly

Vysoké učení technické v Brně, Zkušební laboratoř při UTHD FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno, Pracoviště Purkyňova Zkušební laboratoř č. 1396 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018		
 L 1396	Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku zkušebních těles ČSN EN 196-1	list 1/3
Výtisk č. 1 2 3	Protokol o zkoušce č.: 1175/21	

Objednatel:	Cembrit a.s. Výrobní závod Šumperk Příčná 26 787 55 Šumperk	Místo provedení zkoušky:	Pracoviště Purkyňova Purkyňova 139, Brno 612 00
Údaje dodané objednatelem:		Datum dodání vzorku do ZL:	20. 4. 2021
Datum odběru cementu:	-	Datum výroby vzorků:	20. 4. 2021
Úprava vzorku:	Neuvedeno	Označení objednatelem:	Test T1_24, T1_48, T1_72, T1_240
Druh zkoušek:	Kontrolní zkoušky	Označení vzorků ZL:	P6481 – m až x
		Druh zkušební těles:	Trámečky (40x40x160) mm
		Číslo objednávky:	Ze dne 20. 4. 2021
		Zkušební pracovníci:	Ing. Martin Ťažký
		Odběr vzorků:	Neakreditovaným způsobem

1. Zkušební metody a postupy

ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti

2. Zkušební zařízení

Posuvné měřítko, váhy, 2 x zkušební lis, stopky.

Zkušební zařízení byla řádně ověřena nebo kalibrována.

3. Údaje o zkoušení

Vzorek cementu byl dodán objednatelem zkoušky do ZL a zkušební tělesa byla vyrobena pracovníky ZL. Na žádost objednatele byly vzorky vyrobeny za použití dodaného filtrátu namísto demineralizované vody dle ČSN EN 196-1. Zkoušky byly provedeny bez anomálií dle výše uvedených postupů.

4. Výsledky zkoušek

Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulkách číslo 1 až 8.

Tab. 1: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Hmotnost [g]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
ZL	Objednatelem			l	b	h	
P6481-m	Test T1_24	20. 4. 2021	590,70	160,0	40,2	40,2	2280
P6481-n		21. 4. 2021	597,04	159,7	40,6	40,2	2290
P6481-o		1	599,21	160,0	41,0	40,3	2270
Průměr			595,65	159,9	40,6	40,2	2280

Tab. 2: Výsledky stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku			
ZL	Objednatelem		Zatížení [kN]	Pevnost [N.mm ⁻²]	Zatížení [kN]		Pevnost [N.mm ⁻²]	
P6481-m	Test T1_24	20. 4. 2021	2,09	4,8	36,60	35,00	22,9	21,9
P6481-n		21. 4. 2021	1,92	4,4	35,50	37,40	22,2	23,4
P6481-o		1	2,03	4,6	35,80	33,60	22,4	21,0
Průměr			2,01	4,6	35,65		22,3	



Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku zkušebních těles
ČSN EN 196-1

list 2/3

Protokol o zkoušce č.: 1175/21

Tab. 3: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Hmotnost [g]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
ZL	Objednatelem			l	b	h	
P6481-p	Test T1_48	20. 4. 2021	593,87	160,8	40,9	40,2	2250
P6481-q		22. 4. 2021	601,73	159,4	41,6	40,3	2260
P6481-r		2	593,19	159,3	40,8	40,2	2270
Průměr			596,26	159,8	41,1	40,2	2260

Tab. 4: Výsledky stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku			
ZL	Objednatelem		Zatížení	Pevnost	Zatížení		Pevnost	
			[kN]	[N.mm ⁻²]	[kN]	[kN]	[N.mm ⁻²]	[N.mm ⁻²]
P6481-p	Test T1_48	20. 4. 2021	2,52	5,7	60,60	67,00	37,9	41,9
P6481-q		22. 4. 2021	2,81	6,3	61,50	61,50	38,4	38,4
P6481-r		2	2,80	6,4	60,60	59,10	37,9	36,9
Průměr			2,71	6,1	61,72		38,6	

Tab. 5: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles



Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Hmotnost [g]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
ZL	Objednatelem			l	b	h	
P6481-s	Test T1_72	20. 4. 2021	599,01	159,7	40,7	40,2	2290
P6481-t		23. 4. 2021	592,90	159,9	40,4	40,0	2300
P6481-u		3	598,85	159,9	40,9	40,1	2290
Průměr			596,92	159,8	40,7	40,1	2290

Tab. 6: Výsledky stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku			
ZL	Objednatelem		Zatížení	Pevnost	Zatížení		Pevnost	
			[kN]	[N.mm ⁻²]	[kN]	[kN]	[N.mm ⁻²]	[N.mm ⁻²]
P6481-s	Test T1_72	20. 4. 2021	3,02	6,9	72,70	74,30	45,4	46,4
P6481-t		23. 4. 2021	3,20	7,4	70,90	74,60	44,3	46,6
P6481-u		3	3,28	7,5	72,10	74,30	45,1	46,4
Průměr			3,17	7,3	73,15		45,7	

Tab. 7: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Hmotnost [g]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
ZL	Objednatelem			l	b	h	
P6481-v	Test T1_240	20. 4. 2021	599,28	159,9	40,9	40,0	2290
P6481-w		30. 4. 2021	594,83	159,7	40,5	40,1	2300
P6481-x		10	599,83	159,8	40,2	40,0	2300
Průměr			594,65	159,8	40,5	40,0	2300

Vysoké učení technické v Brně, Zkušební laboratoř při ÚTHD FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno, Pracoviště Purkyňova Zkušební laboratoř č. 1396 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018		
 	Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku zkušebních těles ČSN EN 196-1	list 3/3
	Protokol o zkoušce č.: 1175/21	

Tab. 8: Výsledky stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku

Označení vzorků		Datum výroby a zkoušení, stáří vzorků	Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku			
ZL	Objednatelem		Zatížení [kN]	Pevnost [N.mm ⁻²]	Zatížení [kN]		Pevnost [N.mm ⁻²]	
P6481-v	Test T1_240	20. 4. 2021	3,29	7,6	97,80	93,90	61,1	58,7
P6481-w		30. 4. 2021	3,25	7,5	95,00	95,20	59,4	59,5
P6481-x		10	3,20	7,5	93,70	97,00	58,6	60,6
Průměr			3,25	7,5	95,43		59,6	

5. Prohlášení zkušební laboratoře

Výsledky zkoušek se týkají pouze zkoušených vzorků a protokol neznamená schválení výrobku orgánem udělujícím akreditaci ani žádným jiným orgánem. Tam, kde zkušební laboratoř není odpovědná za odběr vzorků, se výsledky zkoušek vztahují ke vzorkům, jak byly přijaty. Protokol může být reprodukován jedině celý, jinak s písemným souhlasem zkušební laboratoře. Protokol nebo jeho části nesmí být měněny.

Zodpovědný zpracovatel:

Ing. Martin Tažký

Vedoucí ZL při ÚTHD FAST VUT v Brně, Pracoviště Purkyňova:

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

V Brně dne:

6. 5. 2021

- Konec protokolu o zkoušce -

Příloha č. 9: Chemický rozbor vod Provozní voda



Agrovýzkum Rapotín s.r.o., Zkušební laboratoř
 zkušební laboratoř akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018
 Výzkumníků 267, 788 13 Rapotín
 tel.: 583 392 142-3, e-mail: ales.vesely@vuchs.cz



Protokol o zkoušce č. 122-V-2021/J

List číslo : 1
 Počet listů: 2

Zákazník : *Cembrít a.s. Provozovna Šumperk*
 Příčná 26
 787 55 Šumperk

Vzorek číslo : 122-V
Materiál : Odpadní voda
Popis vzorku : provozní voda po 1 dnech provozu, linka WHRHN
Odběr vzorku : zákazník
Datum příjmu : 7. 4.2021 **Datum provedení zkoušky :** 7. 4.2021 - 30. 4.2021

Parametr	Výsledek	Jednotka	Nejistota měření+-	Dle metodiky
Chloridy (Cl ⁻)	662	mg/l	10%	(A)-SOP 25 (ČSN ISO 9297)
Sírany (SO ₄ ²⁻)	3240	mg/l	15%	(A)-SOP 22 (STN 757430)
Draslík (K)	4380	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 9964-2)
Sodík (Na)	375	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 9964-1)
Celkový fosfor	0.05	mg/l	10%	(A)-SOP 19 (ČSN EN ISO 6878)
BSK-5	85.1	mg/l	12%	(A)-SOP 14 (ČSN EN 1899-1.25814)
pH (25 °C)	12.6		0.1	(A)-SOP 15 (ČSN ISO 10 523)
Nerozpuštěné látky	91.0	mg/l	10%	(A)-SOP 12 (ČSN EN 872)
Nerozp.látky-zbytek po žihání	46.0	mg/l	10%	(A)-SOP 12 (ČSN 757350)
Rozpuštěné látky-sušina 105°C	11800	mg/l	10%	(A)-SOP 13 (ČSN 757346)
Rozpuštěné anorganické soli-RAS	10800	mg/l	10%	(A)-SOP 13 (ČSN 757346, ČSN 757347)
Nepolární extrah.látky (NEL)	0.66	mg/l	20%	(S)-ext.akr.lab.
Extrahovatelné látky (EL)	1.91	mg/l	30%	(S)-ext.akr.lab.
Železo (Fe)	0.38	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I ČSN 75 7385
Měď (Cu)	< 0.20	mg/l	-	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 8288)
Zinek (Zn)	0.09	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 8288)
Vápník (Ca)	840.7	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 7980)
Hořčík (Mg)	0.44	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 7980)
Dusík dusičnanový (N-NO ₃)	0.15	mg/l	8%	(A)-SOP 16 (ČSN ISO 7890-3)
CHSK-Cr	281	mg/l	12%	(A)-SOP 23-east 1 (ČSN ISO 15705)
Chrom 6+	0.011	mg/l	10%	(A)-SOP 46 (ČSN ISO 11083)
Chrom (Cr)	0.016	mg/l	25%	(A)-SOP 21-II (ČSN EN 1233)
Olovo (Pb)	< 0.005	mg/l	-	(A)-SOP 21-II (ČSN EN ISO 15586)

Příloha č. 10: Chemický rozbor vod Filtrát z kalů



Agrovýzkum Rapotín s.r.o., Zkušební laboratoř
 zkušební laboratoř akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018
 Výzkumníků 267, 788 13 Rapotín
 tel.: 583 392 142-3, e-mail: ales.vesely@vuchs.cz



L 1340

Protokol o zkoušce č. 134-V-2021/J

List číslo : 1

Počet listů: 2

Zákazník : *Cembrít a.s. Provozovna Šumperk*
 Příčná 26
 787 55 Šumperk

Vzorek číslo : 134-V

Materiál : Odpadní voda

Popis vzorku : filtrát kalolisu

Odběr vzorku : zákazník

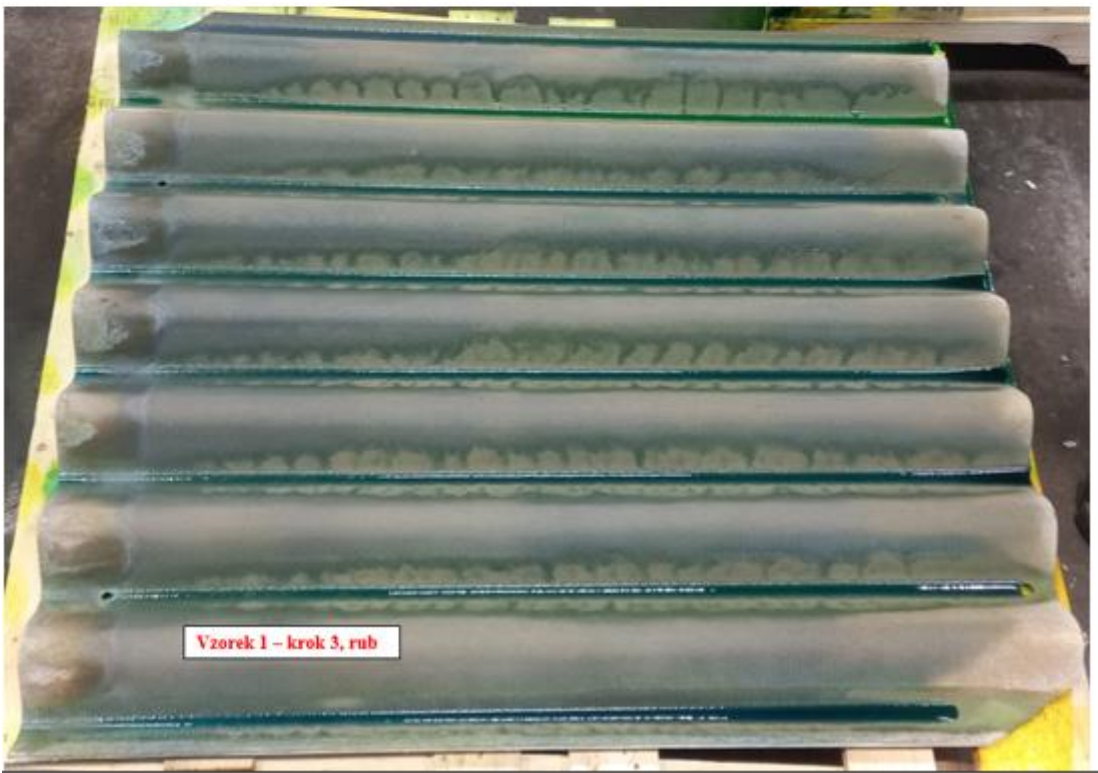
Datum příjmu : 19. 4.2021

Datum provedení zkoušky : 19. 4.2021 - 14. 5.2021

Parametr	Výsledek	Jednotka	Nejistota měření+-	Dle metodiky
Chloridy (Cl ⁻)	622	mg/l	10%	(A)-SOP 25 (ČSN ISO 9297)
Sírany (SO ₄ ²⁻)	4760	mg/l	15%	(A)-SOP 22 (STN 757430)
Draslík (K)	4080	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 9964-2)
Sodík (Na)	438	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 9964-1)
Celkový fosfor	0.07	mg/l	10%	(A)-SOP 19 (ČSN EN ISO 6878)
BSK-5	74.6	mg/l	12%	(A)-SOP 14 (ČSN EN 1899-1,25814)
pH (25 °C)	12.5		0.1	(A)-SOP 15 (ČSN ISO 10 523)
Nerozpuštěné látky	203	mg/l	10%	(A)-SOP 12 (ČSN EN 872)
Nerozp.látky-zbytek po žihání	132	mg/l	10%	(A)-SOP 12 (ČSN 757350)
Rozpuštěné látky-sušina 105°C	9960	mg/l	10%	(A)-SOP 13 (ČSN 757346)
Rozpuštěné anorganické soli-RAS	9420	mg/l	10%	(A)-SOP 13 (ČSN 757346,ČSN 757347)
Železo (Fe)	5.42	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I ČSN 75 7385
Měď (Cu)	< 0.20	mg/l	-	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 8288)
Zinek (Zn)	0.08	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 8288)
Vápník (Ca)	669	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 7980)
Hořčík (Mg)	0.52	mg/l	20%	(A)-SOP 21-I (ČSN ISO 7980)
Dusík dusičnanový (N-NO ₃)	< 0.10	mg/l	-	(A)-SOP 16 (ČSN ISO 7890-3)
CHSK-Cr	553	mg/l	12%	(A)-SOP 23-část 1 (ČSN ISO 15705)
Chrom 6+	< 0.01	mg/l	-	(A)-SOP 46 (ČSN ISO 11083)
Chrom (Cr)	0.037	mg/l	25%	(A)-SOP 21-II (ČSN EN 1233)
Olovo (Pb)	< 0.005	mg/l	-	(A)-SOP 21-II (ČSN EN ISO 15586)

Příloha č. 11: Metoda skrytých vad







Vzorek 1 - krok 4, lic



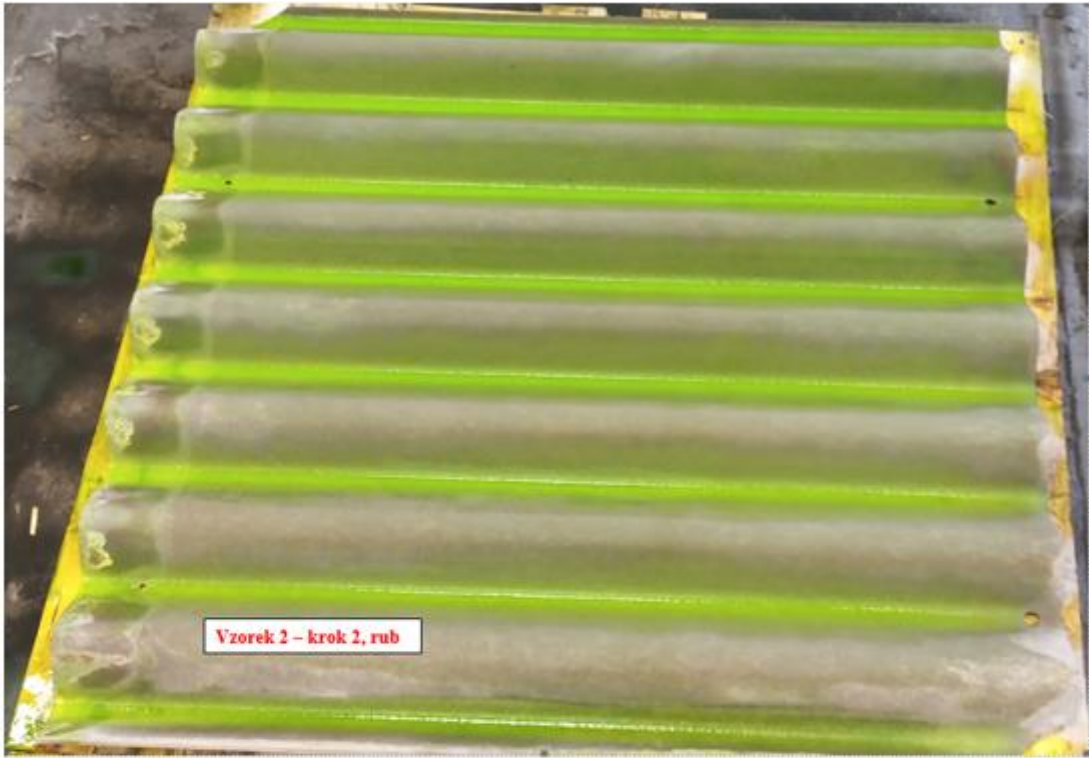
Vzorek 1 - krok 5, lic



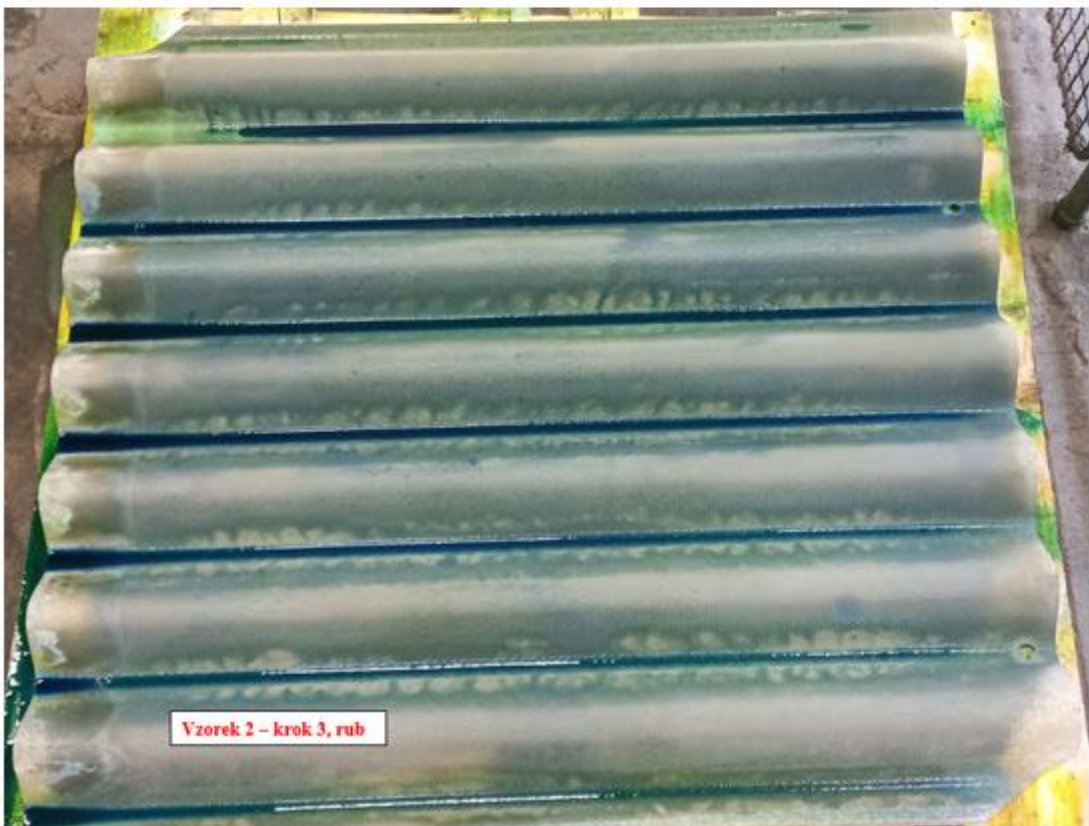
Vzorek 2 – krok 1, lic



Vzorek 2 – krok 1, rub



Vzorek 2 – krok 2, rub



Vzorek 2 – krok 3, rub



Vzorek 2 - krok 4, lic



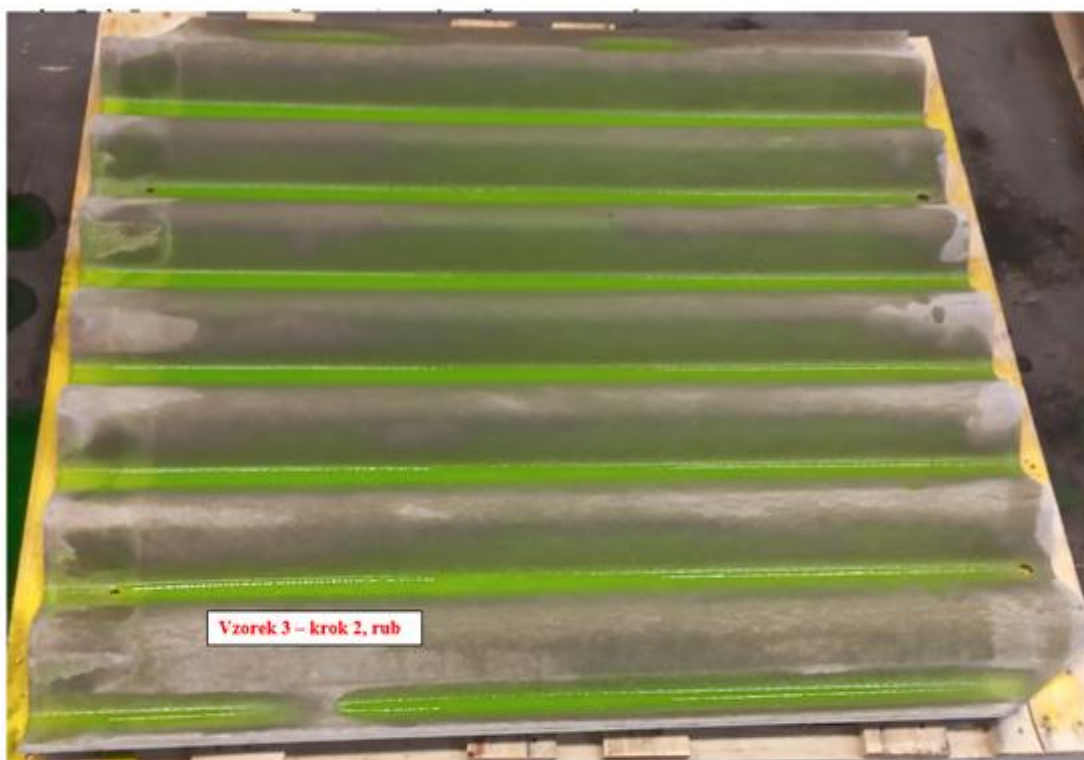
Vzorek 2 - krok 5, lic



Vzorek 3 - krok 1, lic



Vzorek 3 - krok 1, rub





Vzorek 3 - krok 4, lic



Vzorek 3 - krok 5, lic



Vzorek 4 - krok 1, lic



Vzorek 4 - krok 1, rub

