



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

STUDIUM MOŽNOSTÍ VYUŽÍVÁNÍ KALOVÉ VODY Z RECYKLACE ČERSTVÉHO BETONU
DO KONSTRUKČNÍCH BETONŮ

STUDY OF THE POSSIBILITIES OF USING SLUDGE WATER FROM FRESH CONCRETE
RECYCLING INTO STRUCTURAL CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matyáš Kubíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

BRNO 2025



Zadání diplomové práce

Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Student: Bc. Matyáš Kubíček

Vedoucí práce: prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Akademický rok: 2025/26

Studijní program: N0732A260027 Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Studium možností využívání kalové vody z recyklace čerstvého betonu do konstrukčních betonů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při recyklaci čerstvého betonu v betonárnkách vzniká velký objem tzv. kalové vody, kterou nelze ukládat na skládky. Tato obsahuje výrazně proměnlivé množství jemných podílů písku, cementu či dalších příměsí. Nicméně využití kalové vody jako 100% náhrada čisté záměsové vody přináší spoustu problémů, které souvisí s kolísáním sušiny v kalové vodě během dne a proměnlivým složením jemných podílů v závislosti na typu vyráběných betonů v daném čase. Změna koncentrace a typu sušiny ovlivňuje chování plastifikačních a provzdušňovacích přísad i dávku záměsové vody, což se projevuje i na vlastnostech zatvrdlých betonů, hlavně na pevnosti v tlaku, statických modulech pružnosti, smršťování a mrazuvzdornosti.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem diplomové práce bude posoudit meze kolísání sušiny v kalových vodách na třech vybraných betonárnách společnosti ZAPA beton v průběhu cca tří měsíců. Na pravidelně odebíraných vzorcích bude následně stanovena meze složení sušiny, zejména obsah jílových podílů.

Ověřit metodu kontinuálního sledování hustoty na betonárnách a skutečného obsahu sušiny. Na navržené receptuře C25/30, konzistence S4 a různých cementech ověřit optimální dávkování kalové vody, resp. sušiny. Na čerstvém betonu sledovat závislost změny konzistence a obsah vzduchu v čase od namíchání do 60 minut v závislosti na různých dávkách sušiny při konst. vodním součiniteli. Dále ověřit dopady na pevnosti betonu v tlaku ve stáří 7, 28 a 60 dnů, vodotěsnost a smrštění do stáří 7 dnů. Při optimální dávce sušiny otestovat chování čerstvého betonu při teplotě 30°C.

Předpokládaný rozsah diplomové práce 60–80 stran.

Seznam doporučené literatury a podklady:

1. ČSN EN 206+A2 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
2. ČSN P 73 2404/Z1 – Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
3. Hela. R: Technologie betonu I, II a II, učební opory VUT FAST Brno
4. Sborníky z českých a mezinárodních konferencí
5. České a zahraniční časopisy
6. Internetové zdroje, Science Direct apod.
7. Diplomové a bakalářské práce na VUT FAST Brno

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 16. ledna 2025

L. S.

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

vedoucí ústavu

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.

děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem možností využití kalové vody vznikající při recyklaci čerstvého betonu jako záměsové vody pro výrobu konstrukčních betonů. Cílem práce bylo komplexně posoudit vlastnosti kalové vody z různých betonáren a vyhodnotit její vliv na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu při částečné nebo úplné náhradě pitné záměsové vody.

V rámci experimentální části byly analyzovány fyzikální a chemické vlastnosti kalové vody, zejména objemová hmotnost v čase, obsah sušiny, pH, chemické složení a minerální fáze stanovené pomocí rentgenové difrakce. Následně byly navrženy a vyrobeny zkušební betonové směsi s různým podílem kalové vody, u nichž byly hodnoceny vybrané vlastnosti čerstvého betonu a mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu v různém stáří.

Na základě vyhodnocení výsledků bylo prokázáno, že kalová voda vykazuje proměnlivé vlastnosti v závislosti na čase a místě odběru, přičemž její použití v betonu je možné za splnění určitých podmínek. Vhodně zvolený podíl kalové vody neměl negativní vliv na základní mechanické vlastnosti betonu a v některých případech vedl k jejich mírnému zlepšení. Výsledky práce potvrzují potenciál kalové vody jako alternativního zdroje záměsové vody a přispívají k udržitelnějšímu nakládání s vodou v betonářském průmyslu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kalová voda, recyklace čerstvého betonu, udržitelnost, záměsová voda

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the study of possibilities for utilizing sludge-water generated during the recycling of fresh concrete as mixing water for the production of structural concrete. The aim of the thesis was to comprehensively assess the properties of sludge-water obtained from different concrete plants and to evaluate its influence on the properties of fresh and hardened concrete when partially or fully replacing potable mixing water.

Within the experimental part, the physical and chemical properties of the sludge-water were analyzed, in particular its density over time, solids content, pH value, chemical composition, and mineral phases determined by X-ray diffraction. Subsequently, experimental concrete mixtures with different proportions of sludge-water were designed and produced, and selected properties of fresh concrete as well as the mechanical properties of hardened concrete at various ages were evaluated.

Based on the evaluation of the results, it was demonstrated that sludge-water exhibits variable properties depending on the time and location of sampling, while its use in concrete is feasible under certain conditions. An appropriately selected proportion of sludge-water did not adversely affect the basic mechanical properties of concrete and, in some cases, led to a slight improvement. The results of the thesis confirm the potential of sludge-water as an alternative source of mixing water and contribute to more sustainable water management in the concrete industry.

KEYWORDS

Wash-water, sludge-water, fresh concrete recycling, sustainability, mixing water

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

KUBÍČEK, Matyáš. *Studium možností využívání kalové vody z recyklace čerstvého betonu do konstrukčních betonů*. Diplomová práce. Rudolf HELA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2025.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Studium možností využívání kalové vody z recyklace čerstvého betonu do konstrukčních betonů zpracoval samostatně, uvedl všechny použité zdroje. Při vyhledávání literatury a tvorbě některých skriptů v Pythonu jsem využil podporu umělé inteligence.

V Brně dne 16. ledna 2026

Bc. Matyáš Kubíček

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce, panu prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc., za odborné vedení při zpracování práce, cenné rady a podněty, a zejména za jeho trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům společnosti ZAPA beton, zejména těm, kteří mi poskytovali součinnost přímo na betonárnách. Poděkování patří rovněž zaměstnancům Ústavu THD a centra AdMaS, kteří mi významně pomohli při realizaci experimentální části práce. Největší poděkování náleží mé rodině a přítelkyni za dlouhodobou podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

ÚVOD	1
TEORETICKÁ ČÁST.....	2
1.1 Recyklace betonu	2
1.1.1 Stavební a demoliční odpad.....	3
1.1.2 Recyklace čerstvého betonu	4
1.1.3 Recyklační zařízení pro čerstvý beton	6
1.2 Kalová voda.....	8
1.2.1 Fyzikální vlastnosti	9
1.2.2 Chemické složení	10
1.2.3 Variabilita složení v závislosti na provozu.....	12
1.3 Možnosti využití kalové vody v konstrukčních betonech.....	13
1.4 Vliv použití kalové vody na vlastnosti betonu	15
1.4.1 Vlastnosti čerstvého betonu	15
1.4.2 Vlastnosti ztvrdlého betonu	16
1.4.3 Vliv na trvanlivost.....	18
1.5 Normové požadavky pro technologickou vodu v betonech.....	20
1.5.1 Kritéria použitelnosti vody	20
1.5.2 Omezení pro kalovou/technologickou vodu	21
1.5.3 Vztah ke kvalitativním požadavkům betonu dle ČSN EN 206+A2....	21
1.5.4 Trvanlivostní parametry	22
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	23
2.1 Cíl práce	23
2.2 Metodika práce.....	24
2.3 Postup práce.....	26
2.4 Zkoušky kalové vody	28
2.4.1 Stanovení vizuálních parametrů kalové vody.....	28
2.4.2 Stanovení teploty kalové vody	28
2.4.3 Stanovení hustoty kalové vody	29
2.4.4 Stanovení obsahu sušiny v kalové vodě	30
2.4.5 Stanovení pH kalové vody	30
2.4.6 Chemický rozbor kalové vody	30
2.4.7 Rentgenová difrakční analýza sušiny	31

2.5	Zkoušky čerstvého betonu	32
2.5.1	Zkouška sednutím kužele (ČSN EN 12 350-2)	32
2.5.2	Objemová hmotnost (ČSN EN 12 350-6)	33
2.5.3	Obsah vzduchu – tlakové metody (ČSN EN 12 350-7)	33
2.5.4	Teplota	34
2.6	Zkoušky ztvrdlého betonu	34
2.6.1	Stanovení smrštění betonu	35
2.6.2	Hloubka průsaku tlakovou vodou (ČSN EN 12 390-8)	36
2.6.3	Objemová hmotnost (ČSN EN 12 390-7)	36
2.6.4	Pevnost v tlaku (ČSN EN 12 390-3)	37
2.7	Receptury	37
2.8	Použité materiály	40
2.8.1	Cement	40
2.8.2	Kamenivo	42
2.8.3	Kalová voda	45
2.8.4	Voda	45
2.8.5	Přísady	45
3	VÝSLEDKY, HODNOCENÍ A DISKUSE	46
3.1	Vyhodnocení vlastností kalové vody	46
3.1.1	Teplota kalové vody v čase	46
3.1.2	Hustota kalové vody v čase	48
3.1.3	Obsah sušiny kalové vody v čase	50
3.1.4	pH kalové vody v čase	51
3.1.5	Chemický rozbor	52
3.1.6	XRD	53
3.2	Vyhodnocení vlastností čerstvého betonu	54
3.2.1	Vyhodnocení konzistence v čerstvém stavu	54
3.2.2	Vyhodnocení obsahu vzduchu v čerstvém stavu	57
3.2.3	Vyhodnocení teploty betonu	59
3.3	Vyhodnocení vlastností ztvrdlého betonu	61
3.3.1	Vyhodnocení smrštění betonu	61
3.3.2	Vyhodnocení hloubky průsaku tlakovou vodou	66
3.3.3	Vyhodnocení objemové hmotnosti	69
3.3.4	Vyhodnocení pevnosti betonu v tlaku	72
4	ZÁVĚR	83

5	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	85
6	SEZNAM OBRÁZKŮ	91
7	SEZNAM TABULEK	92
8	SEZNAM ZKRATEK.....	93

ÚVOD

Beton je nejrozšířenějším stavebním materiálem současnosti, avšak jeho výroba je spojena s vysokou spotřebou přírodních surovin, energie a vody. S ohledem na rostoucí tlak na udržitelný rozvoj stavebnictví, snižování environmentální zátěže a efektivní nakládání s přírodními zdroji se v posledních letech zvyšuje zájem o využívání vedlejších produktů a recyklátů.

Jednou z významných ne zcela uspokojivě vyřešených oblastí, je problematika recyklace čerstvého betonu a následného využití kalové vody vznikající při tomto procesu. Při recyklaci nevyužitých zbytků čerstvého betonu na betonárnách vzniká značné množství kalové vody obsahující jemné částice cementu, kameniva, hydratačních produktů a zbytky chemických přísad. Její likvidace představuje významnou ekologickou i provozní zátěž. Opětovné využití kalové vody při výrobě betonu tak představuje cestu ke snížení spotřeby pitné vody, omezení množství odpadu a k celkovému zlepšení environmentální bilance betonářské výroby.

Využití kalové vody jako náhrady záměsové vody v konstrukčních betonech je však spojeno s řadou technologických rizik. Zásadním problémem je především výrazná proměnlivost obsahu sušiny a jejího složení. Obsah sušiny je závislý na provozních podmínkách betonárny, typu vyráběných betonů a časovém průběhu výroby.

Z hlediska dlouhodobé udržitelnosti betonových konstrukcí je nezbytné zajistit, aby použití kalové vody nevedlo ke zhoršení klíčových parametrů betonu, jako jsou pevnost v tlaku, objemová hmotnost nebo trvanlivostní charakteristiky. Současné normy sice umožňují využití recyklované technologické vody při výrobě betonu, avšak kladou důraz na splnění přísných kvalitativních požadavků a na prokázání její nezávadnosti. V praxi však stále chybí dostatek experimentálních dat získaných v reálných provozních podmínkách, která by umožnila stanovit jednoznačné meze použitelnosti kalové vody.

Tato diplomová práce se proto zaměřuje na studium vlastností kalové vody vznikající při recyklaci čerstvého betonu a na experimentální ověření jejího vlivu na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého konstrukčního betonu. Cílem práce je k šetrnějšímu využívání zdrojů v betonářské praxi a podpořit principy udržitelného stavebnictví prostřednictvím racionálního nakládání s technologickou vodou.

TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část je rozdělena do pěti podkapitol, ve kterých je obecně rozebrána problematika recyklace betonu. Dále jsou popsány vlastnosti kalové vody, možnosti jejího využití v konstrukčních betonech, a zmíněny jsou i normové požadavky pro užití vody v betonech.

1.1 RECYKLACE BETONU

Recyklace betonu zahrnuje regeneraci stavebního a demoličního betonu, jeho drcení a další zpracování. Využití recyklovaného betonu snižuje objem skládkování a zefektivňuje využití primárních zdrojů. [1]

Recyklace betonu představuje ve stavebnictví klíčový nástroj v udržitelné a cirkulární ekonomice ve stavebnictví. Stavební sektor je totiž jedním z největších spotřebitelů přírodních surovin a rovněž masivním producentem odpadů, což má významný dopad na životní prostředí i využívání zdrojů. Dle ČSÚ tvořil v roce 2023 odpad ze sanací, výstavby budov, inženýrského stavitelství a specializované stavební činnosti 41,22 % z celkového odpadu. [2]

V praxi se rozlišují oblasti recyklace stavebního a demoličního odpadu po ukončení životnosti konstrukcí a recyklace čerstvého betonu a odpadních vod, výrobních kalů vznikajících během výroby. [1]

Využívání recyklovaného kameniva získaného z demolic a stavebních odpadů dovoluje snížit spotřebu primárních surovin, minimalizovat objem ukládaného odpadu a omezit ekologickou zátěž spojenou s těžbou, dopravou a výrobou nových materiálů. Navíc recyklace betonu umožňuje uzavřít materiálový cyklus stavby — beton, který jednou sloužil, může být přeměněn zpět na stavební surovinu a znovuvyužit. Tím se zvyšuje ekologická efektivita stavebních projektů a podporuje se princip cirkulární ekonomiky. [3]

Současný výzkum potvrzuje, že použití recyklovaného kameniva (recycled aggregate = RA) v nových betonových směsích je životaschopné řešení z hlediska udržitelnosti. Recyklované kamenivo sice vykazuje vyšší pórovitost, větší nasákavost a nižší objemovou hmotnost v porovnání s přírodním kamenivem, což může ovlivnit reologii směsi, konzistenci nebo mechanické vlastnosti betonu. Nicméně díky moderním technologiím úpravy a ošetření recyklátu

(např. odstraňování staré malty, povrchové úpravy, konsolidace) je možné dosáhnout přijatelné kvality a trvanlivosti pro široké spektrum konstrukčních aplikací. Význam recyklace je tedy dvojitý: ekologický — omezení těžby a redukce odpadu; a technický — možnost vyrábět beton srovnatelné kvality s nižší ekologickou zátěží. Tato tendence je podporována jak mezinárodními studiiemi a recenzovanou literaturou, tak i praxí v České republice, kde se využití recyklátů ze stavebních a demoličních odpadů postupně stává standardem. [3; 4]

V kontextu stavební výroby a provozu betonáren recyklace betonu nabízí nejen využití drcené sutě, ale i možnost znovuvyužití takzvaného „zbytkového“ betonu a odpadních vod či kalů — tedy materiálů, které dříve končily na skládkách. Tím se otevírá možnost výrazného snížení ekologického dopadu betonářské výroby, úspory vody a surovin, a současně podpora dlouhodobé environmentální udržitelnosti v sektoru stavebnictví [3; 5; 6; 7; 8; 9; 10].

1.1.1 STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD

Stavebním a demoličním odpadem (SDO) je dle zákona č. 541/2020 Sb., o odpadech, odpad vznikající při stavebních a demoličních činnostech. V současnosti je naštěstí téměř všechen stavebně demoliční odpad využit – nejčastěji jako druhotná surovina. Nejběžnější využití SDO je drcení a třídění a následná výroba recyklovaného kameniva. [1]

Podle dřívější analýzy České geologické služby (ČGS) do roku 2032 těžaři jen ve Středočeském kraji ukončí těžbu až na 90 % pískoven. Z dnešních zhruba třiceti ložisek by tak měly být funkční pouhé čtyři. Podle jednatele CS – Betonu pana Ing. Marka Matějky, vystačí zásoby písku v České republice při současné poptávce maximálně na deset let. Navíc se stávajícími legislativními nároky a povolovacími procesy je značně ztíženo otevírání nových lomů, ať už na těžbu písku nebo kameniva. Podle Mgr. Radima Mana, tiskového mluvčího společnosti Metrostav, bude v některých krajích do deseti let vytěženo až padesát procent těžitelných zásob. Od roku 1989 totiž nebylo otevřeno žádné nové ložisko a dochází tedy pouze k vytěžování ložisek stávajících. [11; 12; 13]

Na pokles přírodních zásob kameniva reaguje současné stavebnictví vyšším použitím recyklovaných kameniv (RA), ať už cihelných, betonových nebo směsných (viz. Obr. 1). Jejich specifikace jako objemová stálost, klasifikace složek hrubého

recyklovaného kameniva, povolené množství chloridů, síranů, vliv na počáteční dobu tuhnutí cementu, nasákavost a objemová hmotnost jsou popsány v normě ČSN EN 12620 + A1 – Kamenivo do betonu. [14]



Obr. 1 Betonový recyklát [61; 62]

1.1.2 RECYKLACE ČERSTVÉHO BETONU

Recyklace čerstvého betonu představuje významnou oblast materiálového využití odpadů vznikajících přímo během výroby a zpracování betonových směsí. Na rozdíl od recyklace stavebního a demoličního odpadu se v tomto případě jedná o materiály, které ještě neprošly procesem zatvrdnutí a jejichž složení je zpravidla přesně známo. Mezi tyto materiály patří například čerstvý beton vracený ze stavby nebo betonové zbytky z technologických přestávek. A především voda a kal vznikající při mytí míchacích zařízení, dopravních prostředků a betonářské techniky. Tyto materiály byly v minulosti často považovány za odpad bez možnosti dalšího využití, což vedlo k jejich ukládání na skládky nebo k nutnosti nákladného čištění odpadních vod. Současný přístup však směřuje k jejich maximálnímu znovuvyužití přímo v rámci betonářského provozu. [15; 16]

Zbytkový čerstvý beton, označovaný v zahraniční literatuře jako *returned plastic concrete (RPC)*, vzniká nejčastěji v důsledku nepřesného plánování výroby, změn požadavků na stavbě nebo časových prostojů během dopravy. Pokud by nebyl dále zpracován, docházelo by k jeho zatvrdnutí a následnému zařazení mezi stavební a demoliční odpad. Moderní recyklační technologie však umožňují tento čerstvý beton mechanicky rozdělit na jednotlivé složky – kamenivo a cementový kal – ještě před jeho ztuhnutím. Hrubé a jemné kamenivo může být po separaci a opláchnutí opětovně využito jako součást nových betonových směsí, obvykle jako částečná náhrada přírodního kameniva. Tím dochází k přímé úspoře primárních surovin a současně ke snížení množství odpadu produkovaného betonárnou. [16; 17]

Významnou složkou recyklace čerstvého betonu je také nakládání s vodou z mycích procesů, tzv. kalovou nebo recyklovanou vodou (*sludge water, wash water*). Tato voda obsahuje jemné částice cementu, hydratační produkty, zbytky přísad a jemné frakce kameniva, což se projevuje vysokým pH a zvýšeným obsahem nerozpuštěných látek. Z environmentálního i legislativního hlediska není možné tuto vodu bez úpravy vypouštět do kanalizace nebo povrchových vod. Z tohoto důvodu se v betonárnách stále častěji uplatňují uzavřené vodní okruhy, ve kterých je kalová voda zachycována, upravována a znovuvyužívána jako technologická nebo záměsová voda při výrobě betonu. [15; 16; 18]

Použití recyklované vody v betonových směsích je předmětem řady výzkumů, které se zaměřují na její vliv na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Výsledky odborných studií ukazují, že při řízeném dávkování a kontrole základních parametrů, jako je pH, obsah sušiny a koncentrace jemných částic, lze recyklovanou vodu využít jako částečnou náhradu záměsové vody bez významného negativního dopadu na pevnostní nebo trvanlivostní charakteristiky betonu. V některých případech bylo dokonce zaznamenáno mírné zvýšení počátečních pevností, což je přisuzováno přítomnosti jemných částic působících jako aktivní nebo inertní plnivo. Na druhé straně může vyšší obsah suspendovaných látek ovlivnit konzistenci směsi, dobu zpracovatelnosti a reologické chování čerstvého betonu, což vyžaduje úpravu receptury nebo použití vhodných chemických přísad. [15; 16; 18]

Z hlediska provozu betonárny je recyklace čerstvého betonu úzce spojena s využíváním speciálních recyklačních zařízení, často označovaných jako *reclaimery*, kterým se věnuje podkapitola *1.1.3 Recyklační zařízení pro čerstvý beton*. [19; 20]

Recyklace čerstvého betonu tak představuje důležitý krok směrem k udržitelnému provozu betonáren a k naplnění principů cirkulární ekonomiky ve stavebnictví, které umožní další snížení množství odpadu ve stavebním průmyslu.

Správně navržený a řízený systém recyklace umožňuje efektivně uzavřít materiálový i vodní cyklus výroby betonu, aniž by došlo ke zhoršení kvality finálního produktu. Z tohoto důvodu se recyklace čerstvého betonu stává stále častěji standardní součástí moderních betonárenských provozů v České republice i v zahraničí.

1.1.3 RECYKLAČNÍ ZAŘÍZENÍ PRO ČERSTVÝ BETON

Recyklace čerstvého betonu v betonářském provozu je v současnosti neoddelitelně spjata s využíváním specializovaných technologických zařízení, jejichž cílem je efektivní zpracování zbytkového betonu a odpadních vod vznikajících při výrobě, dopravě a zpracování betonových směsí. Tato zařízení umožňují separaci jednotlivých složek čerstvého betonu, zejména kameniva, cementové suspenze a vody, a jejich následné opětovné využití v rámci uzavřeného materiálového a vodního hospodářství betonárny. Používání recyklačních zařízení tak představuje klíčový prvek udržitelné betonářské výroby a významně přispívá ke snižování množství odpadu ukládaného na skládky. [19]

Z hlediska konstrukčního a provozního uspořádání lze recyklační zařízení pro čerstvý beton rozdělit do několika základních typů, které se liší především způsobem separace složek, kapacitou, nároky na obsluhu a možnostmi integrace do provozu betonárny. [15; 19; 20]

Nejrozšířenějším typem jsou mechanická separační zařízení, často označovaná jako reclaimery. Princip těchto zařízení spočívá v mechanickém oddělení hrubého a jemného kameniva od cementové suspenze pomocí rotačního síta nebo šnekového separátoru (viz. Obr. 3). Zbytkový čerstvý beton, případně beton vyplavovaný při čištění autodomíchačů, je přiváděn do zařízení, kde dochází k intenzivnímu promývání vodou. Hrubé frakce kameniva jsou zachyceny na sítu a odváděny k dalšímu využití, zatímco jemné částice cementu, písku a hydratačních produktů jsou odplavovány spolu s vodou do sedimentačního systému (viz. Obr. 2, Obr. 4). Tento typ zařízení je technicky relativně jednoduchý, vysoce spolehlivý a vhodný pro betonárny s vysokým objemem výroby, kde vzniká pravidelný přísun zbytkového betonu. [19; 20]

Další skupinu tvoří kompaktní recyklační systémy, které kombinují mechanickou separaci s integrovaným hospodařením s vodou. Tato zařízení jsou zpravidla menších rozměrů a jsou navržena tak, aby umožňovala instalaci i v provozech s omezeným prostorem. Kromě separace kameniva obsahují zásobníky a míchací nádrže pro zachycení kalové vody, která je následně recirkulována zpět do procesu výroby betonu. Výhodou těchto systémů je nižší náročnost na prostor a možnost automatizace provozu. Nevýhodou je pak zpravidla nižší kapacita a omezené možnosti regulace kvality získaných složek. [19]

Specifickou kategorií představují systémy založené převážně na sedimentaci a řízeném usazování pevných částic. U těchto zařízení není primárním cílem okamžitá mechanická separace kameniva, ale spíše postupné oddělování tuhých složek z kalové vody v sedimentačních nádržích nebo lagunách. Tyto systémy jsou konstrukčně jednoduché a finančně méně náročné, avšak mají větší prostorové nároky a zpracování trvá delší dobu. Získaná kalová voda má proměnlivé složení a její využití v nových betonových směsích vyžaduje důslednou kontrolu vlastností, zejména obsahu pevných částic a pH. [21]

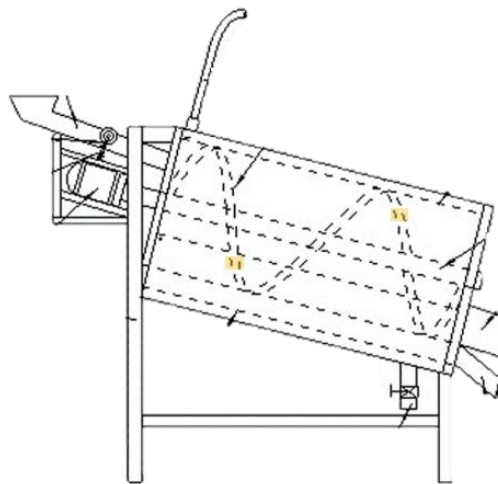
Z hlediska provozního využití lze jednotlivé typy zařízení porovnat zejména podle účinnosti separace, kvality získaného kameniva a flexibility při opětovném použití vody. Mechanické reclaimery dosahují vysoké účinnosti separace a umožňují získat kamenivo relativně čisté a vhodné k přímému opětovnému použití, typicky jako náhradu části přírodního kameniva v čerstvých betonových směsích nebo jako materiál pro podkladní vrstvy. Kompaktní systémy jsou výhodné z hlediska integrace do provozu a automatizace, avšak mohou vyžadovat dodatečná opatření pro stabilizaci vlastností kalové vody. Sedimentační systémy jsou vhodné především jako doplňkové řešení hospodaření s vodou, nikoliv jako hlavní technologie recyklace zbytkového betonu. [19; 21]

Recyklační zařízení umožňují separaci kameniva a cementového tmelu pomocí mechanických principů, jako je třídění, šneková doprava nebo rotační bubny. Oddělená voda a jemný kal jsou následně vedeny do sedimentačních nádrží nebo uzavřeného systému, kde dochází k jejich dalšímu využití. Implementace těchto technologií nabízí nejen environmentální přínosy v podobě snížení spotřeby vody a surovin, ale také ekonomické výhody vyplývající z omezení nákladů na likvidaci odpadů a nákup primárních materiálů. [15; 17]

Celkově lze konstatovat, že volba konkrétního typu recyklačního zařízení závisí na velikosti betonárny, objemu produkovaného zbytkového betonu, prostoru a požadavcích na míru recyklace. Moderní betonárenské provozy často kombinují více principů recyklace, aby dosáhly maximální materiálové a environmentální efektivity. Recyklační zařízení pro čerstvý beton tak představují nezbytný technologický prvek, který umožňuje uzavření materiálového cyklu výroby betonu a naplnění principů udržitelného stavebnictví. [19]



Obr. 2 Recyklační zařízení na betonárně ZAPA beton Holubice



Obr. 3 Schéma mechanického recyklačního zařízení [63]

1.2 KALOVÁ VODA

Kalová voda, anglicky často nazývaná *sludge water* nebo *wash water*, obsahuje suspenzi jemných částic cementu, drobného kameniva, hydratačních produktů a dalších příměsí, což významně ovlivňuje její fyzikálně-chemické vlastnosti a potenciál pro recyklaci. Kvůli vysokému pH by její vypouštění mělo negativní dopad na životní prostředí, a to kontaminací vodních zdrojů nebo půdy. [22; 23; 24; 25; 26; 27]

Dle některých autorů použití kalové vody nesnižuje ani pevnost betonu v tlaku, v kombinaci se zeolitem ji může dokonce zvýšit až o 30 %. Většina autorů však tvrdí, že použitím kalové vody v receptuře dochází k poklesu pevnosti v tlaku o 8–10 % oproti pevnosti při použití vody z vodovodu. Použití kalové vody snižuje nasákavost, a tím ovlivňuje trvanlivostní charakteristiky. Je to další možnost, jak recyklovat, ovšem při opětovném použití je doporučeno korigovat recepturu směsi, kvůli odlišné hustotě kalové vody. [27]



Obr. 4 Nádrž na kalovou vodu ZAPA beton Holubice

1.2.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Fyzikální charakteristiky kalové vody silně ovlivňují její využitelnost v betonových směsích. Na rozdíl od pitné vody obsahuje značné množství jemných pevných částic, což zvyšuje viskozitu, hustotu a mění sedimentační chování. Tyto parametry závisí na typu recyklačního zařízení a provozních podmínkách betonárny. [28]

Kalová voda obvykle obsahuje směs suspendovaných pevných látek — jemný písek, nezreagovaný cement, hydratované produkty — v koncentracích, které mohou dosahovat desítek až stovek gramů na litr. Velikost částic se pohybuje od částic menších než 1 μm po frakce do 1–2 mm, přičemž největší zastoupení často tvoří částice menší než 63 μm . Velikost částic má vliv na jejich reaktivitu, a zejména jemnější frakce mohou znovu reagovat v betonové směsi. [28; 29]

Přítomnost vysokého podílu jemných suspendovaných částic zvyšuje viskozitu kalové vody výrazně nad úroveň běžné záměsové vody. Jemné částice zvyšují navíc

vnitřní tření v suspenzi, což negativně ovlivňuje zpracovatelnost čerstvého betonu — směs může být tužší, s nižší hodnotou sednutí. V některých případech však může docházet i k mírnému „mikroplnivovému“ efektu, který částečně kompenzuje zhoršení tekutosti. [28; 29; 30].

Hustota kalové vody je vyšší než u čisté vody — typicky v rozmezí 1,05 – 1,20 g/cm³ v závislosti na obsahu pevné sušiny. Laboratorní i provozní měření uvádějí, že sušina (celkový obsah nerozpuštěných látek) může být přítomná v koncentraci od desítek až po stovky g/l, v závislosti na intenzitě praní a efektivitě separace pevných částic. Měření hustoty a obsahu sušiny mají význam pro návrh míchacích poměrů a pro sedimentační systémy recyklace. [29]

Sedimentační chování kalové vody je poměrně složité: hrubší částice sedimentují relativně rychle (minuty až desítky minut), zatímco jemné frakce mohou zůstat rozpuštěné delší dobu (hodiny), čímž vzniká částečně stabilní suspenze. Stabilita závisí na velikosti částic, jejich povrchových vlastnostech a chemickém prostředí. Při recyklaci bývá u provozních tanků pozorována výrazná denní variabilita — koncentrace suspenze, rychlost usazování a složení sedimentu. [28]

Vysoký obsah jemných částic, vyšší viskozita a hustota kalové vody ovlivňují zpracovatelnost čerstvého betonu. Typickým efektem je snížení sednutí, zvýšení kohezivity a tužší chování směsi. Naopak jemné reaktivní částice mohou přispívat ke mikroplnivovému efektu, který v některých případech zlepšuje stabilitu směsi a zpomaluje segregaci. Experimenty ukazují, že při vhodném poměru náhrady míchací vody lze dosáhnout přijatelné zpracovatelnosti bez výrazného negativního vlivu na vlastnosti čerstvého betonu. [29]

1.2.2 CHEMICKÉ SLOŽENÍ

Chemické složení kalové vody z recyklace čerstvého betonu je charakteristické vysokou alkalitou a zvýšeným obsahem rozpuštěných iontů i jemných pevných částic cementového původu. Toto složení je přímým důsledkem hydratace cementu, vymývání cementové pasty z povrchu kameniva a částečného rozpouštění hydratačních produktů. Z hlediska opětovného využití v betonových směsích je chemické složení kalové vody rozhodujícím faktorem limitující její využitelnost, protože ovlivňuje hydrataci, dobu tuhnutí i dlouhodobou trvanlivost betonu. [28]

Jedním z nejvýraznějších chemických rysů kalové vody je její velmi vysoká alkalita. Hodnota pH se běžně pohybuje v rozmezí 11,5–13,0, přičemž nejčastěji se uvádějí hodnoty kolem pH 12,5. Tato alkalita je způsobena přítomností hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a dalších alkalických hydroxidů vznikajících při hydrataci cementu. Vysoké pH může urychlovat počáteční hydrataci cementu, ale zároveň představuje riziko při nekontrolovaném dávkování z hlediska zpracovatelnosti a rovnoměrnosti tuhnutí. [28; 31]

Kalová voda obsahuje významné koncentrace rozpuštěných iontů, zejména Ca^{2+} , Na^+ , K^+ a OH^- , které pocházejí z cementu a jeho hydratačních reakcí. Zvýšené koncentrace vápníku jsou spojeny s rozpouštěním portlanditu, zatímco sodík a draslík pocházejí především z alkalických složek cementu. Tyto ionty zvyšují elektrickou vodivost vody a mohou ovlivňovat rychlost hydratace i tvorbu hydratačních produktů v čerstvém betonu. [29; 32]

V chemickém složení kalové vody jsou běžně přítomny také chloridy a sírany, jejichž koncentrace závisí na typu cementu, použitém kamenivu a přísadách. Zahraniční studie uvádějí, že obsah chloridů bývá zpravidla pod limitními hodnotami normy ČSN EN 1008, avšak při dlouhodobé akumulaci kalové vody může dojít ke zvýšení obsahu chloridů. Síranové ionty mohou v kombinaci s vysokým obsahem vápníku ovlivňovat tvorbu ettringitu a tím i objemovou stabilitu betonu. [28]

Významnou součástí chemického složení kalové vody jsou jemné pevné částice cementového původu, které se částečně rozpouštějí a částečně zůstávají ve formě suspenze. Tyto částice obsahují slínkové minerály (C_3S , C_2S) i jejich hydratační produkty (C-S-H fáze, portlandit), které mohou při opětovném použití vykazovat tzv. latentní hydraulickou aktivitu. Z chemického hlediska tak kalová voda nepředstavuje inertní médium, ale aktivní složku betonové směsi. [28; 33]

Chemické složení kalové vody není konstantní a vykazuje výraznou časovou i provozní variabilitu. Koncentrace iontů, pH i obsah rozpuštěných látek se mění v průběhu dne v závislosti na typu vyráběného betonu, intenzitě mytí zařízení a míře recyklace vody. Zahraniční studie zdůrazňují, že bez pravidelné kontroly chemického složení může docházet k výrazným rozdílům ve vlastnostech betonu vyráběného se stejnou recepturou. [28; 32]

1.2.3 VARIABILITA SLOŽENÍ V ZÁVISLOSTI NA PROVOZU

Kalová voda vzniká při recyklaci zbytků čerstvého betonu a při omývání technologických zařízení betonáren, zejména míchacích bubnů a čerpadel. Tento odpadní materiál obsahuje jemné částice cementové pasty, nerozpuštěný cement, jemné plnivo a vysoké množství alkalických složek (hydroxidy), ale i síranů a chloridů, které jsou přítomny v původní betonové směsi a ve vodách použitých při výrobě a omývání. Objem kalové vody může dosahovat stovek litrů na jednu produkovanou dávku betonu, přičemž obsah suspendovaných látek je typicky vysoký (≥ 9000 mg/l) a pH výrazně alkalické (> 11). [34]

Významným faktorem ovlivňujícím složení kalové vody je typ a receptura vyráběného betonu v daném čase provozu. Studie ukazují, že koncentrace aniontů jako SO_4^{2-} a Cl^- ve vzorcích kalové vody mohou být řádově desetkrát vyšší než v čisté pitné vodě. Vyšší koncentrace odpovídá tomu, jaké přísady a cementy byly použity ve výrobním procesu. Například vzorky z betonárny vykazovaly až 20× vyšší obsah síranů a až 15× vyšší obsah chloridů ve srovnání s pitnou vodou kvůli předešlému vyráběnému betonu obsahujícímu anhydrit. [28]

Složení kalové vody se mění nejen chemicky, ale i fyzikálně v závislosti na provozních podmínkách — zejména na množství jemných částic a obsahu vody. Studie zkoumající kalové vody z několika různých betonáren identifikovala velkou variabilitu obsahu sušiny, která se pohybovala v rozmezí přibližně 50–300 % při různých sezónách a podmínkách skladování. Tyto rozdíly závisí na tom, kolik vody je použito při čištění zařízení, jak dlouho voda stojí, a na klimatických podmínkách (např. odpařování v teplejších měsících). [35]

Proměnlivé složení kalové vody přímo ovlivňuje její potenciální využití jako alternativního zdroje vody při výrobě betonu. Výzkumy ukazují, že i při vysoké variabilitě lze kalovou vodu použít jako dílčí náhradu čerstvé vody bez významného snížení některých technologických parametrů (např. konzistence nebo pevnosti). Výsledné vlastnosti betonu jsou silně závislé na aktuálním složení kalové vody a její koncentraci suspendovaných látek. Kontrola a případná úprava kalové vody je proto nezbytná pro konzistentní kvalitu betonu při různých provozních situacích. [18; 19]

Provozní technologie recyklace kalové vody též ovlivňuje její složení. Například moderní systémy recyklace mohou kontinuálně monitorovat úroveň znečištění a upravovat poměr „šedé“ kalové vody a čisté vody tak, aby odpovídal

normě ČSN EN 1008 pro použití vody do betonu. To umožňuje vyrovnávat rozdíly v chemickém a fyzikálním složení během provozu betonárny a zajišťovat stabilnější vstupní parametry pro výrobu betonu. [36]

1.3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ KALOVÉ VODY V KONSTRUKČNÍCH BETONECH

Kalová voda vznikající při recyklaci čerstvého betonu je neoddelitelnou součástí moderní betonářské výroby. V minulosti byla recyklace této vody považována za problematickou, jelikož znamenala dodatečné finanční náklady. V současném pojetí udržitelného stavebnictví je však kalová voda vnímána jako potenciální sekundární surovina, jejíž opětovné využití přispívá ke snížení spotřeby primárních zdrojů a k naplňování principů cirkulární ekonomiky. [37]

Kalová voda se vyznačuje vysokým obsahem jemných pevných částic, jejichž množství se obvykle pohybuje v jednotkách až desítkách procent hmotnosti. Chemicky je typická vysokou alkalitou, přičemž hodnota pH se běžně pohybuje v rozmezí 11,5–13,0. Toto chemické prostředí je důsledkem přítomnosti hydroxidů alkalických kovů a vápenatých sloučenin vznikajících při hydrataci cementu. Výše zmíněné vlastnosti mají zásadní význam pro chování kalové vody při použití v betonové směsi a je nutné je respektovat při technologickém návrhu betonu. [18]

Složení kalové vody je výrazně proměnlivé a závisí na celé řadě faktorů, mezi které patří typ vyráběných betonů, použitý druh cementu, intenzita recyklace a doba zadržení vody v usazovacích nádržích. V průběhu skladování může docházet k pokračující hydrataci jemných cementových částic, což dále ovlivňuje reologické i chemické vlastnosti kalové vody. Tato variabilita je jedním z hlavních technologických rizik jejího využití a vyžaduje systematickou kontrolu. [18]

Základním předpokladem využití kalové vody v konstrukčních betonech je splnění požadavků platných technických norem. Klíčovým dokumentem je evropská norma ČSN EN 1008, která stanovuje kritéria pro záměsovou vodu do betonu, včetně vody recyklované. Norma připouští použití kalové vody za podmínky, že její chemické složení nepřekračuje stanovené limity, a že nemá nepříznivý vliv na vlastnosti betonu. [38]

V praxi to znamená nutnost pravidelného sledování základních ukazatelů kvality, jako je obsah pevných látek, koncentrace chloridů, síranů a alkálií. Betonárny, které kalovou vodu využívají dlouhodobě, zpravidla zavádějí interní

kontrolní systémy a technologické předpisy, jež umožňují stabilní a opakovatelné použití této vody v rámci výroby konstrukčních betonů. Možnosti praktického využití kalové vody v konstrukčních betonech jsou úzce svázány s platným normativním rámcem. [38]

Opětovné využití kalové vody přispívá k efektivnějšímu hospodaření se surovinami v betonářském provozu. Jemné cementové částice obsažené v kalové vodě představují určitý podíl pojiva, které by jinak bylo ztraceno při likvidaci kalů. Jejich návrat do betonové směsi může vést k částečnému zlepšení využití pojivového systému, zejména z hlediska vyplnění jemných pórů v cementovém kameni. [18]

Je však nutné zdůraznit, že cement obsažený v kalové vodě nemůže být považován za přímou náhradu cementu v receptuře. Obsah aktivních složek je proměnlivý a obtížně přesně kvantifikovatelný, a proto musí být její využití vždy založeno na konzervativním návrhu směsi a na experimentálním ověření. Přínos kalové vody je v tomto kontextu spíše nepřímý a spočívá v optimalizaci materiálových toků v rámci výroby betonu. [18]

Řada výzkumných prací publikovaných v mezinárodních odborných časopisech potvrzuje, že využití kalové vody v betonu je při dodržení technologických podmínek dlouhodobě realizovatelné. Výzkumy se soustřeďují především na systematické hodnocení vlivu proměnlivého složení kalové vody a na definování mezních podmínek jejího použití. Tyto poznatky jsou postupně přenášeny do průmyslové praxe. [39]

Významní výrobci stavebních materiálů a provozovatelé betonáren uvádějí, že zavedení systémů recyklace procesní vody nabízí nejen environmentální, ale i ekonomické přínosy. Tyto zkušenosti potvrzují, že kalová voda může být považována za standardní součást moderní betonářské technologie, nikoliv pouze za experimentální nebo okrajové řešení. [39; 40]

Lze očekávat, že s rostoucím tlakem na udržitelnost a efektivní využívání zdrojů bude význam kalové vody v konstrukčních betonech dále narůstat. Její systematické a normově podložené využití může do budoucna představovat jeden z důležitých nástrojů pro dosažení udržitelnější výroby betonu. [18]

1.4 Vliv použití kalové vody na vlastnosti betonu

V následující podkapitole budou popsány vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu a vliv užití kalové vody na trvanlivost betonu.

1.4.1 Vlastnosti čerstvého betonu

V hydrataci cementu a vlastnostech zpracovatelnosti směsi hraje voda klíčovou roli. Kvalita použité vody ovlivňuje dobu tuhnutí, konzistenci a tokové vlastnosti čerstvé směsi. Podle obecného stavebního know-how musí záměsová voda splňovat normu ČSN EN 1008, která stanoví, že záměsová voda může pocházet i z recyklace v betonárně za předpokladu, že je její kvalita vhodná pro cementové systémy. [41]

Jedním z nejčastěji studovaných vlivů použití kalové vody je zpracovatelnost čerstvého betonu. V mnoha experimentech s recyklovanou vodou z betonářských provozů bylo zjištěno, že zvýšení podílu kalové vody vede ke snížení konzistence a ke zvýšení viskozity směsi. To je způsobeno výskytem jemných pevných látek v recyklované vodě, které zvyšují odpor směsi proti toku a snižují její tekutost. Například ze studie Ahmada vyplývá, že s rostoucím podílem recyklované vody dochází k nárůstu viskozity a mezní pevnosti pasty, což souvisí s přítomností nerozpuštěných částic a alkalických látek ve vodě. [42]

Současné zahraniční publikace dále potvrzují, že čerstvé směsi s vyšší koncentrací kalové vody vykazují nižší hodnotu sednutí, ale také nižší úbytek tekutosti během první hodiny, takže vykazují vyšší reologickou stabilitu v rámci krátkého času zpracování. To může být v některých technologických provozech výhodné, pokud je kladen důraz na minimalizaci segregace, nicméně i přesto je nutné přizpůsobit recepturu požadované konzistenci betonu. [42]

Kalová voda ovlivňuje také kinetiku hydratace cementu a dobu tuhnutí směsi. Vyšší pH v kalové vodě, často podpořené přítomností volného Ca(OH)_2 , má potenciál zrychlit počáteční fáze hydratace cementu. To může vést ke zkrácení doby počátečního tuhnutí, což má význam při řízení času zpracování směsi na pracovišti. Tento efekt byl potvrzen např. studií de Matose, která identifikovala vyšší rané pevnosti u směsí s recyklovanou vodou díky urychleným hydratacím produktů, i když dlouhodobé pevnosti mohou být lehce sníženy. [42]

Na rozdíl od některých tradičních představ se vliv kalové vody na mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu může lišit v závislosti na kvalitě a úpravě vody.

Některé studie dokumentují, že při správném řízení receptury a úpravě kalové vody (např. pH stabilizací, odstraněním pevných látek) může být dosaženo podobných nebo i lepších raných pevností v tlaku v porovnání s referenčními směsmi s pitnou vodou. [42]

Významné přehledy publikované i v recenzovaných časopisech zjistily, že vyšší obsah nerozpuštěných solí a jemných suspendovaných částic může zvýšit pórovitost čerstvého betonu a vést ke snížení konečných mechanických vlastností v tlaku a ohybu. Tento efekt je spojen s rušivými interakcemi těchto látek s hydratačními produkty a s jejich vlivem na mikrostrukturu cementové matrice. [31]

V praxi je proto doporučováno postupné nahrazování pitné vody kalovou vodou za současné úpravy receptury, zejména použití plastifikačních přísad či optimalizace poměru voda/cement, aby bylo dosaženo požadované zpracovatelnosti bez negativních vedlejších efektů. Betonářské normy i vědecké studie kladou důraz na posouzení kvality kalové vody před jejím použitím a doporučují provést případné technologické úpravy – například oddělení pevných látek, úpravu pH a odstranění agresivních iontů – aby byla zajištěna shoda s výkonovými požadavky stavebních materiálů. [41]

1.4.2 VLASTNOSTI ZTVRDLÉHO BETONU

Beton jako jeden z nejrozšířenějších konstrukčních materiálů vykazuje vysokou spotřebu vody při výrobě. Její opětovné použití snižuje množství vypouštěných odpadů i potřebu čerstvé pitné vody, avšak zároveň mění chemicko-fyzikální složení směsi, což může ovlivnit vlastnosti jak čerstvého betonu, tak následně ztvrdlého betonu. Obsah pevných částic a chemických složek bývá u kalové vody oproti pitné vodě podstatně vyšší, a to může ovlivnit výsledné vlastnosti materiálu. [24]

Kalová voda se od běžné pitné záměsové vody liší zejména vyšší koncentrací jemných částic cementové suroviny, drobného kameniva a rozpuštěných iontů, například sulfátů a chloridů. Tyto složky pocházejí z procesu mytí zařízení a zpravidla zůstávají v kalu. Přítomnost těchto suspenzí a chemických látek má přímý vliv na hydrodynamiku čerstvého betonu, zvyšuje jeho viskozitu a ovlivňuje výslednou konzistenci směsi. [28]

Hydratace cementu je klíčovým procesem, který určuje mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu. Použití kalové vody může ovlivnit rovnováhu mezi tvorbou hydratačních produktů, zejména hydrátu calcium silikátů (C-S-H), a množstvím nesouvislého volného prostoru v mikrostruktuře cementové pasty. Výzkum ukazuje, že vyšší obsah chloridů a sulfátů v recyklované vodě může zpomalit nebo narušit tvorbu těchto hydratačních produktů, což vede ke zvýšení pórovitosti a snížení objemové hmotnosti materiálu. Zvýšená pórovitost přímo koreluje se sníženými mechanickými vlastnostmi betonu. [28]

Na druhou stranu s nárůstem času hydratace může být část nežádoucích účinků recyklované vody eliminována, neboť pokračující hydratace může do určité míry vyrovnat rozdíly způsobené počátečními podmínkami. Dlouhodobé výsledky některých studií dokonce ukazují, že po 90 dnech zrání mohou být pevnostní parametry blízké nebo i lepší než u vzorků s čistou záměsovou vodou, pokud je podíl kalové vody optimalizován. [28]

Mechanické vlastnosti betonu, zejména pevnost v tlaku a v ohybu, jsou úzce spojeny s mikrostrukturou cementové matrice. Experimentální výsledky publikované v MDPI ukazují, že s rostoucím podílem recyklované vody v betonové směsi obvykle dochází ke snížení pevnosti v tlaku a ohybu ve srovnání s použitím pitné vody, a to až o desítky procent. Tento pokles lze připsat vyšší pórovitosti a přítomnosti rozpuštěných iontů, které narušují hydrataci cementu. [28; 32]

Nicméně při nízkém podílu recyklované vody, obvykle do 25 % náhrady, může být snížení pevností minimální nebo nemusí být statisticky významné, pokud je kvalita kalové vody dobře kontrolována a odpovídá normativním požadavkům. [28; 32]

Dlouhodobější zkoušky po 90 dnech ukazují, že betony s optimalizovaným podílem recyklované vody mohou vykazovat lepší vývoj pevnostních vlastností než krátkodobé zkoušky po 28 dnech, což naznačuje, že hydratace pokračuje intenzivněji se zapojením jemných částic z kalové vody. [28]

Dlouhodobá trvanlivost betonu zahrnuje odolnost vůči vnějším vlivům, jako je mrazuvzdornost, chemická odolnost a schopnost odolávat cyklickému zatížení. Zvýšený obsah iontů a jemných suspenzí z kalové vody může teoreticky ovlivnit tyto aspekty, protože zvýšená pórovitost je spojena s vyšší permeabilitou, což umožňuje rychlejší transport agresivních látek do matrice betonu, a jeho rychlejší degradaci.

Normy a technologické příručky proto upozorňují, že kvalita recyklované vody musí být pečlivě kontrolována a měly by být aplikovány i vhodné přísady (např. plastifikační k redukci zvýšení spotřeby vody v důsledku vyššího podílu jemných částic) pro kompenzaci potenciálně negativních efektů. [24]

Optimální využití kalové vody v betonárenském provozu zahrnuje laboratorní ověření její kvality před použitím s důrazem na obsah pevných částic a chemického složení. Dále je doporučeno omezit podíl recyklované vody na úroveň, která nevede k nepřijatelnému zhoršení mechanických vlastností (pod 25–30 %) a přizpůsobit receptury betonu včetně úpravy přísad a plastifikátorů. [24; 43]

1.4.3 VLIV NA TRVANLIVOST

Vliv použití recyklované kalové vody z recyklace čerstvého betonu na trvanlivost výsledných betonových a maltových směsí je komplexním jevem, který zahrnuje změny v mikrostruktuře, chemickém složení a transportních vlastnostech materiálu. Trvanlivost betonu je definována jako schopnost materiálu odolávat degradabilním vlivům prostředí během jeho životnosti bez významného snížení funkčnosti či mechanických vlastností. U betonů a malt vystavených opakovanému vlivu agresivních činidel je rozhodující zejména jejich pórovitost, kapilární transport, odolnost proti karbonataci, cyklickému zmrazování a chemické agresii. Užití recyklované kalové vody, která obsahuje zvýšené množství nerozpuštěných částic, zbytky přísad a vyšší koncentrace iontů (např. chloridů a síranů), může tyto parametry významně ovlivnit a tím i snížit celkovou trvanlivost cementových materiálů. [32]

Jedním z primárních mechanismů, jimiž recyklovaná voda ovlivňuje trvanlivost, je změna mikrostruktury materiálu. Studie ukazují, že nahrazení pitné vody recyklovanou kalovou vodou vede ke zvýšení celkové pórovitosti a snížení hustoty maltové matrice. Zvýšená pórovitost může zhoršit odolnost vůči pronikání agresivních látek, neboť kapilární póry umožňují hlubší a rychlejší transport škodlivých iontů jako jsou chloridy, které iniciují korozi výztuže nebo urychlují degradaci hydratačních produktů cementu. Tento jev je patrný především při vyšší míře nahrazení pitné vody recyklovanou vodou, kde se pórovitost zvyšuje významně a snižuje se schopnost materiálu odolávat kapilárnímu transportu vody a iontů. [32]

Trvanlivost betonu ovlivňuje i chemické složení recyklované kalové vody. Voda z betonáren obvykle obsahuje zvýšené množství iontů chloridů a síranů, které mohou přímo ovlivnit hydratační reakce cementu a sekundární mineralogické procesy. Chloridové ionty jsou známy svou schopností narušovat pasivační vrstvy na povrchu ocelové výztuže, což zvyšuje riziko koroze výztužných prvků. Síranové ionty mohou reagovat s aluminátovými fázemi cementu za vzniku ettringitu, který má tendenci expandovat a vytvářet mikropraskliny v cementové matrici. Tato mikrostruktura je poté více náchylná ke škodlivým vlivům prostředí, včetně cyklického zmrazování či karbonatace, což celkově snižuje životnost konstrukce. [32]

Významný vliv na trvanlivost má i interakce mezi rozpustnými látkami v recyklované vodě a hydratačními produkty cementu. Přítomnost rozpuštěných solí může změnit kinetiku hydratace cementu. V některých případech byly pozorovány urychlené počáteční hydratační reakce, avšak za cenu nerovnoměrně vyvinuté mikrostruktury, která byla křehčí a méně homogenní. Nerovnoměrná mikrostruktura rovněž zvyšuje riziko tzv. autogenního praskání a zhoršenou odolnost vůči mechanickému namáhání v důsledku přítomnosti slabých míst v matrici. [32]

Je však nutné zdůraznit, že vliv recyklované kalové vody na trvanlivost není uniformně negativní a může být ovlivněn konkrétními podmínkami použití, chemickým složením kalové vody, typem cementu, použitými přísadami a způsobem recyklace. Některé studie potvrzují, že při správném řízení složení recyklované vody a optimalizaci receptury betonu lze dosáhnout srovnatelných nebo dokonce lepších parametrů v určitých aspektech trvanlivosti (např. v hloubce průsaku tlakovou vodou) než u referenčních směsí. [32]

Významným faktorem, který ovlivňuje trvanlivost, je především kontrola množství kontaminantů a minimalizace přítomnosti iontů, které negativně ovlivňují chemickou stabilitu cementové matrice a transportní vlastnosti. Lze tomu předcházet úpravou recyklačního procesu nebo použitím vhodných přísad, které tlumí nepříznivé účinky vyšších koncentrací solí a pevných částic. [20]

Celkově lze závěrem konstatovat, že recyklovaná kalová voda ovlivňuje trvanlivost betonových materiálů prostřednictvím změn mikrostruktury, chemického složení a transportních vlastností, přičemž tyto změny obecně směřují ke zvýšení pórovitosti a potenciálně vyššímu riziku degradace. Nicméně při pečlivém

řízení složení a úpravě výrobní technologie je možné minimalizovat negativní vlivy a zabezpečit dlouhodobou stabilitu betonu, což je klíčové pro jeho uplatnění ve strukturálních aplikacích s vysokými požadavky na trvanlivost. [20; 32]

1.5 NORMOVÉ POŽADAVKY PRO TECHNOLOGICKOU VODU V BETONECH

Voda jakožto jeden ze základních technologických vstupů významně ovlivňuje jak vlastnosti čerstvého betonu, tak výsledné parametry betonu ztvrdlého. Z toho důvodu se následující kapitola bude věnovat záměsové vodě do betonu dle normy ČSN EN 1008. Pozornost bude věnována kritérium použitelnosti, omezením, trvanlivostním parametrům nebo přesahu do normy ČSN EN 206+A2.

1.5.1 KRITÉRIA POUŽITELNOSTI VODY

Základním východiskem pro posuzování vhodnosti vody pro výrobu betonu je norma ČSN EN 1008, která definuje vodu pitnou jako použitelnou bez dalšího zkoušení. V případě ostatních druhů vody, mezi něž patří i technologická nebo recyklovaná kalová voda, je nutné ověřit její chemické a fyzikální vlastnosti. Norma stanovuje limity pro obsah chloridů, síranů, alkalických látek, organických nečistot, olejů a tuků, přičemž cílem je zabránit negativním interakcím s cementovým pojivem a výztuží. Použitelnost vody je hodnocena nejen na základě chemické analýzy, ale rovněž prostřednictvím porovnávacích zkoušek pevnosti, kdy beton vyrobený s posuzovanou vodou musí dosáhnout alespoň 90 % pevnosti referenční směsi připravené s pitnou vodou. [38]

Dalším kritériem použitelnosti vody je její vliv na dobu tuhnutí cementu. Norma ČSN EN 1008 stanovuje, že rozdíl v počátku a konci tuhnutí cementové pasty připravené s posuzovanou vodou nesmí překročit ± 30 minut oproti referenční pastě. Tento požadavek je klíčový zejména u technologické vody s vyšším obsahem jemných částic a rozpuštěných iontů, které mohou působit jako urychlovače nebo zpomalovače hydratace. Z hlediska technologické praxe je proto nezbytné sledovat nejen chemické složení vody, ale i její dlouhodobou stabilitu. [38; 45]

1.5.2 OMEZENÍ PRO KALOVOU/TECHNOLOGICKOU VODU

Kalová voda z recyklace čerstvého betonu se vyznačuje zvýšeným obsahem nerozpuštěných pevných částic, především jemných frakcí cementu a kameniva, a současně vysokou alkalitou. Norma ČSN EN 1008 připouští její použití, avšak stanovuje, že obsah pevných částic musí být kontrolován a zohledněn při návrhu složení betonu. Prakticky to znamená nutnost započtení jemných částic obsažených v kalové vodě do celkového množství jemných složek směsi, aby nedošlo k neřízenému snížení účinného vodního součinitele. [38; 46]

Významným omezením je rovněž proměnlivost složení kalové vody v čase, která závisí na typu vyráběných betonů, použitém cementu a intenzitě recyklačního provozu. Odborné studie upozorňují, že bez kontinuální kontroly hustoty a pH může dojít k výrazným výkyvům vlastností čerstvého betonu, zejména konzistence a zpracovatelnosti. Z tohoto důvodu je technologická voda zpravidla využívána pouze do určitého maximálního podílu náhrady záměsové vody, který se v praxi pohybuje mezi 10–30 %, pokud není prokázána její plná ekvivalence s vodou pitnou. [20; 47]

1.5.3 VZTAH KE KVALITATIVNÍM POŽADAVKŮM BETONU DLE ČSN EN 206+A2

Norma ČSN EN 206+A2 klade důraz na zajištění deklarovaných vlastností betonu, zejména pevnostní třídy, konzistence, objemové hmotnosti a trvanlivosti. Použití technologické vody je v tomto kontextu přípustné pouze tehdy, pokud není v rozporu s požadavky normy na maximální vodní součinitel a minimální obsah cementu. Záměsová voda, včetně vody kalové, se plně započítává do výpočtu vodního součinitele, což je klíčové pro návrh betonu do agresivních prostředí. [44]

Kvalitativní požadavky dle ČSN EN 206+A2 rovněž zahrnují omezení obsahu chloridů ve vztahu k typu výztuže. Technologická voda musí splňovat stejné limity jako voda pitná, přičemž zvláštní pozornost je nutné věnovat betonům s předpjatou výztuží. Zahraniční studie potvrzují, že dlouhodobé používání recyklované vody bez kontroly obsahu chloridů může vést ke kumulaci těchto iontů v betonu a následně ke zvýšenému riziku koroze výztuže. [44]

1.5.4 TRVANLIVOSTNÍ PARAMETRY

Z hlediska trvanlivosti betonu je kvalita záměsové vody významná zejména ve vztahu k pórové struktuře cementového kamene a chemické stabilitě hydratačních produktů. Zvýšený obsah alkalických látek v technologické vodě může přispívat k vyšší alkalitě pórového roztoku, což je obecně příznivé pro pasivaci výztuže, avšak současně může zvyšovat riziko alkalicko-křemičité reakce v případě reaktivního kameniva. Normy proto nepřímou vyžadují, aby použití technologické vody bylo posuzováno v kontextu konkrétní skladby betonu. [48]

Dlouhodobé experimentální studie potvrzují, že při dodržení limitů ČSN EN 1008 nemá použití kalové vody negativní vliv na mrazuvzdornost ani odolnost betonu proti chemickému působení. Naopak některé práce publikované v časopise *Materials* uvádějí mírné zlepšení mikrostruktury v důsledku přítomnosti jemných částic působících jako mikroplnivo. Tyto efekty jsou však silně závislé na stabilitě složení technologické vody a na způsobu řízení výroby betonu. [38; 47]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je komplexně posoudit možnosti využití kalové vody vznikající při recyklaci čerstvého betonu jako částečné náhrady záměsové vody v konstrukčních betonech a vyhodnotit její vliv na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu z hlediska technologických, mechanických a trvanlivostních parametrů.

V teoretické části práce je cílem shrnout současný stav poznání v oblasti recyklace čerstvého betonu, charakterizovat fyzikální a chemické vlastnosti kalové vody, její proměnlivost v závislosti na provozních podmínkách betonáren a vymezit normové požadavky na technologickou vodu používanou při výrobě betonu, zejména ve vztahu k ČSN EN 206+A2 a souvisejícím předpisům.

Experimentální část práce je zaměřena na sledování kolísání obsahu sušiny a složení kalové vody společnosti ZAPA beton. Na odebraných vzorcích je cílem stanovit meze variability složení sušiny, se zvláštním důrazem na obsah jemných a jílovitých podílů, a ověřit vhodnost metody kontinuálního sledování hustoty kalové vody jako nástroje pro odhad skutečného obsahu sušiny.

Dalším cílem práce je na základě navržené referenční receptury betonu třídy C25/30 s konzistencí S4 a s využitím různých druhů cementů experimentálně ověřit vliv dávek kalové vody s rozdílným obsahem sušiny, na chování čerstvého betonu. Při konstantním vodním součiniteli byly sledovány a hodnoceny následující charakteristiky: konzistence a obsah vzduchu v čase po namíchání a s odstupem 60 minut. Bezprostředně po namíchání byla sledována i teplota betonové směsi.

Při zkoumání vlastností ztvrdlého betonu bylo cílem posoudit vliv použití kalové vody na objemovou hmotnost, hloubku průsaku tlakovou vodou, smrštění betonu v raném stáří a pevnost v tlaku ve stáří 7, 28 a 60 dnů. Součástí práce je rovněž ověření chování čerstvého betonu při zvýšené teplotě 30 °C při optimálně stanovené dávce sušiny.

Výstupem práce je vyhodnocení vhodnosti a limitů využití kalové vody z recyklace čerstvého betonu v konstrukčních betonech a formulace doporučení pro její praktické použití v podmínkách betonářského provozu.

2.2 METODIKA PRÁCE

Cílem navržené metodiky bylo experimentálně ověřit vliv postupné náhrady pitné vody kalovou vodou z recyklace čerstvého betonu na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu při zachování konstantní konzistence. Metodika zahrnuje komplexní sledování kalové vody v provozních podmínkách, návrh a výrobu betonových směsí, jejich označení a systematické vyhodnocení experimentálních dat.

Pro zajištění reprezentativních dat byla kalová voda sledována na třech různých betonárnách firmy ZAPA beton, konkrétně v Holubicích, Vyškově a Horoměřicích. Odběr vzorků probíhal každý týden po dobu tří měsíců a zahrnoval tři časové body denně, přibližně v 8:00, 10:00 a 14:00. Tento časový rozvrh umožnil zachytit provozní variabilitu vlastností kalové vody během směn betonárny. Sledovány byly fyzikálně-chemické a vizuální parametry, konkrétně množství sušiny, pH, hustota, množství sedimentu a barva. Vzorky byly odebírány z úrovně vstupní hadice, která vede kalovou vodu z nádrže do míchačky, přičemž odběr byl proveden do 120 sekund po ukončení míchacího cyklu, aby bylo zajištěno, že odebraný vzorek bude před odběrem zhomogenizován. Vzorky byly označeny a převezeny do laboratoře. Na betonárně v Horoměřicích byla k průběžnému měření využita měřicí sonda OLAS, která umožňuje přesně sledovat obsah pevných látek v kalové vodě bez přímého kontaktu s médiem.

Před výrobou betonových směsí byla kalová voda podrobena několika analýzám. Minerální složení pevných částic bylo stanoveno pomocí rentgenové difrakční analýzy (XRD), přičemž vyhodnocení dat probíhalo pomocí programu Profex. Chemické složení bylo určeno standardním chemickým rozbohem. Vzorky byly před analýzou vysušeny a vyžihány při teplotě 400 °C, aby byly odstraněny organické složky. Tyto analýzy umožnily vyloučit negativní vliv složek kalové vody na vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého betonu.

Byly navrženy betonové receptury se čtyřmi různými druhy cementů z Cementárny Hranice, jejichž specifikace je uvedena v kapitole 3.4 *Použité materiály*. Referenční receptury byly přejaty přímo z firmy ZAPA Beton, čímž bylo zajištěno, že plastifikační přísady budou správně fungovat s dodanými typy cementů. Pro každý typ cementu byla připravena jedna referenční směs bez kalové vody, ve které byla použita výhradně pitná voda, a dále čtyři modifikované směsi, kde byla

pitná voda částečně nebo zcela nahrazena kalovou vodou v podílech 25 %, 50 %, 75 % a 100 % z celkového množství záměsové vody. Rozsah 0–100 % byl zvolen s ohledem na vysokou variabilitu vlastností kalové vody a nemožnost přímé aplikace zahraničních poznatků optimální dávky kalové vody na podmínky konkrétních betonáren.

Jako kamenivo bylo jednotně použito drobné těžené kamenivo frakce 0–4 mm z lokality Hrušovany a hrubé drcené kamenivo frakcí 4–8 mm a 8–16 mm z lokality Luleč. Skladba kameniva byla ve všech recepturách shodná, aby bylo možné objektivně vyhodnotit vliv druhu cementu a podílu kalové vody. Množství záměsové vody bylo u jednotlivých směsí upraveno tak, aby při zkoušce sednutí kužele byla dosažena konzistenční třída S4, odpovídající sednutí 160–220 mm, čímž byla zajištěna srovnatelná zpracovatelnost všech směsí.

Výroba zkušebních těles probíhala v laboratorních podmínkách. Počet zkušebních těles byl přizpůsoben tak, aby bylo možné celou záměs namíchat najednou a minimalizovat rozdíly, například při dodatečném dávkování vody. Z každé záměsi bylo připraveno celkem šest zkušebních krychlí o hraně 150 mm a jeden měřicí žlab pro stanovení smrštění. Zbytek čerstvého betonu byl využit k provedení zkoušek čerstvého betonu. Po odbednění byla tělesa přemístěna do vodního uložení ke zrání.

Pro jednoznačnou identifikaci zkušebních těles byl zaveden systematický označovací systém. Například označení C1_50 vyjadřuje betonovou směs s cementem C1 (CEM II/A-LL 42,5 R) a podílem kalové vody 50 % z celkového množství záměsové vody. Na každé těleso byly dále uvedeny následující identifikátory: datum výroby, datum zkoušení, pořadové číslo a typ zkoušky, pro kterou bylo určeno, čímž se minimalizovalo riziko záměny vzorků při paralelním testování většího počtu těles. Pro stanovení hloubky průsaku byla určena jedna zkušební krychle, zatímco zbylých pět krychlí bylo použito ke stanovení pevnosti betonu v tlaku. Ve stáří 28 a 60 dnů byly vždy zkoušeny dvě krychle a ve stáří 7 dní pouze jedna. Vzhledem k omezenému počtu zkušebních těles zapříčiněnému kapacitními limity laboratorní míchačky, nelze výsledky považovat za statisticky plně průkazné; statistické vyhodnocení slouží především k identifikaci trendů a interpretaci experimentálních dat.

Naměřená data byla systematicky zpracována a vyhodnocena pomocí programovacího jazyka Python, který umožnil tvorbu grafických výstupů.

2.3 POSTUP PRÁCE

Od 6. června do 20. srpna 2025 bylo každý týden prováděno měření na zkoumaných betonárnách Holubice, Horoměřice a Vyškov. Odběr vzorků probíhal pravidelně po dobu tří měsíců a zahrnoval tři časové body během dne, přibližně v 8:00, 10:00 a 14:00. Zvolený časový rozvrh umožnil zachytit provozní variabilitu vlastností kalové vody v průběhu jednotlivých směn betonárny a zohlednit vliv aktuálního zatížení provozu.

V rámci sledování byly hodnoceny fyzikálně-chemické a vizuální parametry kalové vody, konkrétně množství sušiny, hodnota pH, tekutost, množství sedimentu a barevné odstíny. Vzorky byly odebírány z úrovně vstupní hadice, která vede kalovou vodu z akumulární nádrže do míchačky. Odběr byl proveden nejpozději do 120 s po ukončení míchacího cyklu, aby bylo zajištěno, že odebraný vzorek reprezentativní z hlediska aktuálního složení kalové vody. Odebrané vzorky byly jednoznačně označeny a převezeny do laboratoře.

Množství sušiny bylo stanoveno laboratorně po vysušení vzorku kalové vody při teplotě 105 °C do dosažení konstantní hmotnosti. Na základě rozdílu hmotností před a po vysušení byl stanoven procentuální podíl sušiny ve vzorku.

Hustota kalové vody byla stanovena pomocí odměrného válce o známém objemu. Odměrný válec byl nejprve zvážen prázdný a následně naplněn odebraným vzorkem kalové vody. Vzorek byl do válce naléván bezprostředně po odběru, aby se minimalizoval vliv sedimentace pevných částic. Po naplnění válce na stanovený objem byla změřena celková hmotnost vzorku. Hustota kalové vody byla vypočtena jako podíl hmotnosti vzorku a objemu odměrného válce. Stanovení bylo prováděno za ustálené teploty. Pouze na betonárně v Horoměřicích probíhalo měření hustoty přímo pomocí sondy OLAS.

Odběr vzorku kalové vody k míchání betonové směsi byl proveden dne 22. září 2025 na betonárně ZAPA beton v Holubicích. Tento odběr byl zvolen jako reprezentativní, neboť vycházel z dlouhodobého sledování provozních parametrů a průměrných hodnot zjištěných během předchozího monitorovaného období. Finální vzorek byl odebrán za standardních provozních podmínek a použit

pro detailní laboratorní analýzy, zejména pro rentgenovou difrakční analýzu (XRD), chemický rozbor a doplňující fyzikálně-chemická stanovení.

Následně bylo provedeno míchání jednotlivých betonových receptur s cílem ověřit vliv postupné náhrady pitné vody kalovou vodou na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Každá receptura byla připravena vždy v rámci jedné záměsi, aby byla minimalizována nehomogenita směsi způsobená například rozdílným dávkováním složek, zejména vody. Při dávkování kalové vody, která vykazuje tendenci k sedimentaci pevných částic, byl vzorek vždy důkladně rozmíchán. Rozmíchání bylo provedeno rovněž bezprostředně před nalitím kalové vody do laboratorní míchačky.

Nejprve bylo do laboratorní míchačky přidáno kamenivo, které bylo homogenizováno po dobu 30 s. Následně byl přidán cement. Od okamžiku přidání pitné vody, případně kalové vody v závislosti na konkrétní receptuře, bylo zahájeno měření času pomocí digitálních stopek. Do části záměsové vody byly přidány obě plastifikační přísady a poté byl doplněn zbytek vody. Celková doba míchání činila přibližně 300 s.

V čerstvém stavu byla u betonových směsí stanovena teplota betonu, sednutí kužele v časech 5 a 60 minut, obsah vzduchu v časech 5 a 60 minut a objemová hmotnost čerstvého betonu. Teplota betonové směsi měla být 30 °C. Objemová hmotnost v čerstvém stavu byla stanovena v nádobě určené pro stanovení obsahu vzduchu. Teplota betonu byla měřena digitálním teploměrem bezprostředně po ukončení míchacího cyklu přímo v laboratorní míchačce. Sednutí kužele bylo provedeno dle ČSN EN 12350-2, objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 a obsah vzduchu dle ČSN EN 12350-7.

Smrštění betonu bylo stanoveno na měřicích žlabech zařízení SCHLEIBINGER GERÄTE, kdy byl ve dvou vrstvách naplněn měřicí žlab. Každá vrstva byla řádně zhutněna. Po zapojení byl žlab ponechán v laboratorních podmínkách bez zakrytí po dobu 7 dní. Z každé záměsi bylo dále vyrobeno šest zkušebních krychlí o hraně 150 mm. Na zkušebních krychlích byla ve stanoveném stáří ověřována hloubka průsaku, pevnost v tlaku a objemová hmotnost.

Po naplnění forem byla laboratorní míchačka pečlivě zakryta neprodyšnou PE fólií do doby, než uplynulo 60 minut od přidání vody do laboratorní míchačky.

Následně byla betonová směs opětovně rozmíchána a bylo provedeno opakované stanovení sednutí kužele a obsahu vzduchu v čase 60 minut.

Po přibližně 24 hodinách byly zkušební krychle odbedněny a přemístěny do vodního uložení. Hloubka průsaku tlakovou vodou byla stanovena dle ČSN EN 12390-8 ve stáří 28 dní. Objemová hmotnost zkušebních těles byla stanovena dle ČSN EN 12390-7 při každé zkoušce ve ztvrdlém stavu. Pevnost v tlaku zkušebních krychlí byla stanovena dle ČSN EN 12390-3 ve stářích 7, 28 a 60 dní.

2.4 ZKOUŠKY KALOVÉ VODY

V rámci experimentální části práce byly provedeny vybrané zkoušky kalové vody z recyklace čerstvého betonu s cílem charakterizovat její fyzikální a chemické vlastnosti. Zkoušky byly zaměřeny zejména na složení pevných částic přítomných v kalové vodě, její chemické složení a základní fyzikální charakteristiku. Pro tento účel byly použity následující metody: rentgenová difrakční analýza (XRD), chemický rozbor a stanovení hustoty kalové vody. Kromě toho bylo sledováno i pH, obsah sušiny nebo barva kalové vody.

2.4.1 STANOVENÍ VIZUÁLNÍCH PARAMETRŮ KALOVÉ VODY

Pro posouzení vizuálních parametrů byla sledována barva a množství sedimentu v kalové vodě. Tyto parametry poskytují rychlý a praktický odhad kvality vody a homogenity směsi, a napomáhají identifikovat případnou separaci pevných částic či přítomnost nečistot. Barva je indikátorem přítomnosti jemných částic cementu či jiných složek. Vizuální hodnocení tak doplňuje chemicko-fyzikální měření a umožňuje komplexní posouzení vhodnosti kalové vody pro recyklaci.

2.4.2 STANOVENÍ TEPLoty KALOVÉ VODY

Teplota kalové vody byla měřena přímo v místě odběru pomocí digitálního teploměru, aby se minimalizoval vliv okolních podmínek a časová prodleva mezi odběrem a měřením. Digitální teploměr byl ponořen do kalové vody tak, aby měření nebylo ovlivněno okolním vzduchem ani stěnami nádrže. Naměřená hodnota teploty byla zaznamenána spolu s datem, časem a lokalitou odběru. Sonda teploměru byla mezi měřeními očištěna, aby nedošlo ke zkreslení výsledků.

2.4.3 STANOVENÍ HUSTOTY KALOVÉ VODY

Hustota kalové vody byla stanovena jednoduchou laboratorní metodou pomocí odměrného válce. Tato zkouška poskytuje základní informaci o obsahu pevných částic v kalové vodě a umožňuje orientační posouzení její koncentrace a variability v závislosti na provozních podmínkách betonárny.

Postup spočíval v naplnění odměrného válce známého objemu kalovou vodou a následném zvážení celého objemu. Z naměřené hmotnosti a objemu byla vypočtena hustota kalové vody.

Na betonárně v Horoměřicích byla k průběžnému měření využita měřící sonda OLAS, která pomocí optického senzoru na bázi absorpce světla umožňuje přesně sledovat obsah pevných látek v kalové vodě bez přímého kontaktu s médiem.



Obr. 5 Měřící sonda OLAS [64]

$$\rho_{kal.vody} = \frac{(m_{n+s} - m_s)}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

kde:

$\rho_{kal. vody}$ = hustota kalové vody [kg/m³]

m_{n+s} = hmotnost nádoby se suspenzí [kg]

m_s = hmotnost suspenze [kg]

V = objem kalové vody [m³]

2.4.4 STANOVENÍ OBSAHU SUŠINY V KALOVÉ VODĚ

Obsah sušiny v kalové vodě byl stanoven gravimetrickou metodou vysušením vzorku do konstantní hmotnosti, to umožňuje přesné kvantifikování podílu nerozpustných a rozpuštěných pevných částic, které kalová voda obsahuje. Podíl sušiny v kalové vodě totiž ovlivňuje zejména konzistenci a objemovou hmotnost betonu.

$$x = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100 [\%]$$

kde:

x = obsah sušiny [%]

m_2 = navážka suchého vzorku [g]

m_1 = navážka vzorku před vysušením [g]

2.4.5 STANOVENÍ PH KALOVÉ VODY

Pro stanovení pH kalové vody byla použita digitální pH sonda, která umožňuje přesné a rychlé měření kyselosti či zásaditosti vodného roztoku. Hodnoty pH ovlivňují zejména stabilitu cementového hydrátu a případné chemické reakce při opětovném využití vody v betonové směsi. Digitální pH metry poskytují okamžité hodnoty, minimalizují chyby způsobené subjektivním odhadem.

2.4.6 CHEMICKÝ ROZBOR KALOVÉ VODY

Chemický rozbor kalové vody byl proveden za účelem stanovení základních chemických parametrů, které jsou rozhodující pro její použitelnost v betonu z hlediska platných normových požadavků na záměsovou vodu. Hodnoceny byly zejména koncentrace hlavních iontů a vybraných chemických složek, které mohou ovlivňovat průběh hydratace cementu, dobu tuhnutí, vývoj pevností a trvanlivost betonu.

Vzorky kalové vody byly analyzovány v homogenizovaném stavu, aby bylo zajištěno reprezentativní zachycení jak kapalné, tak jemně dispergované pevné fáze. Výsledky chemického rozboru byly následně porovnány s limitními hodnotami uvedenými v příslušných normách pro vodu používanou k výrobě betonu.

2.4.7 RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA SUŠINY

Rentgenová difrakční analýza byla použita k identifikaci minerálního složení pevných částic obsažených v kalové vodě. Tato metoda umožňuje stanovit přítomnost jednotlivých krystalických fází, které vznikají jednak jako součást původních složek cementu, jednak jako produkty hydratace cementu nebo zbytkové částice jemných kameniv a dalších složek.

Před vlastní analýzou byl vzorek kalové vody ponechán k sedimentaci, následně byla pevná fáze oddělena a vysušena za laboratorních podmínek. Takto připravený vzorek byl rozemlet na jemnou frakci a analyzován pomocí XRD.

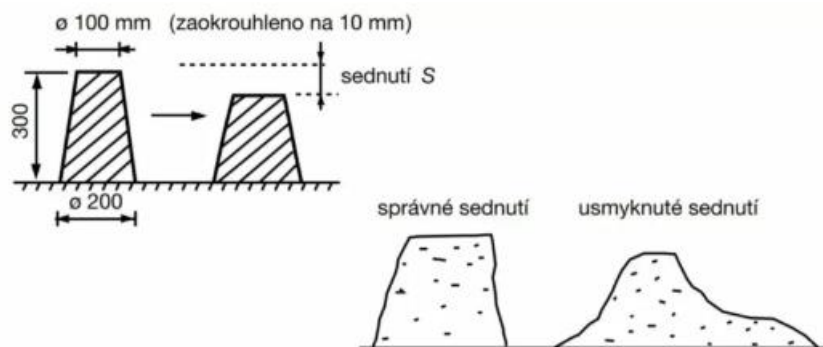
Výsledkem analýzy byly difrakční záznamy, na jejichž základě byly identifikovány jednotlivé minerální fáze v programu Profex. Získané informace slouží k posouzení reaktivity pevných částic a jejich možného vlivu na hydratační procesy v betonové směsi při použití kalové vody jako záměsové.

2.5 ZKOUŠKY ČERSTVÉHO BETONU

V rámci experimentu byla na čerstvém betonu stanovena: teplota směsi Sednutí v čase 5 a 60 minut, dále potom objemová hmotnost čerstvého betonu, stanovení obsahu vzduchu v čase 5 a 60 minut.

2.5.1 ZKOUŠKA SEDNUTÍM KUŽELE (ČSN EN 12 350-2)

Zkouška sednutím byla provedena v čase 5 a 60 minut od započetí míchání. Veškeré vybavení potřebné pro zkoušku bylo navlhčeno vlhkým hadrem. Kužel byl přišlápnut a následně plněn ve třech vrstvách přes násypku, kdy každá vrstva byla zhutněna 25 vpichy propichovací tyčí. Vpichy byly po celém průřezu kužele. Po zaplnění kužele byla odstraněna násypka s přebytečným betonem pomocí zednické lžice. Kužel byl zvednut kolmo vzhůru. Bylo změřeno sednutí S podle rozdílu mezi formou a nejvyšším bodem sednutého kužele. Výsledek sednutí byl zapsán s přesností na 10 mm. Při stanovení sednutí po 60 minutách byla navíc směs před plněním do kužele nejprve řádně rozmíchána.[49; 49; 50]



Obr. 6 Měření sednutí [50]

Tab. 1 Třída sednutí [49]

Třída sednutí	Interval sednutí
S1	10–40 mm
S2	50–90 mm
S3	100–150 mm
S4	160–210 mm
S5	více než 220 mm

2.5.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST (ČSN EN 12 350–6)

Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu byla provedena dle ČSN EN 12 350- 6. Pro stanovení byla použita nádoba pro stanovení obsahu vzduchu o objemu 8 litrů. Nádoba byla před započítím měření navlhčena vlhkým hadrem a zvážena. Po jejím navlhčení byla naplněna ve dvou vrstvách betonem, kdy každá vrstva byla následně zhutněna na vibračním stole. Po urovnání betonu do roviny pomocí zednické lžice byla nádoba opět zvážena. Objemová hmotnost byla potom následně vypočtena ze vzorce a uvedena s přesností na 10 kg/m³ [51].

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

kde je

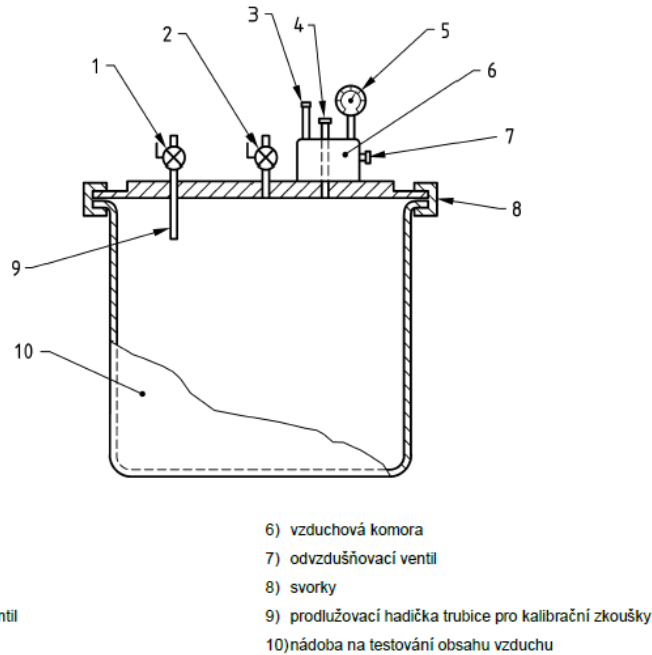
D	objemová hmotnost čerstvého betonu, v kg/m ³ ;
m_1	hmotnost prázdné nádoby, v kg;
m_2	hmotnost naplněné nádoby se zhutněným betonem, v kg;
V	objem nádoby, v m ³ .

Obr. 7 Výpočet objemové hmotnosti dle normy [51]

2.5.3 OBSAH VZDUCHU – TLAKOVÉ METODY (ČSN EN 12 350–7)

Zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu byla provedena dle ČSN EN 12 350–7. Pro stanovení byla použita nádoba s víkem, kde nádoba měla objem 8 litrů. Nádoba i víko byly navlhčeny vlhkým hadrem. Následně byla nádoba naplněna ve dvou vrstvách betonem, kdy byla každá vrstva zhutněna na vibračním stole. Po zhutnění byl beton urovnán s přírubou nádoby. Horní hrana byla otřena vlhkým hadrem, aby po nasazení a uzavření víka docíleno těsnosti. Oba ventily byly otevřeny a stříčkou byla do ventilu A vstříkována voda tak dlouho, dokud z ventilu B nevytékala voda. Gumovou paličkou bylo poté poklepáno na nádobu přístroje, aby došlo k odstranění vzduchových bublin. Do ventilu A se opět vstříkovala voda, dokud z ventilu B nezačala opět vytékat voda. Oba ventily byly v tento okamžik uzavřeny a do vzduchové komory byl napumpován vzduch, dokud ručička tlakoměru neukazovala počáteční hodnotu tlaku. Po stisknutí tlačítka byla odečtena hodnota

na tlakoměru, která odpovídala obsahu vzduchu v procentech, kdy výsledná hodnota byla zaokrouhlena na 0,1 %. [52]



Obr. 8 Schéma nádoby pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém stavu[52]

2.5.4 TEPLOTA

Teplota betonu byla měřena pomocí kalibrovaného digitálního teploměru přímo v čerstvé směsi bezprostředně po ukončení míchání. Výsledná teplota byla uvedena s přesností na 0,1 °C.

2.6 ZKOUŠKY ZTVRDLÉHO BETONU

Na ztvrdlém betonu bylo stanoveno: smrštění betonu v délce 7 dnů od zamíchání, objemová hmotnost ztvrdlého betonu, pevnost v tlaku stáří 7, 28 a 60 dnů a stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou stáří 28 dnů.

2.6.1 STANOVENÍ SMRŠTĚNÍ BETONU

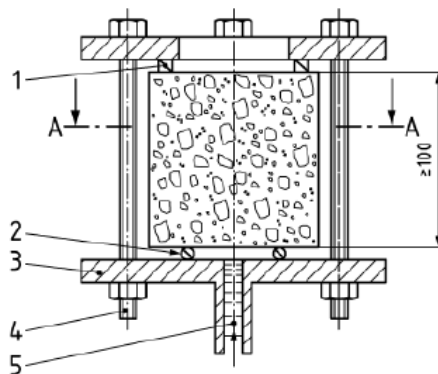
Smrštění betonu bylo stanoveno v měřícím žlabu SCHLEIBINGER GERÄTE. Měřící žlab byl naplněn betonem ve dvou vrstvách, kdy každá vrstva byla zhutněna na vibračním stole. Horní povrch byl urovnán pomocí navlhčené zednické lžíce. Po připojení snímače bylo započato měření, které trvalo 7 dní od zapojení snímače. Snímač odesílal data každých 15 minut. Po ukončení zkoušky bylo z naměřených dat zjištěno smrštění betonu.



Obr. 9 Měřící žlab pro stanovení objemových změn SCHLEIBINGER GERÄTE [65]

2.6.2 HLOUBKA PRŮSAKU TLAKOVOU VODOU (ČSN EN 12 390–8)

Hloubka průsaku byla stanovena na zkušebních krychlích o hraně 150 mm ve stáří 28 dní. Povrch krychle byl zdrsňen ocelovým kartáčem. Těleso bylo upnuto do zkušebního zařízení vodotlačné stolice, tak aby zkoušená strana byla zdrsňena. Na těleso působil vodní tlak (500 ± 50) kPa po dobu (72 ± 2) hodin. Během zkoušení byla zkušební krychle pozorována, zda nedošlo k průsaku, ať už z boku nebo shora. Po skončení doby působení bylo těleso vyjmuto ze zkušebního zařízení. Zkušební těleso bylo rozlomeno na polovinu, kolmo na směr, na který působil vodní tlak. Po rozlomení se byla krychle ponechána k oschnutí, jenom tak, aby došlo ke zvýraznění hranice průsaku. Následně byla změřena největší hloubka průsaku od zkoušené plochy s přesností na 1 mm [53].



Obr. 10 Uložení zkušební krychle do vodotlačné stolice [53]

2.6.3 OBJEMOVÁ HMOTNOST (ČSN EN 12 390–7)

Po vyjmutí zkušebních krychlí z vodního uložení byla každá krychle otřena vlhkým hadrem, aby se na povrchu nenacházela voda. Následně byla stanovena na váze hmotnost krychle v kg. Objem krychle byl stanoven pomocí posuvného měřítka z rozměrů krychle a vypočten v m^3 , zaokrouhlen na celé desítky. Objemová hmotnost byla vypočtena ze vztahu:

$$D = \frac{m}{V} [kg/m^3]$$

kde:

D = objemová hmotnost [kg/m^3]

m = hmotnost zkušebního tělesa [kg]

V = objem tělesa [m^3]

Výsledek byl zaokrouhlen na nejbližších $10 kg/m^3$ [54].

2.6.4 PEVNOST V TLAKU (ČSN EN 12 390–3)

Po vyjmutí zkušebních krychle o hraně 150 mm z vodního uložení, byla krychle otřena, aby byli odstraněny zbytky uvolněného materiálu z povrchu krychle. Krychle byla následně změřena pomocí posuvného měřítka. Těleso bylo poté vloženo do zkušebního lisu, tak aby bylo zatěžování prováděno kolmo na směr hutnění. Těleso bylo vycentrováno, aby zatěžování bylo rovnoměrné. Rychlost zatěžování byla $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Těleso bylo zatěžováno až do porušení, následně bylo zaznamenáno maximální zatížení v kN. Ze vztahu daného normou byla vypočtena pevnost betonu v tlaku s přesností na 0,1 MPa.[55]

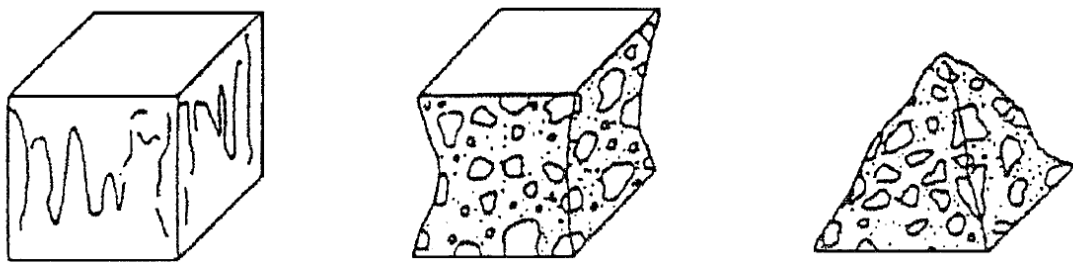
$$f_c = \frac{F}{A_c} [MPa]$$

kde:

f_c = pevnost v tlaku [MPa]

F = maximální zatížení při porušení [N]

A_c = plocha tělesa ze změřených rozměrů [mm²]



Obr. 11 Vyhovující způsoby porušení zkušební krychle [55]

2.7 RECEPTURY

Pro účely této práce byly použity receptury betonových směsí s cílem zhodnotit možnosti využití kalové vody z recyklace čerstvého betonu. Shodné referenční receptury jsou používány při výrobě betonových směsí na zkoumaných betonárnách společnosti ZAPA beton, čímž bylo zajištěno stabilní spolupůsobení použitých cementů s plastifikačními přísadami. Každá receptura zahrnovala referenční směs bez přídavku kalové vody a dále směsi se zvyšujícím podílem kalové vody (25 %, 50 %, 75 % a 100 % náhrady záměsové vody kalovou vodou (viz Tab. 2).

Při přípravě směsí s přidavkem kalové vody bylo nutné upravit množství záměsové vody v závislosti na tekutosti a viskozitě kalové vody, pro dosažení požadované třídy konzistence S4. V některých směsích byla rovněž navýšena dávka plastifikační přísady, aby bylo dosaženo požadované zpracovatelnosti betonu (viz Tab. 3). Tyto úpravy byly prováděny tak, aby nebyly ovlivněny základní proporce směsi a aby bylo možné objektivně porovnat vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu při různém podílu kalové vody.

Tab. 2 Navržené receptury betonů

C1	C1_0	C1_25	C1_50	C1_75	C1_100
CEM II/A-LL 42,5 R	330 kg	330 kg	330 kg	330 kg	330 kg
0/4 Hrušovany	840 kg	840 kg	840 kg	840 kg	840 kg
4/8 Luleč	200 kg	200 kg	200 kg	200 kg	200 kg
8/16 Luleč	730 kg	730 kg	730 kg	730 kg	730 kg
Stachoplast (LS)	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg
Stachement 2489 (PCE)	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg
Voda	190 kg	143 kg	95 kg	48 kg	0 kg
Kalová voda	0 kg	48 kg	95 kg	143 kg	190 kg
Vodní součinitel	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
C2	C2_0	C2_25	C2_50	C2_75	C2_100
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N	330 kg	330 kg	330 kg	330 kg	330 kg
0/4 Hrušovany	840 kg	840 kg	840 kg	840 kg	840 kg
4/8 Luleč	200 kg	200 kg	200 kg	200 kg	200 kg
8/16 Luleč	730 kg	730 kg	730 kg	730 kg	730 kg
Stachoplast (LS)	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg
Stachement 2489 (PCE)	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg
Voda	190 kg	143 kg	95 kg	48 kg	0 kg
Kalová voda	0 kg	48 kg	95 kg	143 kg	190 kg
Vodní součinitel	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
C3	C3_0	C3_25	C3_50	C3_75	C3_100
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	330 kg	330 kg	330 kg	330 kg	330 kg
0/4 Hrušovany	840 kg	840 kg	840 kg	840 kg	840 kg
4/8 Luleč	200 kg	200 kg	200 kg	200 kg	200 kg
8/16 Luleč	730 kg	730 kg	730 kg	730 kg	730 kg
Stachoplast (LS)	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg
Stachement 2489 (PCE)	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg
Voda	190 kg	143 kg	95 kg	48 kg	0 kg
Kalová voda	0 kg	48 kg	95 kg	143 kg	190 kg
Vodní součinitel	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58

C4	C4_0	C4_25	C4_50	C4_75	C4_100
CEM III/A 42,5 N	330 kg	330 kg	330 kg	330 kg	330 kg
0/4 Hrušovany	840 kg	840 kg	840 kg	840 kg	840 kg
4/8 Luleč	200 kg	200 kg	200 kg	200 kg	200 kg
8/16 Luleč	730 kg	730 kg	730 kg	730 kg	730 kg
Stacheplast (LS)	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg
Stachment 2489 (PCE)	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg
Voda	190 kg	143 kg	95 kg	48 kg	0 kg
Kalová voda	0 kg	48 kg	95 kg	143 kg	190 kg
Vodní součinitel	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58

Tab. 3 Tabulka korekcí v rámci receptur

C1	C1_0	C1_25	C1_50	C1_75	C1_100
Stacheplast navíc	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg
Celkový Stacheplast	1,00 kg	1,00 kg	1,00 kg	1,00 kg	1,00 kg
Stachment 2489 navíc	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg
Celkový Stachment 2489	2,00 kg	2,00 kg	2,00 kg	2,00 kg	2,00 kg
Voda navíc	0 kg	-10 kg	-4 kg	0 kg	0 kg
Celková voda	190 kg	132 kg	91 kg	48 kg	0 kg
Kalová voda navíc	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg
Celková kalová voda	0 kg	48 kg	95 kg	143 kg	190 kg
Výsledný vodní součinitel	0,58	0,55	0,56	0,58	0,58
C2	C2_0	C2_25	C2_50	C2_75	C2_100
Stacheplast navíc	0,00 kg	0,00 kg	0,18 kg	0,00 kg	0,00 kg
Celkový Stacheplast	1,00 kg	1,00 kg	1,18 kg	1,00 kg	1,00 kg
Stachment 2489 navíc	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	1,00 kg	1,00 kg
Celkový Stachment 2489	2,00 kg	2,00 kg	2,00 kg	3,00 kg	3,00 kg
Voda navíc	-16 kg	-5 kg	10 kg	1 kg	13 kg
Celková voda	174 kg	137 kg	105 kg	49 kg	13 kg
Kalová voda navíc	0 kg	0 kg	0 kg	36 kg	13 kg
Celková kalová voda	0 kg	48 kg	95 kg	179 kg	203 kg
Výsledný vodní součinitel	0,53	0,56	0,61	0,69	0,66
C3	C3_0	C3_25	C3_50	C3_75	C3_100
Stacheplast navíc	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,34 kg	0,00 kg
Celkový Stacheplast	1,00 kg	1,00 kg	1,00 kg	1,34 kg	1,00 kg
Stachment 2489 navíc	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,69 kg	1,00 kg
Celkový Stachment 2489	2,00 kg	2,00 kg	2,00 kg	2,69 kg	3,00 kg
Voda navíc	-4 kg	-5 kg	14 kg	4 kg	12 kg
Celková voda	186 kg	138 kg	109 kg	52 kg	12 kg
Kalová voda navíc	0 kg	0 kg	0 kg	48 kg	46 kg
Celková kalová voda	0 kg	48 kg	95 kg	191 kg	236 kg
Výsledný vodní součinitel	0,56	0,56	0,62	0,74	0,75

C4	C4_0	C4_25	C4_50	C4_75	C4_100
Stacheplast navíc	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg
Celkový Stacheplast	1,00 kg	1,00 kg	1,00 kg	1,00 kg	1,00 kg
Stachment 2489 navíc	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,14 kg	0,00 kg
Celkový Stachment 2489	2,00 kg	2,00 kg	2,00 kg	2,14 kg	2,00 kg
Voda navíc	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg
Celková voda	190 kg	143 kg	95 kg	48 kg	0 kg
Kalová voda navíc	0 kg	0 kg	34 kg	46 kg	82 kg
Celková kalová voda	0 kg	48 kg	129 kg	189 kg	272 kg
Výsledný vodní součinitel	0,58	0,58	0,68	0,72	0,82

2.8 POUŽITÉ MATERIÁLY

V této podkapitole budou popsány materiály použité pro výrobu zkoumaných vzorků – jmenovitě cement, kamenivo, voda, kalová voda a plastifikační přísady

2.8.1 CEMENT

Pro přípravu receptury s označením C1 byl použit cement CEM II/A-LL 42,5 R z Cementu Hranice a. s, která je českou dceřinou společností cementářského koncernu Dyckerhoff/Buzzi.

Tab. 4 Vybrané vlastnosti cementu C1 dle technického listu [66]

CEM II/A-LL 42,5 R		
Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	80–94 %
Vápenec LL		6–22 %
Doplňující složka		0–5 %
Chemické vlastnosti		
Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka
Obsah SO ₃ [%]	2,60 %	EN 197–1
Obsah Cl [%]	0,08 %	EN 197–1
Počátek tuhnutí	171 minut	EN 197–1
Normalizovaná pevnost (28 dnů)	57,0 MPa	EN 197–1
Objemová stálost	1,0 mm	EN 197–1

Pro přípravu receptury s označením C2 byl použit cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N z Cementu Hranice a. s, která je českou dceřinou společností cementářského koncernu Dyckerhoff/Buzzi.

Tab. 5 Vybrané vlastnosti cementu C2 dle technického listu [67]

CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N		
Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	65–79 %
Vápenec LL a vysokopecní struska		21–35 %
Doplňující složka		0–5 %
Chemické vlastnosti		
Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka
Obsah SO ₃ [%]	2,50 %	EN 197–1
Obsah Cl [%]	0,08 %	EN 197–1
Počátek tuhnutí	181 minut	EN 197–1
Normalizovaná pevnost (28 dnů)	51,4 MPa	EN 197–1
Objemová stálost	1,0 mm	EN 197–1

Pro přípravu receptury s označením C3 byl použit cement CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N z Cementu Hranice a. s, která je českou dceřinou společností cementářského koncernu Dyckerhoff/Buzzi.

Tab. 6 Vybrané vlastnosti cementu C3 dle technického listu [68]

CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N		
Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	50–64 %
Vápenec LL a vysokopecní struska		36–50 %
Doplňující složka		0–5 %
Chemické vlastnosti		
Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka
Obsah SO ₃ [%]	2,60 %	EN 197–1
Obsah Cl [%]	0,07 %	EN 197–1
Počátek tuhnutí	179 minut	EN 197–1
Normalizovaná pevnost (28 dnů)	52,6 MPa	EN 197–1
Objemová stálost	0,9 mm	EN 197–1

Pro přípravu receptury s označením C4 byl použit cement CEM III/A 42,5 N z Cementu Hranice a. s, která je českou dceřinou společností cementářského koncernu Dyckerhoff/Buzzi.

Tab. 7 Vybrané vlastnosti cementu C4 dle technického listu [69]

CEM III/A 42,5 N		
Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	35–64 %
Vysokopevní struska		36–65 %
Doplňující složka		0–5 %
Chemické vlastnosti		
Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka
Obsah SO ₃ [%]	2,70 %	EN 197–1
Obsah Cl [%]	0,08 %	EN 197–1
Počátek tuhnutí	190 minut	EN 197–1
Normalizovaná pevnost (28 dnů)	55,9 MPa	EN 197–1
Objemová stálost	0,9 mm	EN 197–1

2.8.2 KAMENIVO

Pro přípravu betonu bylo použito kamenivo:

DTK 0/4 mm Hrušovany

HDK 4/8 mm Luleč

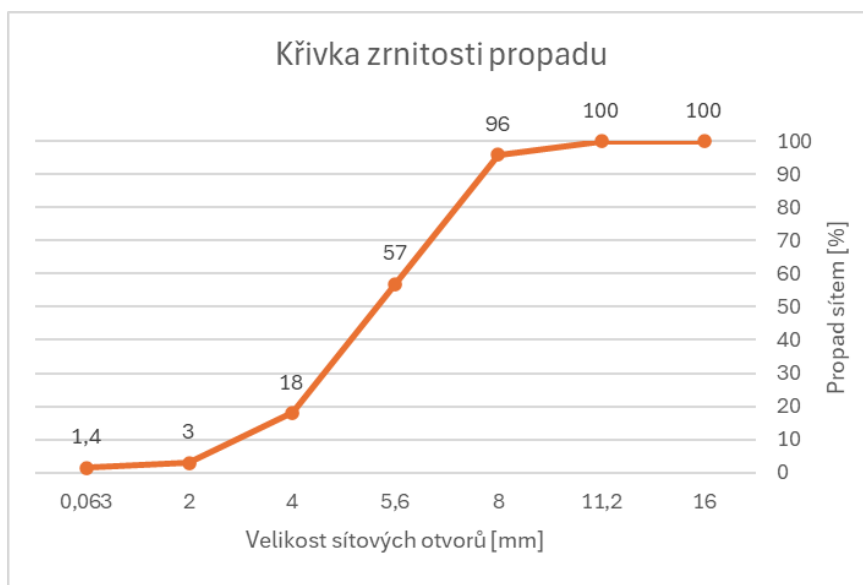
HDK 8/16 mm Luleč

Společnost Heidelberg Materials CZ, a. s. dle prohlášení o shodě splňuje požadavky dle EN 12620: 2002 +A1:2008 Kamenivo do betonu.

Společnost ČESKÉ ŠTĚRKOPÍSKY SPOL. s. r. o. dle prohlášení o shodě splňuje požadavky dle EN 12620 + A1 Kamenivo do betonu.

Tab. 8 Vybrané vlastnosti kameniva frakce 0/4 Hrušovany u Brna dle ročních zkoušek [56]

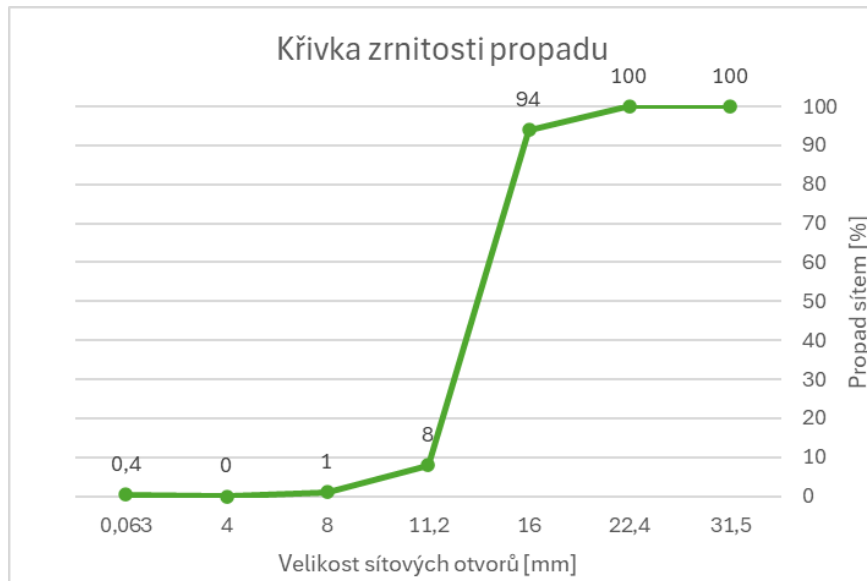
Přírodní těžené kamenivo frakce 0/4 Hrušovany u Brna		
Vlastnosti		
Základní charakteristiky	Vlastnost	Metoda / poznámka
Objemová hmotnost ρ_{rd}	2,580 Mg/m ³	ČSN EN 1097-6
Nasákavost WA_{24}	1,1 % hm.	ČSN EN 1097-6
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	1,520 Mg/m ³	ČSN EN 1097-3
Mezerovitost volně sypaná	42,0	ČSN EN 1097-3



Obr. 12 Křivka zrnitosti propadu kameniva frakce 0/4 mm Hrušovany [56]

Tab. 9 Vybrané vlastnosti kameniva frakce 4/8 Luleč dle zkoušky typu [57]

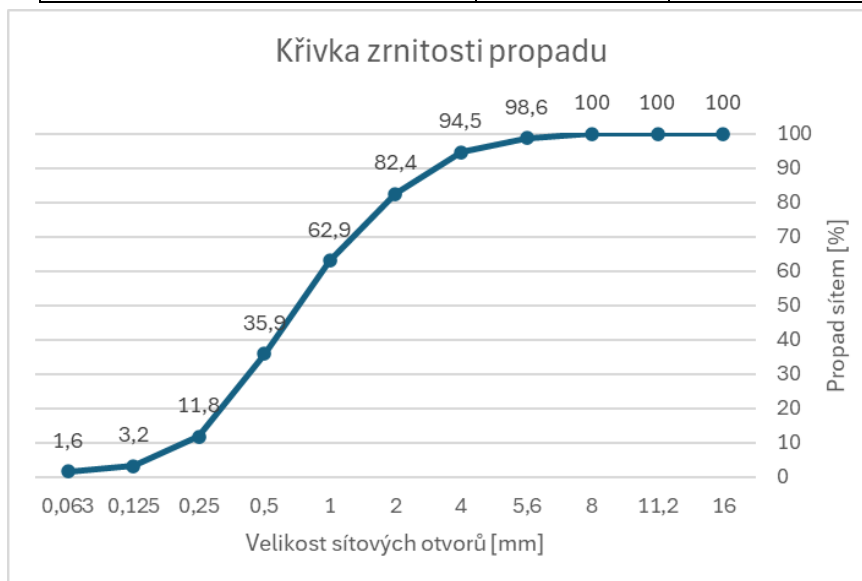
Přírodní drcené kamenivo frakce 4/8 Luleč		
Vlastnosti		
Základní charakteristiky	Vlastnost	Metoda / poznámka
Objemová hmotnost ρ_{rd}	2,690 Mg/m ³	ČSN EN 1097-6
Nasákavost WA_{24}	0,8 % hm.	ČSN EN 1097-6
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	1,290 Mg/m ³	ČSN EN 1097-3
Mezerovitost volně sypaná	51,0	ČSN EN 1097-3



Obr. 13 Křivka zrnitosti propadu kameniva frakce 4/8 mm Luleč [57]

Tab. 10 Vybrané vlastnosti kameniva frakce 8/16 Luleč dle zkoušky typu [58]

Přírodní drcené kamenivo frakce 8/16 Luleč		
Vlastnosti		
Základní charakteristiky	Vlastnost	Metoda/ poznámka
Objemová hmotnost ρ_{rd}	2,710 Mg/m ³	ČSN EN 1097-6
Nasákavost WA_{24}	0,8 % hm.	ČSN EN 1097-6
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	1,320 Mg/m ³	ČSN EN 1097-3
Mezerovitost volně sypaná	50,0	ČSN EN 1097-3



Obr. 14 Křivka zrnitosti propadu kameniva frakce 8/16 mm Luleč [56]

2.8.3 KALOVÁ VODA

Použitá kalová voda byla odebrána 22. září 2025 přímo z kalové nádrže na betonárně firmy ZAPA beton a. s. na pobočce v Holubicích.

2.8.4 VODA

Pro výrobu betonu byla použita voda z vodovodního řadu Brněnských vodáren a kanalizací.

2.8.5 PŘÍŠADY

STACHEPLAST

Plastifikační přísada na bázi lignosulfonátů.

Tab. 11 Vybrané vlastnosti STACHEPLASTU z technického listu [59]

STACHEPLAST	
Vlastnosti	
Základní charakteristiky	Vlastnost
Barva	tmavohnědá
Hustota [kg/m ³]	1170
Obsah sušiny [%]	34-38
pH	8-11,5
Vodou rozpustné chloridy [% hm.]	0,1
Obsah alkálií [ekv. Na ₂ O %]	8

STACHEMENT 2489

Superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů.

Tab. 12 Vybrané vlastnosti STACHEMENTU 2489 z technického listu [60]

STACHEMENT 2489	
Vlastnosti	
Základní charakteristiky	Vlastnost
Barva	červenohnědá
Hustota [kg/m ³]	1055
Obsah sušiny [%]	25
pH	5-7
Vodou rozpustné chloridy [% hm.]	0,1
Obsah alkálií [ekv. Na ₂ O %]	1,5

3 VÝSLEDKY, HODNOCENÍ A DISKUSE

V této kapitole bude provedeno vyhodnocení dosažených výsledků a jejich komentář s vysvětlením zjištěných závislostí a souvislostí vyplývajících z experimentální části práce. Nejprve jsou hodnoceny vlastnosti kalové vody z recyklace čerstvého betonu, a to z hlediska jejího mineralogického složení, chemického rozboru a časového vývoje vybraných fyzikálně-chemických parametrů. Následovat bude vyhodnocení vlastností čerstvého betonu, zejména konzistence, obsahu vzduchu a teploty. Závěrečná část kapitoly se zabývá hodnocením vlastností ztvrdlého betonu, konkrétně smrštění betonu, hloubkou průsaku tlakovou vodou, objemovou hmotností ztvrdlého betonu a pevností betonu v tlaku.

3.1 VYHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ KALOVÉ VODY

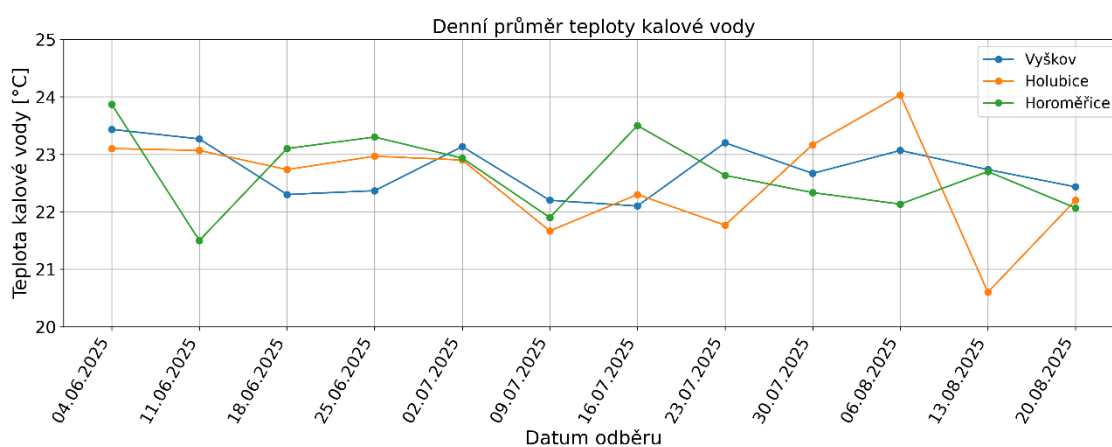
V této podkapitole jsou prezentovány a vyhodnoceny základní vlastnosti kalové vody získané z recyklace čerstvého betonu. Hodnocení zahrnuje teplotu, mineralogické složení, chemické charakteristiky a změny vybraných fyzikálně-chemických parametrů v čase, což umožňuje posoudit její vhodnost pro použití v konstrukčních betonech.

3.1.1 TEPLOTA KALOVÉ VODY V ČASE

Tab. 13 Výsledky teploty kalové vody na zkoumaných betonárnách v čase

		Holubice	Horoměřice	Vyškov
Celkové	Počet dní měření	36	36	36
	Průměrná teplota [°C]	22,5	22,7	22,7
	Směr. Odchylka teploty	2,04	2,31	2,19
	Minimální teplota [° C]	19,2	17,6	19,0
	Maximální teplota [°C]	26,3	26,4	27,6

ráno	Průměrná teplota [°C]	20,7	20,1	20,4
	Minimální teplota [° C]	19,2	17,6	19,0
	Maximální teplota [°C]	22,2	23,2	21,6
dopoledne	Průměrná teplota [°C]	24,6	24,6	25,2
	Minimální teplota [° C]	21,4	22,6	24,2
	Maximální teplota [°C]	26,3	26,4	27,6
odpoledne	Průměrná teplota [°C]	22,4	23,3	22,6
	Minimální teplota [° C]	20,2	21,1	21,0
	Maximální teplota [°C]	24,4	25,8	23,7



Obr. 15 Grafické znázornění průměrných teplot kalové vody v čase

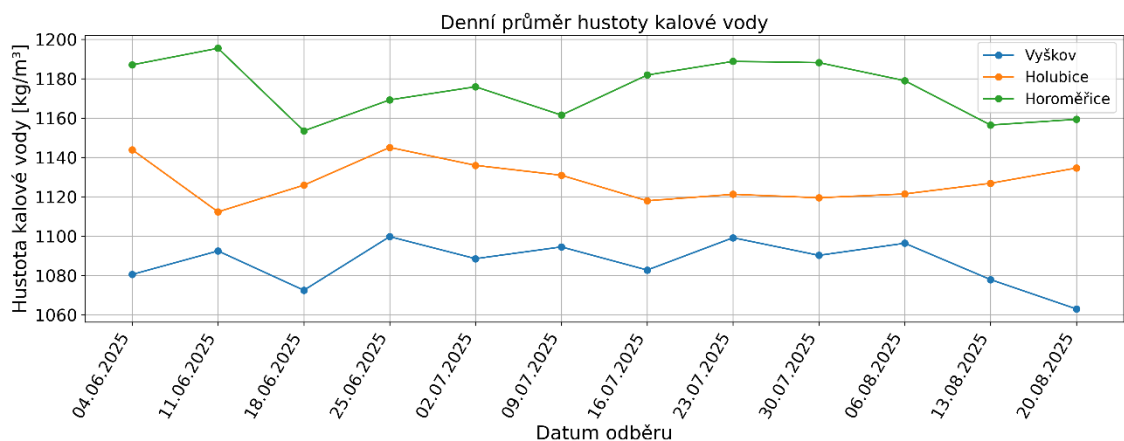
Teplota kalové vody kolísala v rozmezí 19–27,6 °C, průměrně 22,5 °C v Holubicích a 22,7 °C v Horoměřicích i ve Vyškově. Ranní odběry měly teplotu kolem 20 °C, dopolední odběry dosahovaly maxima kolem 25 °C a odpolední hodnoty klesaly na 22–23 °C.

Vizuální charakteristiky vody korespondovaly s teplotou: chladnější ranní voda byla světlejší, zatímco teplejší dopolední vzorky byly tmavší a s patrnými sedimenty, patrně zde docházelo k vyššímu odparu. Mezi lokalitami nebyly výrazné rozdíly, všechny tři betonárny vykazovaly obdobný teplotní režim, odpovídající běžným denním kolísáním a vlivu provozního prostředí.

3.1.2 HUSTOTA KALOVÉ VODY V ČASE

Tab. 14 Výsledky hustoty kalové vody na zkoumaných betonárnách v čase

		Holubice	Horoměřice	Vyškov
celkové	Počet dní měření	36	36	36
	Průměrná hustota kal. vody [kg/m³]	1128	1175	1086
	Směr. odchylka hustoty kal. vody	19,38	20,73	16,09
	Minimální hustota kal. vody [kg/m ³]	1100	1114	1060
	Maximální hustota kal. vody [kg/m ³]	1178	1202	1119
ráno	Průměrná hustota kal. vody [kg/m³]	1124	1169	1087
	Minimální hustota kal. vody [kg/m ³]	1100	1114	1060
	Maximální hustota kal. vody [kg/m ³]	1157	1202	1115
dopoledne	Průměrná hustota kal. vody [kg/m³]	1131	1179	1088
	Minimální hustota kal. vody [kg/m ³]	1100	1151	1065
	Maximální hustota kal. vody [kg/m ³]	1165	1202	1119
odpoledne	Průměrná hustota kal. vody [kg/m³]	1129	1176	1084
	Minimální hustota kal. vody [kg/m ³]	1100	1132	1061
	Maximální hustota kal. vody [kg/m ³]	1178	1202	1106



Obr. 16 Grafické znázornění průměrných hustoty kalové vody v čase

Hustota kalové vody na všech třech zkoumaných betonárnách vykazovala během sledovaného období určité kolísání, přičemž průměrná hodnota byla nejvyšší v betonárně Horoměřice 1175 kg/m^3 , střední v Holubicích 1128 kg/m^3 a nejnižší ve Vyškově 1086 kg/m^3 . Měření v Horoměřicích bylo prováděno pomocí sondy OLAS, zatímco v Holubicích a ve Vyškově byla hustota stanovena metodou v odměrném válci. Přestože hodnoty z OLAS mohou mírně odlišovat od odměrného válce, trend kolísání a vzájemné porovnání jsou relevantní.

V Holubicích byla kalová voda převážně tmavě až světle šedá a občasnými sedimenty. Hustota vykazovala ráno průměrně 1124 kg/m^3 , dopoledne 1131 kg/m^3 a odpoledne 1129 kg/m^3 , přičemž maximum bylo zaznamenáno odpoledne 25. června s hustotou 1178 kg/m^3 . Ve srovnání s Holubicemi byla voda v Horoměřicích tmavě šedá až šedá se silnějšími sedimenty, s průměrnou hustotou dopoledne 1179 kg/m^3 . Ve Vyškově byla kalová voda převážně s menším množstvím sedimentů, a průměrná hustota se zde pohybovala kolem 1086 kg/m^3 .

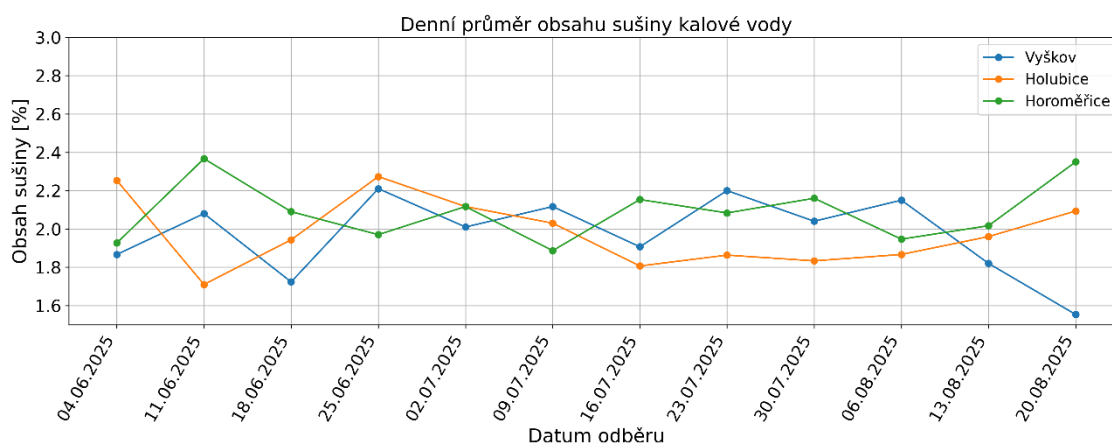
Růst hustoty kalové vody během dne a její maxima korespondují s obvyklým provozem betonáren, kdy se během ranních a dopoledních směn zvyšuje koncentrace pevných částic v odpadní vodě v důsledku míchání a výroby čerstvého betonu.

Dne 22. září 2025 byl odebrán reprezentativní vzorek kalové vody, který byl použit při míchání receptur z kalové nádrže na betonárně v Holubicích. Hustota kalové vody odebrané po rozmíchání kalu byla stanovena pomocí odměrného válce o objemu 2 l. Obsah byl ponechán, aby kal sedimentoval a bylo snazší odečíst hodnotu objemu. Po sedimentaci kalu byla odečtena hodnota $V=1980 \text{ ml}$. Z hmotnosti nádoby s kalovou vodou po odečtení nádoby byla stanovena hmotnost kalové vody $m_s= 2,2344 \text{ kg}$. Z toho byla stanovena hustota kalové vody 1129 kg/m^3 .

3.1.3 OBSAH SUŠINY KALOVÉ VODY V ČASE

Tab. 15 Výsledky obsahu sušiny kalové vody na zkoumaných betonárnách v čase

		Holubice	Horoměřice	Vyškov
Cellkove	Počet dní měření	36	36	36
	Průměrný obsah sušiny [%]	2,0	2,1	2,0
	Směr. Odchylka obsahu sušiny	0,33	0,27	0,29
	Minimální obsah sušiny [%]	1,5	1,5	1,5
	Maximální obsah sušiny [%]	2,8	2,6	2,6
ráno	Průměrný obsah sušiny [%]	1,9	2,1	2,0
	Minimální obsah sušiny [%]	1,5	1,8	1,5
	Maximální obsah sušiny [%]	2,5	2,5	2,5
dopoledne	Průměrný obsah sušiny [%]	2,0	2,1	2,0
	Minimální obsah sušiny [%]	1,5	1,5	1,6
	Maximální obsah sušiny [%]	2,6	2,6	2,6
odpoledne	Průměrný obsah sušiny [%]	2	2	1,9
	Minimální obsah sušiny [%]	1,5	1,6	1,5
	Maximální obsah sušiny [%]	2,8	2,4	2,3



Obr. 17 Grafické znázornění průměrných obsahu sušiny kalové vody v čase

Obsah sušiny kalové vody se pohyboval průměrně kolem 2 % ve všech třech sledovaných lokalitách, s minimem 1,5 % a maximem 2,8 % v Holubicích, 2,6 % v Horoměřicích i ve Vyškově. Ranní hodnoty byly obecně nižší a během dopoledne a odpoledne docházelo k mírnému nárůstu, odpovídajícímu zahušťování a sedimentaci kalu.

V Holubicích byla kalová voda světle až tmavě šedá, s lehkými až silnějšími sedimenty, což odpovídá průměrnému obsahu sušiny 2,0 %. V Horoměřicích byla

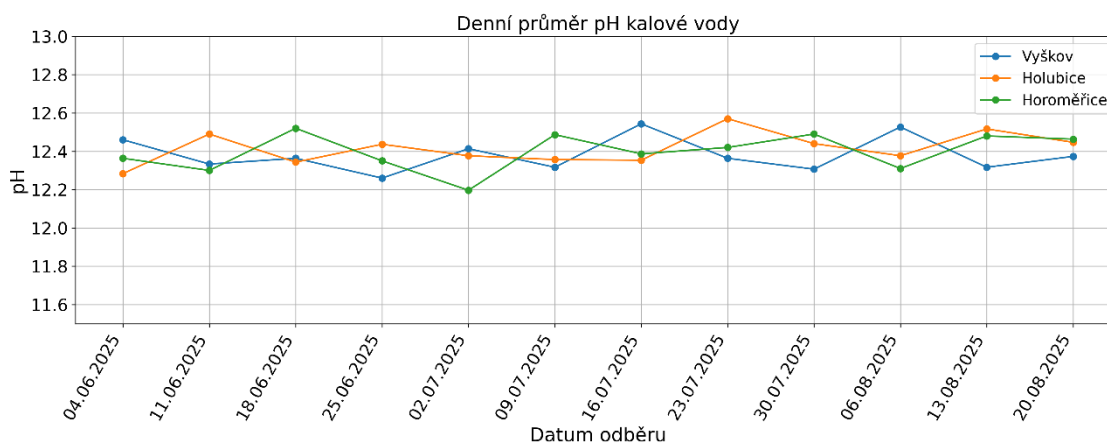
voda tmavě šedá s výraznějšími sedimenty, s průměrnou hodnotou 2,1 %. Ve Vyškově byla kalová voda řidší, světle až tmavě šedá, s menší sedimentací, obsah sušiny byl průměrně 2,0 %.

Nárůst obsahu sušiny během dne koresponduje s obvyklým provozem na betonárnách – vyšší koncentrace pevných částic odráží intenzitu výroby čerstvého betonu a postupnou sedimentaci.

3.1.4 PH KALOVÉ VODY V ČASE

Tab. 16 Výsledky pH kalové vody na zkoumaných betonárnách v čase

		Holubice	Horoměřice	Vyškov
Cellkové	Počet dní měření	36	36	36
	Průměrné pH [-]	12,42	12,40	12,38
	Směr. odchylka pH	0,136	0,126	0,144
	Minimální pH [-]	12,12	12,15	11,92
	Maximální pH [-]	12,76	12,67	12,63
ráno	Průměrné pH [-]	12,44	12,39	12,36
	Minimální pH [-]	12,17	12,18	12,17
	Maximální pH [-]	12,60	12,51	12,52
dopoledne	Průměrné pH [-]	12,41	12,39	12,36
	Minimální pH [-]	12,12	12,15	11,92
	Maximální pH [-]	12,76	12,60	12,63
odpoledne	Průměrné pH [-]	12,40	12,42	12,43
	Minimální pH [-]	12,26	12,24	12,27
	Maximální pH [-]	12,61	12,67	12,63



Obr. 18 Grafické znázornění průměrných objemových hmotností kalové vody v čase

pH kalové vody bylo relativně stabilní na všech lokalitách, s celkovými průměry pH=12,42 v Holubicích, pH=12,40 v Horoměřicích a pH=12,38 ve Vyškově, což odpovídá silně alkalickému prostředí typickému pro kalovou vodu. Denní variace pH byly spíše malé, bez výrazného trendu mezi ranními, dopoledními a odpoledními odběry.

Mezi jednotlivými lokalitami nejsou výrazné rozdíly, všechny tři betonárny vykazují stabilní alkalické prostředí s mírnými fluktuacemi souvisejícími spíše s lokálními provozními podmínkami než s kvalitou kalové vody.

3.1.5 CHEMICKÝ ROZBOR

Tab. 17 Výsledky chemického rozboru vzorku po vyžhání na 400 °C

Sloučenina	Hodnota	Jednotka
CaO	35,319	%
SiO ₂	22,529	%
Al ₂ O ₃	6,244	%
MgO	3,163	%
Fe ₂ O ₃	2,509	%
SO ₃	1,942	%
K ₂ O	0,415	%
TiO ₂	0,297	%
Na ₂ O	0,257	%
MnO	0,188	%
P ₂ O ₅	0,153	%
Cl	525,1	ppm
ZŽ	26,769	%

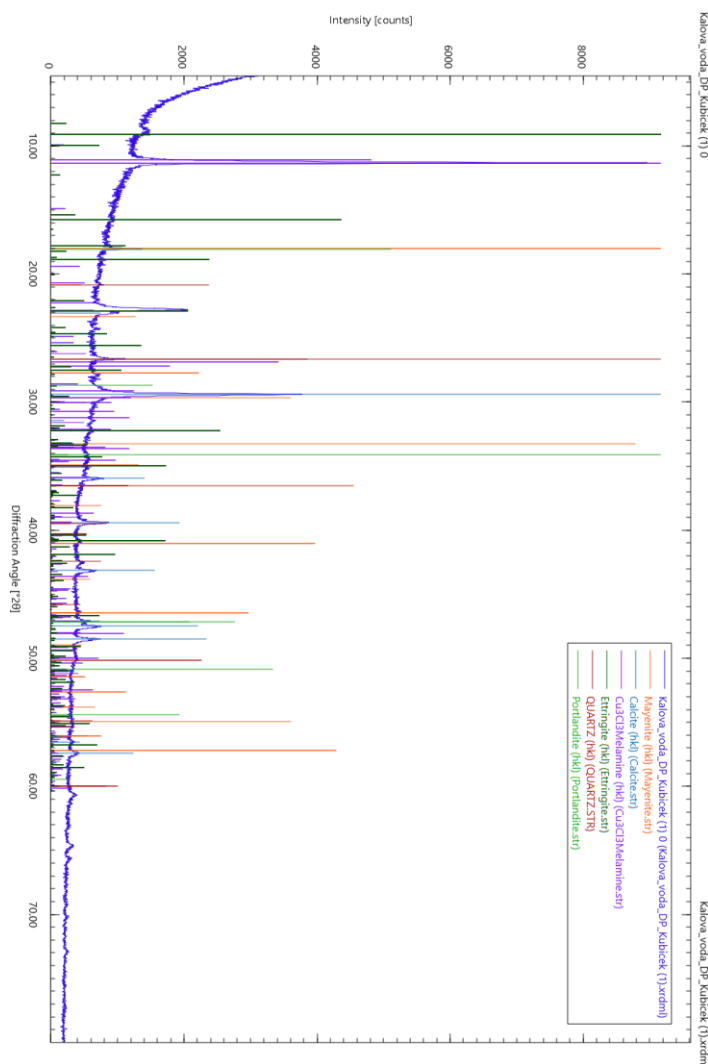
Chemický rozbor kalové vody ukázal nejvyšší obsah CaO, což odpovídá použitým cementům v betonárně Holubice (CEM II/A-LL 42,5 R, CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N, CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N a CEM III/A 42,5 N) s vysokým podílem vápence. SiO₂ a Al₂O₃ podporují výskyt hydraulických fází (C-S-H, ettringit). Přítomnost SiO₂ může pocházet i z jemných zrn kameniva. Množství MgO je pod kritickou hodnotou pro nežádoucí expanze. Ostatní složky, včetně chloridů (525,1 ppm), jsou v nízkých koncentracích. Chemické složení naznačuje, že kalová voda je vhodná pro částečnou náhradu pitné vody v čerstvých betonových směsích bez negativního vlivu na hydraulické vlastnosti betonu.

3.1.6 XRD

Na základě XRD analýzy byly ve zkoumaném vzorku identifikovány minerály: kalcit, melamin, ettringit, mayenit, β -křemen a portlandit. Výskyt kalcitu, portlanditu, ettringitu a mayenitu je v souladu s výsledky chemického rozboru, přičemž zejména kalcit obsahuje vysoký podíl CaO. β -křemen je pravděpodobně přítomen díky jemným podílům kameniva, což je typické pro betonové směsi. Zajímavým nálezem je melamin, který se běžně používá jako složka plastifikátorů.

Při vyhodnocení byly sledovány i jílové minerály; jejich výskyt však nebyl potvrzen XRD záznamy, což naznačuje, že jejich přítomnost v analyzovaném vzorku je buď pod detekčním limitem metody, nebo vázaná v amorfnní formě.

Celkově výsledky XRD potvrzují přítomnost hlavních minerálů typických pro čerstvý a ztvrdlý beton a zároveň dokládají vliv přidaných aditiv, jako jsou plastifikátory, na minerální složení směsi.



Obr. 19 Vyhodnocení XRD záznamu

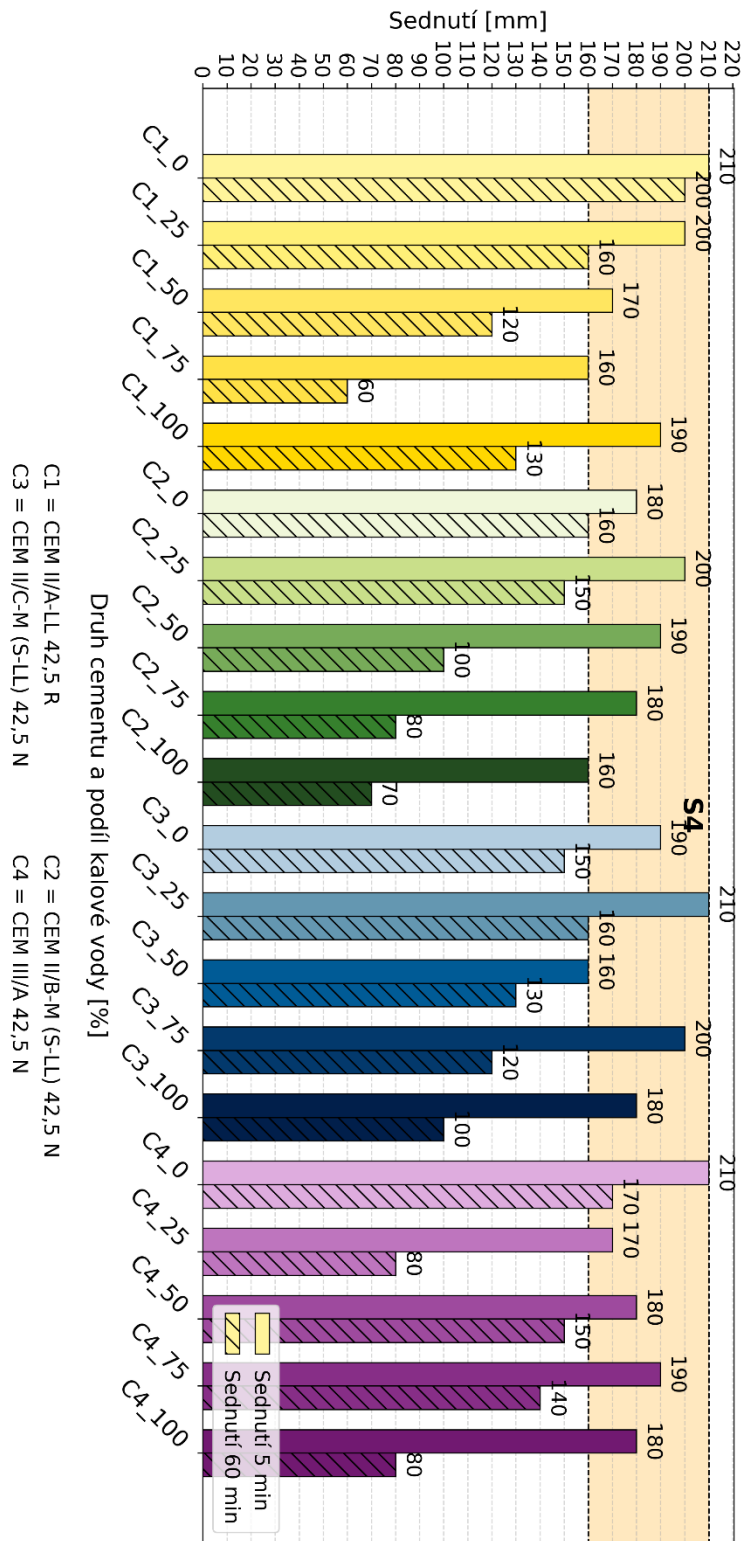
3.2 VYHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ ČERSTVÉHO BETONU

V této podkapitole jsou vyhodnoceny vlastnosti čerstvého betonu připraveného s využitím kalové vody. Zkoumána byla konzistence, obsah vzduchu a teplotu betonu v čerstvém stavu

3.2.1 VYHODNOCENÍ KONZISTENCE V ČERSTVÉM STAVU

Tab. 18 Výsledky dat zkoušky sednutí kužele jednotlivých receptur

Záměs	Sednutí 5 min [mm]	Sednutí 60 min [mm]
C1_0	210	200
C1_25	200	160
C1_50	170	120
C1_75	160	60
C1_100	190	130
C2_0	180	160
C2_25	200	150
C2_50	190	100
C2_75	180	80
C2_100	160	70
C3_0	190	150
C3_25	210	160
C3_50	160	130
C3_75	200	120
C3_100	180	100
C4_0	210	170
C4_25	170	80
C4_50	180	150
C4_75	190	140
C4_100	180	80



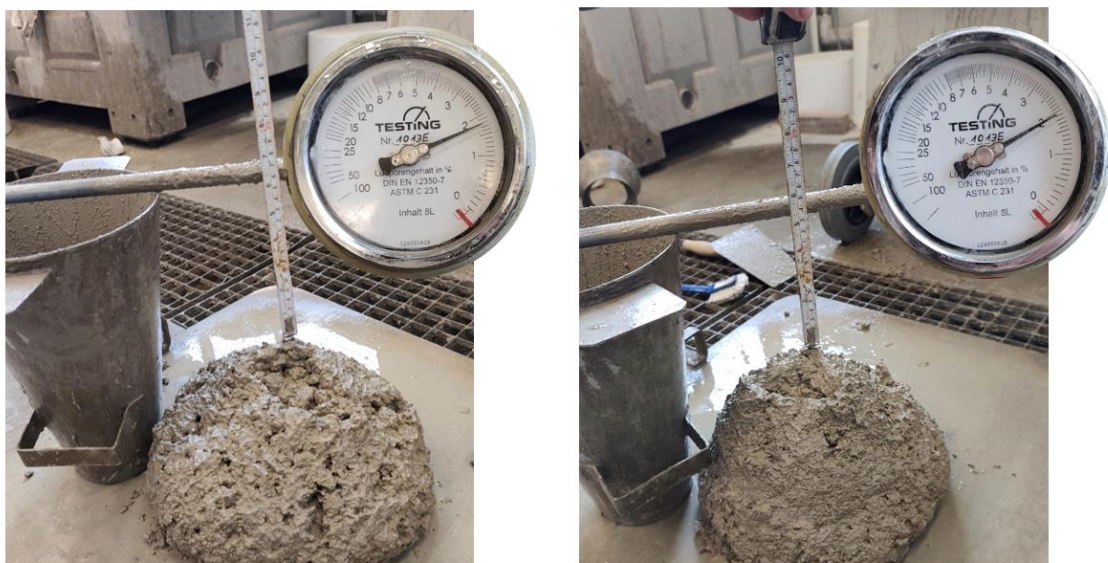
Obr. 20 Grafické znázornění výsledků zkoušky sednutí kužele jednotlivých receptur

V tomto konkrétním zadání byl požadavek na dodržení třídy konzistence S4, což se ve všech směsích podařilo dosáhnout při počátečním měření (5 minut po zamíchání). V průběhu času (60 minut od zamíchání) však došlo k poklesu konzistence, který nebylo možné přesně předpovědět. Třída konzistence byla zachována pouze u omezeného počtu směsí, zejména těch s nižším podílem kalové vody.

Obecně lze pozorovat, že s rostoucím podílem kalové vody dochází k výraznějšímu poklesu konzistence v čase. Tento jev lze vysvětlit vyšším obsahem jemných částic (cementový prach a drobné částice z kameniva), které jsou v kalové vodě obsaženy, a které ovlivňují tekutost směsi.

Dále bylo zaznamenáno, že směsi s vyšším podílem kalové vody vyžadovaly zvýšenou spotřebu plastifikátoru a někdy i korekce množství vody, aby byla dosažena požadovaná počáteční konzistence. Přesto však ani při nejvyšších podílech kalové vody nebyly zaznamenány projevy krvácení betonu, což svědčí o stabilitě směsi a vhodnosti kalové vody pro použití v konstrukčních betonech.

Z praktického hlediska výsledky naznačují, že při využití kalové vody je nezbytné průběžné sledování konzistence, zejména pokud směs obsahuje vyšší podíl kalové vody. Současně je vhodné přizpůsobit dávkování plastifikátoru a případně i podíl čerstvé vody tak, aby byla zachována požadovaná třída konzistence po stanovenou dobu zpracovatelnosti.



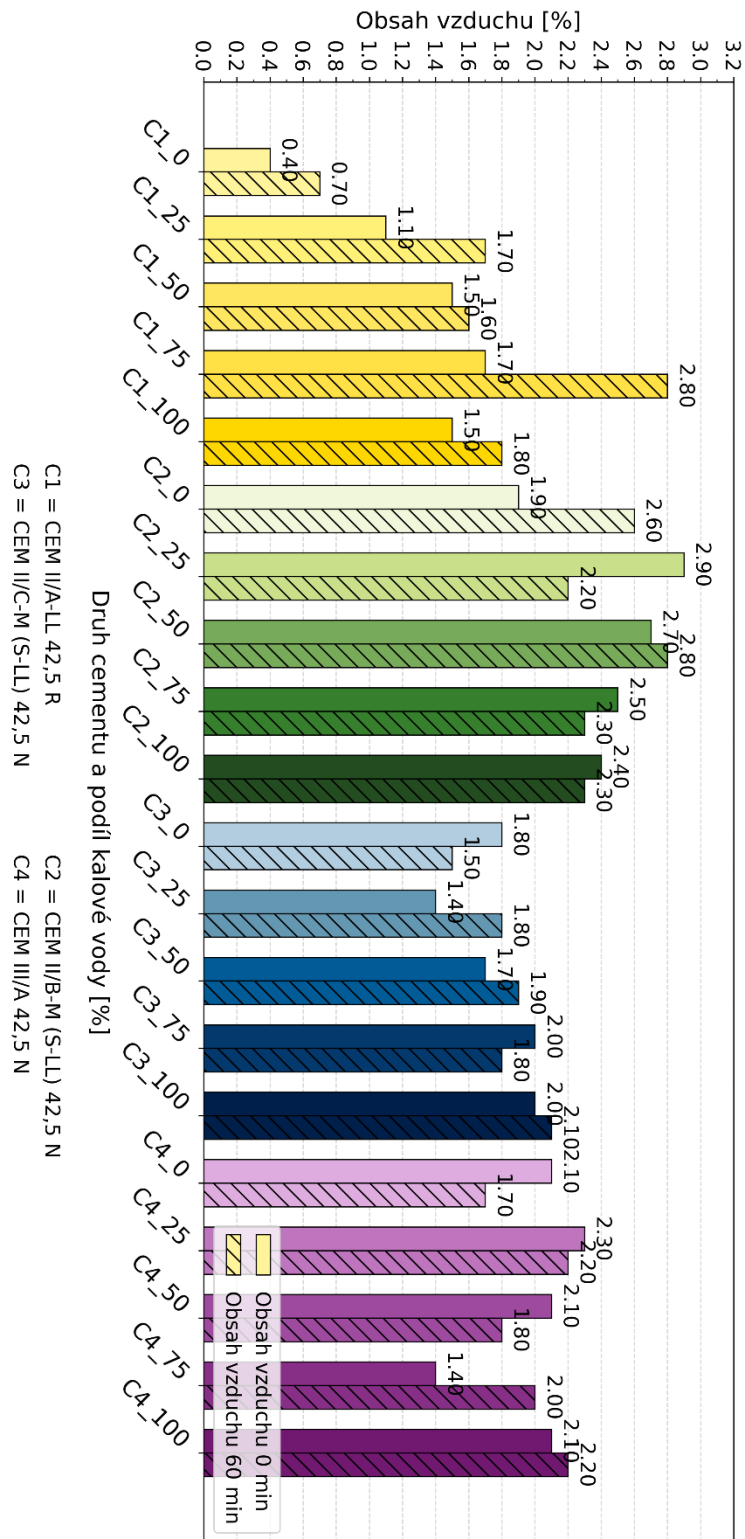
Obr. 21 Naměřené sednutí a obsahu vzduchu receptury C3_50

(vlevo čas 5 minut, vpravo 60 minut)

3.2.2 VYHODNOCENÍ OBSAHU VZDUCHU V ČERSTVÉM STAVU

Tab. 19 Výsledky dat stanovení obsahu vzduchu jednotlivých receptur

Záměs	Obsah vzduchu 5 min [%]	Obsah vzduchu 60 min [%]
C1_0	0,4	0,7
C1_25	1,1	1,7
C1_50	1,5	1,6
C1_75	1,7	2,8
C1_100	1,5	1,8
C2_0	1,9	2,6
C2_25	2,9	2,2
C2_50	2,7	2,8
C2_75	2,5	2,3
C2_100	2,4	2,3
C3_0	1,8	1,5
C3_25	1,4	1,8
C3_50	1,7	1,9
C3_75	2,0	1,8
C3_100	2,0	2,1
C4_0	2,1	1,7
C4_25	2,3	2,2
C4_50	2,1	1,8
C4_75	1,4	2,0
C4_100	2,1	2,2



Obr. 22 Grafické znázornění obsahu vzduchu v čerstvém betonu v čase 0 a 60 minut dle jednotlivých receptur

Stanovení obsahu vzduchu bylo provedeno normově. U betonu C1_0 jsou patrně velmi nízké hodnoty. Bylo by možné hovořit v tomto případě o přehutnění, ovšem pevnosti v tlaku tomu nenasvědčují.

Ve většině sledovaných směsí došlo k nárůstu obsahu vzduchu oproti referenčnímu betonu, přičemž hodnoty se pohybovaly od 1,1 do 2,9 % po 5 minutách a od 1,6 do 2,8 % po 60 minutách. Z výsledků však nelze vyvodit jednoznačný trend závislosti obsahu vzduchu na podílu kalové vody v záměsí.

U některých cementů a podílů kalové vody došlo ke zvýšení obsahu vzduchu po 60 minutách (např. C1_75), zatímco u jiných směsí byla hodnota prakticky stabilní nebo došlo k mírnému poklesu (např. C2_25). To naznačuje, že vliv kalové vody na obsah vzduchu je ovlivněn nejen jejím množstvím, ale také typem použitého cementu.

3.2.3 VYHODNOCENÍ TEPLoty BETONU

Tab. 20 Výsledky dat stanovení teploty betonových směsí jednotlivých receptur

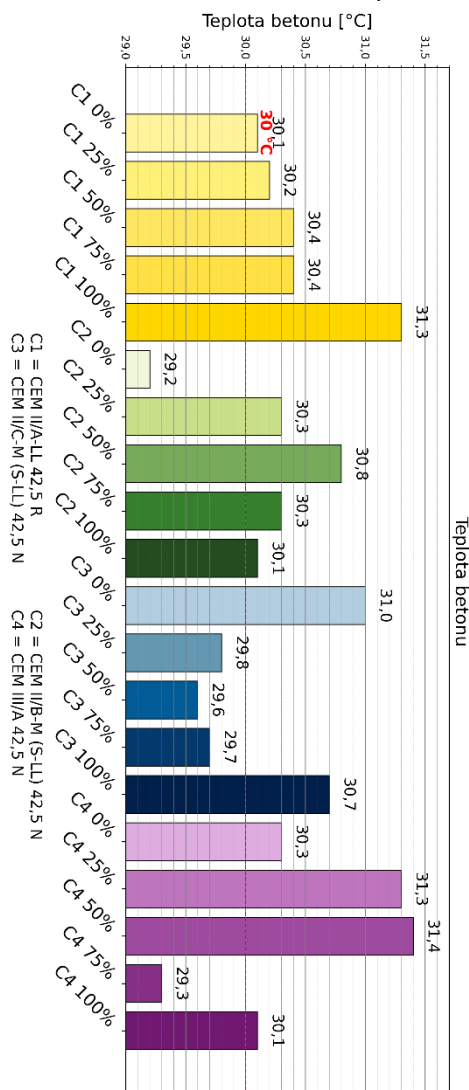
Záměs	Teplota [° C]
C1_0	30,1
C1_25	30,2
C1_50	30,4
C1_75	30,4
C1_100	31,3
C2_0	29,2
C2_25	30,3
C2_50	30,8
C2_75	30,3
C2_100	30,1
C3_0	31
C3_25	29,8
C3_50	29,6
C3_75	29,7
C3_100	30,7
C4_0	30,3
C4_25	31,3
C4_50	31,4
C4_75	29,3
C4_100	30,1

Měření teploty čerstvého betonu probíhalo přímo v laboratorní míchačce ihned po ukončení míchání digitálním teploměrem. Vyhodnocení naměřených hodnot ukazuje, že ve většině případů byla dodržena požadovaná referenční teplota

betonové směsi 30 °C. Z těchto směsí byl následně vyrobeny zkušební vzorky a provedeny požadované zkoušky v čerstvém stavu.

U jednotlivých záměsí byly zaznamenány mírné odchylky od této hodnoty. Nejvyšší teplota byla naměřena u záměsí C4_50 (31,4 °C), zatímco nejnižší teplota byla u záměsí C2_0 (29,2 °C). Maximální odchylka činila 1,4 °C, což lze vzhledem k rozmezí naměřených hodnot považovat za zanedbatelné a neovlivňuje zásadně porovnatelnost výsledků mezi jednotlivými záměsemi.

Trend teplot ukazuje, že mírný nárůst teploty byl pozorován u záměsí s vyšším podílem kalové vody u některých druhů cementu (např. C1), zatímco u jiných záměsí (např. C3) došlo k mírnému poklesu teploty při vyšším podílu kalové vody. Tyto rozdíly lze vysvětlit drobnými variacemi vlastností kalové vody a cementu, ale celkově teplota všech záměsí zůstává v rámci doporučeného rozsahu.

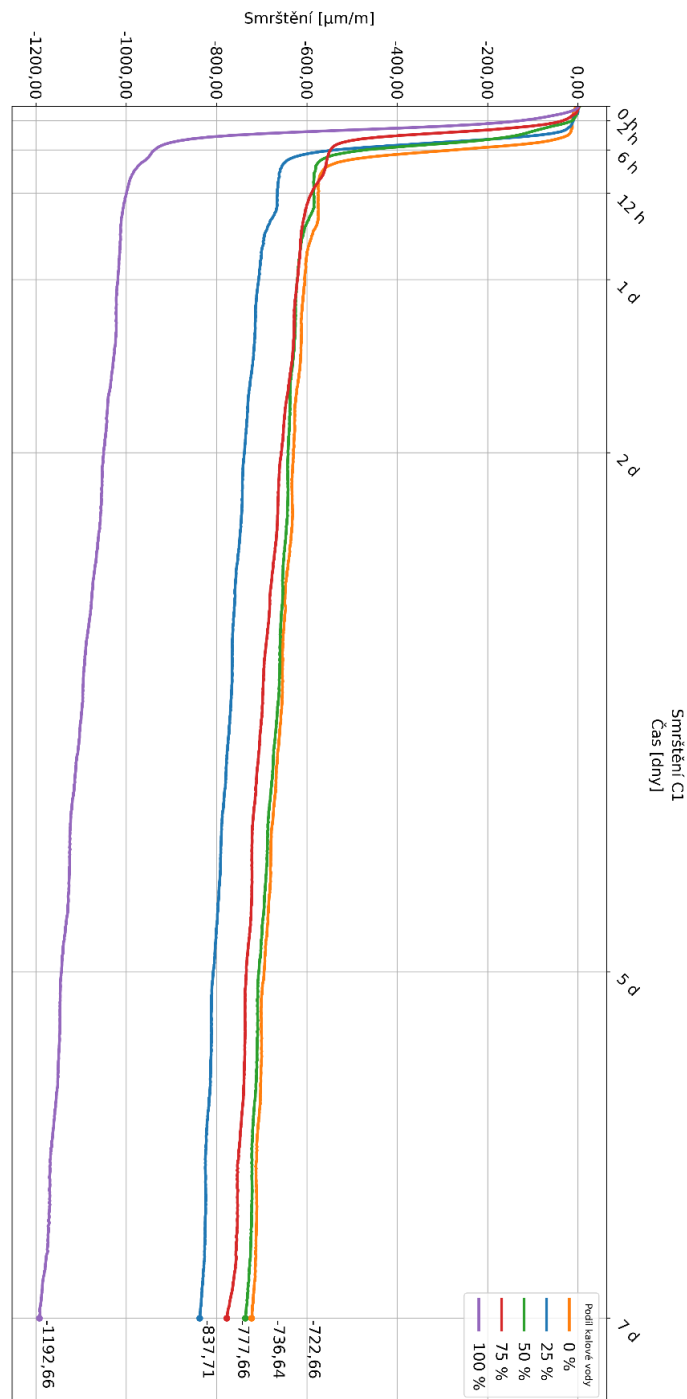


Obr. 23 Vyhodnocení teploty betonu

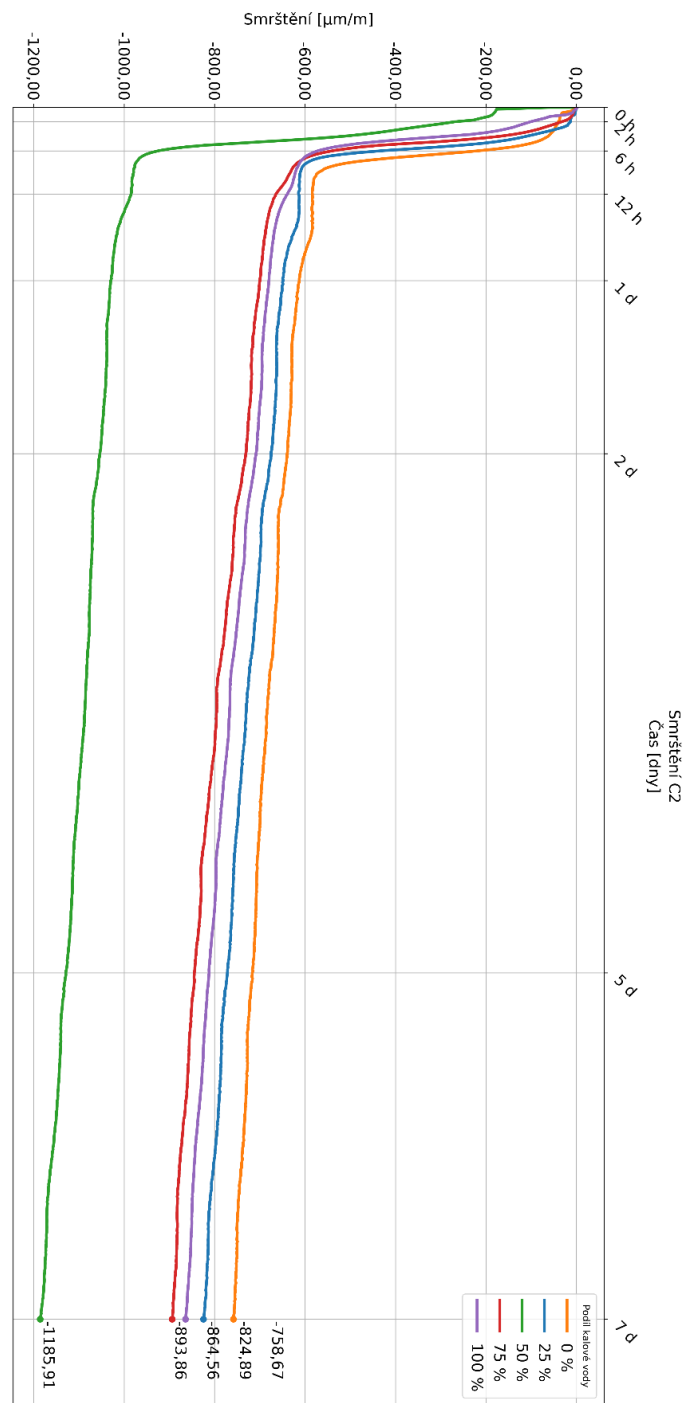
3.3 VYHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ ZTVRDLÉHO BETONU

V této podkapitole jsou hodnoceny zkoušky ztvrdlého betonu připraveného s využitím kalové vody. Bylo provedeno vyhodnocení objemových změn, odolnosti proti průsaku tlakové vody, objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku.

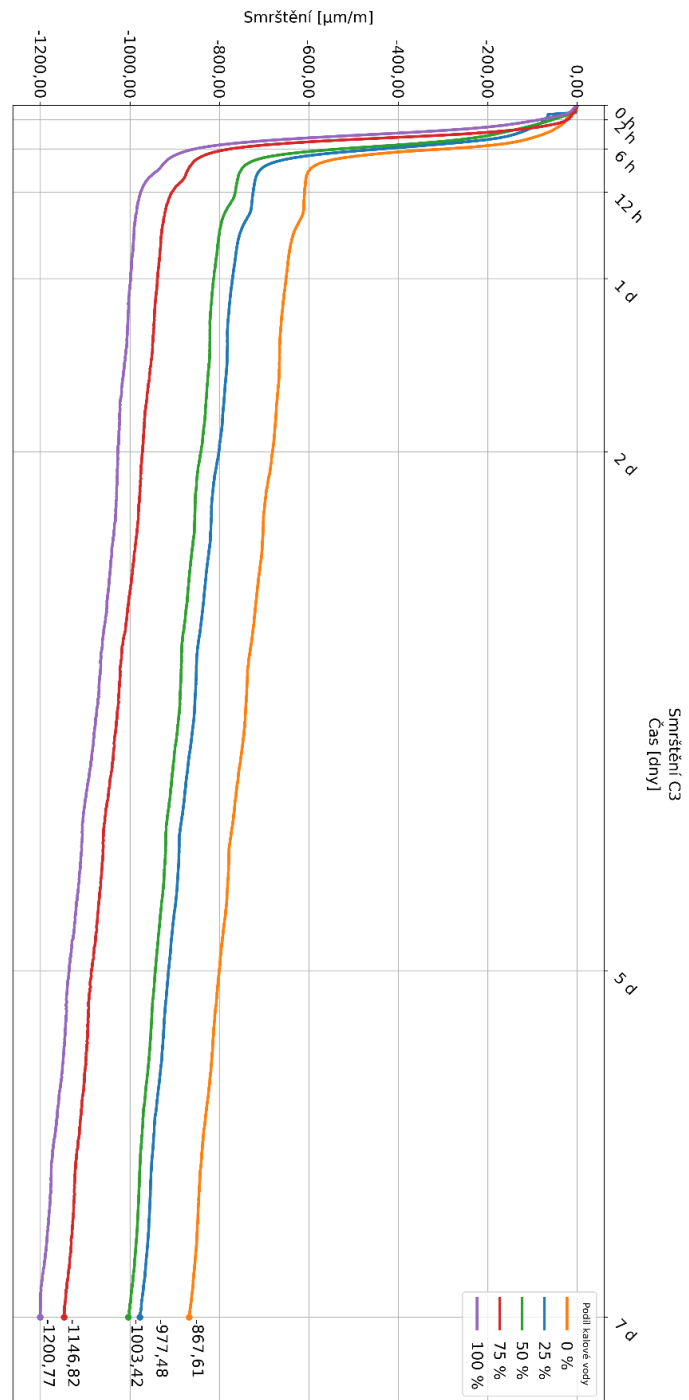
3.3.1 VYHODNOCENÍ SMRŠTĚNÍ BETONU



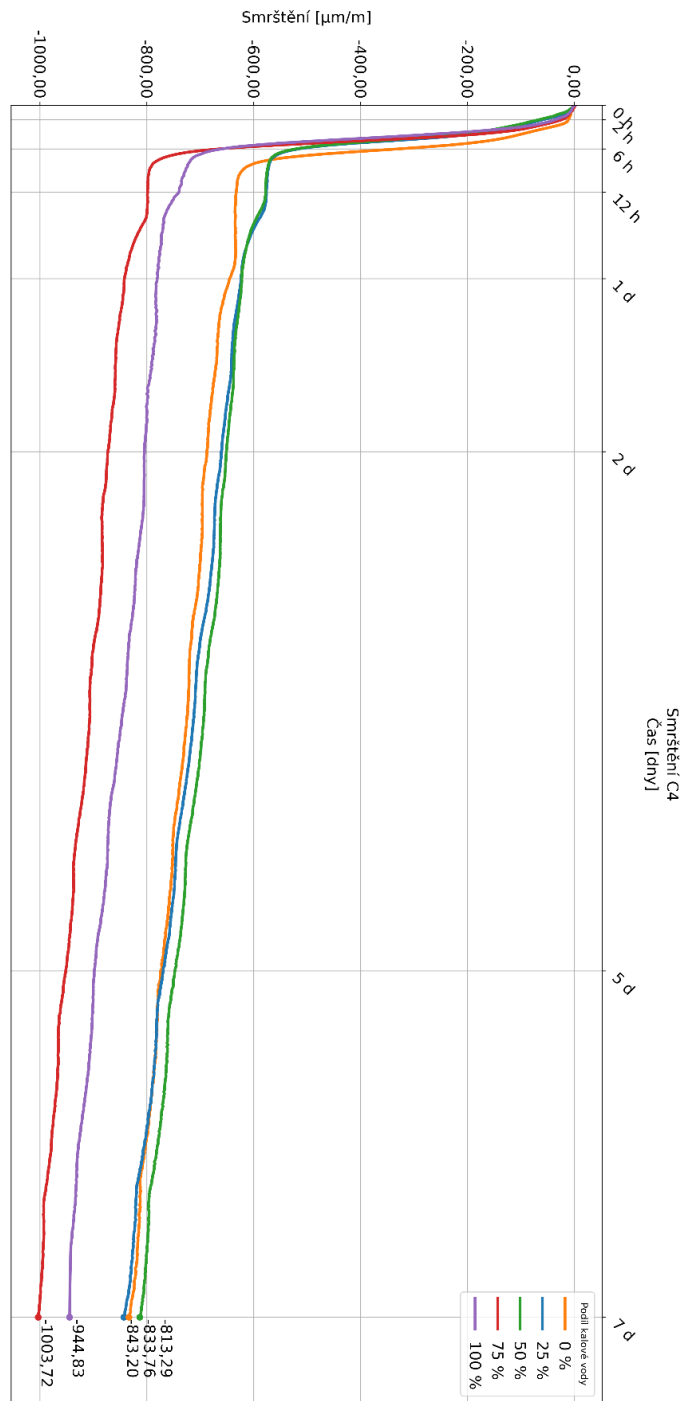
Obr. 24 Porovnání smrštění cementu C1 s různými podíly kalové vody



Obr. 25 Porovnání smrštění cementu C2 s různými podíly kalové vody



Obr. 26 Porovnání smrštění cementu C3 s různými podíly kalové vody



Obr. 27 Porovnání smrštění cementu C4 s různými podíly kalové vody

Vzhledem k rozsáhlému množství naměřených dat jsou v této práci uvedeny pouze grafické znázornění smršťovacích křivek jednotlivých záměsí pro každý druh použitého cementu. Snímač na měřícím žlabu odesílá hodnoty každých 15 minut, což při sledování po dobu 7 dní představuje celkem 672 jednotlivých měření pro každou křivku. Z praktických důvodů je v grafickém zobrazení uvedena pouze konečná hodnota smrštění, přičemž průběh jednotlivých bodů je možné přibližně odvodit z tvaru křivky. Navíc pro přehlednost nebyla dodržena stejná barevnost jako ve zbytku práce. Pro shodné podíly kalové vody byly v tomto případě použity stejné barvy, které však nekorespondují s podílem nahrazení kalové vody a typem cementu jako ve zbytku práce.

Pro každou recepturu byl použit samostatný měřící žlab, který byl ponechán v laboratorních podmínkách, aby byly minimalizovány vlivy vnějších faktorů, jako je teplota a vlhkost. Tímto způsobem byla zajištěna srovnatelnost výsledků mezi jednotlivými recepturami.

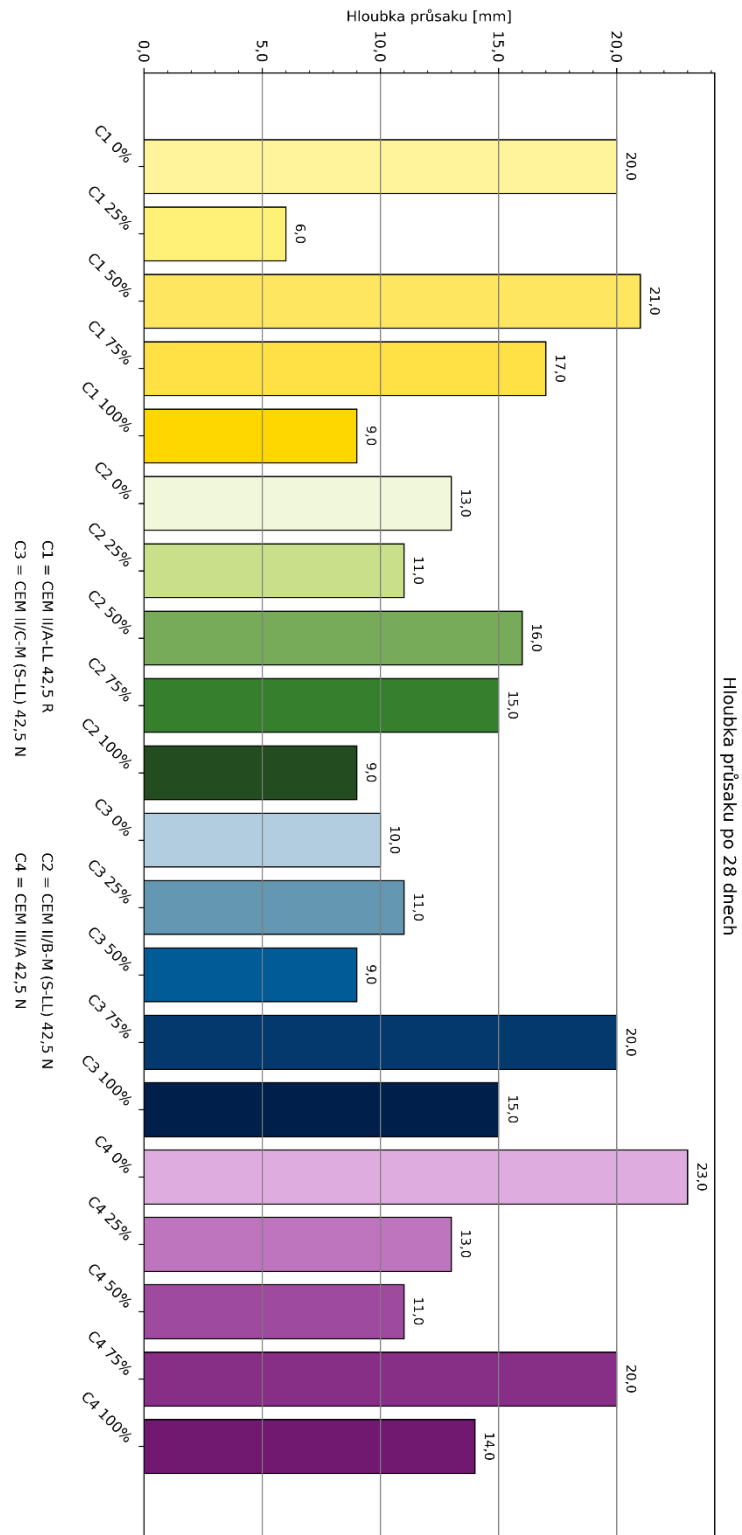
Z grafického zobrazení je patrné, že všechny směsi vykazují typický průběh smrštění – rychlejší počáteční smrštění v prvních 12 hodinách, následované postupným zpomalováním až do dosažení stabilní konečné hodnoty po 7 dnech. Směsi obsahující vyšší podíl kalové vody vykazují mírně vyšší konečné smrštění, což lze přisoudit zvýšenému obsahu volné vody ve směsi a případnému vlivu jemných částic kalu na mikrostrukturu betonu. Naopak referenční směsi bez kalové vody vykazují nižší konečné smrštění, což je v souladu s očekávaným chováním běžného konstrukčního betonu třídy C25/30.

Celkově lze konstatovat, že použití kalové vody má patrný vliv (viz. Obr. 24, 25, 26, 27) na velikost smrštění. Trendy jsou konzistentní napříč jednotlivými druhy cementu a ukazují, že při řízeném podílu kalové vody lze její využití v konstrukčních betonech považovat za vhodné bez výrazného negativního dopadu na smršťování.

3.3.2 VYHODNOCENÍ HLOUBKY PRŮSAKU TLAKOVOU VODOU

Tab. 21 Výsledky maximální hloubky průsaku jednotlivých receptur

Záměs	Maximální hloubka průsaku [mm]
C1_0	20
C1_25	6
C1_50	21
C1_75	17
C1_100	9
C2_0	13
C2_25	11
C2_50	16
C2_75	15
C2_100	9
C3_0	10
C3_25	11
C3_50	9
C3_75	20
C3_100	15
C4_0	23
C4_25	13
C4_50	11
C4_75	20
C4_100	14



Obr. 28 Graf porovnání maximální hodnoty průsaku jednotlivých receptur

Ve vyhodnocení maximální hloubky průsaku tlakovou vodou se většina naměřených hodnot pohybuje v očekávaném rozmezí pro použitý typ cementu a receptury. Průsak byl zkoušen vždy pouze na jedné zkušební krychli od každé receptury, proto výsledky představují pouze orientační hodnoty.

U záměsí C1 se průsak pohyboval mezi 6 a 21 mm. Nejnižší hodnoty byly zaznamenány u vzorků s vyšším podílem kalové vody. To naznačuje, že jemné podíly obsažené v kalové vodě vyplňují póry a zlepšují soudržnost betonu, čímž snižují jeho vodopropustnost. U záměsí C2 byly hodnoty stabilní, v rozmezí 9–16 mm, přičemž s rostoucím podílem kalové vody docházelo k mírnému a systematickému poklesu hloubky průsaku. Záměsí C3 vykazovaly průsak 9–16 mm, přičemž zvýšení u vzorku s 75 % kalové vody pravděpodobně odráží lokální mikrostrukturní odchylku.

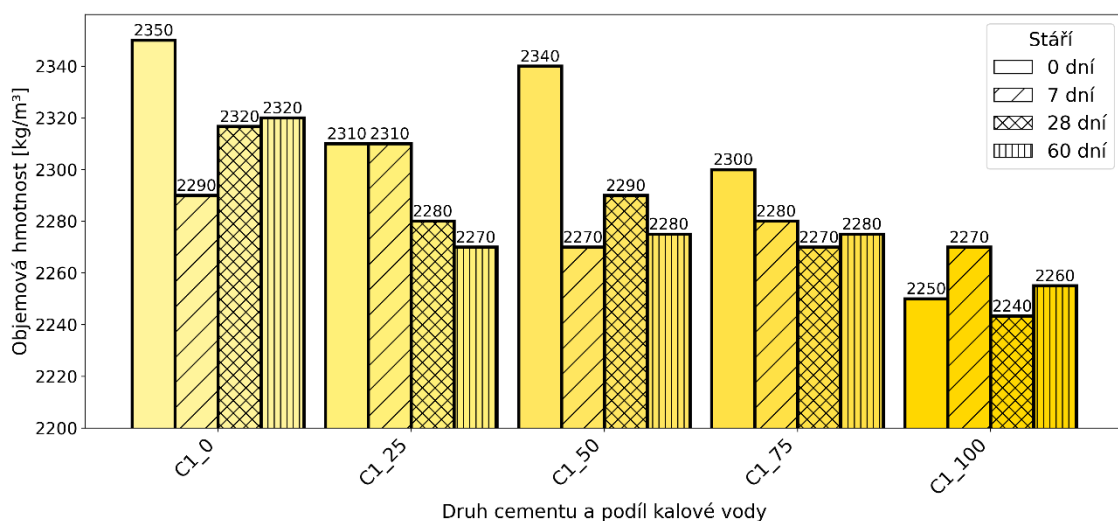
U záměsí C4 se trend projevuje nejvýrazněji. Referenční vzorek bez kalové vody vykázal nejvyšší průsak, 23 mm, zatímco při přidání kalové vody do směsi (25–100 %) hloubka průsaku klesla a pohybovala se mezi 13 a 20 mm. Tento pokles ukazuje pozitivní vliv jemných podílů z kalové vody na hutnost betonu. Obecně lze sledovat, že s rostoucím obsahem kalové vody dochází ke snižování hloubky průsaku a zlepšení vodotěsnosti směsi u všech typů cementů.

Celkově tedy platí, že průsak tlakovou vodou odpovídá očekávaným hodnotám. Z výsledků je patrné, že kalová voda může mít pozitivní vliv na hutnost betonových směsí a přispívá ke zvýšení jejich odolnosti vůči průsaku vody.

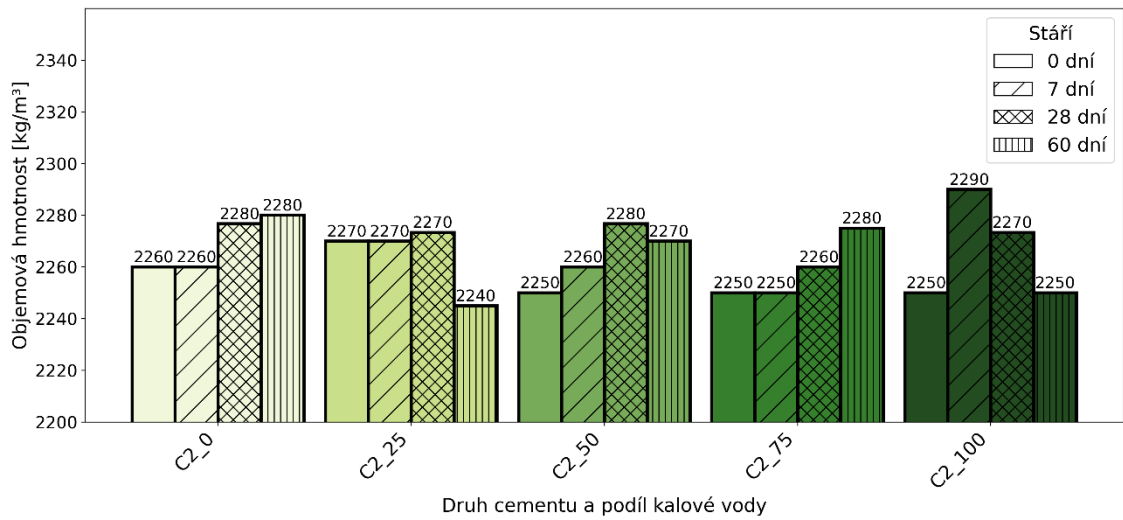
3.3.3 VYHODNOCENÍ OBJEMOVÉ HMTNOSTI

Tab. 22 Výsledky dat objemové hmotnosti v čerstvém i ztvrdlém stavu

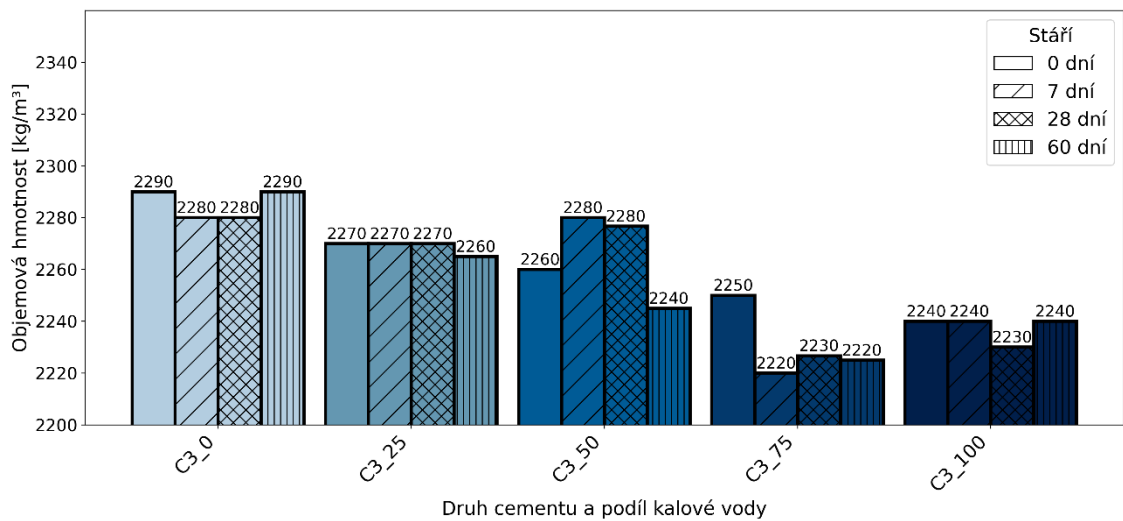
Záměs	Objemová hmotnost ČB 0 d	Objemová hmotnost ZB 7 d	Objemová hmotnost ZB 28 d	Objemová hmotnost ZB 60 d
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
C1_0	2350	2290	2320	2320
C1_25	2310	2310	2280	2270
C1_50	2340	2270	2290	2280
C1_75	2300	2280	2270	2280
C1_100	2250	2270	2240	2260
C2_0	2260	2260	2280	2280
C2_25	2270	2270	2270	2250
C2_50	2250	2260	2280	2270
C2_75	2250	2250	2260	2280
C2_100	2250	2290	2270	2250
C3_0	2290	2280	2280	2290
C3_25	2270	2270	2270	2270
C3_50	2260	2280	2280	2250
C3_75	2250	2220	2230	2230
C3_100	2240	2390	2230	2240
C4_0	2250	2240	2240	2260
C4_25	2270	2260	2260	2270
C4_50	2230	2250	2230	2240
C4_75	2240	2220	2260	2260
C4_100	2240	2240	2240	2250



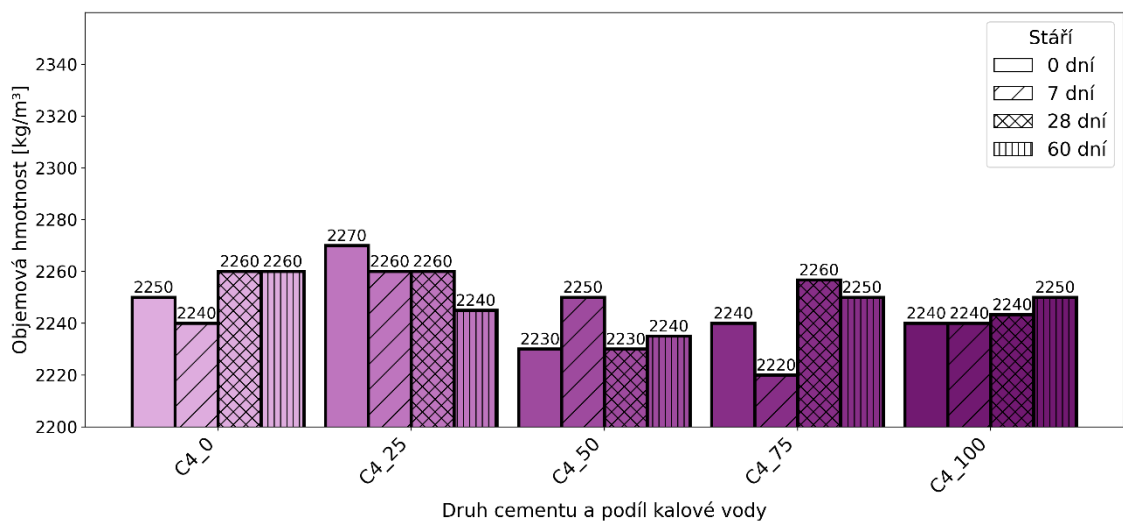
Obr. 29 Vývoj objemových hmotností cementu C1 v čase



Obr. 30 Vývoj objemových hmotností cementu C2 v čase



Obr. 31 Vývoj objemových hmotností cementu C3 v čase



Obr. 32 Vývoj objemových hmotností cementu C4 v čase

Celkově se hodnoty objemové hmotnosti pohybují v rozmezí přibližně 2220 až 2350 kg/m³, dle objemové hmotnosti se tedy jedná o obyčejný hutný beton.

V případě cementu C1 je patrné, že referenční směs bez kalové vody (0 % podíl) vykazuje nejvyšší počáteční objemovou hmotnost 2350 kg/m³, která během prvního týdne mírně klesá na 2290 kg/m³, aby se po 28 a 60 dnech stabilizovala kolem 2320 kg/m³. Přidání 25 % kalové vody způsobuje snížení objemové hmotnosti, zejména po 28 a 60 dnech, kdy dosahuje hodnot 2280–2270 kg/m³. Vyšší podíly kalové vody (50–75 %) vykazují proměnlivý trend: počáteční objemová hmotnost je někdy vyšší než u 25 % podílu, ale s časem klesá, což naznačuje, že kalová voda může zpočátku usnadňovat hutnění směsi, avšak dlouhodobě přispívá k nižší hustotě. U 100 % podílu kalové vody je patrný nejvýraznější pokles počáteční objemové hmotnosti (2250 kg/m³), přičemž během doby tuhnutí dochází k mírným výkyvům, avšak průměrná hodnota zůstává pod hodnotami referenční směsi.

Cement C2 vykazuje podobné chování, s tím, že vliv kalové vody je mírně méně výrazný než u C1. Objemová hmotnost čerstvého betonu u referenční směs vykazuje hodnotu 2260 kg/m³ a mírně roste během zrání až na 2280 kg/m³ po 60 dnech. Směsi s podílem 25–50 % kalové vody mají spíše stabilní objemovou hmotnost, s mírným poklesem u vyšších podílů po 60 dnech (např. 2245 kg/m³ u 25 % podílu). Směsi s 100 % kalovou vodou vykazují počáteční hodnotu 2250 kg/m³, s nárůstem na 2290 kg/m³ po 7 dnech, což může souviset s mírným zlepšením kompaktnosti vlivem chemických složek kalové vody, avšak po 28 a 60 dnech objemová hmotnost opět klesá.

U cementů C3 a C4 je zřejmé, že vyšší podíly kalové vody (75–100 %) vedou k výraznějšímu poklesu objemové hmotnosti v průběhu zrání, zejména po 7–28 dnech, kdy hodnoty dosahují 2220–2225 kg/m³ u C3 a 2220 kg/m³ u C4. To ukazuje, že kombinace vyššího podílu kalové vody a specifického složení těchto cementů může vést k nižší kompaktnosti a potenciálně vyšší porositě. Referenční směsi bez kalové vody vykazují u obou cementů stabilní hodnoty mezi 2250–2290 kg/m³, což potvrzuje, že samotný cement bez příměsi kalové vody poskytuje nejvyšší počáteční hustotu.

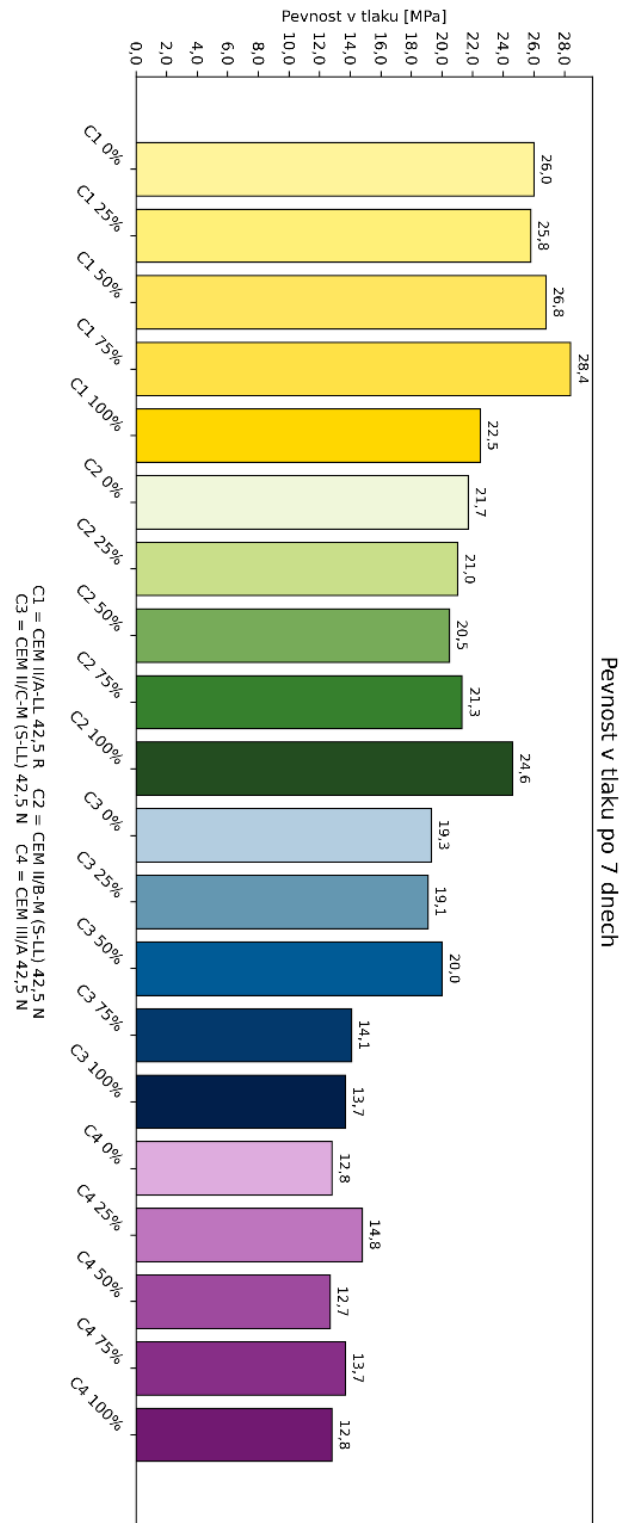
Obecně lze konstatovat, že kalová voda má na objemovou hmotnost betonových směsí významný vliv, který je závislý na podílu kalové vody a druhu cementu. Nízké až střední podíly (25–50 %) způsobují mírné snížení objemové

hmotnosti, avšak extrémně vysoké podíly (75–100 %) mohou vést k výraznému poklesu, zejména v kombinaci s určitými druhy cementu. Trend ukazuje, že nejvýznamnější změny se objevují v prvních 7–28 dnech zrání, poté se objemová hmotnost stabilizuje. Tyto poznatky jsou důležité pro navrhování receptur betonů s využitím kalové vody, neboť vysoký podíl kalové vody může ovlivnit hutnost, mechanické vlastnosti a potenciálně i trvanlivost konečného betonu.

3.3.4 VYHODNOCENÍ PEVNOSTI BETONU V TLAKU

Tab. 23 Výsledky pevnosti betonu v tlaku stáří 7 dnů dle receptur

Záměs	Hmotnost betonu	Délka	Šířka	Výška	F_c	Pevnost 7 d	Objemová hmotnost ztvrdlý
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[kg/m ³]
C1_0	7,854	150,0	150,1	152,5	594	26,0	2290
C1_25	7,723	149,9	150,0	148,7	576	25,8	2310
C1_50	7,764	149,8	149,8	152,2	610	26,8	2270
C1_75	7,638	149,7	149,8	149,2	635	28,4	2280
C1_100	7,569	149,9	149,8	148,4	501	22,5	2270
C2_0	7,530	149,9	149,9	148,5	482	21,7	2260
C2_25	7,627	149,9	149,9	149,5	471	21,0	2270
C2_50	7,487	149,9	149,8	147,5	453	20,5	2260
C2_75	7,704	150,0	150,1	151,8	485	21,3	2250
C2_100	7,559	149,9	149,9	146,9	542	24,6	2290
C3_0	7,718	149,9	149,8	150,5	435	19,3	2280
C3_25	7,665	150,1	149,8	150,5	431	19,1	2270
C3_50	7,638	149,9	149,9	149,3	448	20,0	2280
C3_75	7,639	149,8	149,8	153,3	324	14,1	2220
C3_100	7,966	149,8	149,9	148,6	304	13,7	2390
C4_0	7,671	149,8	149,8	152,3	291	12,8	2240
C4_25	7,749	149,9	149,8	152,7	338	14,8	2260
C4_50	7,591	149,9	149,9	150,1	285	12,7	2250
C4_75	7,652	149,9	149,9	153,2	315	13,7	2220
C4_100	7,607	149,7	149,8	151,6	290	12,8	2240



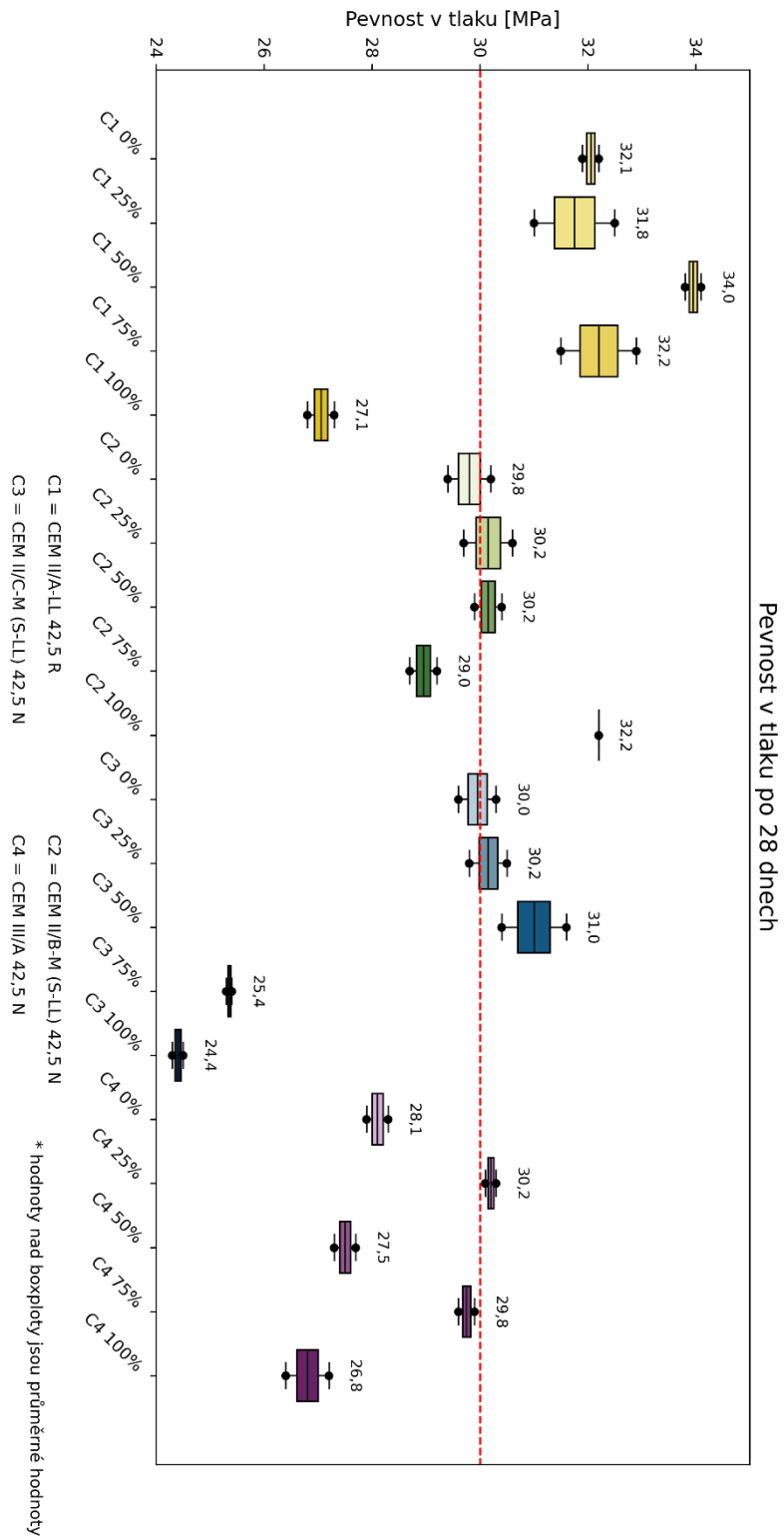
Obr. 33 Pevnost betonů v tlaku po 7 dnech

Tab. 24 Výsledky dat pevnosti v tlaku stáří 28 dnů cementů C1 a C2

Záměs	Hmotnost betonu	Délka	Šířka	Výška	F_c	Pevnost 28 d	Pevnost 28 d	Objemová hmotnost ztvrdlý	Objemová hmotnost ztvrdlý
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
C1_0	7,930	150,0	150,0	152,1	727	31,9	32,1	2320	2320
C1_0	7,876	150,1	150,1	151,0	730	32,2		2320	
C1_25	7,782	150,1	150,1	152,1	741	32,5	31,8	2270	2290
C1_25	7,935	150,0	150,0	153,3	713	31,0		2300	
C1_50	7,716	150,0	150,1	151,7	777	34,1	34,0	2260	2300
C1_50	7,861	150,0	150,1	149,8	760	33,8		2330	
C1_75	7,533	149,9	149,8	150,1	709	31,5	32,2	2230	2260
C1_75	7,697	150,0	150,6	148,5	733	32,9		2290	
C1_100	7,575	150,3	150,4	152,3	614	26,8	27,1	2200	2250
C1_100	7,620	150,0	150,0	147,0	602	27,3		2300	
C2_0	7,540	150,5	150,0	147,4	652	29,4	29,8	2270	2290
C2_0	7,809	150,0	150,4	150,7	682	30,2		2300	
C2_25	7,574	149,9	150,0	148,0	658	29,7	30,2	2280	2280
C2_25	7,764	149,9	149,9	151,9	697	30,6		2270	
C2_50	7,695	149,9	149,8	151,1	688	30,4	30,2	2270	2270
C2_50	7,595	150,0	150,2	148,2	665	29,9		2270	
C2_75	7,600	149,8	149,9	149,9	655	29,2	29,0	2260	2260
C2_75	7,680	150,0	150,0	150,8	649	28,7		2260	
C2_100	7,499	149,8	150,2	145,5	701	32,2	32,2	2290	2280
C2_100	7,631	149,8	149,9	149,4	721	32,2		2270	

Tab. 25 Výsledky dat pevnosti v tlaku stáří 28 dnů cementů C3 a C4

Záměr	Hmotnost betonu	Délka	Šířka	Výška	F_c	Pevnost 28 d	Pevnost 28 d	Objemová hmotnost ztvrdlý	Objemová hmotnost ztvrdlý
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
C3_0	7,629	149,9	149,9	147,0	667	30,3	30,0	2310	2300
C3_0	7,604	149,8	149,9	147,6	654	29,6		2290	
C3_25	7,731	150,0	150,0	150,8	690	30,5	30,2	2280	2280
C3_25	7,596	149,9	150,0	148,7	665	29,8		2270	
C3_50	7,526	149,9	149,9	147,3	697	31,6	31,0	2270	2280
C3_50	7,721	150,0	149,9	150,9	689	30,4		2280	
C3_75	7,697	150,0	149,9	152,5	579	25,3	25,4	2240	2230
C3_75	7,551	150,1	150,1	151,0	575	25,4		2220	
C3_100	7,632	150,1	150,0	151,8	559	24,5	24,4	2230	2240
C3_100	7,399	149,9	149,9	147,3	537	24,3		2240	
C4_0	7,627	150	150	150	638	28,3	28,1	2260	2260
C4_0	7,638	150	150	150	630	27,9		2260	
C4_25	7,428	150	150	146	663	30,3	30,2	2270	2260
C4_25	7,658	150	150	151	682	30,1		2250	
C4_50	7,503	150	150	149	619	27,7	27,5	2240	2240
C4_50	7,543	150	150	151	616	27,3		2230	
C4_75	7,508	150	150	149	665	29,9	29,8	2250	2260
C4_75	7,584	150	150	149	662	29,6		2260	
C4_100	7,592	150	150	150	612	27,2	26,8	2250	2250
C4_100	7,597	150	150	151	598	26,4		2240	



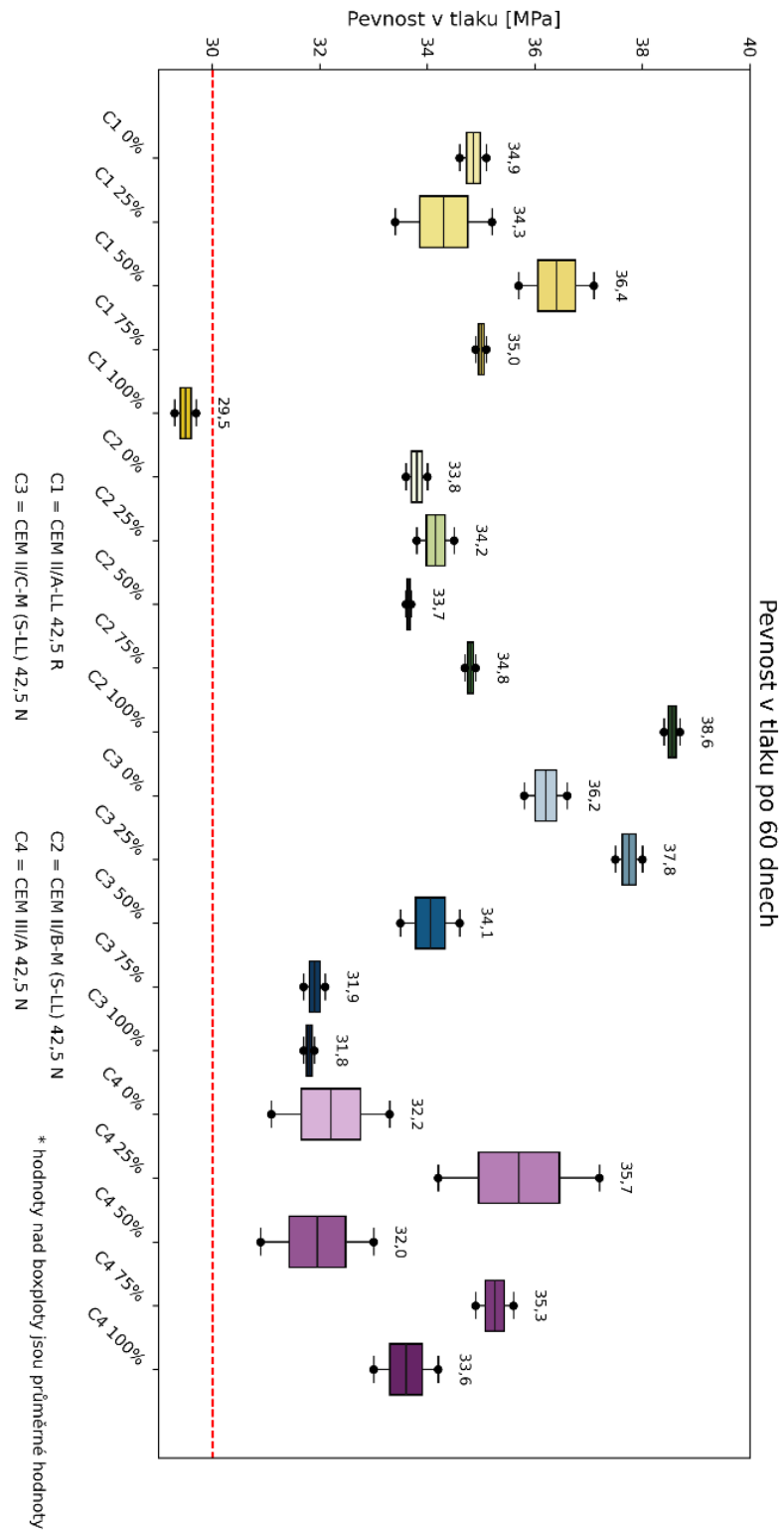
Obr. 34 Pevnost betonů v tlaku po 28 dnech

Tab. 26 Výsledky dat pevnosti v tlaku stáří 60 dnů dle receptur

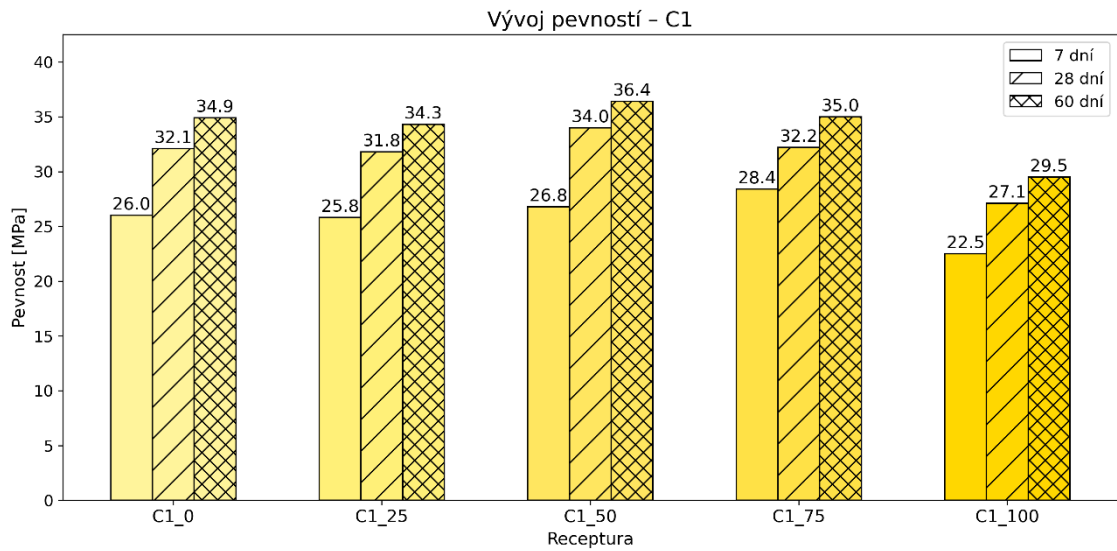
Záměr	Hmotnost betonu	Délka	Šířka	Výška	F_c	Pevnost 60 d	Pevnost 60 d	Objemová hmotnost ztvrdlý	Objemová hmotnost ztvrdlý
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
C1_0	7,990	150,0	150,0	152,0	801	35,1	34,9	2340	2320
C1_0	7,830	149,9	149,9	151,7	787	34,6		2300	
C1_25	7,760	150,0	149,9	151,3	799	35,2	34,3	2280	2270
C1_25	7,677	149,9	150,0	150,8	755	33,4		2260	
C1_50	7,666	149,9	150,0	150,2	836	37,1	36,4	2270	2280
C1_50	7,801	150,1	150,0	151,7	814	35,7		2280	
C1_75	7,701	149,8	149,9	150,6	792	35,1	35,0	2280	2280
C1_75	7,667	150,0	150,0	149,8	784	34,9		2270	
C1_100	7,706	149,9	149,9	151,5	674	29,7	29,5	2260	2260
C1_100	7,679	150,0	150,0	151,4	666	29,3		2250	
C2_0	7,813	150,0	150,0	151,9	765	33,6	33,8	2290	2280
C2_0	7,560	150,0	150,0	147,8	754	34		2270	
C2_25	7,461	149,9	150,0	148,0	766	34,5	34,2	2240	2250
C2_25	7,521	150,0	150,0	148,5	752	33,8		2250	
C2_50	7,639	150,0	150,0	149,1	753	33,7	33,7	2280	2270
C2_50	7,554	149,9	150,0	148,7	748	33,6		2260	
C2_75	7,590	149,8	149,9	148,0	773	34,9	34,8	2280	2280
C2_75	7,546	149,9	150,0	147,7	769	34,7		2270	
C2_100	7,718	150,0	150,0	151,8	874	38,4	38,6	2260	2250
C2_100	7,575	149,9	150,1	150,4	873	38,7		2240	

Tab. 27 Výsledky dat pevnosti v tlaku stáří 60 dnů cementů C3 a C4

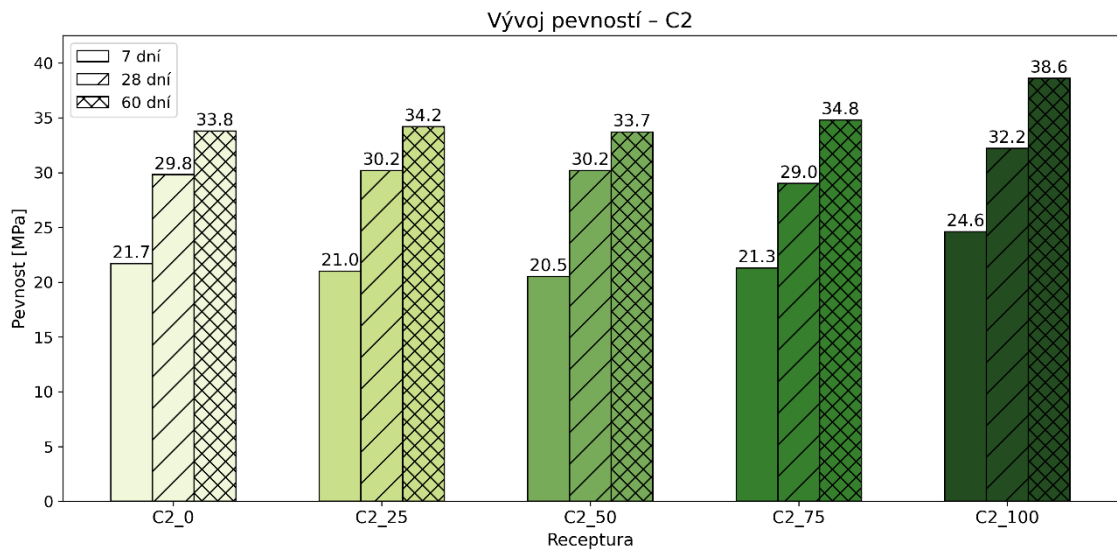
Záměs	Hmotnost betonu	Délka	Šířka	Výška	F_c	Pevnost 60 d	Pevnost 60 d	Objemová hmotnost ztvrdlý	Objemová hmotnost ztvrdlý
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
C3_0	7,631	150,0	150,0	148,3	796	35,8	36,2	2290	2290
C3_0	7,580	149,9	149,8	147,7	810	36,6		2290	
C3_25	7,718	150,0	150,0	150,3	856	38,0	37,8	2280	2270
C3_25	7,451	149,9	149,9	147,1	827	37,5		2250	
C3_50	7,731	149,8	149,9	153,2	769	33,5	34,1	2250	2250
C3_50	7,716	149,9	149,8	153,1	795	34,6		2240	
C3_75	7,578	150,0	150,0	150,9	717	31,7	31,9	2230	2230
C3_75	7,490	150,0	149,9	149,8	722	32,1		2220	
C3_100	7,507	149,9	149,8	149,3	709	31,7	31,8	2240	2240
C3_100	7,550	149,8	149,9	150,0	716	31,9		2240	
C4_0	7,706	149,8	149,8	151,8	758	33,3	32,2	2260	2260
C4_0	7,680	149,9	149,9	151,1	705	31,1		2260	
C4_25	7,666	149,9	150,0	151,7	845	37,2	35,7	2250	2250
C4_25	7,686	150,0	149,9	152,8	783	34,2		2240	
C4_50	7,511	149,9	149,9	149,0	738	33	32,0	2240	2240
C4_50	7,586	150,1	150,2	150,6	699	30,9		2230	
C4_75	7,542	149,8	149,9	148,9	793	35,6	35,3	2260	2250
C4_75	7,502	149,8	149,9	148,9	778	34,9		2240	
C4_100	7,581	149,8	149,8	149,9	767	34,2	33,6	2250	2250
C4_100	7,627	149,9	149,9	150,9	747	33		2250	



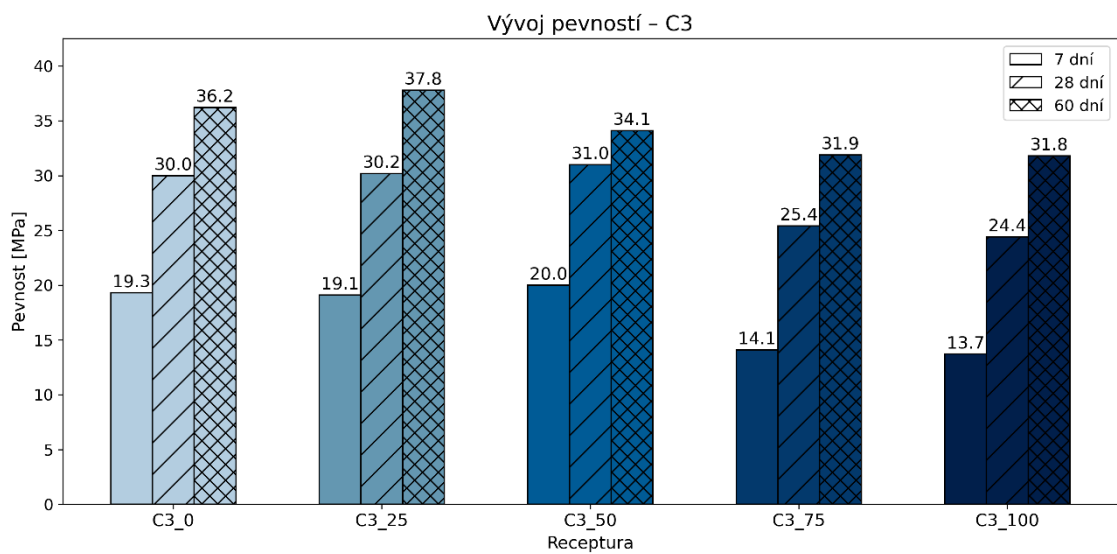
Obr. 35 Porovnání pevností zkušebních těles v tlaku po 60 dnech



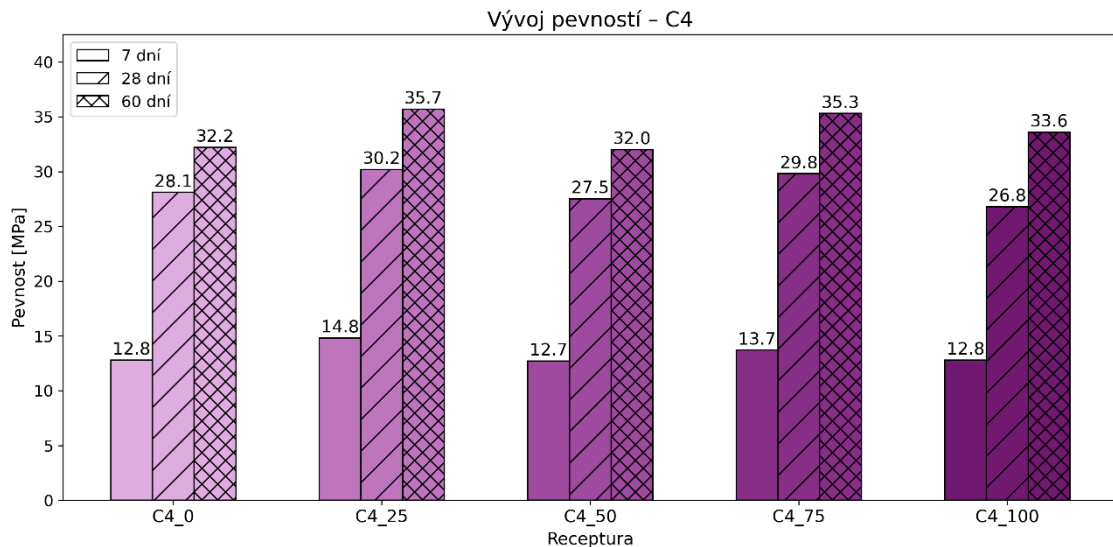
Obr. 36 Vývoj pevností receptur s cementem C1 v čase



Obr. 37 Vývoj pevností receptur s cementem C2 v čase



Obr. 38 Vývoj pevností receptur s cementem C3 v čase



Obr. 39 Vývoj pevností receptur s cementem C4 v čase

Z naměřených hodnot pevnosti betonu v tlaku je zřejmé, že podíl kalové vody z recyklace čerstvého betonu má významný vliv na vývoj pevností ve všech sledovaných stářích, přičemž tento vliv se liší v závislosti na typu použitého cementu.

Ve stáří 7 dní je u většiny receptur patrný postupný nárůst pevnosti betonu v tlaku s rostoucím podílem kalové vody až do úrovně přibližně 75 % náhrady záměsové vody. Tento trend lze vysvětlit přítomností jemných částic cementového a hydratačního charakteru v kalové vodě, které mohou urychlovat počáteční hydrataci cementu a současně působit jako mikropřímky zlepšující strukturu cementového tmelu. Při úplné, tedy 100% náhradě záměsové vody kalovou vodou však ve většině případů dochází k poklesu pevnosti oproti referenční směsi. Tento pokles lze přičíst zejména vyššímu obsahu nerozpuštěných jemných částic, zvýšené alkalitě a zejména potenciálně horšímu rozptýlení účinných plastifikačních přísad v systému. Výjimku v tomto ohledu představuje receptura C2_100, u které byl zaznamenán nárůst pevnosti i při plné náhradě vody. Vzhledem k jedinému zkušebnímu vzorku však tento výsledek nelze považovat za směrodatný.

Ve stáří 28 dní se již vliv kalové vody projevuje výrazněji. U několika receptur nebyla dosažena požadovaná pevnostní třída stanovená v zadání práce, konkrétně u směsí C1_100, C2_75, C3_75, C3_100, C4_0, C4_50, C4_75 a C4_100. V některých případech, zejména u receptur C2_75 a C4_75, se však jedná o relativně malé rozdíly, které lze považovat za staticky nevýznamné a mohou souviset s přirozenou variabilitou materiálových vlastností betonu. Pokles pevností při 100% náhradě záměsové vody kalovou vodou byl v souladu s předpoklady, neboť při takto vysokém

podílu již negativní vlivy kalové vody převažují nad jejím případným aktivačním účinkem. Naopak poměrně překvapivým výsledkem je nárůst pevností při částečné náhradě záměsové vody, zejména do úrovně 50 %, který byl zaznamenán u většiny sledovaných cementů. Tento efekt potvrzuje, že při vhodně zvoleném dávkování může kalová voda v systému působit nejen jako náhrada záměsové vody, ale také jako aktivní složka ovlivňující mikrostrukturu cementového kamene. Pevnosti ve stáří 28 dní byly stanoveny jako průměr ze dvou zkušebních krychlí.

Ve stáří 60 dní bylo zjištěno, že všechny receptury kromě C1_100 dosáhly pevností převyšujících minimální požadovanou pevnost třídy ve stáří 28 dní. To svědčí o pokračujícím nárůstu pevnosti v čase, avšak zároveň je patrné jeho zpomalení ve srovnání s počátečními fázemi zrání betonu. Tento jev je nejvýraznější u směsí s vyšším podílem kalové vody, kde lze předpokládat, že rychlejší počáteční hydratace vede k částečnému vyčerpání reaktivních složek v raném stáří a následnému pozvolnějším nárůstu pevností v pozdějších fázích. U receptur s částečnou náhradou záměsové vody kalovou vodou je však i ve stáří 60 dní patrné, že dosažené pevnosti jsou srovnatelné, případně vyšší než u referenčních směsí. Stejně jako u pevností ve stáří 28 dní byly výsledky ve stáří 60 dní stanoveny jako průměr ze dvou zkušebních krychlí.

Celkově lze konstatovat, že výsledky zkoušek pevnosti betonu v tlaku prokazují možnost částečné náhrady záměsové vody kalovou vodou bez negativního dopadu na mechanické vlastnosti betonu, přičemž jako optimální se jeví náhrada v rozmezí přibližně 25–50 %, případně až 75 % v závislosti na typu cementu. Úplná náhrada záměsové vody kalovou vodou se z hlediska dosažených pevností jeví jako hraniční a vyžaduje další podrobnější experimentální ověření a optimalizaci receptur.

4 ZÁVĚR

V teoretické části práce byly shrnuty současné poznatky o recyklaci čerstvého betonu a charakterizovány fyzikálně-chemické vlastnosti kalové vody, včetně proměnlivosti jejího složení v závislosti na provozních podmínkách betonáren. Byly rovněž vymezeny normové požadavky na technologickou vodu podle ČSN EN 206+A2 a souvisejících norem a předpisů, což umožnilo vyhodnotit potenciální omezení při jejím využití v konstrukčních betonech.

Vyhodnocení experimentálních zkoušek kalové vody ukázalo, že její fyzikálně-chemické vlastnosti vykazují jistou variabilitu mezi jednotlivými betonárnami a v průběhu dne, přičemž průměrný obsah sušiny a hustota byly nejvyšší v Horoměřicích, střední v Holubicích a nejnižší ve Vyškově. Chemický rozbor a XRD analýza prokázala obsah minerálů kalcitu, portlanditu a ettringitu, což podporuje hydraulické vlastnosti směsi. pH kalové vody se pohybovalo v silně zásaditém rozmezí, hustota byla stabilní s mírným kolísáním. Hraniční hustota, která je považována za použitelnou bez dalšího zpracování je 1200 kg/m^3 . Při vyšší hustotě je nutné kalovou vodu naředit pro další zpracování. Tyto výsledky potvrzují vhodnost kalové vody pro částečnou náhradu pitné vody v betonových směsích bez negativního vlivu na proces hydratace a manipulaci s čerstvým betonem.

Zkoušky čerstvého betonu ukázaly, že postupná náhrada pitné vody kalovou vodou ovlivňuje zejména konzistenci, obsah vzduchu a teplotu směsi. Ve většině receptur bylo možné zachovat požadovanou konzistenční třídu S4 i při náhradě až 50 % záměsové vody kalovou vodou, přičemž rozdíl sednutí mezi časem 5 a 60 minut zůstával minimální. Obsah vzduchu byl v přijatelných mezích, teplota čerstvého betonu zůstala v rámci cílové hodnoty $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a objemová hmotnost čerstvého betonu se u jednotlivých receptur lišila jen mírně. Experiment ukázal, že citlivost směsí na vyšší podíly kalové vody je vyšší u cementů s vyšší reaktivitou, což je důležité pro optimalizaci receptur.

U ztvrdlého betonu bylo potvrzeno, že použití kalové vody do určitého podílu nevede k výraznému snížení pevnosti v tlaku, zatímco hloubka průsaku tlakovou vodou a objemová hmotnost vykazovaly stabilní hodnoty. Nejlepší výsledky byly dosaženy u směsi s cementem C1 (CEM II/A-LL 42,5 R) při 25–50 % náhradě záměsové vody kalovou vodou, kde pevnosti v tlaku ve stáří 28 a 60 dnů byly vysoké, hloubka průsaku byla minimální a rozdíl sednutí v čase 5 a 60 minut byl nízký.

Smrštění betonu zůstalo v přijatelných mezích a stabilita směsi při zvýšené teplotě 30 °C byla zachována.

Na základě výsledků experimentální části lze konstatovat, že kalová voda z recyklace čerstvého betonu je vhodná pro částečnou náhradu pitné vody v konstrukčních betonech, přičemž optimální podíl se pohybuje kolem 25–50 % z celkového množství záměsové vody. Nejvhodnější kombinace z hlediska mechanických a technologických vlastností byla dosažena u cementu C1, který při uvedeném podílu kalové vody vykazoval vysokou pevnost v tlaku, nízkou hloubku průsaku a minimální rozdíl sednutí, což potvrzuje možnost praktického využití kalové vody v betonářské výrobě s ohledem na zachování kvality a trvanlivosti konstrukčního betonu.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Stavební a demoliční odpady. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2020 [cit. 2025-12-02]. Dostupné z: <https://mzp.gov.cz/cz/agenda/odpadove-hospodarstvi-a-cirkularni-ekonomika/odpady/stavebni-a-demolicni-odpady>
- [2] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. Tab. 3 Produkce odpadů za odvětví CZ-NACE. *Produkty* [online]. 2023 [cit. 2025-12-06]. Dostupné z: <https://csu.gov.cz/produkty/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2023>
- [3] DE ANDRADE SALGADO, Fernanda a Flávio DE ANDRADE SILVA. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering* [online]. Elsevier BV, 2022, **52**, 104452 [cit. 2025-12-06]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2022.104452
- [4] KOHOUTKOVÁ, Alena a Jaroslav PROCHÁZKA. Recyklace betonu. ČVUT V PRAZE, KATEDRA BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ A MOSTŮ. *Nenalezený vydavatel* [online]. [cit. 2025-12-16]. Dostupné z: https://people.fsv.cvut.cz/www/prochja2/YTBK/Prednaska_10_2015.pdf?utm
- [5] *Sustainability* [online]. MDPI, 2023 [cit. 2025-12-06]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://www.mdpi.com>
- [6] JOSEPH, Herbert Sinduja, Thamilselvi PACHIAPPAN, Siva AVUDAIAPPAN, Nelson MAUREIRA-CARSALADE, Ángel ROCO-VIDELA, Pablo GUINDOS a Pablo F. PARRA. A Comprehensive Review on Recycling of Construction Demolition Waste in Concrete. *Sustainability* [online]. MDPI, 2023, 2023-3-10, **15**(6), 4932 [cit. 2025-12-06]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su15064932
- [7] *Journal of Building Engineering* [online]. Elsevier BV, 2022 [cit. 2025-12-06]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com>
- [8] *Journal of Environmental Management* [online]. Elsevier BV, 2024 [cit. 2025-12-06]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com>
- [9] BARBHUIYA, Salim, Bibhuti Bhusan DAS a Dibyendu ADAK. A comprehensive review on integrating sustainable practices and circular economy principles in concrete industry. *Journal of Environmental Management* [online]. Elsevier BV, 2024, **370**(3), 122702 [cit. 2025-12-06]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122702
- [10] SCHÖNBECK, Pia, Malin LÖFSJÖGÅRD a Anders ANSELL. Quantitative Review of Construction 4.0 Technology Presence in Construction Project Research. *Buildings* [online]. MDPI, 2020, 2020-9-29, **10**(10), 173 [cit. 2025-12-06]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings10100173
- [11] *Forbes* [online]. 2025 [cit. 2025-09-19]. Dostupné z: <https://forbes.cz/konec-lomu-a-piskoven-v-cesku-nove-se-tezko-oteviraji-hrozi-zdrazovani-staveb/>
- [12] STROUHAL, Jan. Konec lomů a pískoven v Česku? Nové se těžko otevírají, hrozí zdražování staveb. *Forbes* [online]. 2025 [cit. 2025-09-19]. Dostupné z:

- <https://forbes.cz/konec-lomu-a-piskoven-v-cesku-nove-se-tezko-oteviraji-hrozi-zdravovani-staveb/>
- [13] SMITH, Ivy. Recyklovaný beton: Použití, výhody a omezení. *Construction How* [online]. 2025 [cit. 2025-09-19]. Dostupné z: <https://constructionhow.com/recycled-concrete/>
- [14] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu. Listopad 2008.
- [15] TURK, Omar, Sherif YEHIA, Akmal ABDELFAHAH a Mohamed ELCHALAKANI. Sustainable concrete production: The potential of utilizing recycled waste materials. *Journal of Building Engineering* [online]. Elsevier BV, 2024, **98**, 111467 [cit. 2025-12-17]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jobbe.2024.111467
- [16] SANDROLINI, Franco a Elisa FRANZONI. Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier BV, 2001, **31**(3), 485-489 [cit. 2025-12-17]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(00)00468-3
- [17] CTC & ASSOCIATES LLC. Concrete Recycling: Reuse of Returned Plastic Concrete and Crushed Concrete as Aggregate. *Nenalezený vydavatel* [online]. 7.9.20212 [cit. 2025-12-17]. Dostupné z: <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/preliminary-investigations/concrete-recycling-pi-2012-09-07-a11y.pdf>
- [18] KLUS, Lukáš, Vojtěch VÁCLAVÍK, Tomáš DVORSKÝ, Jakub SVOBODA a Jiří BOTULA. Reuse of Waste Material "Waste Sludge Water" from a Concrete Plant in Cement Composites: A Case Study. *Applied Sciences* [online]. MDPI, 2019, 2019-10-24, **9**(21), 4519 [cit. 2025-12-17]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9214519
- [19] EKOLU, Stephen a Amit DAWNEERANGEN. SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING, UNIVERSITY OF THE WITWATERSRAND. Evaluation of recycled water recovered from a ready-mix concrete plant for re-use in concrete. *Nenalezený vydavatel* [online]. [cit. 2025-12-25]. Dostupné z: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/54200371.pdf>
- [20] GHRAIR, Ayoup M., Andrew HEATH, Kevin PAINE a Muath AL KRONZ. Waste Wash-Water Recycling in Ready Mix Concrete Plants. *Environments* [online]. MDPI, 2020, 2020-12-11, **7**(12), 108 [cit. 2025-12-28]. ISSN 2076-3298. Dostupné z: doi:10.3390/environments7120108
- [21] TURK, Omar, Sherif YEHIA, Akmal ABDELFAHAH a Mohamed ELCHALAKANI. Sustainable concrete production: The potential of utilizing recycled waste materials. *Journal of Building Engineering* [online]. Elsevier BV, 2024, **98**, 111467 [cit. 2025-12-29]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jobbe.2024.111467

- [22] KLUS, Lukáš, Vojtěch VÁCLAVÍK, Tomáš DVORSKÝ, Jakub SVOBODA a Radek PAPESCH. The Utilization of Waste Water from a Concrete Plant in the Production of Cement Composites. *Buildings* [online]. MDPI, 2017, 2017-12-20, **7**(4), 120 [cit. 2025-11-25]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings7040120
- [23] CLR-S SYSTÉM RECYKLACE ODPADNÍ VODY. *BETON, VŠE Z BETONU A VŠE PRO BETON V ČR* [online]. 2015 [cit. 2025-11-25]. Dostupné z: <https://www.betonsserver.cz/aktuality/clr-s-system-recyklace-odpadni-vody>
- [24] *Příručka technologa: BETON – suroviny – výroba – vlastnosti*. 2. 2005.
- [25] PAULA, H. M. a M. S. O. ILHA. Quality of concrete plant wastewater for reuse. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* [online]. FapUNIFESP (SciELO), 2014, **7**(3), 349-366 [cit. 2025-11-25]. ISSN 1983-4195. Dostupné z: doi:10.1590/S1983-41952014000300003
- [26] BUMANIS, G., G. SHAKHMENKO, P. KARA a A. KORJAKINS. Concrete Sawing Waste Recycling As Microfiller in Concrete Production. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* [online]. Riga Technical University, 2015, 2015-8-5, **1**, 346 [cit. 2025-11-25]. ISSN 2256070X. Dostupné z: doi:10.17770/etr2011vol1.887
- [27] VAIČIUKYNIENĖ, Danutė, Aras KANTAUTAS, Simona TUČKUTĖ, Fallon MANHANGA, Eugenijus JANAVIČIUS, Ernestas IVANAUSKAS, Žymantas RUDŽIONIS a Aloyzas GAUDUTIS. The Using of Concrete Wash Water from Ready Mixed Concrete Plants in Cement Systems. *Materials* [online]. MDPI, 2021, 2021-5-11, **14**(10), 2483 [cit. 2025-12-02]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14102483
- [28] KLUS, Lukáš, Vojtěch VÁCLAVÍK, Tomáš DVORSKÝ, Jakub SVOBODA a Jiří BOTULA. Reuse of Waste Material “Waste Sludge Water” from a Concrete Plant in Cement Composites: A Case Study. *Applied Sciences* [online]. MDPI, 2019, 2019-10-24, **9**(21), 4519 [cit. 2025-11-25]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9214519
- [29] KLUS, Lukáš, Vojtěch VÁCLAVÍK, Tomáš DVORSKÝ, Jakub SVOBODA a Radek PAPESCH. The Utilization of Waste Water from a Concrete Plant in the Production of Cement Composites. *Buildings* [online]. MDPI, 2017, 2017-12-20, **7**(4), 120 [cit. 2025-11-25]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings7040120
- [30] ZERVAKI, Monika, Christos LEPTOKARIDIS a Stamatis TSIMAS. Reuse of By-Products from Ready-Mixed Concrete Plants for the Production of Cement Mortars. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* [online]. SDEWES Centre, 2013, **1**(2), 152-162 [cit. 2025-11-25]. ISSN 1848-9257. Dostupné z: doi: 10.13044/j.sdwes.2013.01.0011

- [31] VAIČIUKYNIENĖ, Danutė, Aras KANTAUTAS, Simona TUČKUTĖ, Fallon MANHANGA, Eugenijus JANAVIČIUS, Ernestas IVANAUSKAS, Žymantas RUDŽIONIS a Aloyzas GAUDUTIS. The Using of Concrete Wash Water from Ready Mixed Concrete Plants in Cement Systems. *Materials* [online]. MDPI, 2021, 2021-5-11, **14**(10), 2483 [cit. 2025-12-28]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14102483
- [32] HADDAD, Bechara, Farjallah ALASSAAD a Nassim SEBAIBI. Impact of Collected and Recycled Concrete Plant Washing Water on the Physical, Chemical, and Mechanical Properties of Mortars. *Materials* [online]. MDPI, 2025, 2025-4-3, **18**(7), 1641 [cit. 2025-12-17]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma18071641
- [33] DAVIDOVÁ, Vendula, Tomáš DAVID a Pavel REITERMAN. The Influence of Sludge Water on the Properties of Fresh and Hardened Concrete. *Materials Science Forum* [online]. Trans Tech Publications, 2022, 2022-10-13, **1070**, 231-236 [cit. 2026-01-04]. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/p-n4oi0e
- [34] ARUNTAŞ, Hüseyin Yılmaz, Engin NALLI a Gökhan KAPLAN. Usage of ready-mixed concrete plant wastewater in concrete with superplasticizer: Effect on physico-mechanical properties. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier BV, 2022, **348**, 128641 [cit. 2025-12-25]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128641
- [35] AUDO, M., P.-Y. MAHIEUX, Ph. TURCRY, L. CHATEAU a C. CHURLAUD. Characterization of ready-mixed concrete plants sludge and incorporation into mortars: Origin of pollutants, environmental characterization and impacts on mortars characteristics. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier BV, 2018, **183**, 153-161 [cit. 2025-12-25]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.155
- [36] CLR-S SYSTÉM RECYKLACE ODPADNÍ VODY. *BETON, VŠE Z BETONU A VŠE PRO BETON V ČR* [online]. 2015 [cit. 2025-12-25]. Dostupné z: <https://www.betonserver.cz/aktuality/clr-s-system-recyklace-odpadni-vody>
- [37] *IEA* [online]. 2023 [cit. 2025-12-30]. Dostupné z: <https://www.iea.org>
- [38] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN EN 1008:2003 Záměšová voda do betonu*. 2003.
- [39] HEIDELBERG MATERIALS. Sustainability. *Heidelberg Materials* [online]. 2024 [cit. 2025-12-30]. Dostupné z: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/sustainability>
- [40] CEMNET. The Cemex way to the future. *International Cement Review* [online]. 2022 [cit. 2025-12-30]. Dostupné z: <https://www.cemnet.com/Articles/story/172585/the-cemex-way-to-the-future.html>
- [41] ZAPA beton. O betonu. *ZAPA beton* [online]. 2019 [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: <https://www.zapa.cz/cs/o-betonu>

- [42] DE MATOS, Paulo Ricardo, Luiz Roberto PRUDÊNCIO JR., Ronaldo PILAR, Philippe Jean Paul GLEIZE a Fernando PELISSER. Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: Effect on the hydration, fresh and hardened properties. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier BV, 2020, **230**, 116981 [cit. 2025-12-28]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116981
- [43] Záměsová voda do betonu. *Beton.cz 60x v ČR* [online]. 2025 [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: <https://www.beton.cz/o-nas/slovník-pojmu/zamesova-voda-do-betonu.html>
- [44] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN EN 206+A2:2021 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2021.
- [45] *Properties of concrete*. 3. Longman Scientific & Technical, 1986. ISBN 0582406269.
- [46] MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Education, [2014]. ISBN 9780071797870.
- [47] BAHRAMAN, Mohanna, Gholamreza ASADOLLAHFARDI, Amir Masoud SALEHI a Behnaz YAHYAEI. Feasibility study of using wash water from ready mixed concrete plant and synthetic wastewater based on tap water with different total dissolved solid to produce self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering* [online]. Elsevier BV, 2021, **41**, 102781 [cit. 2025-12-29]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jobee.2021.102781
- [48] HOBBS, D. W. *Alkali/Silica Reaction in Concrete*. Thomas Telford, 1988. ISBN 0727713179.
- [49] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkoušení sednutím*. 2020.
- [50] Sednutí kužele. *Ebeton* [online]. 2025 [cit. 2025-11-25]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/sednuti-kuzele/>
- [51] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. 2020.
- [52] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – tlakové metody*. 2020.
- [53] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. 2019.
- [54] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2021.
- [55] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2020.
- [56] *Zpráva o kontrolních zkouškách kameniva – Hrušovany: ROČNÍ ZKOUŠKY* [elektronický]. 2024.
- [57] *Protokol o zkoušce číslo: 01/17/25: Luleč 4/8* [elektronický]. 2025. 2025.
- [58] *Protokol o zkoušce číslo: 01/19/25: Luleč 8/16* [elektronický]. 2025.

- [59] STACHEMA. STACHEPLAST. *Nenalezený vydavatel* [online]. 2019, 25.9.20219 [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/produkty/plastifikatory:c9/stacheplast:p237.htm>
- [60] STACHEMA. STACHEMENT 2489. *Nenalezený vydavatel* [online]. 2019, 25.9.20219 [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/produkty/superplastifikatory-ztekucovice-pce:c163/stachment-2489:p314.htm>
- [61] Betonový recyklát. *Betonový recyklát* [online]. 2025 [cit. 2025-12-02]. Dostupné z: <https://www.brnorecyklace.cz/betonovy-recyklat>
- [62] *Betonový recyklát* [online]. 2025 [cit. 2025-12-02]. Dostupné z: <https://www.brnorecyklace.cz>
- [63] Patent – Concrete production waste water recycling system. *Google Patents* [online]. 2020 [cit. 2025-12-16]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CN213977213U/en>
- [64] ASTERIX. OLAS – přístroj na měření množství kalu v kalové vodě. *Ostatní produkty* [online]. [cit. 2026-01-09]. Dostupné z: <https://asterix.cz/pages/ostatni-produkty.html>
- [65] Měřicí žlab pro stanovení objemových změn. *Strojeprozkusebnictvi.cz* [online]. 2011 [cit. 2025-12-02]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/merici-zlab-pro-stanoveni-objemovych-zmen.html>
- [66] CEMENT HRANICE. CEM II/A-LL 42,5 R – Cement Hranice – technický list. *Cement Hranice* [online]. 2025, 3.2.2025 [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: <https://www.cement.cz/cem-ii/a-ll-42-5-r>
- [67] CEMENT HRANICE. CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N – Cement Hranice – technický list. *Cement Hranice* [online]. 2025, 3.2.2025 [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: <https://www.cement.cz/cem-ii/b-m-s-ll-42-5-n-2>
- [68] CEMENT HRANICE. CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N – Cement Hranice – technický list. *Cement Hranice* [online]. 2025, 3.2.2025 [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: <https://www.cement.cz/cem-ii-c-m-s-ll-42-5-n>
- [69] CEMENT HRANICE. CEM III/A 42,5 N – Cement Hranice – technický list. *Cement Hranice* [online]. 2025, 3.2.2025 [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: <https://www.cement.cz/cem-iii/a-42-5-n>

6 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Betonový recyklát [61; 62].....	4
Obr. 2 Recyklační zařízení na betonárně ZAPA beton Holubice	8
Obr. 3 Schéma mechanického recyklačního zařízení [63]	8
Obr. 4 Nádrž na kalovou vodu ZAPA beton Holubice.....	9
Obr. 5 Měřicí sonda OLAS [64]	29
Obr. 6 Měření sednutí [50]	32
Obr. 7 Výpočet objemové hmotnosti dle normy [51].....	33
Obr. 8 Schéma nádoby pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém stavu[52].....	34
Obr. 9 Měřicí žlab pro stanovení objemových změn SCHLEIBINGER GERÄTE [65].	35
Obr. 10 Uložení zkušební krychle do vodotlačné stolice [53]	36
Obr. 11 Vyhovující způsoby porušení zkušební krychle [55]	37
Obr. 12 Křivka zrnitosti propadu kameniva frakce 0/4 mm Hrušovany [56].....	43
Obr. 13 Křivka zrnitosti propadu kameniva frakce 4/8 mm Luleč [57]	44
Obr. 14 Křivka zrnitosti propadu kameniva frakce 8/16 mm Luleč [56]	44
Obr. 15 Grafické znázornění průměrných teplot kalové vody v čase	47
Obr. 16 Grafické znázornění průměrných hustoty kalové vody v čase.....	48
Obr. 17 Grafické znázornění průměrných obsahu sušiny kalové vody v čase	50
Obr. 18 Grafické znázornění průměrných objemových hmotností kalové vody v čase	51
Obr. 19 Vyhodnocení XRD záznamu	53
Obr. 20 Grafické znázornění výsledků zkoušky sednutí kužele jednotlivých receptur	55
Obr. 21 Naměřené sednutí a obsahu vzduchu receptury C3_50	56
Obr. 22 Grafické znázornění obsahu vzduchu v čerstvém betonu v čase 0 a 60 minut dle jednotlivých receptur	58
Obr. 23 Vyhodnocení teploty betonu	60
Obr. 24 Porovnání smrštění cementu C1 s různými podíly kalové vody	61
Obr. 25 Porovnání smrštění cementu C2 s různými podíly kalové vody	62
Obr. 26 Porovnání smrštění cementu C3 s různými podíly kalové vody	63
Obr. 27 Porovnání smrštění cementu C4 s různými podíly kalové vody	64
Obr. 28 Graf porovnání maximální hodnoty průsaku jednotlivých receptur	67
Obr. 29 Vývoj objemových hmotností cementu C1 v čase.....	69
Obr. 30 Vývoj objemových hmotností cementu C2 v čase.....	70
Obr. 31 Vývoj objemových hmotností cementu C3 v čase.....	70
Obr. 32 Vývoj objemových hmotností cementu C4 v čase.....	70
Obr. 33 Pevnost betonů v tlaku po 7 dnech.....	73
Obr. 34 Pevnost betonů v tlaku po 28 dnech.....	76
Obr. 35 Porovnání pevností zkušebních těles v tlaku po 60 dnech	79
Obr. 36 Vývoj pevností receptur s cementem C1 v čase	80
Obr. 37 Vývoj pevností receptur s cementem C2 v čase	80
Obr. 38 Vývoj pevností receptur s cementem C3 v čase	80
Obr. 39 Vývoj pevností receptur s cementem C4 v čase	81

7 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Třída sednutí [49]	32
Tab. 2 Navržené receptury betonů	38
Tab. 3 Tabulka korekcí v rámci receptur	39
Tab. 4 Vybrané vlastnosti cementu C1 dle technického listu [66].....	40
Tab. 5 Vybrané vlastnosti cementu C2 dle technického listu [67].....	41
Tab. 6 Vybrané vlastnosti cementu C3 dle technického listu [68].....	41
Tab. 7 Vybrané vlastnosti cementu C4 dle technického listu [69].....	42
Tab. 8 Vybrané vlastnosti kameniva frakce 0/4 Hrušovany u Brna dle ročních zkoušek [56].....	43
Tab. 9 Vybrané vlastnosti kameniva frakce 4/8 Luleč dle zkoušky typu [57].....	43
Tab. 10 Vybrané vlastnosti kameniva frakce 8/16 Luleč dle zkoušky typu [58]	44
Tab. 11 Vybrané vlastnosti STACHEPLASTU z technického listu [59]	45
Tab. 12 Vybrané vlastnosti STACHEMENTU 2489 z technického listu [60]	45
Tab. 13 Výsledky teploty kalové vody na zkoumaných betonárnách v čase	46
Tab. 14 Výsledky hustoty kalové vody na zkoumaných betonárnách v čase	48
Tab. 15 Výsledky obsahu sušiny kalové vody na zkoumaných betonárnách v čase	50
Tab. 16 Výsledky pH kalové vody na zkoumaných betonárnách v čase	51
Tab. 13 Výsledky chemického rozboru vzorku po vyžhání na 400 °C	52
Tab. 18 Výsledky dat zkoušky sednutí kužele jednotlivých receptur	54
Tab. 19 Výsledky dat stanovení obsahu vzduchu jednotlivých receptur	57
Tab. 20 Výsledky dat stanovení teploty betonových směsí jednotlivých receptur ..	59
Tab. 21 Výsledky maximální hloubky průsaku jednotlivých receptur	66
Tab. 22 Výsledky dat objemové hmotnosti v čerstvém i ztvrdlém stavu	69
Tab. 23 Výsledky pevnosti betonu v tlaku stáří 7 dnů dle receptur	72
Tab. 24 Výsledky dat pevnosti v tlaku stáří 28 dnů cementů C1 a C2	74
Tab. 25 Výsledky dat pevnosti v tlaku stáří 28 dnů cementů C3 a C4.....	75
Tab. 26 Výsledky dat pevnosti v tlaku stáří 60 dnů dle receptur	77
Tab. 27 Výsledky dat pevnosti v tlaku stáří 60 dnů cementů C3 a C4.....	78

8 SEZNAM ZKRATEK

ČB – čerstvý beton

ČGS – České geologické služby

ČSÚ – Český statistický úřad

LS – lignosulfonát

OH – objemová hmotnost

PCE – polykarboxylát

RA – Recycled aggregate

RAC – Recycled aggregate concrete

RPC – Recycled plastic concrete

SDO – stavební a demoliční odpad

XRD – rentgenová difrakční analýza

ZB – ztvrdlý beton