



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 ZÁVISLOSTI PROVZDUŠNĚNÍ V ČERSTVÉM BETONU A TRVANLIVOSTI ZTVRDLÉHO BETONU

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN AERATION IN FRESH CONCRETE AND
DURABILITY OF HARDENED CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kristýna Chaloupková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

BRNO 2026



Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Studentka: **Bc. Kristýna Chaloupková**

Vedoucí práce: **Ing. Adam Hubáček, Ph.D.**

Akademický rok: 2025/26

Studijní program: N0732A260027 Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Studium závislosti provzdušnění v čerstvém betonu a trvanlivosti ztvrdlého betonu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Trvanlivost betonu je jedním z jeho základních určujících parametrů. Metody jejího posouzení jsou v České republice zavedené už od 80. let 20. století. V současnosti však některé tyto postupy plně nereflektují současný stav posouzení trvanlivosti betonů vystavených působení vody, mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Nosným tématem diplomové práce bude, na základě poznatků ze současně používaných zkušebních postupů v České republice, posouzení případných závislostí mezi jednotlivými zjištěnými parametry provzdušnění v čerstvém a ztvrdlém betonu a jeho trvanlivostí, zejména odolnosti betonu proti působení vody, mrazu a chemických rozmrazovacích látek.

Cílem práce bude návrh a posouzení možností pro zpřesnění predikce trvanlivosti na základě běžně používaných zkušebních postupů a dále také postupů, které v České republice nejsou rozšířené a nemají žádné využití v praxi.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Základní body diplomové práce budou následující:

Popis a shrnutí dosavadních znalostí o betonech vystavených působení vody, mrazu a chemických rozmrazovacích látek (CHRL), shrnutí stanovení a posouzení parametrů provzdušnění v čerstvém a ztvrdlém betonu, zejména s ohledem na parametry součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu (tzv. Spacing

Factor), ale také v čerstvém betonu (tzv. AVA test), popis a shrnutí tuzemských metod zabývajících se posouzením trvanlivosti betonů vystavených podmínkám působení mrazu a CHRL, s ohledem na co nejlepší opakovatelnost a reprodukovatelnost, shrnutí metod testování trvanlivosti používaných v zahraničí.

Praktická část diplomové práce bude zaměřena na testování betonů, zabývajících se studiem míry provzdušnění v čerstvém a ztvrdlém betonu, s ohledem na kvalitu a množství tzv. mikroskopického vzduchu v čerstvém a ve ztvrdlém betonu a dále také trvanlivostí betonu vůči působení vody, mrazu a chemických rozmrazovacích látek.

Budou sledovány parametry betonu jako jsou zpracovatelnost čerstvého betonu, obsah vzduchu v čerstvém betonu a ve ztvrdlém betonu, objemová hmotnost, pevnost betonu v tlaku a odolnost betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Jednotlivé zkušební postupy budou případně modifikovány tak, aby výsledné parametry dané metody co nejvíce respektovaly požadavky na trvanlivost betonu, s ohledem na opakovatelnost a reprodukovatelnost zkoušek.

Předpokládaný rozsah diplomové práce 60-80 stran.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Časopis Beton TKS.

ČSN EN 206+A2 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.

ČSN P 73 2404 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace.

Zkušební metody pro trvanlivost betonu dle národních a zahraničních standardů technických norem.

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí.

Normové i případné nenormové standardy zabývajících se trvanlivostí betonu a součinitelem prostorového rozložení vzduchových pórů v čerstvém a ve ztvrdlém betonu.

Internetové zdroje, např. databáze SCOPUS, Science Direct a další.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 24. 3. 2025

L. S.

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
vedoucí ústavu

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
vedoucí práce

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možnostmi posouzení závislostí mezi parametry trvanlivosti betonu, zejména s ohledem na odolnost betonu proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek, a mírou provzdušnění v čerstvém a ve ztvrdlém betonu. Zkušební postupy, které jsou v současné době používány pro stanovení odolnosti betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám, jsou značně problematické z hlediska jejich opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Průběh zkoušek je ovlivněn celou řadou faktorů, například úpravou zkušebního povrchu či způsobem uložení zkušebních těles před zkouškou.

Také parametry míry provzdušnění čerstvého a ztvrdlého betonu vykazují odchylky, zejména mezi jednotlivými zkušebními metodami. Metoda AVA (Air Void Analyzer), která umožňuje hodnocení vybraných parametrů vzduchového systému již v čerstvém betonu, však vykazuje jisté systematické vazby na parametry stanovené mikroskopickou analýzou ve ztvrdlém betonu. I přes značnou variabilitu zkoušek trvanlivosti betonu lze při vhodné interpretaci výsledků identifikovat tyto vazby mezi parametry vzduchového systému betonu a jeho odolností proti chemickým rozmrazovacím látkám, na jejichž základě lze sestavit predikční modely průběhu degradace betonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, trvanlivost, mrazuvzdornost, chemické rozmrazovací látky, cyklické zmrazování a rozmrazování, zkušební metody, součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů v betonu, Spacing factor, Air Void Analyzer.

ABSTRACT

This Master's thesis deals with the possibilities of assessing the relationship between concrete durability parameters, with particular emphasis on the resistance of concrete to frost action and chemical deicing agents, and the degree of air entrainment in fresh and hardened concrete. The test methods currently used to determine the resistance of concrete to chemical deicing agents are significantly problematic in terms of repeatability and reproducibility. The course of the tests is influenced by a number of factors, such as the preparation of the test surface or the method of storing the test specimens prior to testing.

The parameters describing the degree of air entrainment in fresh and hardened concrete also show deviations, particularly between individual test methods. However, the AVA (Air Void Analyzer) method, which enables the evaluation of selected air-void system parameters already in fresh concrete, exhibits certain systematic relationships with parameters determined by microscopic analysis in hardened concrete. Despite the considerable variability of concrete durability tests, this relationships between the parameters of the concrete air-void system and its resistance to chemical deicing agents can be identified through appropriate interpretation of the results, on the basis of which predictive models of the concrete degradation process can be developed.

KEYWORDS

Concrete, durability, frost resistance, chemical deicing salts, cyclic freezing and thawing, test methods, spatial distribution coefficient of air pores in concrete, Spacing factor, Air Void Analyzer.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHALOUPKOVÁ, Kristýna. *Studium závislosti provzdušnění v čerstvém betonu a trvanlivosti ztvrdlého betonu*. Diplomová práce. Adam HUBÁČEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2025.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Studium závislosti provzdušnění v čerstvém betonu a trvanlivosti ztvrdlého betonu* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 1. 2026

Bc. Kristýna Chaloupková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Adamu Hubáčkovi, Ph.D. za cenné odborné rady a čas, který mi v průběhu jejího zpracování věnoval. Dále bych ráda poděkovala ostatním členům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, zejména spolupracovníkům ze zkušebny na AdMaSe. V neposlední řadě bych ráda poděkovala mé rodině a kamarádům za jejich pomoc a podporu.

OBSAH

ÚVOD	12
CÍL PRÁCE	13
TEORETICKÁ ČÁST	14
1 PROVZDUŠNĚNÉ BETONY	15
2 PROVZDUŠŇOVACÍ PŘÍSADY.....	16
3 TRVANLIVOST BETONU	16
4 STANOVENÍ PARAMETRŮ PÓROVÉHO SYSTÉMU BETONU.....	20
4.1 Stanovení parametrů pórového systému v čerstvém betonu (ČB)	21
4.2 Stanovení parametrů pórového systému ve ztvrdlém betonu (ZB).....	25
4.3 Porovnání metod	30
5 STANOVENÍ TRVANLIVOSTI BETONU NAMÁHANÉHO MRAZEM A CHRL ..	31
5.1 Stanovení trvanlivosti betonu namáhaného mrazem.....	31
5.2 Stanovení trvanlivosti betonu namáhaného mrazem a CHRL	31
6 STANOVENÍ TRVANLIVOSTI BETONU – POSTUPY POUŽÍVANÉ V ZAHRANIČÍ	34
6.1 Německo	35
6.2 Finsko.....	36
6.3 Spojené státy americké (USA).....	36
6.4 Kanada	37
7 ZÁVISLOST PÓROVÉHO SYSTÉMU BETONU NA JEHO ODOLNOSTI PROTI CHRL.....	37
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
8 METODIKA PRÁCE.....	40
9 VLASTNOSTI VSTUPNÍCH SUROVIN.....	43
9.1 Zkušební postupy	43
9.2 Vyhodnocení.....	44
10 VLASTNOSTI BETONU – ZKUŠEBNÍ POSTUPY.....	45
11 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	49
12 RECEPTURY BETONU	51
13 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK.....	53
13.1 Vyhodnocení jednotlivých receptur	53
13.2 Porovnání základních vlastností betonů.....	81
13.3 Porovnání parametrů vnitřní struktury betonu	86
13.4 Porovnání odolnosti betonu proti CHRL.....	95
14 PREDIKČNÍ MODELY ZÁVISLOSTI MEZI PROVZDUŠNĚNÍM BETONU A JEHO ODOLNOSTÍ PROTI CHRL	100
14.1 Model A – Závislost mezi mikroskopickou analýzou a trvanlivostí betonu zkoušené na původním povrchu.....	102

14.2 Model B – Závislost mezi mikroskopickou analýzou a trvanlivostí betonu zkoušené na povrchu vzniklém pomocí teflonové vložky	106
14.3 Model C – Závislost mezi metodou AVA a trvanlivostí betonu zkoušené na původním povrchu.....	107
14.4 Shrnutí predikčních modelů	108
ZÁVĚR.....	110
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	113
SEZNAM OBRÁZKŮ	118
SEZNAM GRAFŮ	121
SEZNAM TABULEK.....	123
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	125
PŘÍLOHA 1 – VÝPOČETNÍ KÓD – MODEL A1.....	126

ÚVOD

Beton je v dnešní době nejpoužívanější stavební materiál. Skládá se z pojiva, plniva, vody, případně přísad a příměsí. Pro konstrukce vystavené mrazovému namáhání za přítomnosti vody nebo chemických rozmrazovacích látek se používají provzdušněné betony. Do čerstvého betonu se uměle vkládají vzduchové póry přidáním tzv. provzdušňovacích přísad.

Odolnost betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám je významná zejména u silničních staveb, kde se v zimních měsících používá posypová sůl ke snižování bodu tuhnutí vody a k omezení tvorby ledu a sněhové vrstvy. Současné zkušební metody však vykazují řadu nepřesností, které se projevují vysokou variabilitou výsledků, s opakovatelností a reprodukovatelností dosahující až 500 %. Naměřené hodnoty jsou značně kolísavé a nelze z nich spolehlivě určit, zda bude posuzovaný beton skutečně trvanlivý.

Z těchto důvodů jsou hledány alternativní postupy, které by byly schopny lépe stanovit trvanlivost betonů. Jednou z možností je stanovení parametrů vzduchových pórů, jako je Spacing factor nebo také obsah vzduchových pórů do velikosti 300 μm . Tyto parametry dokážou předpovědět, zda bude beton mrazuvzdorný, avšak jejich souvislost s odolností betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám dosud nebyla prokázána. Tvar, velikost a rozložení vzduchových pórů se stanovuje mikroskopickou analýzou na ztvrdlém betonu dle ČSN EN 480-11. Další možností hodnocení těchto parametrů je zkouška pomocí AVA přístroje (Air Void Analyzer), pro kterou zatím neexistuje závazný normový postup. Jedná se o obdobu zkoušky Spacing factoru pro čerstvý beton. Významnou výhodou této metody je možnost provádět měření na čerstvém betonu a získat výsledky ještě v době, kdy lze recepturu případně upravit.

CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je zjistit závislost mezi provzdušněním čerstvého a ztvrdlého betonu a jeho trvanlivostí ve stupni vlivu prostředí XF (mrazové namáhání za přítomnosti vody nebo chemických rozmrazovacích látek).

V teoretické části budou shrnuty dosavadní znalosti o betonech vystavených mrazovému namáhání a zkušební postupy, pomocí kterých se jejich trvanlivost zjišťuje. Dále budou shrnuty informace o parametrech provzdušnění v čerstvém i ztvrdlém betonu, včetně metod potřebných ke zjištění těchto vlastností. Závěrem této části diplomové práce bude přehled současných poznatků o vztahu mezi trvanlivostí betonu a jeho provzdušněním.

V praktické části bude experimentálně ověřen vztah mezi různými parametry provzdušnění betonu a jeho odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám. Pozornost bude zaměřena i na vztah mezi parametry vzduchového systému betonu stanovenými v čerstvém a ztvrdlém betonu pomocí metody AVA a mikroskopie. Současně bude hodnocen i vliv úpravy zkušebního povrchu na zkoušku odolnosti betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám. Cílem experimentu je také sestavení matematického modelu případné závislosti mezi provzdušněním betonu a jeho trvanlivostí v prostředí XF4.

TEORETICKÁ ČÁST

1 PROVZDUŠNĚNÉ BETONY

Provzdušněné betony jsou speciálním druhem betonů, do kterých je během míchání záměrně vnesen systém mikroskopických vzduchových pórů menších než 300 μm . Hlavním účelem provzdušnění je zvýšení odolnosti betonu proti cyklickému zmrazování a rozmrazování za přítomnosti vody nebo chemických rozmrazovacích látek (CHRL). Při zamrznání voda zvětšuje svůj objem přibližně o 9 %. U neprovzdušněných betonů se voda nemá kam rozpínat a dochází k mrazovému porušení betonu, které je znázorněno na obr. 1. Tento problém je řešen vytvořením sítě mikropórů, které slouží jako retenční prostor. Kapilární póry nejsou zcela zaplněny vodou, a proto při expanzi vody během skupenské přeměny dochází k výrazně menšímu, případně žádnému, porušení betonu. [1; 2; 3; 4; 5; 6]



Obr. 1 - Nárůst objemu vody při skupenské přeměně a vznik trhlin v cementové matrici [8]

Provzdušněné betony se používají zejména v konstrukcích, které jsou vystaveny extrémnímu mrazovému namáhání, například vozovky, mostní konstrukce, letištní plochy, prefabrikáty, vodohospodářské stavby nebo obvodové pláště. Dle ČSN EN 206 + A2 se provzdušněný beton používá pro konstrukce navrhované ve třídě prostředí XF. Toto prostředí má 4 stupně, stupně XF1 a XF3 bez vlivu rozmrazovacích látek a stupně XF2 a XF4 s vlivem rozmrazovacích látek. [4; 1]

Provzdušněný beton dosahuje požadovaných vlastností při vneseném provzdušnění zpravidla mezi 4–8 %. Obsah vzduchu v betonu má přímý vliv na jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti. Zvýšení provzdušnění o 1 % odpovídá ztrátě 28denní pevnosti v tlaku přibližně o 2–3 %. S rostoucím obsahem vzduchu tedy klesá hodnota pevnosti betonu v tlaku, ale i modul pružnosti (statický a dynamický). Naopak provzdušnění působí kladně na zpracovatelnost čerstvého betonu (ČB). [2; 4; 3]

Kromě celkového obsahu vzduchu je pro mrazuvzdornost betonu podstatná také struktura systému vzduchových pórů. Klíčovým ukazatelem je tzv. Spacing faktor, který určuje vzdálenost z jakéhokoli bodu cementové matrice k okraji nejbližšího póru. [7; 6]

2 PROVZDUŠŇOVACÍ PŘÍSDADY

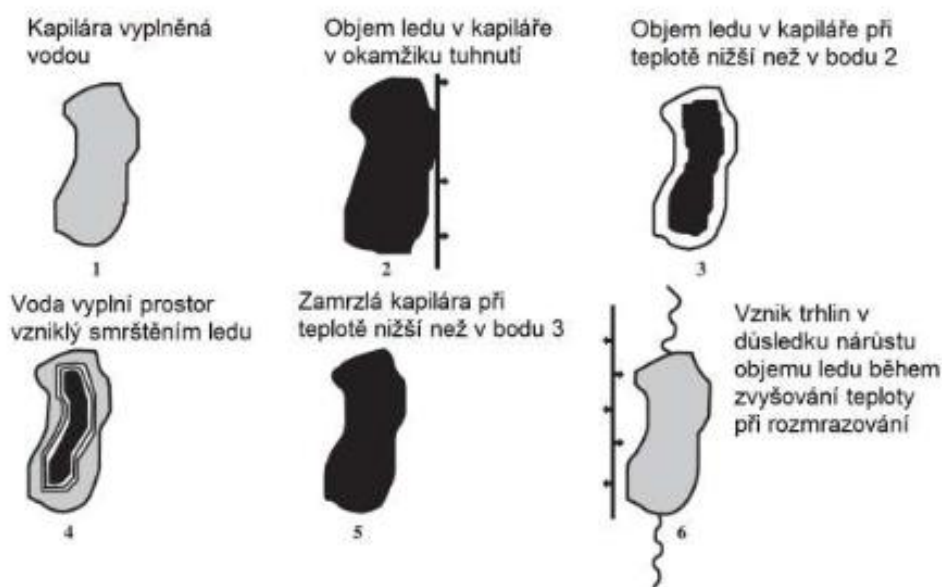
Jedná se o přísady, které umožňují vznik a stabilizaci kulovitých a uzavřených mikropórů (většinou o rozměru 10–300 μm) rovnoměrně rozptýlených v cementové matici. Póry zůstávají zachované i po zatvrdnutí betonu a vytvářejí ochranný systém dutin. Provzdušňovací přísady působí jako povrchově aktivní látky (tenzidy). Snižují povrchové napětí vody, stabilizují vzduchové póry vzniklé při míchání a zároveň zabraňují jejich slučování. [8; 9]

Dříve se jako provzdušňovací přísady používaly přírodní látky, dnes se využívají převážně syntetické tenzidy. Mezi používané látky patří zmýdelněné pryskyřice, Lignin-sulfonáty, syntetické povrchově aktivní látky (alkylsulfáty, alkylarylsulfonáty) nebo vedlejší produkty chemického a papírenského průmyslu. [10]

3 TRVANLIVOST BETONU

PŮSOBENÍ MRAZU NA BETON

Voda při přechodu do pevného skupenství zvětšuje svůj objem asi o 9 %. Pokud jsou póry v betonu téměř nebo zcela nasyceny vodou, dochází při změně skupenství vody k expanznímu tlaku, který převyšuje pevnost cementové matrice, což vede k mikrotrhlinám. Při opakovaném mrazovém namáhání se trhliny propojují, dochází k odlupování povrchových vrstev až ke ztrátám pevností betonu. Obr. 2 zobrazuje chování vody v pórech při změně skupenství. [7; 11]



Obr. 2 - Chování vody a ledu v kapilárním póru při cyklickém mrazovém namáhání [7]

Problém nastává při tzv. kritické nasycenosti. Jedná se o hranici, při které začne poškození betonu rychle narůstat. Pokud je nasyceno méně než přibližně 80 % objemu pórů, projevuje se mrazové poškození minimálně. Vyšší nasycenost je typická u konstrukcí, které jsou v kontaktu s vodou, například mostovky, komunikace či přehrad. [11]

Opakovaným působením mrazu se snižuje modul pružnosti, pevnost v tahu za ohybu i v tlaku. Roste propustnost betonu, která umožňuje průnik dalších agresivních médií, například chloridů či oxidu uhličitého. Nakonec může dojít až k destrukci konstrukce. [12]

PŮSOBENÍ MRAZU ZA PŘÍTOMNOSTI CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK NA BETON

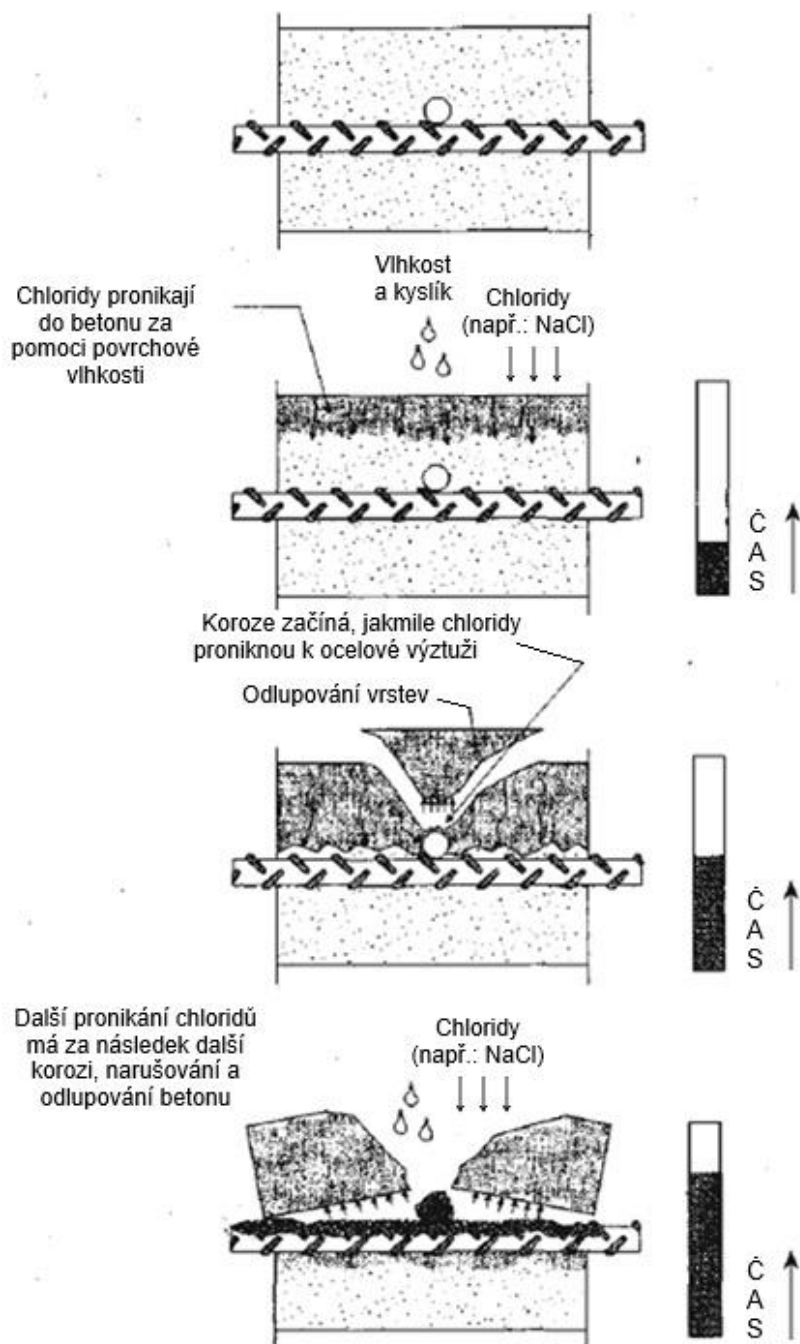
Chemické rozmrazovací látky (CHRL) jsou chemické prostředky používané zejména k ošetřování komunikací v zimním období, kdy zabraňují namrznání silnic. CHRL snižují bod tuhnutí vody. Voda v pórech zamrzne při teplotách nižších než 0 °C. Tento proces má nepříznivý vliv na beton. Snížením bodu tuhnutí se rozšiřuje teplotní interval, v němž v pórech betonu probíhá zmrazování a rozmrazování. Beton je proto vystaven cyklům zmrazování a rozmrazování v širším a časově delším teplotním intervalu, což zvyšuje intenzitu jeho namáhání a vede k většímu poškození. [11; 6]

Působení CHRL na beton se nejčastěji projevuje tzv. odlupováním povrchové vrstvy (scaling). K odlupování dochází v důsledku kombinace osmotického tlaku roztoků soli a cyklického zmrazování. Namáhání za přítomnosti CHRL probíhá současně s cyklickým střídáním teplot. CHRL obsahují alkalické ionty (zejména Na^+ a K^+), které při opakovaném kontaktu betonu s roztoky těchto solí pronikají do pórového systému. Zvýšený obsah mobilních alkálií pak může v přítomnosti kameniva obsahujícího amorfni SiO_2 přispět k iniciaci nebo urychlení alkalicko-křemičité reakce, jež vede k expanzi a tvorbě trhlin. [11; 6; 13]

Kombinované působení CHRL a zmrazovacích cyklů má synergický efekt, který urychluje vznik povrchového poškození. Narušení povrchové vrstvy zároveň usnadňuje další pronikání roztoků a postupný rozvoj degradace do hlubších vrstev betonu, než by nastal při izolovaném působení jednotlivých vlivů. [12; 6]

Rozmrazovací soli obsahují chloridy, které při proniknutí do betonu způsobují depasivaci výztuže. V kombinaci s trhlinami, které způsobil mráz, je proces koroze značně urychlen. Tímto namáháním nejvíce trpí stavby dopravní infrastruktury (mosty, vozovky,

letištní plochy). Poškození se projevuje odlupováním povrchové vrstvy, ztrátou krytí a následnou korozí výztuže, jak je znázorněno na obr. 3. [12; 11]



Obr. 3 - Koroze výztuže za přítomnosti mrazu a CHRL [14]

VLIV SLOŽENÍ BETONU A PŘÍRAD

Nejvýznamnější vliv na mrazuvzdornost betonu má účinné provzdušnění (přítomnost mikroskopických pórů o rozměru 10–300 μm), které působí jako retenční prostor při expanzi vody během zamrznutí. Optimální dávka provzdušňovací přísady, která působí

pozitivně při mrazovém namáhání a zároveň výrazně neovlivňuje další důležité vlastnosti betonu, je 0,02 až 0,6 % z množství cementu (dle potřeb projektu mohou být použity i vyšší dávky). Nedostatečné nebo nerovnoměrné provzdušnění, projevující se zvýšenou hodnotou Spacing factoru, snižuje mrazuvzdornost betonu. [1; 6; 15]

Dalším faktorem, který ovlivňuje odolnost betonu proti mrazuvzdornosti, je vodní součinitel. Při nižším vodním součiniteli obsahuje matrice méně kapilárních pórů a je hutnější. Beton je méně nasákový, a tedy méně náchylný k mrazovému porušení. ČSN EN 206 + A2 uvádí maximální vodní součinitel pro třídy XF1 a XF2 0,55, pro třídu XF3 0,50 a pro třídu XF4 nejpřísnějších 0,45. [16; 17]

Minerální příměsi mohou také pozitivně ovlivnit trvanlivost betonu. Popílek a struska snižují propustnost cementového kompozitu, čímž omezují průnik chloridových iontů (Cl⁻). Tento efekt je doplněn pucolánovou reakcí, která snižuje množství volného Ca(OH)₂ a vede ke zhutnění mikrostruktury. Popílek však není vhodný pro použití do prostředí XF, protože zpomaluje nárůst raných pevností a může zhoršit účinnost provzdušňovacích přísad, což vede ke snížení mrazuvzdornosti betonu. Normy ČSN EN 206 + A2 a ČSN P 73 2404 použití popílku v tomto prostředí významně limitují. Mikrosilika zjemňuje pórovou mikrostrukturu a zvyšuje odolnost proti působení CHRL a pronikání chloridů. [1; 16; 17; 18]

TECHNOLOGICKÁ OPATŘENÍ PRO ZAJIŠTĚNÍ TRVANLIVOSTI BETONU

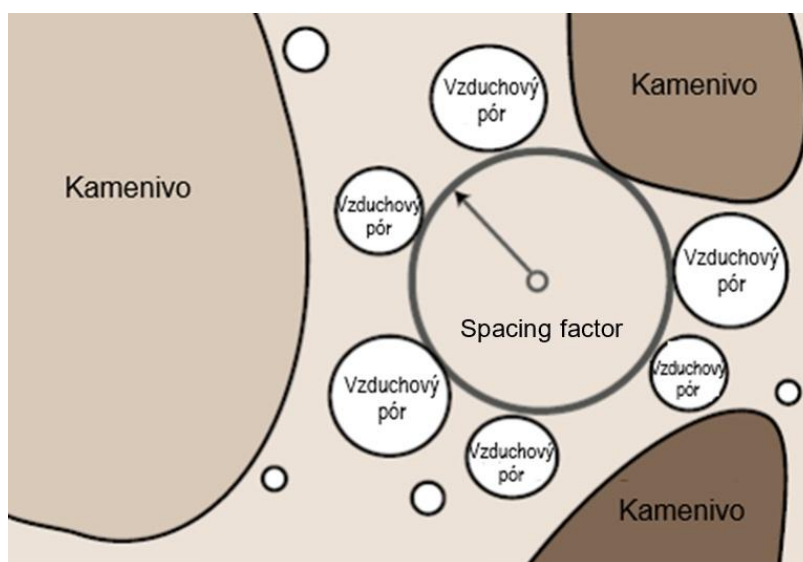
Pro konstrukce, které ohrožuje mrazové namáhání, případně CHRL, tedy konstrukce nacházející se v prostředí XF, je důležité použít ČB vhodného složení. Doporučuje se použít cementy s nižším obsahem C₃A. Případně recepturu doplnit o strusku či mikrosiliku. Zásadní je použít provzdušňovací přísadu v doporučené optimální dávce (0,02-0,6 % z množství cementu) a udržet nízký vodní součinitel (prostředí XF4 vodní součinitel maximálně 0,45). Během betonáže je důležitá pravidelná kontrola, zda dodávaný beton odpovídá požadavkům norem a specifikacím uvedeným v projektu. [15; 17; 16; 1]

Silně namáhané či již porušené konstrukce je možné ošetřit prvky sekundární ochrany. Před použitím jakéhokoli přípravku je nutné provést diagnostiku konstrukce. Vhodné jsou například nátěry na bázi silanů či lněných olejů, které omezují pronikání vody a chloridů. [12; 6]

4 STANOVENÍ PARAMETRŮ PÓROVÉHO SYSTÉMU BETONU

Základní vlastností vzduchového systému v betonu je celkový obsah vzduchu, který udává objemový podíl pórů v čerstvém nebo ve ztvrdlém betonu. Tento ukazatel sám o sobě nevypovídá o kvalitě provzdušnění, které je potřebné pro zajištění mrazuvzdornosti betonu. [19]

Z toho důvodu se sleduje i Spacing factor (SF), tedy maximální průměrná vzdálenost z jakéhokoli bodu cementové matrice k okraji nejbližšího póru, který je znázorněný na obr. 4. Tento parametr úzce souvisí s odolností betonu vůči zmrazování a rozmrazování. Při zamrznutí vody v pórech vzniká expanzní tlak. Pokud je SF vysoký a voda musí urazit velkou vzdálenost, dochází k akumulaci expanzního tlaku, který může iniciovat tvorbu mikrotrhlin a následně snižovat pevnost betonů. Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů pro hodnocení vzduchového systému v betonu. Beton se považuje za mrazuvzdorný, pokud hodnota SF nepřesáhne 0,20 mm. [19; 20]

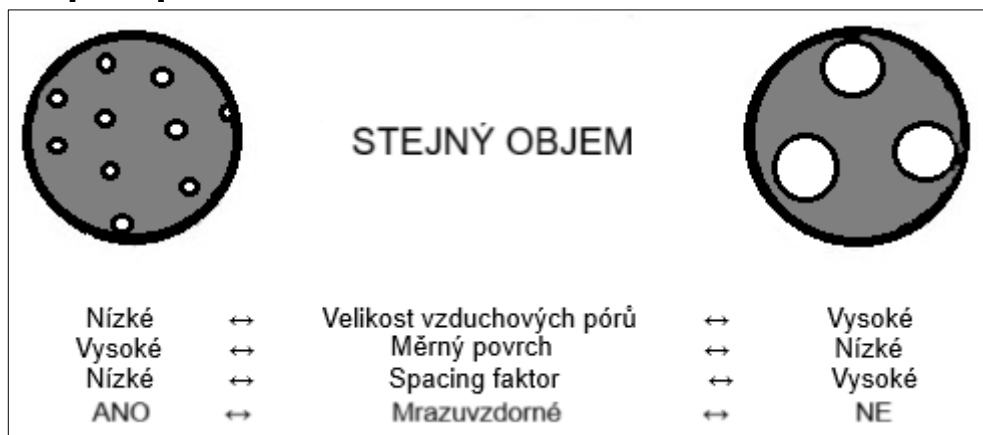


Obr. 4 - Spacing factor [7]

Dalším významným parametrem pórového systému u betonu je měrný povrch vzduchových pórů (v zahraničních textech uváděn jako specific surface), který vyjadřuje poměr celkové plochy povrchu vzduchových pórů k jejich objemu. Nepřímo charakterizuje jemnost a rozdělení pórů. Vysoký měrný povrch znamená, že v betonu je hodně malých pórů. Doporučená hodnota pro mrazuvzdorné betony je $\geq 24 \text{ mm}^{-1}$. Tento parametr úzce souvisí se Spacing factorem:

- Vysoký měrný povrch → Nízký Spacing factor (mrazuvzdorné)
- Nízký měrný povrch → Vysoký Spacing factor (nemrazuvzdorné)

Z toho plyne, že se měrný povrch používá jako doplňující ukazatel pro posouzení mrazuvzdornosti betonů. Vztah mezi velikostí pórů, měrným povrchem a SF je znázorněn na obr. 5. [19; 20]



Obr. 5 - Znázornění vztahu velikosti pórů, měrného povrchu a SF při stejném objemu

Mezi doplňkové parametry pórového systému u betonu patří distribuce velikosti pórů a jejich tvar. Případně poměr mezi objemem cementové tmelu a vzduchovými póry, uváděn pod názvem paste air ratio. [19; 20]

Kombinace těchto ukazatelů poskytuje komplexní obraz o tom, zda je vzduchový systém dostatečně jemný, rovnoměrně rozptýlený a schopný zajistit požadovanou mrazuvzdornost. [19; 20]

4.1 STANOVENÍ PARAMETRŮ PÓROVÉHO SYSTÉMU V ČERSTVÉM BETONU (ČB)

TLAKOVÁ METODA

Základní metodou posuzující obsah vzduchu v betonu je tlaková metoda. Jedná se o jednoduchou a rychlou metodu, která umožňuje stanovit výsledek během několika minut. Používá se pro rutinní kontroly na stavbách a betonárnách. Omezením je, že tato metoda uvádí pouze celkový obsah vzduchu. Neposkytuje informace o velikosti, rozložení a tvaru pórů, tedy o parametrech, které jsou klíčové pro trvanlivost betonu při mrazovém namáhání. Další nevýhodou je, že nelze rozlišit, zda jde o vzduch záměrně vnesený pomocí provzdušňovacích přísad, nebo o vzduch nezáměrně zachycený při ukládání a zhutňování čerstvého betonu. [21; 22]

Zkouška se provádí dle ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Tato norma uvádí 2 různé zkušební postupy – metodu vodního sloupce a tlakoměrnou metodu. V praxi se nejčastěji uplatňuje tlakoměrná metoda, při níž se obsah vzduchu v betonu stanovuje pomocí tlakoměrného hrnce. Příklad zařízení je uveden na obr. 6. [22]



Obr. 6 - Tlakoměrný hrnec

AIR VOID ANALYZER (AVA)

Air void analyzer (AVA) byla vyvinuta v 90. letech v Dánsku, jako metoda umožňující detailnější posouzení vzduchového systému ČB, a rozšířila se především do USA. Na rozdíl od tlakoměrné metody poskytuje i další parametry betonu, například Spacing factor a měrný povrch. Tedy parametry relevantní pro odolnost betonu proti mrazovému namáhání. Velkou výhodou je rychlá kontrola kvality betonu a včasná úprava receptury. Samotná zkouška trvá přibližně 25 až 30 minut. Mezi nevýhody patří vyšší náročnost na obsluhu, nutnost eliminovat vliv hrubého kameniva, citlivost na teplotu a viskozitu kapaliny a variabilitu výsledků při nedostatečně standardizovaném postupu (odchyly jsou zaviněné nepřesným výkladem technologického postupu metody v jednotlivých laboratořích). Z těchto důvodů zůstává základní zkouškou stanovující obsah vzduchu v betonu tlakoměrná analýza. U složitějších staveb vyžadující znalost dalších parametrů vzduchového systému může být využita kombinace tlakoměrné analýzy a metody AVA, což by mohlo částečně nahradit pozdější mikroskopickou analýzu. [20; 23]

Principem metody AVA je uvolnění všech přítomných vzduchových pórů ze vzorku extrahovaného z cementové malty, jejich zachycení, zaznamenání jejich množství a rozdělení dle velikosti. Vzduchové póry se uvolňují ve formě bublinek do viskózní analytické kapaliny, která umožňuje, aby si zachovaly svou původní velikost. Tedy zajišťuje, aby se nespojily ani nerozpadly na menší. Zkušební kapalina je na bázi glycerinu. Vzduchové

bublinky po uvolnění stoupají zkušebním válcem a shromažďují se pod ponořenou záchytnou miskou. Rychlost stoupání bublinek kapalinou závisí na jejich velikosti. Dle Stokesova zákona velké bublinky stoupají rychleji než malé. Viskozita analytické kapaliny zpomaluje počáteční stoupání bublinek a zajišťuje měřitelný odstup. Na základě zavedené empirické kalibrace se vypočítají kvantitativní a kvalitativní parametry:

- Obsah vzduchu v bublinkách menších než 3 mm
- Obsah vzduchu v bublinkách menších než 1,5 mm
- Obsah vzduchu v bublinkách menších než 0,5 mm
- Měrný povrch vzduchových bublinek
- Spacing factor stanovený metodou AVA

Obsah vzduchu se stanovuje v objemových procentech betonu, cementové pasty a tmelu (tmel je definován jako cementová pasta včetně vzduchových dutin). Systém vykazuje nejpřesnější výsledky u betonu s obsahem vzduchu od 3,5 do 10 %. [23; 20]

Pro zkoušení ČB pomocí metody AVA zatím není schválena žádná mezinárodně uznaná norma. Postup je popsán pouze v metodických materiálech výrobce zařízení a ve výzkumných zprávách (např. FHWA, CP Tech Center). Zkušební zařízení AVA je znázorněné na obr. 7. [20; 24; 25]



Obr. 7 – Zkušební zařízení AVA [25]

Voda používaná při zkoušce

Metoda AVA je citlivá na podmínky, za kterých zkouška probíhá, například na umístění zařízení (musí být na rovné ploše bez otřesů), typu použité vody a teplotě vody i zkušební kapaliny. Vliv používané vody se může projevit dvěma způsoby:

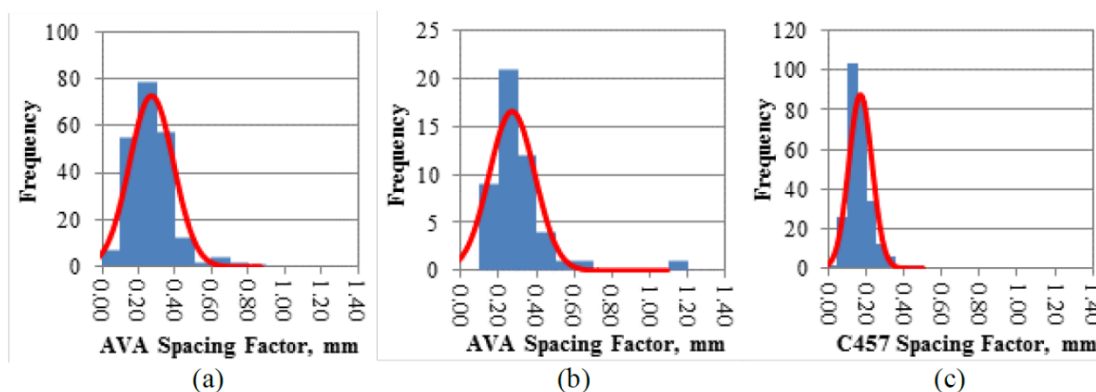
1. Fyzikálními vlastnostmi – zejména viskozitou a teplotou, které určují rychlost vzestupu bublinek dle Stokesova zákona
2. Chemickými vlastnostmi zdroje vody – rozdílným složením nebo obsahem rozpuštěných plynů

Fyzikální vliv je vyloučen požadavky metodiky na vodu odvzdušněnou a temperovanou na teplotu 21–25 °C. Chemický vliv však eliminován není. [26; 27; 28]

Voda z vodovodního řadu (pitná) obsahuje různé soli a další látky, které pomáhají udržet bublinky menší a stabilní. To je sice výhodné, ale protože se složení pitné vody liší podle místa původu, mohou být výsledky jednotlivých laboratoří rozdílné. Destilovaná voda neobsahuje soli, bublinky se tedy mohou spojovat do větších, což může ovlivnit výsledek zkoušky. Navíc při delším stání pohlcuje oxid uhličitý ze vzduchu, a tím mění své vlastnosti. Deionizovaná voda je podobně „čistá“ jako voda destilovaná, ale vykazuje vyšší stabilitu. Z těchto důvodů je pro praktické využití nevhodnější. [27; 29; 26]

Výrobce zařízení ve své dokumentaci k přístroji zdůrazňuje potřebu použít vodu odvzdušněnou a temperovanou na správnou teplotu. Z tohoto důvodu je přístroj vybaven nádrží o objemu 35 l, která umožňuje vodu upravit na požadovanou teplotu a současně z ní odstranit rozpuštěné plyny. Typ vody výrobce nenařizuje, pouze odkazuje na požadavky ASHTO (metodický předpis zkoušky) – pitná a odvzdušněná voda. [27]

Zkušenosti z praxe ale ukazují, že volba konkrétního zdroje vody může mít měřitelný vliv na výsledky. Kansas Department of Transportation (KDOT) dříve používal při testech vodu z veřejných zdrojů města Salina (vodovodní řad a vrty), ale zaznamenal větší variabilitu výsledků. V pozdější fázi projektu porovnali výsledky získané s pomocí pitné a deionizované vody. Průměrný Spacing factor s pitnou vodou vyšel 0,271 mm se směrodatnou odchylkou 0,120 mm, zatímco u deionizované vody to bylo 0,305 mm se směrodatnou odchylkou 0,158 mm. Porovnání pomocí histogramů je znázorněno na obr. 8, pro srovnání je jeden graf věnován i mikroskopické analýze. V této sadě dat nebyl rozdíl výrazně statisticky významný. Nicméně zkušenosti s abnormálně vysokými hodnotami při použití pitné vody vedli KDOT k tomu, že od té doby používá při zkoušce AVA výhradně deionizovanou vodu. [29]



Obr. 8 – Histogram Spacing factoru, hodnoty získané: (a) metoda AVA s pitnou vodou, (b) metoda AVA s deionizovanou vodou, (c) mikroskopická analýza dle ASTM C457 [29]

Některé materiály konstatují, že zdroj vody je jedním z potenciálních faktorů variability výsledků. Proto doporučují standardizaci podmínek a používání stále stejného zdroje vody, což je důležité zejména při mezilaboratorních porovnávacích zkouškách (MPZ). Konkrétní zmínky o destilované vodě se objevují pouze okrajově, a to zejména v souvislosti s jejím použitím jako alternativou k vodě pitné. Většina laboratoří se proto přiklání buď k vodě pitné nebo vodě deionizované – a to z důvodu vyšší opakovatelnosti a stability výsledků. [26]

4.2 STANOVENÍ PARAMETRŮ PÓROVÉHO SYSTÉMU VE ZTVRDLÉM BETONU (ZB)

Mikroskopická analýza ZB umožňuje stanovit nejen celkový obsah vzduchu, ale i další vlastnosti jako Spacing factor, měrný povrch, distribuci i tvar pórů. Výsledky této zkoušky poskytují komplexní pohled na kvalitu provzdušnění a jeho vliv na trvanlivost konstrukce. Jde o nejrozšířenější a v současné době také nejpřesnější zkušební metodu, která je schopná stanovit uvedené parametry. [19; 30; 29; 31]

Velkou výhodou je vysoká přesnost a komplexnost této zkušební metody. Výsledky jsou široce akceptovány v praxi i výzkumu a slouží jako podklad pro porovnání novějších metod. Nevýhody metody souvisejí především s časovou a technickou náročností. Zkouška se provádí na ZB, takže konstrukce jsou při ověřování SF a dalších vlastností vzduchových pórů již dokončené. Příprava vzorků je zdlouhavá a může trvat i několik dní. Následné vyhodnocení zabere několik dalších hodin. Pokud vzorky nejsou připraveny kvalitně, stává se vyhodnocení obtížným až nemožným. Metoda navíc klade vyšší nároky na kvalitu obsluhy, protože subjektivní vliv hodnotitele může významně ovlivnit přesnost měření. Z těchto důvodů se vyvíjejí i automatizované metody (např. RapidAir). [19; 30; 29; 31]

MANUÁLNÍ ANALÝZA

Zkouška se provádí dle ČSN EN 480-11 nebo její americké obdoby ASTM C457. Obě normy si jsou velmi podobné – vyžadují výbrus ze ztvrdlého betonu a určují celkový obsah vzduchu, měrný povrch, Spacing factor i distribuci velikosti pórů. Zároveň oba postupy používají podobné způsoby vyhodnocení. Rozdíly mezi nimi jsou spíše formální a vycházejí z geografického kontextu. Lišit se mohou v některých detailech postupu a výpočtů. [19; 32]

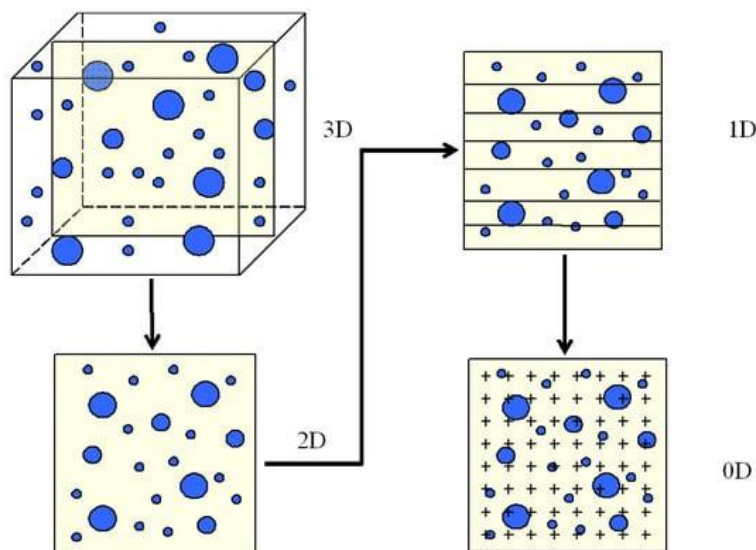
Princip metody spočívá v přípravě naleštěných výbrusů betonového vzorku, jejichž povrch se opatří kontrastním nátěrem a vzduchové póry se vyplní vhodným materiálem pro jejich optické zvýraznění. Takto upravené vzorky jsou podrobeny mikroskopické analýze za použití přímkové metody, jejíž princip je podrobně popsán v následujícím odstavci. Pro vyhodnocení jednoho vzorku se zpracovávají dva samostatné výbrusy, tedy výsledné parametry pórového systému vycházejí z analýzy dvou zkušebních těles. Software následně vyhodnotí parametry charakterizující pórový systém zkoušeného betonu. [19; 32]

Principem přímkové metody je sledování průběhů zkušebních přímek a zaznamenání úseků, kde přímka prochází vzduchovými póry. Na základě jejich četnosti a délky se stereologicky odvozují parametry vzduchového systému v betonu. Výhodou je, že postup je detailně popsán v normě a poskytuje srovnatelné výsledky napříč laboratořemi. Nevýhodou je právě přímkový princip, protože nelze ovlivnit, kde přímka pór protne, takže naměřená délka úsečky může být výrazně menší než skutečný průměr póru. Metoda tedy pracuje s distribucí náhodných průsečíků, nikoliv s reálnými průměry pórů a výsledné parametry jsou založené na modelovém stereologickém přepočtu. [19; 32; 31; 33; 31; 34; 35]

Moderní digitální systémy dnes již umožňují i plošnou analýzu, kdy se vyhodnocuje celý obraz nebo jeho část a póry se segmentují jako plošné objekty. Teoreticky je tak možné pracovat s reálnou velikostí a tvarem pórů, nikoliv pouze s délkami průsečíků. Plošná analýza však zatím není popsána v normě a jednotlivé softwarové přístupy se liší algoritmem segmentace a prahováním obrazu. Vzhledem k absenci normalizace se plošná analýza pórů využívá převážně ve výzkumné a laboratorní praxi a není dosud standardní součástí rutinního hodnocení vzduchového systému. [34; 35; 33]

Obr. 9 znázorňuje redukci prostorového uspořádání pórového systému v betonu z reálné 3D struktury na plošnou (2D) a následně na přímkovou analýzu (1D). Poslední bodové schématické zobrazení (0D) naznačuje další úroveň zjednodušení a ilustruje, jak

se při zjednodušování 3D systému postupně ztrácí informace o tvaru a velikosti pórů. Nejedná se o samostatnou analytickou metodu. [34]



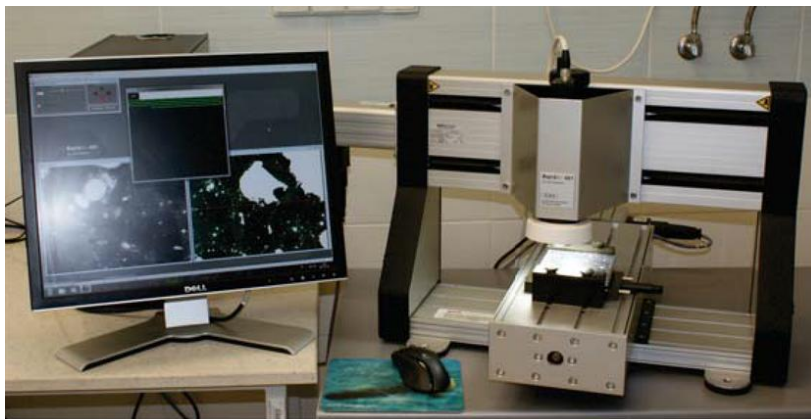
Obr. 9 – Ilustrace převodu skutečné 3D distribuce pórů na 2D plošnou, 1D přímkovou a 0D bodovou analýzu [34]

AUTOMATICKÁ ANALÝZA

Metody nejsou oficiálně samostatně normalizované, obvykle se provádí jako automatické provedení ASTM C457 nebo EN 480-11. Existuje několik variant automatických přístrojů, například – RapidAir 457, Automated Air Void Analysis (AAVA), RapidAir Image Analysis systém, Flabed Scanner Methods nebo 3D mikrofografie. Všechny tyto systémy jsou velmi nákladné. V následující části kapitoly jsou popsány dva příklady – komerčně nejpoužívanější systém RapidAir 457 a AAVA jako příklad výzkumného směru. [30; 28; 33]

RapidAir 457

RapidAir 457 je automatizovaný systém pro analýzu vzduchových pórů v ZB a představuje nejrozšířenější komerčně dostupné řešení. Umožňuje stanovit vlastnosti vzduchových pórů rychleji a s menším vlivem lidského faktoru než klasické manuální metody. Příprava zkušebních vzorků je shodná jako u manuálních metod, ale analýza samotná trvá pouze 10 až 15 minut. Kvalita přípravy vzorku je v tomto případě ještě důležitější, protože automatický program se přizpůsobí hůře než člověk. Malé póry mohou být obtížně rozpoznatelné při nízkém rozlišení nebo špatném kontrastu. Výběr prahové hodnoty v softwaru ovlivňuje to, které póry budou zahrnuty do analýzy. Příklad zařízení RapidAir 457 je zobrazen na obr. 10. [28; 30]



Obr. 10 - RapidAir 457 [36]

Round-Robin studie prokázala velmi dobrou shodu výsledků. Tři vzorky ZB byly rozeslány do sedmi laboratoří, kde došlo k jejich automatické analýze dle ASTM C457. RapidAir vykázal velmi dobrou opakovatelnost a reprodukovatelnost (pojmy jsou vysvětleny v následujícím odstavci) při MPZ, zatímco manuální metody měly větší variabilitu výsledků. Směrodatná odchylka celkového obsahu vzduchu při automatické analýze se pohybovala v rozmezí 0,20 až 0,62 %, oproti tomu směrodatná odchylka u manuálního měření byla v rozmezí od 0,45 do 0,97 %. [30]

Opakovatelnost je schopnost metody poskytovat stejné výsledky, pokud je měření provedeno za stejných podmínek (postup, přístroj, operátor, prostředí). Reprodukovatelnost vyjadřuje těsnost shody výsledků, když se podmínky měření mění. [37]

AAVA (automated air void analysis)

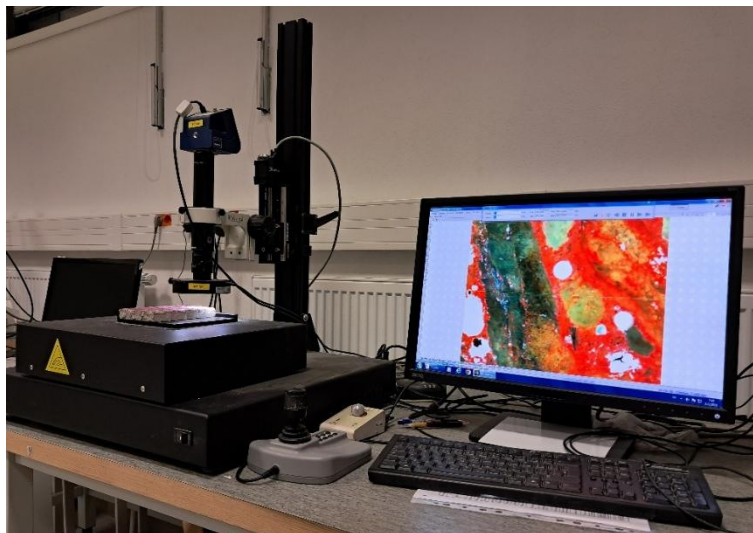
AAVA byla vyvinuta v akademickém prostředí na Iowa State University. Systém představuje spíše výzkumnou alternativu a v současné době nemá komerční využití. Svými vlastnostmi je podobný systému RapidAir, avšak jeho výsledky jsou méně přesné a pouze se blíží manuálnímu vyhodnocení. [31; 33]

Principem metody je snímání vzorku pomocí digitálního mikroskopu s vysokým rozlišením, přičemž software automaticky analyzuje obrazy pórů. Určují se hranice jednotlivých vzduchových dutin, jejich velikost a distribuce. Na základě těchto údajů se vy počítají parametry vzduchového systému. [31; 33]

SEMIAUTOMATICKÁ ANALÝZA

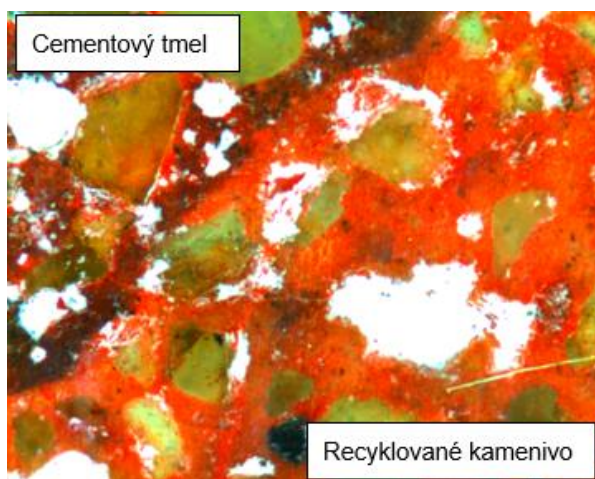
Semiautomatická analýza představuje kombinaci klasické manuální metody a prvků automatizace využívaných u moderních digitálních systémů. Prakticky to znamená, že posun vzorku a generování soustavy měřících přímek zajišťuje automatizované zařízení, ale rozhodování o pórech zůstává manuální. Hodnotitel ručně identifikuje

průsečíky s měřicími přímkami a zařazuje nebo vylučuje sporné objekty. Tento postup zachovává normový princip přímkové metody, ale snižuje časovou náročnost vyhodnocení a zároveň minimalizuje chyby vznikající při ručním posouvání vzorku. Měřící zařízení je zobrazené na obr. 11. [19; 32; 33; 30; 31; 34; 35]



Obr. 11 – Zařízení pro mikroskopickou analýzu

Automatické softwary často narážejí na problém nestabilního prahování obrazu, kdy algoritmus nedokáže spolehlivě odlišit skutečné vzduchové póry od světlých oblastí v matici nebo dutin uvnitř kameniva. Z tohoto důvodu je semiuautomatická metoda vhodná například u betonů s lehkým či recyklovaným kamenivem, kde je lidský úsudek nezbytný pro správnou identifikaci pórů. Problematika měření parametrů vzduchového systému u betonu s recyklovaným kamenivem je znázorněná na obr. 12. [19; 32; 33; 30; 31; 34; 35]



Obr. 12 - Snímek hranice mezi recyklovaným kamenivem a cementovým tmelem při mikroskopické analýze

4.3 POROVNÁNÍ METOD

Tlakoměrná metoda umožňuje jednoduchou kontrolu obsahu vzduchu, ale neposkytuje informace o rozložení a distribuci velikosti vzduchových pórů. Podrobnější údaje lze získat pomocí metody AVA, která umožňuje u ČB stanovit parametry srovnatelné s těmi, jež se obvykle určují až mikroskopickou analýzou na ZB. Ačkoli deionizovaná voda při analýze AVA poskytuje z hlediska reprodukovatelnosti výsledků nejspolehlivější podmínky, pořízení zařízení pro její přípravu představuje dodatečný náklad. Z tohoto důvodu je v běžné praxi nejčastější volbou voda pitná.

Mikroskopická analýza zůstává nejrozšířenější metodou, zejména v semiautomatickém provedení. Moderní alternativu představuje automatická analýza za pomoci softwaru RapidAir 457, která podle Round-Robin studie vykazuje výbornou opakovatelnost i reprodukovatelnost. Nevýhodou je však vysoká pořizovací cena zařízení, a tedy i samotné zkoušky. [30]

Výsledky AVA a mikroskopické analýzy se ne vždy shodují. Například studie Iowa DOT ukázala, že Spacing factor stanovený metodou AVA bývá v průměru 1,5–1,7krát vyšší než při mikroskopické analýze, což odpovídá méně příznivému hodnocení pórového systému betonu. AVA tedy hodnoty nadhodnocuje, což lze považovat za přijatelné, protože se tím zachová bezpečná rezerva. Pokud však výsledná hodnota překročí stanovený limit SF, je vhodné výsledek ověřit mikroskopickou analýzou. Do budoucna by bylo možné stanovit mezní hodnotu, při jejímž splnění by nebylo nutné provádět mikroskopickou analýzu, což by snížilo náklady. [29]

Doporučený postup pro významné konstrukce vystavené účinkům mrazu je kombinace následujících metod:

- Tlakoměrná metoda – slouží k rychlé kontrole
- Metoda AVA – použití dle potřeby pro podrobnější posouzení
- Mikroskopická analýza (semiautomatická metoda) – představuje finální ověření

5 STANOVENÍ TRVANLIVOSTI BETONU NAMÁHANÉHO MRAZEM A CHRL

5.1 STANOVENÍ TRVANLIVOSTI BETONU NAMÁHANÉHO MRAZEM

Stanovení odolnosti betonu za přítomnosti mrazového namáhání se v České republice (ČR) využívá méně často, v praxi se obvykle hodnotí zejména trvanlivost betonu za přítomnosti CHRL. Pro stanovení mrazuvzdornosti existují 2 různé normy:

- ČSN 73 1322/Z1 – Stanovení mrazuvzdornosti betonu
- ČSN 73 1380 – Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – porušení vnitřní struktury

V ČR se nejčastěji používá zkušební postup dle ČSN 73 1322/Z1. Zkouška spočívá ve střídavém zmrazování a rozmrazování vodou nasycených betonových trámů. Počet zkušebních těles se určuje podle počtu zkušebních cyklů a mezilehlých kontrol. Je zapotřebí jedna sada tří referenčních vzorků a samostatná sada pro každou případnou mezilehlou kontrolu. Výsledkem zkoušky je součinitel mrazuvzdornosti. Jedná se o poměr pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků ku vzorkům, které prošly cyklickým střídáním teplot (20 a -20 °C). Beton je považován za mrazuvzdorný pro stanovený počet cyklů, pokud součinitel mrazuvzdornosti neklesne pod 0,75 respektive 75 % z původní pevnosti v tahu za ohybu. Dalším sledovaným parametrem je úbytek hmotnosti, který nesmí překročit 5 %. [38; 39; 40; 6]

5.2 STANOVENÍ TRVANLIVOSTI BETONU NAMÁHANÉHO MRAZEM A CHRL

Odolnost betonu proti mrazovému namáhání za přítomnosti CHRL se v ČR stanovuje dle zkušebního postupu uvedeného v ČSN 73 1326/Z1 – Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Kvůli vysoké variabilitě výsledků se jedná o jednu z nejdiskutovanějších zkoušek. Současná norma popisuje 3 různé zkušební postupy:

- Metoda automatického cyklování I (Metoda A)
- Metoda ruční manipulace se vzorky (Metoda B) – dnes se již nepoužívá
- Metoda automatického cyklování II (Metoda C)

Princip metody spočívá ve vystavení povrchu ztvrdlého betonu působení roztoku chemické rozmrazovací látky během opakovaných cyklů zmrazování a rozmrazování. [41; 42]

Zkušební postup dle metody A umožňuje stanovit trvanlivost betonu na tělesech tvaru krychle nebo válce. Zkušební tělesa jsou ponořena do 3% roztoku NaCl a následně jsou vystavena cyklickému střídání teplot mezi +20 °C a -15 °C. Doba trvání jednoho cyklu je přibližně 2 hodiny. Vzorky během zkoušky jsou zobrazeny na obr.13. Zpravidla po každých 25 cyklech je zjišťovaná hmotnost odloučených částic. Výsledkem zkoušky je množství odpadu přepočtené na jednotku plochy. Zkouška se ukončuje po dosažení předepsaného počtu cyklů, nebo pokud je překročeno mezní množství odpadu, normou stanovené na 3 000 g·m⁻² (což odpovídá odloupení částic v množství přibližně 70 g ze zkušební plochy o rozměrech 150 × 150 mm – zkušební krychle). [41]



Obr. 13 – Vzorky během zkoušky stanovení odolnosti betonu proti CHRL metodou A

Metoda C je určena výhradně pro válcová zkušební tělesa, která jsou před zkouškou opatřena vodotěsnou objímkou vymezující zkušební povrch. Na rozdíl od metody A nejsou boční strany hodnotícím povrchem a zkušební plocha je orientována směrem nahoru. Roztokem se zalívá povrch a teplota je přenášena gradientem, nikoli miskou v přímém kontaktu s chladícím roztokem jako u předchozí metody. Vzorky jsou umístěny do klimatické komory, kde dochází k cyklickému střídání teplot mezi +5 °C a -18 °C. Jeden cyklus je přibližně třikrát delší než u předchozí metody a trvá přibližně 6 hodin. Vyhodnocení, hodnotící intervaly i limitní kritéria jsou shodné s metodou A. [42]

Alternativou jsou zkušební postupy definované v normě ČSN P CEN/TS 12390-9 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování v rozmrazovacích solích – Odlupování. Norma umožňuje 3 alternativní zkušební postupy:

- Zkouška na desce (Slab test) – referenční postup
- Zkouška na krychli
- Zkouška CF/CDF

Všechny 3 postupy jsou pracné a časově náročné. Jediný využívaný je referenční postup na desce, a i ten pouze okrajově. Zkouška stanovuje spíše kvalitativní než kvantitativní parametry. [43]

Problematika zkušebních metod

Opakovatelnost a reprodukovatelnost těchto zkušebních postupů je diskutovaným tématem, protože dochází k častým sporům týkajícím se kvality zkoumaného betonu. V rámci této kapitoly se zaměřím pouze na často používané postupy – metody A a C definované v ČSN 73 1326/Z1. Formulace některých ustanovení normy umožňuje různé interpretace, což může komplikovat dosažení plně srovnatelných výsledků. [41; 42; 44]

Receptura zkušebního roztoku není přesně formulována, uvádí se pouze, že má jít o vodu a sůl, tak aby bylo dosaženo 3% roztoku. Existují různé alternativy vody i soli a rozdílnými vstupními surovinami dostaneme výsledné roztoky s různými vlastnostmi. Navíc v průběhu zkoušky dochází ke kondenzaci vody v mrazící komoře a může dojít ke změnám v koncentraci roztoku. [44]

Jednou z mála jasně specifikovaných částí normy je uložení vzorků před zahájením zkoušky. Norma definuje vodní uložení, jehož vhodnost je však diskutabilní. Do výsledku vstupuje kvalita vody, protože po výměně vody ve skladovací nádobě vznikne tzv. hladová voda, která ze vzorků uvolňuje alkalické ionty, dokud nedojde k jejímu opětovnému nasycení, čímž poruší vzorky ještě před samotným zahájením zkoušky. Výsledky současných výzkumů doporučují spíše vlhké uložení či laboratorní podmínky. [44; 45; 46]

Podstatný vliv na zkoušku má lidský faktor, který ji ovlivňuje od výroby zkušebních těles až po vyhodnocení výsledků. Navíc při každé mezilehlé kontrole se navyšuje chyba měření, kterou má každá váha. [44]

Současnou modifikací metody A je nátěr hran tělesa mrazuvzdorným, vodoodpudivým nátěrem, čímž se zabrání případnému poškození hran zkušebního tělesa – zkušební roztok je nalit do výšky 5 mm nad povrch vzorku, dochází ke vzlínání roztoku a

rozpadu hran, z toho důvodu se těžko stanovuje zkušební plocha do výpočtu. Po opatření hran vzorku nátěrem je zkoušený pouze povrch tělesa shodně jako u metody C. Tato úprava odpovídá i zahraničním postupům, protože i u nich je namáhán pouze povrch tělesa. Další zkoumanou alternativou je zkušební povrch vyrobený za pomoci teflonové vložky. Tento postup jsme převzali z Německa (jejich zkušební postup je popsán v kapitole 6.1 na stránce 35). Takto vyrobené těleso zkusíme nadále dle metody A – válcové těleso by se vytvářelo poměrně složitě. [44]

Všechny současné postupy jsou problematické a jejich reprodukovatelnost dosahuje až 500 %. Stále existuje snaha zpřesnit podmínky zkušebních postupů tak, aby výsledky šlo považovat za směrodatné. Současné jsou však hledány alternativní přístupy, které by dokázaly chování betonu namáhaného mrazem za přítomnosti CHRL předpovědět přesněji použitím nepřímých parametrů, například provzdušnění betonu. [47; 44; 6]

6 STANOVENÍ TRVANLIVOSTI BETONU – POSTUPY POUŽÍVANÉ V ZAHRANIČÍ

Trvanlivost betonu při mrazovém namáhání, případně za přítomnosti CHRL, se v jednotlivých zemích posuzuje podle rozdílných technologických postupů. V Evropské unii (EU) je standardem norma EN 12390-9 (v České republice zavedená jako ČSN P CEN/TS 12390-9). Metody zaměřené na odolnost betonu proti CHRL nejsou v rámci EU sjednocené a jednotlivé členské státy mohou využívat vlastní národní postupy. V ČR se evropská norma v praxi uplatňuje spíše okrajově. Princip této normy je popsán v kapitole 5.2 na stránce 33. [43]

V Německu je nejčastěji využívána metoda uvedená v doporučení RILEM TC 117–FDC. RILEM je mezinárodní organizace sdružující odborníky v oblasti stavebních materiálů, systémů a konstrukcí. Označení TC 117 představuje číslo příslušné technické komise a zkratka FDC vymezuje její zaměření. Původně znamenala „Frost Damage in Concrete“ (mrazové poškození betonu), avšak pracovní náplň komise byla později rozšířena i na problematiku „Freeze–Deicing Salt Scaling“ (povrchové odlupování betonu při působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek), přičemž původní označení komise zůstalo zachováno. Jedná se tedy o odborný doporučený postup, který je v některých zemích běžně využíván v praxi. [48; 49; 50; 51]

Ve Švédsku se používá státní norma SS 13 72 44, přezdívaná „Borås“, jejíž postup je obdobný univerzální evropské normě. Ve Finsku se mrazuvzdornost betonu hodnotí

podle SFS 5447 s využitím tzv. Hummel exponentu, pro posouzení odolnosti betonu proti CHRL se používá norma SFS 5449. [52; 53; 54; 55]

Ve Spojených státech amerických se pro čistě mrazové namáhání používá norma ASTM C666 a pro kombinaci s CHRL norma ASTM C672. V Kanadě jsou používány technologické předpisy jednotlivých provincií. [52; 53; 54; 55]

Jednotlivé metody se liší průběhem cyklů, stupněm nasycení či požadavky na hodnocení, ale všechny pocházejí ze stejného principu – ověřit odolnost betonu vůči objemovým napětím, jež vznikají při cyklickém zmrazování, a posoudit chování jeho povrchu při působení rozmrazovacích solí. [43; 48; 55; 54; 53; 52]

6.1 NĚMECKO

Metoda CDF

V Německu se standardně používá postup uvedený v doporučení RILEM TC 117 – FDC, známý jako metoda CDF. Tento postup slouží k hodnocení trvanlivosti betonu při cyklickém zmrazování a rozmrazování za přítomnosti CHRL. Princip metody spočívá v přípravě zkušební tělesa s definovaným, hladkým a reprodukovatelným povrchem, kterého se dosahuje pomocí teflonové vložky (PTFE) umístěné do formy při výrobě zkušebních těles. Z jedné formy tak vzniknou dvě zkušební tělesa. [48]

Tělesa jsou nasycena roztokem NaCl a následně probíhá cyklování mrazu a rozmrazování. Kvalita betonu se hodnotí po 28 cyklech (1 cyklus trvá 12 hodin). Množství odpadlých částí se stanovuje pomocí ultrazvukové lázně. [48]

Česká republika přebírá z metody CDF použití teflonové vložky při výrobě zkušebních těles. Kompletní postup převzat není, protože teplotní průběhy, délka cyklů i hodnotící kritéria metody CDF se zásadně liší od postupů uvedených v ČSN 73 1326 a výsledky by proto nebyly srovnatelné s dosavadními průzkumy. [48; 41; 42]

RILEM Scaling test (bez i s přítomností CHRL)

Tento postup vznikl v návaznosti na doporučení RILEM TC 117–FDC. Metoda je zaměřena na hodnocení povrchového odlupování betonu při působení mrazu. Zkouška může být prováděna jak s roztokem NaCl, tak i s čistou vodou, což umožňuje posoudit odolnost betonu při čistě mrazových cyklech i při kombinaci mrazového namáhání a CHRL. Hodnocení se provádí na základě hmotnostních úbytků povrchu a vizuální klasifikací povrchového poškození. Postup je méně komplexní než metoda CDF, ale poskytuje dobře reprodukovatelné výsledky, zejména pro povrchové vrstvy betonu. [48]

Zkoušky vnitřního poškození (RILEM FTD)

V Německu se používají také metody založené na poklesu dynamického modulu pružnosti, které rovněž vycházející z doporučení RILEM. Zkušební tělesa jsou vystavena cyklickému střídání kladných a záporných teplot a hodnocena je změna mechanických vlastností. Tento postup slouží k identifikaci poškození vnitřní struktury. [48]

6.2 FINSKO

Finsko mrazuvzdornost betonu posuzuje podle normy SFS 5447. Zkušební tělesa jsou vystavena 150 cyklům zmrazování a rozmrazování. Pro vyhodnocení se využívá tzv. Hummel exponent. Beton je považován za mrazuvzdorný, pokud hodnota Hummel exponentu u zmrazovaných vzorků dosáhne minimálně 90 % hodnoty exponentu referenčních vzorků. [53]

Odolnost betonu proti CHRL se stanovuje dle SFS 5449. Při zkoušce se používá roztok NaCl a zkušební tělesa jsou v klimatické komoře vystavena cyklům zmrazování a rozmrazování. Po 10 a 25 cyklech se hodnotí změna hmotnosti vzorků. Beton je označen za trvanlivý, jestliže pokles hmotnosti nepřesáhne 5 %. [53]

6.3 SPOJENÉ STÁTY AMERICKÉ (USA)

Norma ASTM C666 – Mrazuvzdornost betonu

Jedná se o nejpoužívanější americkou metodu pro hodnocení mrazuvzdornosti betonu. Postup je založený na poměrně rychlém střídání kladných a záporných teplot od +4 do -18 °C. Norma umožňuje 2 postupy:

- Zmrazování a rozmrazování ve vodě
- Zmrazování na vzduchu a rozmrazování ve vodě

Hodnocení se provádí na základě změny dynamického modulu pružnosti, která se posuzuje pomocí ultrazvuku a výsledná hodnota se vyjadřuje jako relative dynamic modulus (RDM). Zkouška končí po dosažení 300 cyklů, nebo pokud modul pružnosti klesne pod 60 % původní hodnoty. [55; 52]

Norma ASTM C672 – Trvanlivost betonu za přítomnosti CHRL

Metoda simuluje povrchové poškození betonu způsobené kombinací mrazu a působení CHRL. Při zkoušce se používá jako zkušební roztok 4% CaCl₂. Nevýhodou této soli je její horší disociace a fakt, že jako posypová sůl je obvykle používána NaCl. Koncentrace je vyšší z důvodu jiné rozpustnosti této soli. Následně se zkušební tělesa

podrobí opakovaným cyklům zmrazování a rozmrazování v klimatické komoře. Hodnotí se intenzita povrchového odlupování, hmotnostní úbytek a vizuální klasifikace poškození pomocí šesti stupňů (0–5). [54; 52]

Norma ASTM C672 je považována za primární metodu pro testování trvanlivosti betonu určeného pro vozovky, mostovky a další plochy vystavené intenzivnímu působení rozmrazovacích solí. [54]

6.4 KANADA

V Kanadě se používají zkušební metody předepsané jednotlivými provinciemi. V provincii Ontario je využíván postup dle technologického předpisu MTO LS–412, který se podobá americké metodě uvedené v ASTM C672, ale používá se 3% roztok chloridu sodného, který je nalit na horní povrch zkušebního tělesa opatřeného vodotěsnou obálkou. Během zkoušky jsou zkušební tělesa umístěna na dřevěných hranolech, aby byla umožněna cirkulace vzduchu kolem vzorků a dosáhlo se rovnoměrnější distribuce teploty. [52; 54]

Provincie Québec používá technologický předpis BNQ NQ 2621–0900. V průběhu zkoušky je zkušební povrch zakryt vodotěsnou membránou, aby se zabránilo odpařování roztoku. A po dobu trvání je kontinuálně zaznamenávána teplota roztoku i povrchu zkušebních těles. [52]

7 ZÁVISLOST PÓROVÉHO SYSTÉMU BETONU NA JEHO ODOLNOSTI PROTI CHRL

Současné poznatky ukazují, že vztah mezi parametry vzduchového systému betonu a jeho odolnosti proti CHRL je komplexnější, než se předpokládalo. Provdzdušnění betonu představuje jeden z hlavních ochranných mechanismů, protože stabilní a rovnoměrně rozptýlené mikropóry snižují pronikání CHRL do povrchové vrstvy betonu, omezují tvorbu ledu v matici cementového tmelu a zlepšují mechanickou stabilitu povrchové vrstvy. To vede ke snížení tahových napětí během cyklického střídání kladných a záporných teplot, což se projevuje menším odlupováním povrchových vrstev, zejména u betonů s vyšším vodním součinitelem. [56]

Dostupné studie zároveň prokazují, že samotný obsah vzduchu nebo jednotlivé parametry vzduchového systému (např.: SF či obsah mikroskopického vzduchu) nejsou samy o sobě dostatečnými ukazateli odolnosti betonu proti CHRL. Experimentální výsledky ukazují, že trvanlivost betonu je ovlivněna celou řadou parametrů, zejména pórovitostí, soudržností a nasákavostí povrchové vrstvy, chemickým složením pojiva a

stabilitou vzduchového systému v průběhu zrání betonu. Tyto faktory mohou způsobit, že betony se zdánlivě příznivými hodnotami vzduchového systému mají nízkou trvanlivost při působení CHRL, zatímco betony s méně příznivými parametry mohou dosahovat dobré trvanlivosti. [57; 58; 59]

Množství vzduchu naměřené v ČB ne vždy odpovídá kvalitě vzduchového systému u ZB. Studie Giergiczyho a kol. dokládá, že nestabilita vzduchových bublinek, jejich nadměrné spojování nebo nerovnoměrné rozmístění může významně snížit odolnost betonu proti CHRL. Reálná trvanlivost betonu tak může být horší, než by odpovídalo hodnotám naměřeným v ČB. [60; 59]

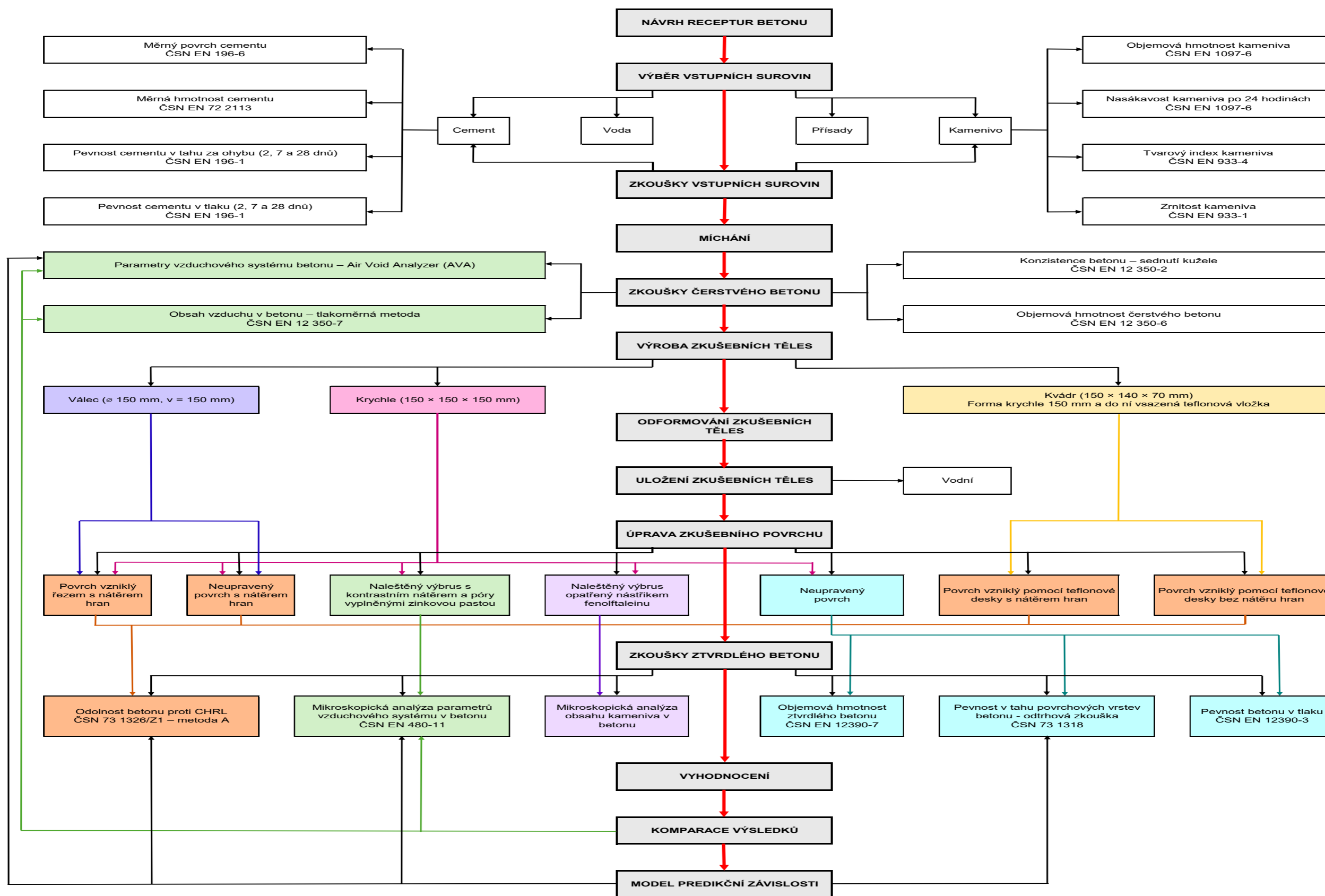
Studie ukazují, že tradičně používaný parametr Spacing factor nedokáže univerzálně popsat odolnost betonu proti CHRL, a to ani při dosažení doporučených limitních hodnot stanovených jako kritéria mrazuvzdornosti betonu. Degradace povrchu způsobená kombinací mrazu a CHRL je ovlivněná především povrchovými mechanismy, které samotný pórový systém betonu nedokáže plně vystihnout. [57; 58]

Jako nejspolehlivější se jeví přístup založený na kombinaci více parametrů. Z výsledků laboratorních testů vyplývá, že predikční schopnost odolnosti betonu proti CHRL se výrazně zlepšuje, pokud se současně hodnotí více parametrů – obsah vzduchu, velikost a distribuce pórů, Spacing factor, specifický povrch vzduchových pórů, nasákavost a vlastnosti povrchových vrstev betonu. Kombinaci těchto parametrů využívá i empirický model uvedený v bakalářské práci V. Krejčara, který na analyzovaném souboru zkoušek vykazoval lepší shodu s naměřenými hodnotami než jednotlivé parametry samostatně. Jeho využitelnost je však omezena pouze na dataset, na kterém byl sestaven. [61; 57; 60]

Celkově lze konstatovat, že parametry vzduchového systému výrazně ovlivňují trvanlivost betonu, avšak jejich predikční schopnost je omezená. Provzdušnění zlepšuje odolnost povrchové vrstvy, ale výsledná trvanlivost je dána synergickým působením vzduchového systému, povrchových charakteristik, složením pojiva i technologických podmínek během zpracování a zrání betonu. Komplexní hodnocení těchto faktorů poskytuje nejspolehlivější základ pro odhad odolnosti betonu proti působení CHRL. [57; 56; 58; 59; 60; 61]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

8 METODIKA PRÁCE



Obr. 14 – Metodika práce

Cílem praktické části diplomové práce bylo experimentálně posoudit vliv vybraných parametrů provzdušnění betonu na jeho odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek. Pozornost byla zaměřena na stanovení souvislosti mezi parametry provzdušnění zjištěnými v čerstvém betonu pomocí metody AVA a odpovídajícími parametry stanovenými u betonu ztvrdlého mikroskopickou analýzou. Na základě těchto parametrů betonu byl dále posuzován jejich vztah k odolnosti betonu proti CHRL, stanoveným prostřednictvím různých modifikací cyklických zkoušek. Současně byl v rámci praktické části hodnocen vliv úpravy povrchu zkušebních těles na výsledky zkoušky odolnosti betonu proti CHRL.

Metodická část zahrnuje návrh experimentu, přípravu zkušebních těles, podmínky provádění jednotlivých zkoušek a následné způsoby zpracování získaných dat. Popsány jsou postupy použité pro stanovení vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu. Grafické znázornění metodiky práce je na obr. 14, který je umístěný na předchozí straně.

V rámci experimentu bylo navrženo devět receptur betonu lišících se složením na základě požadované pevnostní třídy, obsahu vzduchu a konzistence:

- Receptura 3B – C25/30, S3, obsah vzduchu $4,5 \pm 1$ %
- Receptura 3C – C25/30, S3, obsah vzduchu $7,5 \pm 1$ %
- Receptura 1B – C30/37, S3, obsah vzduchu $4,5 \pm 1$ %
- Receptura 1C – C30/37, S3, obsah vzduchu $7,5 \pm 1$ %
- Receptura 2A – C35/45, S3, obsah vzduchu $2,0 \pm 1$ %
- Receptura 2B – C35/45, S3, obsah vzduchu $4,5 \pm 1$ %
- Receptura 2C – C35/45, S3, obsah vzduchu $7,5 \pm 1$ %
- Receptura 4B – C35/45, S4, obsah vzduchu $4,5 \pm 1$ %
- Receptura 4C – C35/45, S4, obsah vzduchu $7,5 \pm 1$ %

Pro přípravu všech receptur byl použit portlandský směsný cement CEM II/A–S 42,5 R od výrobce Heidelberg Materials CZ, a.s., závod Mokrý. Byly použity tři frakce kameniva: drobné těžené kamenivo frakce 0/4 a hrubé těžené kamenivo frakce 4/8 a 8/16. Všechna kameniva pocházela z lokality Žabčice. Poměry zastoupení jednotlivých frakcí byly vypočteny pomocí křivky zrnitosti dle Fullera. Jako záměsová voda byla použita voda z vodovodního řadu. Dále byla použita superplastifikační přísada CHRYSO Optima 309 EMx a provzdušňující přísada CHRYSO AIR A 50 %.

U všech receptur byly ověřeny vlastnosti ČB – konzistence, objemová hmotnost, obsah vzduchu v betonu stanovený tlakoměrnou analýzou a parametry vzduchového

systému pomocí metody AVA. Zkušební vzorky byly po odbednění uloženy do vodního prostředí. Na ztvrdlém betonu byla stanovena objemová hmotnost, pevnost tlaku, pevnost povrchových vrstev betonu, odolnost betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám a mikroskopická analýza vzduchového systému v betonu. Na recepturách 2B a 3B byla provedena mikroskopická analýza obsahu kameniva v betonu.

Odolnost betonu proti CHRL byla provedena dle ČSN 73 1326/Z1 metodou A na tělesech tvaru krychle o straně 150 mm se čtyřmi různými úpravami zkušební povrchu:

- Původní povrch s nátěrem hran
- Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran
- Povrch vzniklý pomocí teflonové (PTFE) vložky bez nátěru hran
- Povrch vzniklý pomocí teflonové vložky s nátěrem hran

U tří receptur byla navíc analýza provedena i na válcových tělesech o průměru 150 mm se dvěma různými úpravami povrchu:

- Původní povrch s nátěrem boční zkušební plochy
- Povrch vzniklý řezem s nátěrem boční zkušební plochy

Každá receptura byla rozdělena do dvou dílčích míchání s cílem dosáhnout srovnatelného obsahu vzduchu a konzistence čerstvého betonu. Současně byl posuzován vliv jejich přirozených odchylek na výsledky ostatních prováděných zkoušek. Všechna míchání byla provedena ve stejné míchačce se shodným složením i podmínkami zpracování a lišila se pouze počtem připravovaných těles a typem zkoušky, která na nich byla následně provedena. Z hlediska hodnocení vlastností betonu jsou obě dílčí míchání posuzována jako jedna receptura.

Pro stanovení pevnosti betonu v tlaku byly připraveny dvě sady zkušebních těles. Jedna sada byla zkoušena ve stáří 7 dnů a druhá sada ve stáří 28 dnů. Ostatní zkoušky na ZB byly provedeny ve stáří 28 dnů.

Část zkušebních těles tvaru krychle byla rozříznuta na dvě části, čímž vznikla tělesa s původním povrchem a tělesa s řeznou plochou určená pro zkoušku odolnosti betonu proti CHRL. Stejným způsobem byla připravena i válcová tělesa. Všechny takto připravené vzorky byly následně opatřeny nátěrem hran. U všech receptur byla dále zkoušena varianta povrchu vytvořeného pomocí PTFE vložky, přičemž u části těchto těles byly boční hrany opatřeny nátěrem.

Mikroskopická analýza prostorového rozložení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu byla provedena na dvou naleštěných výbrusech, z nichž každý byl vyroben z jiného

zkušební tělesa. Následně byly vzorky opatřeny kontrastním nátěrem a póry byly vyplněny zinkovou pastou pro zvýšení kontrastu. Pro mikroskopickou analýzu obsahu kameniva v betonu byl od každé zkoumané receptury připraven jeden naleštěný výbrus, který byl opatřen roztokem fenolftaleinu za účelem zvýraznění kontrastu mezi cementovou maticí a kamenivem.

Pomocí programovacího jazyka Python byly lineární regresi s L2 regularizací a standardizací vstupních proměnných vytvořeny predikční modely popisující vztah mezi vybranými parametry vzduchového systému v betonu a jeho odolností proti působení CHRL. Model byl ověřován validační metodou leave-one-recipe-out (LORO), při níž byla v jednotlivých bězích výpočtu vždy jedna receptura vyřazena z trénovací sady a použita pro ověření predikce. Pro výpočet byly použity průměrné hodnoty laboratorně naměřených dat. Postup byl opakován tak, aby každá receptura byla jednou použita jako validační sada, a z výsledků byla stanovena průměrná chyba predikce. Na základě kompletní sady dat byl následně sestaven finální model závislosti. V rámci analýzy bylo připraveno více variant predikčních modelů lišících se skladbou vstupních dat a typem hodnoceného povrchu.

9 VLASTNOSTI VSTUPNÍCH SUROVIN

9.1 ZKUŠEBNÍ POSTUPY

CEMENT

Vlastnosti cementu byly zkoušeny dle těchto zkušebních postupů:

- ČSN EN 196-1 – Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti [62]
- ČSN EN 196-6 – Metody zkoušení cementu – Část 6: Stanovení jemnosti mletí [63]
- ČSN 72 2113 – Stanovení měrné hmotnosti cementu [64]

KAMENIVO

Vlastnosti kameniva byly stanoveny dle technických norem:

- ČSN EN 933-1 – Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor [65]
- ČSN EN 933-4 – Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index [66]
- ČSN EN 1097-6 – Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. [67]

9.2 VYHODNOCENÍ CEMENT

Vyhodnocení vlastností použitého cementu jsou uvedena v tab. 1.

Tab. 1 - Vlastnosti cementu

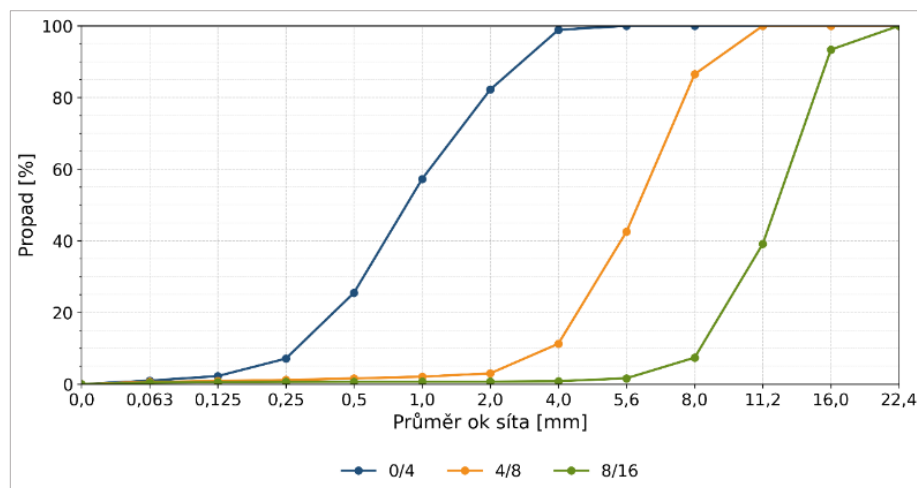
Vlastnost		Naměřená hodnota
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Po 2 dnech	4,6
	Po 7 dnech	6,8
	Po 28 dnech	7,5
Pevnost v tlaku [MPa]	Po 2 dnech	24,0
	Po 7 dnech	43,9
	Po 28 dnech	55,7
Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Po 2 dnech	2200
	Po 7 dnech	2200
	Po 28 dnech	2210
Měrný povrch [$\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$]		446
Měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]		2980

KAMENIVO

Vyhodnocení vlastností použitých kameniv jsou uvedené v tab. 2 Křivky zrnitosti jsou znázorněny v grafu 1.

Tab. 2 – Vlastnosti kameniva

Frakce	DTK 0/4 Žabčice	HTK 4/8 Žabčice	HTK 8/16 Žabčice
Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2610	2550	2560
Nasákavost po 24 h [%]	0,6	1,6	1,3
Tvarový index [%]	-	8	10



Graf 1 – Zrnitost kameniva

10 VLASTNOSTI BETONU – ZKUŠEBNÍ POSTUPY

Vlastnosti čerstvého betonu byly stanoveny zkušebními postupy:

- ČSN EN 12 350-2 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím [68]
- ČSN EN 12 350-6 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost [69]
- ČSN EN 12 350-7 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody
- Air Void Analyzer (AVA) postup uvedený v technickém předpisu FHWA

Vlastnosti ztvrdlého betonu byly stanoveny dle zkušebních postupů:

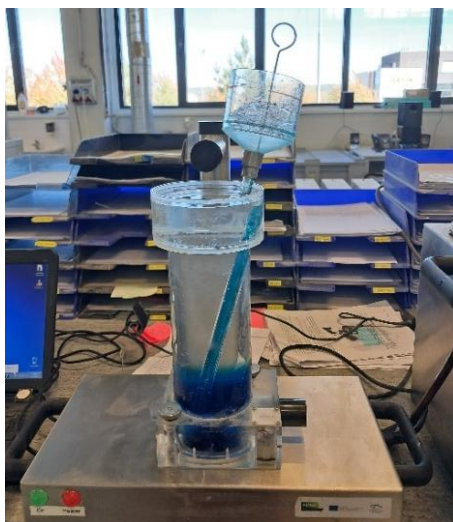
- ČSN EN 12390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [70]
- ČSN EN 12390-7 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [71]
- ČSN 73 1318 – Stanovení pevnosti betonu v tahu – Příloha 2: Zkouška pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev [72]
- ČSN 73 1326 – Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek [41]
- ČSN EN 480-11 – Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu [32]
- Mikroskopická analýza obsahu kameniva v betonu (pro tento postup neexistuje norma)

Většina uvedených zkoušek patří mezi běžně prováděné zkušební postupy, a proto není nutné je podrobně popisovat. Další zkoušky byly již dostatečně popsány v teoretické části. Z těchto důvodů budou dále podrobně popsány pouze následující zkušební postupy:

- Analýza parametrů vzduchového systému v betonu metodou AVA
- Mikroskopická analýza parametrů vzduchového systému v betonu dle ČSN EN 480-11
- Mikroskopická analýza obsahu kameniva v betonu

METODA AVA

Základní jednotka AVA se připraví na vodorovném povrchu a uvede se do provozu dle návodu výrobce. Do testovacího válce se vloží míchací tyčinka a odstraní se všechny vzduchové bublinky. Následně se do válce pomocí speciální nálevky vpustí analytická kapalina AVA (obr.15) a vloží se záchytná miska tak, aby pod ní nezůstal žádný vzduch.
[23]



Obr. 15 – Nálevka v testovacím válci při vypouštění modré kapaliny AVA

Zkušební postup má specifický i odběr vzorků. Používá se vrtačka opatřená speciálním nástavcem. Vzorek se odebírá ze ztuhlé betonové vrstvy. Na povrch betonu se umístí deska z plexiskla s kruhovým otvorem, která zabraňuje stékání ztuhlé povrchové malty do odběrného síta. Vibrační odběrné síto se protlačí otvorem a část betonu bez hrubého kameniva jej vyplní. Jakmile je odběrné síto zavibrováno a vyplněno, ponoří se hrot injekční stříkačky do malty. Za pokračujících vibrací se stříkačka zavádí do malty, dokud není zcela naplněna. Poté se vzorkovací sestava vyjme z betonu. Stříkačka obsahuje 20 ml cementového tmelu potřebného ke zkoušce. Pokud se odebere

více vzorků, tak ty, které se neanalyzují okamžitě, se uchovávají při nízkých teplotách (např. v chladničce). Odběr vzorku je znázorněn na obr. 16. [23]

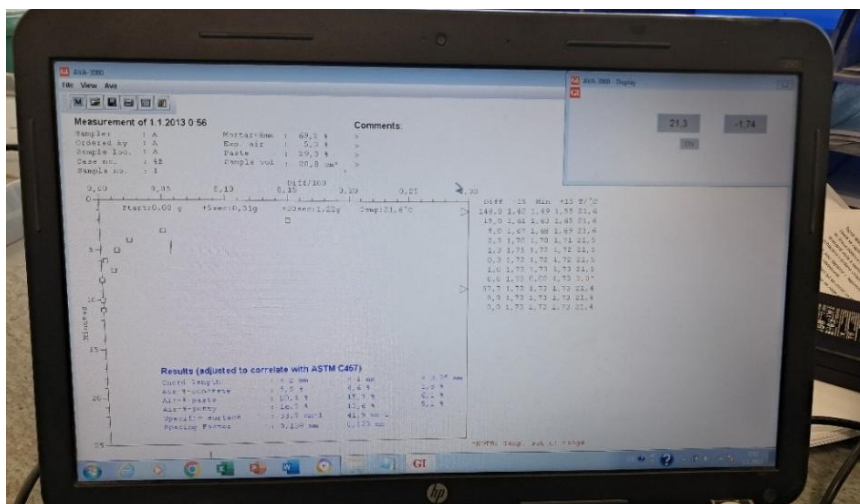


Obr. 16 - Odběr vzorku pro analýzu AVA

Spustí se program a vyplní se požadované informace. Vzorek se aplikuje do zkušebního zařízení. Po dobu 30 s probíhá míchání, které rozpustí vzorek malty v kapalině AVA (modré barvy). Při tomto procesu se uvolní vzduchové póry, které stoupají ve formě bublinek testovacím válcem. Na vrcholu testovacího válce se bublinky zachytí pod ponořenou záchytnou misku, která je připojena na velmi citlivou váhu. Zkušební zařízení v průběhu zkoušky je zobrazené na obr. 17. Software ukončí měření po 25 minutách, případně dříve, pokud nedojde ke změně měření během dvou po sobě následujících minut. Výsledky se zobrazí v softwaru, ukázka je na obr. 19. Program počítá 2 různé Spacing factory – v betonu a v cementové pastě. SF stanovovanému v ZB mikroskopickou analýzou lépe odpovídá nižší hodnota spočítaná na cementové pastě. [23]



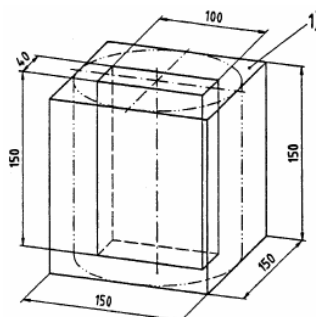
Obr. 17 – Zařízení AVA během zkoušky [73]



Obr. 18 - Příklad vyhodnocení analýzy AVA

MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA PARAMETRŮ VZDUCHOVÉHO SYSTÉMU V BETONU DLE ČSN EN 480-11

Ze zkoumaného vzorku se vyrobí 2 tělesa o minimálním rozměru 150 mm, vhodnými tvary těles jsou krychle nebo válce. Z betonu ošetřovaného nejméně 7 dní se vyříznou zkušební vzorky tak, jak je uvedeno na obr. 19. [32]

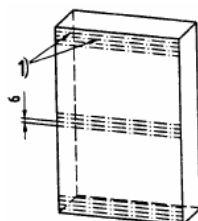


Obr. 19 – Příprava zkušební vzorku pro mikroskopickou analýzu betonu [32]

Povrchy určené pro zkoušení – jeden na každém vzorku – se za mokra vybrousí, dokud nejsou rovné. Musí se vytvořit jemně zabroušený zkušební povrch. Vhodný povrch by měl mít za sucha matný lesk a neměl by vykazovat patrné podbroušení tmelem oproti povrchu kameniva. Okraje pórů by měly být ostré a neměly by být porušené nebo zaoblené. Póry nesmí být zaplněny zbytky z broušení. Povrch se musí důkladně očistit tak, aby nedošlo k poškození okrajů pórů. Následně se na zkušební plochu nanese barvivo a po zaschnutí se do pórů zatře vhodný kontrastní materiál, například zinková pasta. Tento postup zvýrazní kontrast mezi póry a cementovým tmelem. [32]

Zkušební vzorek se umístí na manipulační stůl tak, aby měřící přímky procházely rovnoběžně s původním horním povrchem zkušební tělesa (rovnoběžně se směrem hutnění). Pro každý zkušební vzorek je minimální délka soustavy měřících přímek

1 200 mm, což dává dohromady celkové minimum 2 400 mm na zkoušku. Je nutné dbát, aby do měřené délky nebyla zahrnuta žádná poškozená místa. Doporučené rozložení přímků je na obr. 20, vzdálenost přímků od sebe navzájem je 6 mm. Povrch se pozoruje pod mikroskopem se stonásobným zvětšením, které se během měření nesmí měnit. [32]



Obr. 20 – Rozložení měřících přímků na zkušebním povrchu [32]

Program z naměřených hodnot vyhodnotí základní parametry vzduchových pórů, včetně jejich obsahu a počtu, součinitele prostorového rozložení mikroskopických pórů (SF), měrný povrch vzduchových pórů a velikostní distribuci. [32]

MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA OBSAHU KAMENIVA V BETONU

Naleštěné výbrusy se připraví shodně jako u předchozí analýzy. Následně se opatří nástřikem fenolftaleinu, který má barevný přechod v zásaditém prostředí. Tím dojde k barevnému odlišení cementového tmele a kameniva. Připravené vzorky jsou zobrazeny na obr. 21.



Obr. 21 - Vzorky připravené na mikroskopickou analýzu obsahu kameniva v betonu

Zkušební vzorek se umístí pod mikroskop s dvacetinásobným zvětšením a pomocí softwaru, který vyhodnotí zastoupení daného materiálu na základě barevných rozdílů, se plošnou analýzou vyhodnotí zastoupení kameniva v betonu.

11 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Všechny zkušební vzorky byly po odbednění vloženy do vodního uložení. Po sedmi dnech od výroby zkušebních těles byly vzorky určené na mikroskopickou analýzu

vyjmuty a nařezány na požadované rozměry. Úprava povrchu na mikroskopickou analýzu pórového systému v betonu byla popsána již v předchozích kapitolách. Vzorky připravené na mikroskopickou analýzu jsou znázorněné na obr. 22.



Obr. 22 – Vzorky připravené na mikroskopickou analýzu (zleva receptura 1, 2, 3 a 4, zezhora varianta A, B a C)

PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ NA ZKOUŠKU ODOLNOSTI BETONU PROTI CHRL

Zkušební tělesa byla připravena různými způsoby, což umožnilo posoudit vliv úpravy zkušebního povrchu na zkoušku odolnosti betonu proti CHRL.

Rozdíl vznikl již při ukládání ČB do forem. Byla vyrobena klasická tělesa tvaru krychle i válce a dále tělesa tvaru kvádrů, která byla získána vložením teflonové vložky do formy tvaru krychle o hraně 150 mm. PTFE vložka nebyla opatřena žádným odbedňovacím přípravkem, takže vznikl povrch, který nebyl ovlivněn žádnými vnějšími vlivy. PTFE vložka umístěná ve formě je zobrazena na obr. 24 a povrch vzniklý s její pomocí na obr. 23.



Obr. 24 - Teflonová vložka umístěná ve formě



Obr. 23 - Povrch vzniklý pomocí teflonové vložky

Po odbednění byly všechny zkušební vzorky umístěné do vodního uložení. Ve stáří 7 dnů byla tělesa tvaru krychle a válce vyjmuta a rozříznuta napůl. Tím vznikly dva různé povrchy – původní povrch a povrch vzniklý řezem. Vzorkům s původním povrchem, s povrchem vzniklým řezem a polovině těles s povrchem vytvořeným pomocí teflonové

vložky byly hrany opatřeny nátěrem Sika Floor – 390 N. Tak vznikly 4 varianty úpravy zkoušeného povrchu:

- Původní povrch s nátěrem hran
- Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran
- Povrch vzniklý pomocí teflonové vložky bez nátěru hran
- Povrch vzniklý pomocí teflonové vložky s nátěrem hran

Pro receptury 2A, 2C a 4B byla navíc připravena válcová zkušební tělesa s původním povrchem s nátěrem boční zkušební plochy a tělesa s povrchem vzniklým řezem s nátěrem boční zkušební plochy. Tělesa tvaru krychle připravená na zkoušku odolnosti betonu proti CHRL jsou znázorněna na obr. 25 a obr. 26, tělesa tvaru válce byla připravena stejným způsobem.



Obr. 25 – Zkušební vzorky připravené na zkoušku odolnosti betonu proti CHRL (zleva: povrch vzniklý pomocí teflonové vložky bez nátěru hran, povrch vzniklý pomocí teflonové vložky s nátěrem hran, původní povrch s nátěrem hran, povrch vzniklý řezem s nátěrem hran)



Obr. 26 - Rozdílné zkušební povrchy pro zkoušku odolnosti betonu proti CHRL (zleva: povrch vzniklý pomocí teflonové vložky, původní povrch, povrch vzniklý řezem)

Po zaschnutí nátěru byla zkušební tělesa vrácena do vodního uložení, kde zůstala až do zahájení zkoušky.

12 RECEPTURY BETONU

Pro každou recepturu betonu byly stanoveny požadované parametry uvedené v tab. 3. Na základě výsledků zkoušek na vstupních surovinách a požadovaných parametrů byly navrženy jednotlivé receptury, které jsou uvedené v tab. 4.

Tab. 3 – Požadované vlastnosti receptur betonů

Receptura	3B	3C	1B	1C	2A	2B	2C	4B	4C
Pevnostní třída	C25/30		C30/37		C35/45				
Obsah vzduchu [%]	4,5 (±1)	7,5 (±1)	4,5 (±1)	7,5 (±1)	2,0 (±1)	4,5 (±1)	7,5 (±1)	5,0 (±1)	7,5 (±1)
Konzistence	S3							S4	

Tab. 4 - Receptury betonů

Receptura	3B	3C	1B	1C	2A	2B	2C	4B	4C		
Cement CEM II/A-S 42,5 R [kg·m ⁻³]	310		340		370			370			
Kamenivo	DTK 0/4 Žabčice [kg·m ⁻³]		941		912		883			860	
	HTK 4/8 Žabčice [kg·m ⁻³]		376		365		353			344	
	HTK 8/16 Žabčice [kg·m ⁻³]		565		547		530			516	
Voda [kg·m ⁻³]	130		143		155			174			
Plastifikační přísada CHRYSO Optima 309 Emx [% z m _c *]	0,8		0,8		0,8			0,8			
Provzdušňovací přísada CHRYSO AIR A 50 % [% z m _c *]	0,2	0,25	0,2	0,25	0	0,2	0,25	0,2	0,25		

* m_c = množství cementu

13 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

13.1 VYHODNOCENÍ JEDNOTLOVÝCH RECEPTUR

V této kapitole je uveden souhrn výsledků jednotlivých receptur. Cílem této kapitoly je vytvoření uceleného přehledu vlastností každého betonu jako samostatného celku. Vzájemné porovnání jednotlivých vlastností napříč recepturami je provedeno v následujících kapitolách.

RECEPTURA 3B – C25/30 S3 (OBSAH VZDUCHU 4,5 %)

Tab. 5 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 3B

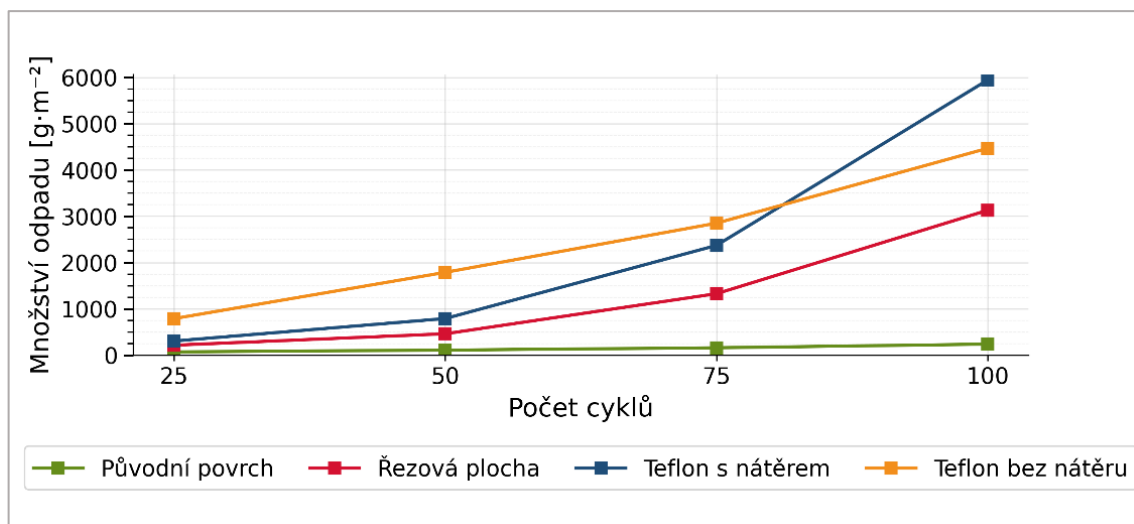
Vlastnost	Vyhodnocení	Vlastnost	Vyhodnocení
Sednutí kužele [mm]	140	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]	2,6
Obsah vzduchu v ČB (tlakoměrná metoda) [%]	5,1	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	43,8
Objemová hmotnost ČB [kg·m ⁻³]	2290	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	49,5
Objemová hmotnost ZB [kg·m ⁻³]	2280		

Tab. 6 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 3B

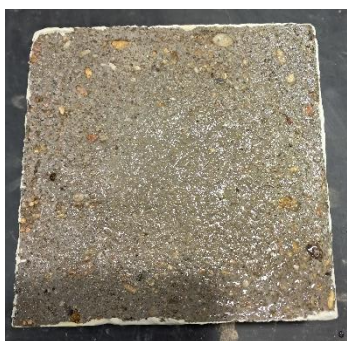
Obsah vzduchu v ČB (AVA) [%]		<3 mm	<1,5 mm	<0,5 mm
	Beton	5,4	4,1	2,1
	Pasta	18,1	12,3	9,4
	Tmel	11,9	8,2	7,4
Spacing factor [mm]		0,197		
Měrný povrch [mm ⁻¹]		24,9		

Tab. 7 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 3B

Úprava povrchu		Průměrné množství odpadu [g·m ⁻²]			
		25	50	75	100
Krychle	Původní povrch s nátěrem hran	72,0	110,7	160,4	239,1
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	215,8	462,3	1327,7	3130,5 (rozpad)
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	789,6	1788,4	2850,8	4468,0 (rozpad)
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran	305,9	791,1	2371,0	5943,7 (rozpad)



Graf 2 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušebnímu povrchu – receptura 3B



Obr. 30 – Vzorek po zkoušce CHRL původní povrch s nátěrem hran – receptura 3B



Obr. 29 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 3B



Obr. 28 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 3B

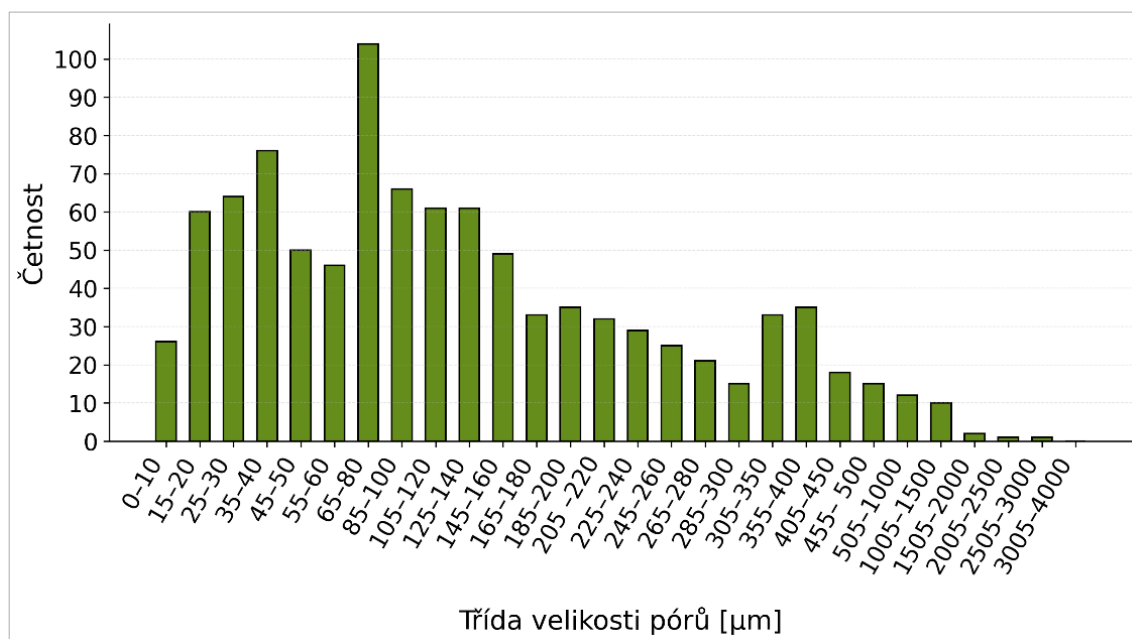


Obr. 27 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 3B

Pozn.: U vzorků s povrchem vzniklým pomocí PTFE vložky s nátěrem hran došlo po 75 cyklech k poškození a utržení nátěru a následnému rozpadu hran zkušebních těles, jak je vidět na obr. 28. Utržená hrana tělesa nebyla do výpočtu zahrnuta.

Tab. 8 – Vyhodnocení mikroskopické provzdušnění betonu – receptura 3B

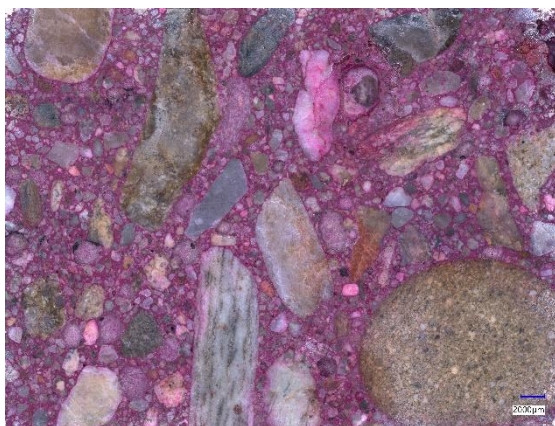
Vlastnost	Vyhodnocení
Celkový obsah vzduchu [%]	6,43
Obsah vzduchu <1000 μm [%]	5,32
Obsah vzduchu <500 μm [%]	5,10
Obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}) [%]	2,80
Spacing factor [mm]	0,17
Specifický povrch [mm^{-1}]	25,404
Poměr tmel: vzduch	4,349



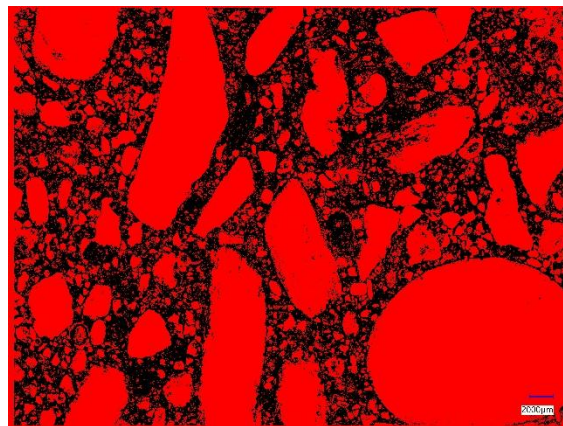
Graf 3 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 3B

Tab. 9 – Vyhodnocení analýzy obsahu kameniva v betonu – receptura 3B

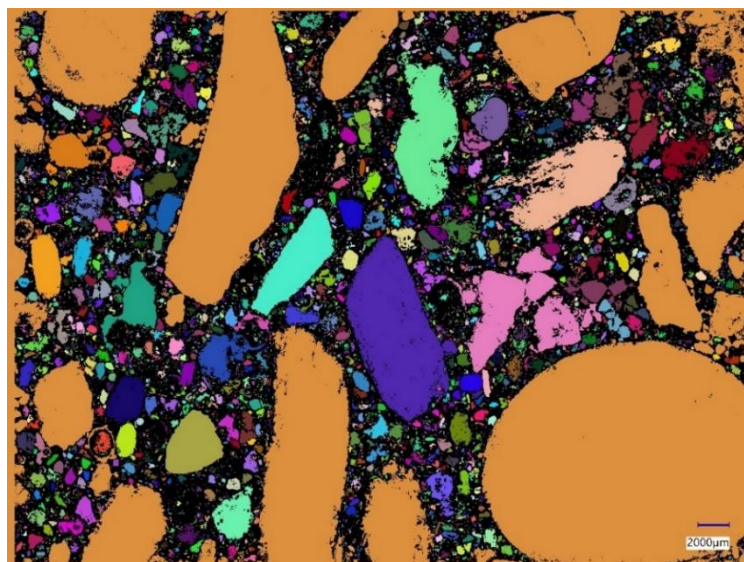
Materiál		Obsah [%]		Obsah kameniva při nezapočtení cementového tmelu [%]
Kamenivo	0/4	35,14	59,8	54,54
	4/8	16,21		23,69
	8/16	8,45		21,77
Cementový tmel		40,2		



Obr. 31 – Analýza obsahu kameniva v betonu – zkoumaný snímek – receptura 3B



Obr. 32 – Analýza obsahu kameniva v betonu – oddělení kameniva (červená) od cementového tmelu (černá) – receptura 3B



Obr. 33 – Analýza obsahu kameniva v betonu – barevné rozlišení kameniv dle velikosti jednotlivých zkoumaných prvků – receptura 3B

RECEPTURA 3C – C25/30 S3 (OBSAH VZDUCHU 7,5 %)

Tab. 10 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 3C

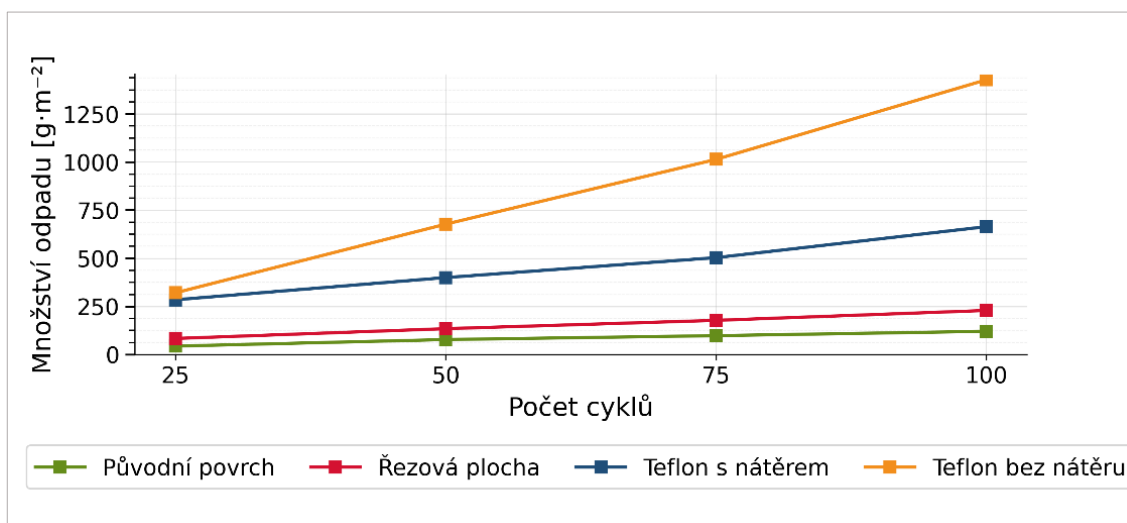
Vlastnost	Vyhodnocení	Vlastnost	Vyhodnocení
Sednutí kužele [mm]	130	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]	2,8
Obsah vzduchu v ČB (tlakoměrná metoda) [%]	8,5	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	37,2
Objemová hmotnost ČB [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2260	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	46,4
Objemová hmotnost ZB [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2240		

Tab. 11 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 3C

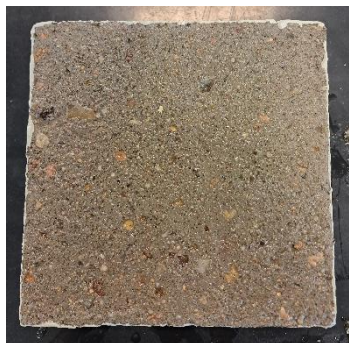
Obsah vzduchu v ČB (AVA) [%]		<3 mm	<1,5 mm	<0,5 mm
	Beton	7,8	6,7	4,1
	Pasta	24,7	19,2	13,3
	Tmel	25,7	22,6	13,6
Spacing factor [mm]		0,139		
Měrný povrch [mm ⁻¹]		24,6		

Tab. 12 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 3C

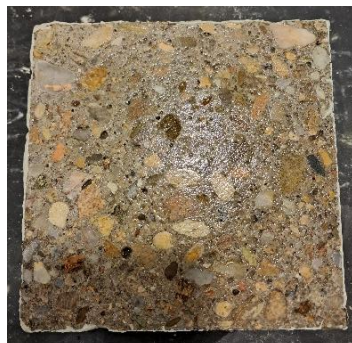
Úprava povrchu		Průměrné množství odpadu [g·m ⁻²]			
		25	50	75	100
Krychle	Původní povrch s nátěrem hran	43,6	77,7	98,0	120,7
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	83,3	134,3	177,6	229,2
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	320,6	677,2	1013,7	1427,4
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran	284,5	399,9	503,3	664,2



Graf 4 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušebního povrchu – receptura 3C



Obr. 36 – Vzorek po zkoušce CHRL - původní povrch s nátěrem hran – receptura 3C



Obr. 34 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 3C



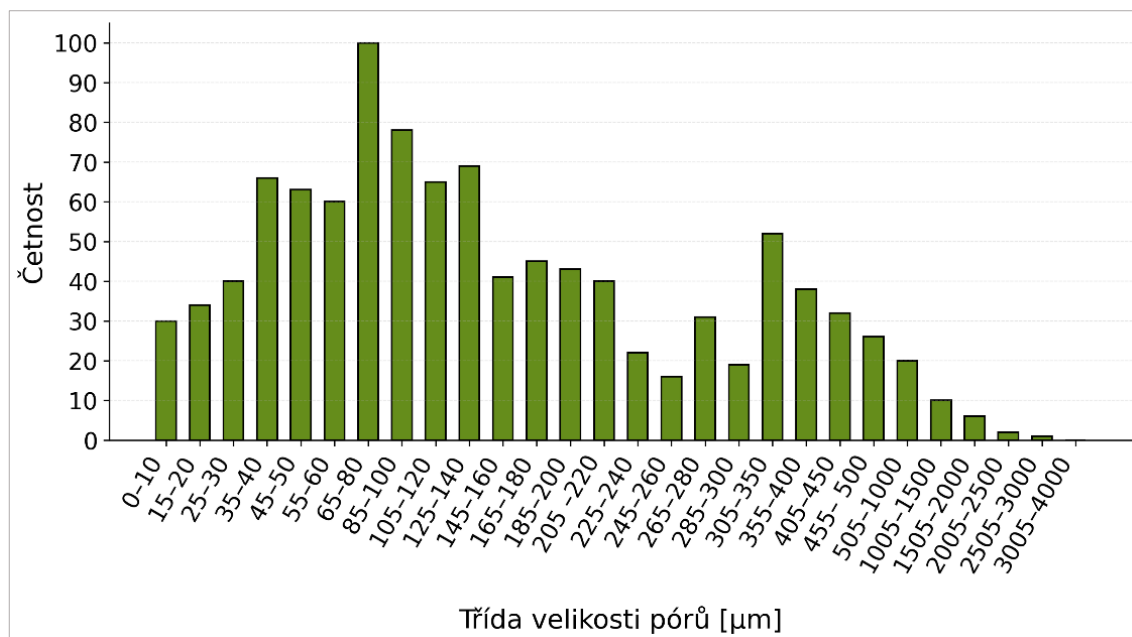
Obr. 35 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 3C



Obr. 37 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 3C

Tab. 13 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 3C

Vlastnost	Vyhodnocení
Celkový obsah vzduchu [%]	8,11
Obsah vzduchu <1000 μm [%]	6,61
Obsah vzduchu <500 μm [%]	6,10
Obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}) [%]	2,63
Spacing factor [mm]	0,16
Specifický povrch [mm^{-1}]	21,571
Poměr tmel: vzduch	3,450



Graf 5 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 3C

RECEPTURA 1B – C30/37 S3 (OBSAH VZDUCHU 4,5 %)

Tab. 14 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 1B

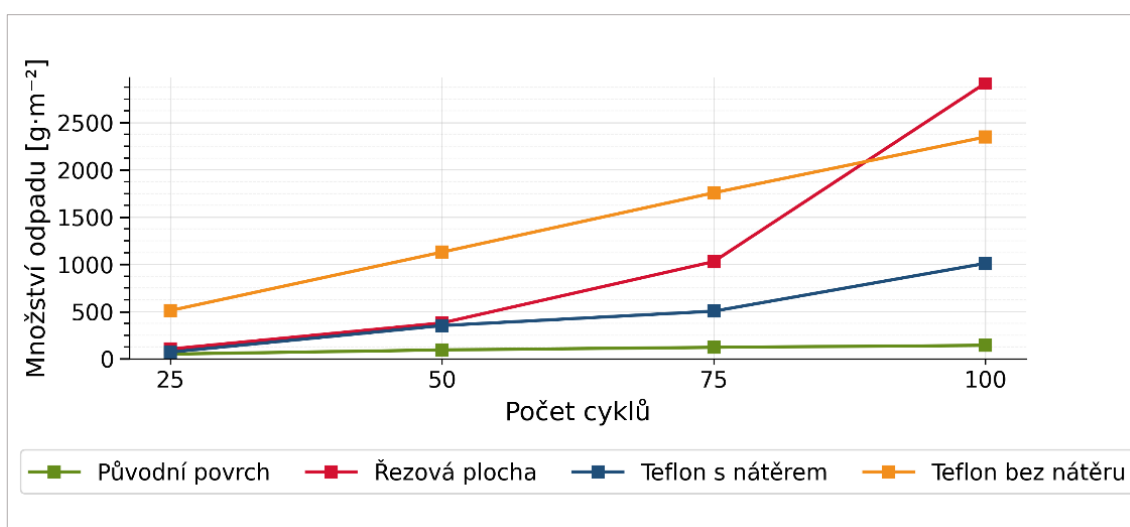
Vlastnost	Vyhodnocení	Vlastnost	Vyhodnocení
Sednutí kužele [mm]	120	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]	3,3
Obsah vzduchu v ČB (tlakoměrná metoda) [%]	5,5	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	43,0
Objemová hmotnost ČB [kg·m ⁻³]	2290	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	55,4
Objemová hmotnost ZB [kg·m ⁻³]	2290		

Tab. 15 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 1B

Obsah vzduchu v ČB (AVA) [%]		<3 mm	<1,5 mm	<0,5 mm
	Beton	5,5	3,6	2,1
	Pasta	23,8	16,0	8,2
	Tmel	19,2	13,7	6,7
Spacing factor [mm]		0,278		
Měrný povrch [mm ⁻¹]		24,3		

Tab. 16 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 1B

Úprava povrchu		Průměrné množství odpadu [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]			
		25	50	75	100
Krychle	Původní povrch s nátěrem hran	50,8	94,9	122,1	143,1
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	104,3	380,1	1029,7	2919,0
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	511,1	1129,7	1757,2	2348,5
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran	71,7	352,2	504,7	1010,8



Graf 6 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební povrchu – receptura 1B



Obr. 38 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 1B



Obr. 41 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 1B



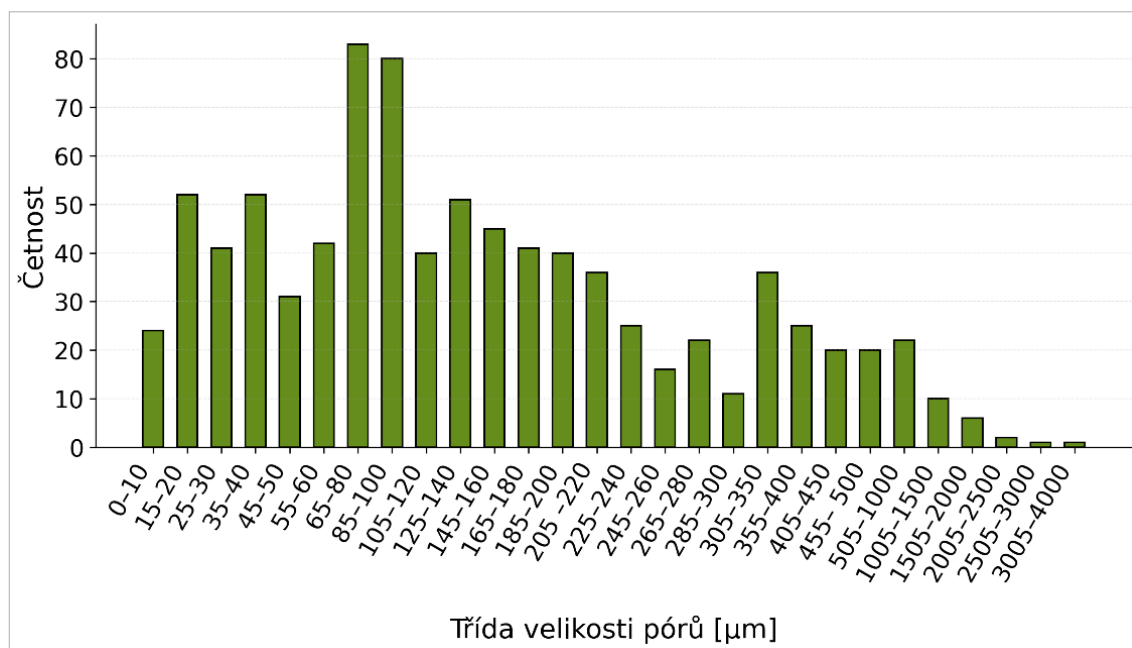
Obr. 40 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 1B

Obr. 39 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 1B

Pozn.: U vzorků s povrchem vzniklým řezem s nátěrem hran došlo po 50 cyklech k poškození a utržení nátěru a následnému rozpadu hran zkušebních těles, jak je vidět na obr. 41.

Tab. 17 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 1B

Vlastnost	Vyhodnocení
Celkový obsah vzduchu [%]	6,99
Obsah vzduchu <1000 μm [%]	5,35
Obsah vzduchu <500 μm [%]	4,76
Obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}) [%]	2,42
Spacing factor [mm]	0,19
Specifický povrch [mm^{-1}]	20,877
Poměr tmel: vzduch	4,003



Graf 7 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 1B

RECEPTURA 1C – C30/37 S3 (OBSAH VZDUCHU 7,5 %)

Tab. 18 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 1C

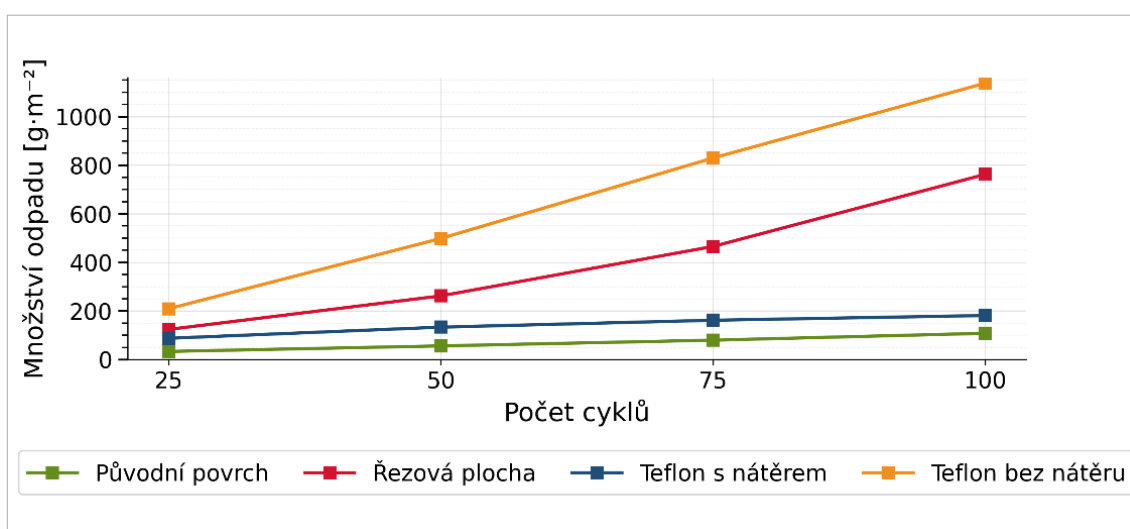
Vlastnost	Vyhodnocení	Vlastnost	Vyhodnocení
Sednutí kužele [mm]	130	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]	3,3
Obsah vzduchu v ČB (tlakoměrná metoda) [%]	8,4	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	43,4
Objemová hmotnost ČB [kg·m ⁻³]	2310	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	53,3
Objemová hmotnost ZB [kg·m ⁻³]	2280		

Tab. 19 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 1C

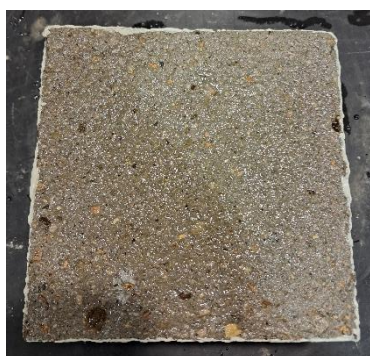
Obsah vzduchu v ČB (AVA) [%]		<3 mm	<1,5 mm	<0,5 mm
	Beton	7,1	5,0	2,9
	Pasta	25,9	13,4	7,2
	Tmel	23,7	11,9	6,2
Spacing factor [mm]		0,226		
Měrný povrch [mm ⁻¹]		26,7		

Tab. 20 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 1C

Úprava povrchu		Průměrné množství odpadu [g·m ⁻²]			
		25	50	75	100
Krychle	Původní povrch s nátěrem hran	33,1	56,1	79,6	108,0
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	123,9	261,9	465,3	762,2
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	208,9	498,2	829,4	1137,6
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran	87,3	133,3	161,7	181,2



Graf 8 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušebního povrchu – receptura 1C



Obr. 42 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 1C



Obr. 43 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 1C



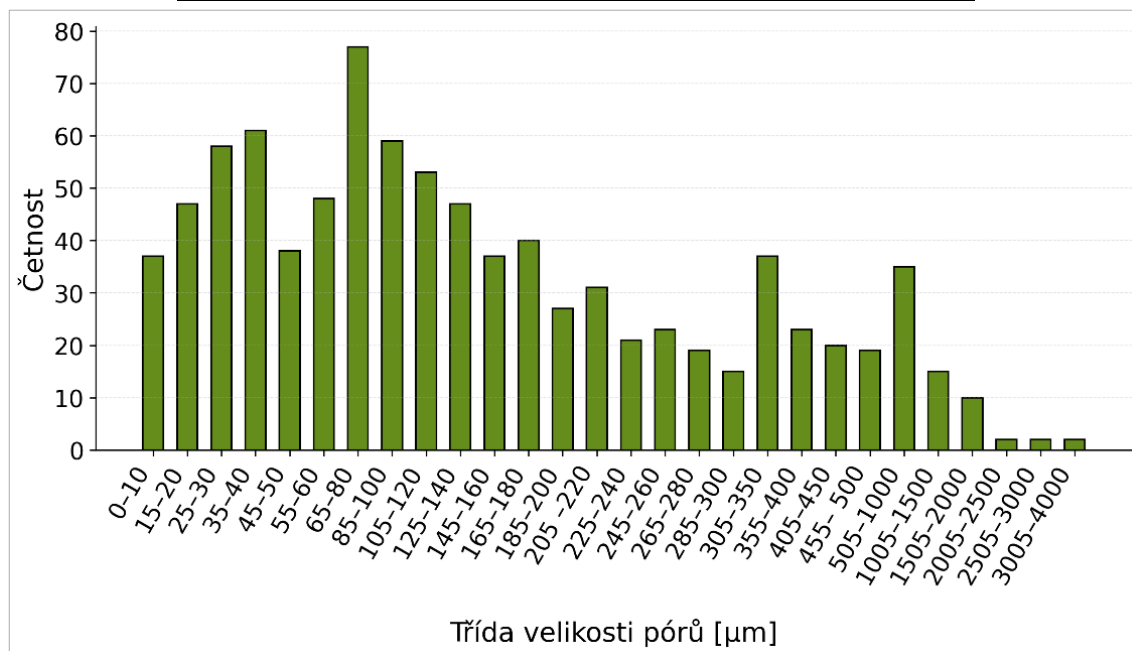
Obr. 44 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 1C



Obr. 45 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 1C

Tab. 21 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 1C

Vlastnost	Vyhodnocení
Celkový obsah vzduchu [%]	8,03
Obsah vzduchu <1000 μm [%]	5,46
Obsah vzduchu <500 μm [%]	4,50
Obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}) [%]	2,24
Spacing factor [mm]	0,19
Specifický povrch [mm^{-1}]	18,743
Poměr tmel: vzduch	3,482



Graf 9 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 1C

RECEPTURA 2A – C35/45 S3 (OBSAH VZDUCHU 2,0 %)

Tab. 22 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 2A

Vlastnost	Vyhodnocení	Vlastnost	Vyhodnocení
Sednutí kužele [mm]	140	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]	3,1
Obsah vzduchu v ČB (tlakoměrná metoda) [%]	3,1	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	51,3
Objemová hmotnost ČB [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2340	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	61,9
Objemová hmotnost ZB [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2330		

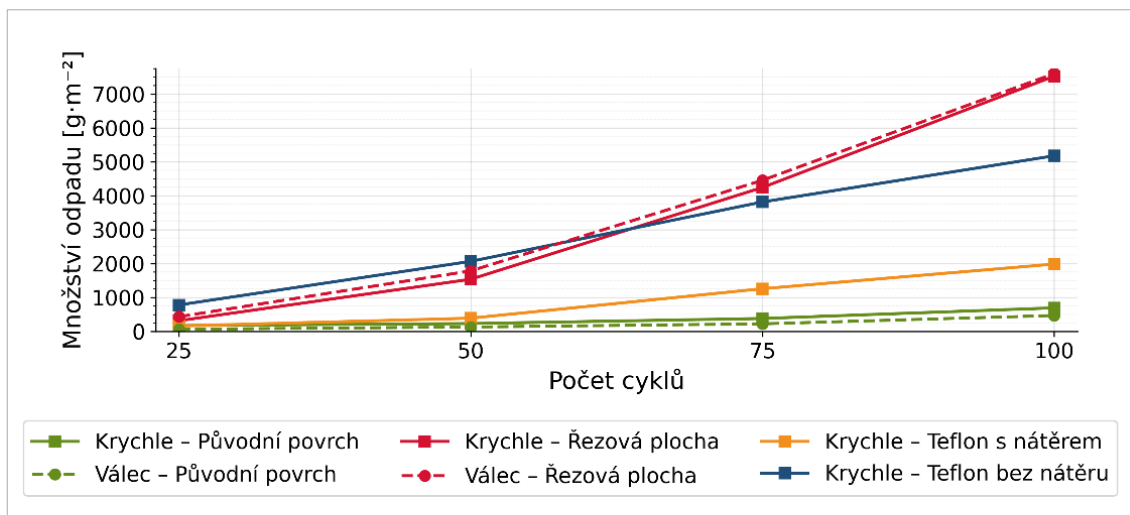
Tab. 23 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 2A

Obsah vzduchu v ČB (AVA) [%]		<3 mm	<1,5 mm	<0,5 mm
	Beton		1,0	0,8
Pasta		3,1	2,5	1,0
Tmel		3,0	2,5	1,0
Spacing factor [mm]		0,438		
Měrný povrch [mm^{-1}]		16,5		

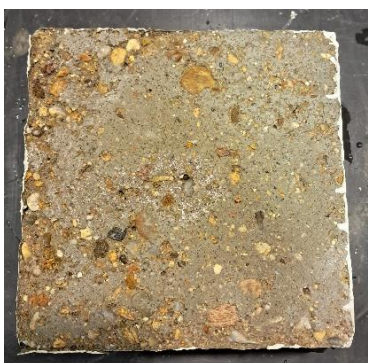
Pozn.: Výsledky naměřené u receptury 2A, je třeba interpretovat s určitou rezervou, protože má nízký obsah vzduchu (3,1 %), který se pohybuje na hranici měřitelnosti metody AVA a není možné určit zda přístroj zkoušku ukončil předčasně.

Tab. 24 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 2A

Úprava povrchu		Průměrné množství odpadu [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]			
		25	50	75	100
Krychle	Původní povrch s nátěrem hran	172,3	232,6	382,1	693,8
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	315,9	1538,2	4244,6 (rozpad)	7524,1 (rozpad)
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	781,6	2065,5	3817,4 (rozpad)	5177,9 (rozpad)
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran	160,4	390,5	1259,3	1985,7
Válec	Původní povrch s nátěrem boční zkušební plochy	63,30	130,61	223,36	468,83
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem boční zkušební plochy	434,7	1784,9	4456,2 (rozpad)	7601,6 (rozpad)



Graf 10 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušebního povrchu – receptura 2A



Obr. 49 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 2A



Obr. 48 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 2A



Obr. 47 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 2A



Obr. 46 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 2A



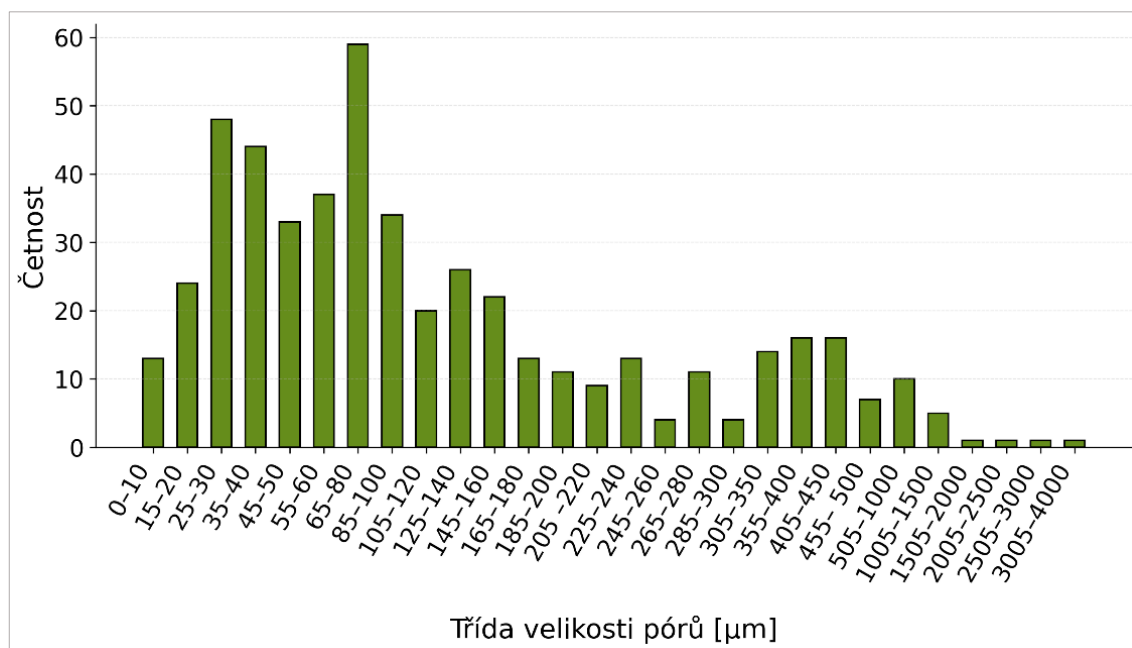
Obr. 50 – Vzorek po zkoušce CHRL – Válcové těleso – původní povrch s nátěrem hran – receptura 2A



Obr. 51 – Vzorek po zkoušce CHRL – Válcové těleso – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 2A

Tab. 25 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 2A

Vlastnost	Vyhodnocení
Celkový obsah vzduchu [%]	3,38
Obsah vzduchu <1000 μm [%]	2,58
Obsah vzduchu <500 μm [%]	2,32
Obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}) [%]	1,19
Spacing factor [mm]	0,24
Specifický povrch [mm^{-1}]	24,507
Poměr tmel: vzduch	8,272



Graf 11 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 2A

RECEPTURA 2B – C35/45 S3 (OBSAH VZDUCHU 4,5 %)

Tab. 26 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 2B

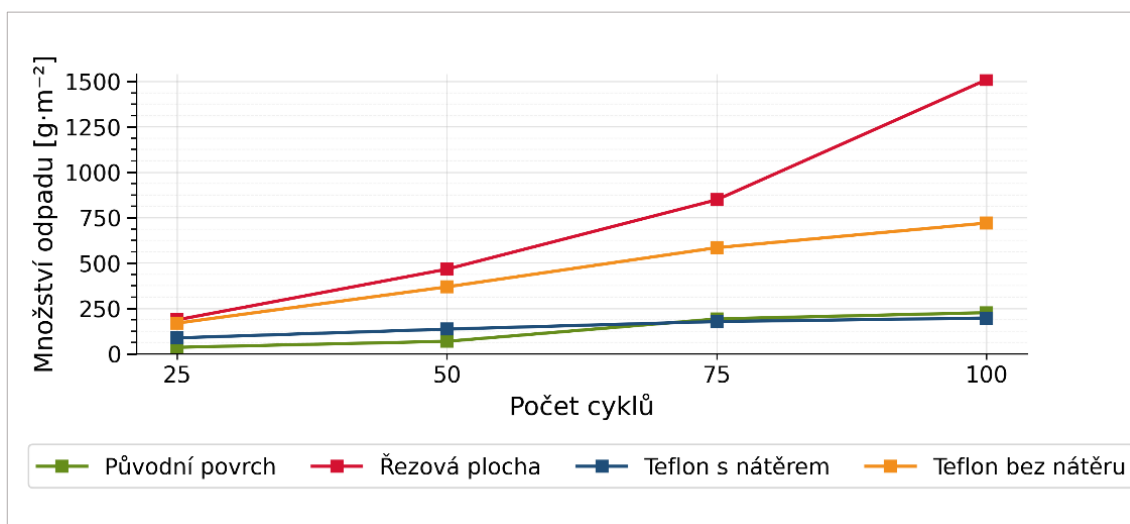
Vlastnost	Vyhodnocení	Vlastnost	Vyhodnocení
Sednutí kužele [mm]	140	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]	3,8
Obsah vzduchu v ČB (tlakoměrná metoda) [%]	4,9	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	52,7
Objemová hmotnost ČB [kg·m ⁻³]	2350	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	66,4
Objemová hmotnost ZB [kg·m ⁻³]	2330		

Tab. 27 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 2B

Obsah vzduchu v ČB (AVA) [%]		< 3 mm	< 1,5 mm	< 0,5 mm
	Beton	4,0	2,8	1,8
	Pasta	18,6	11,7	8,8
	Tmel	12,9	11,3	8,5
Spacing factor [mm]		0,224		
Měrný povrch [mm ⁻¹]		26,6		

Tab. 28 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 2B

Úprava povrchu		Průměrné množství odpadu [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]			
		25	50	75	100
Krychle	Původní povrch s nátěrem hran	36,0	69,1	192,5	227,0
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	187,4	466,4	848,5	1509,9
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	317,0	673,0	1108,1	1422,8
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran	197,3	358,1	575,8	864,1



Graf 12 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební povrchu – receptura 2B



Obr. 54 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 2B



Obr. 52 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 2B



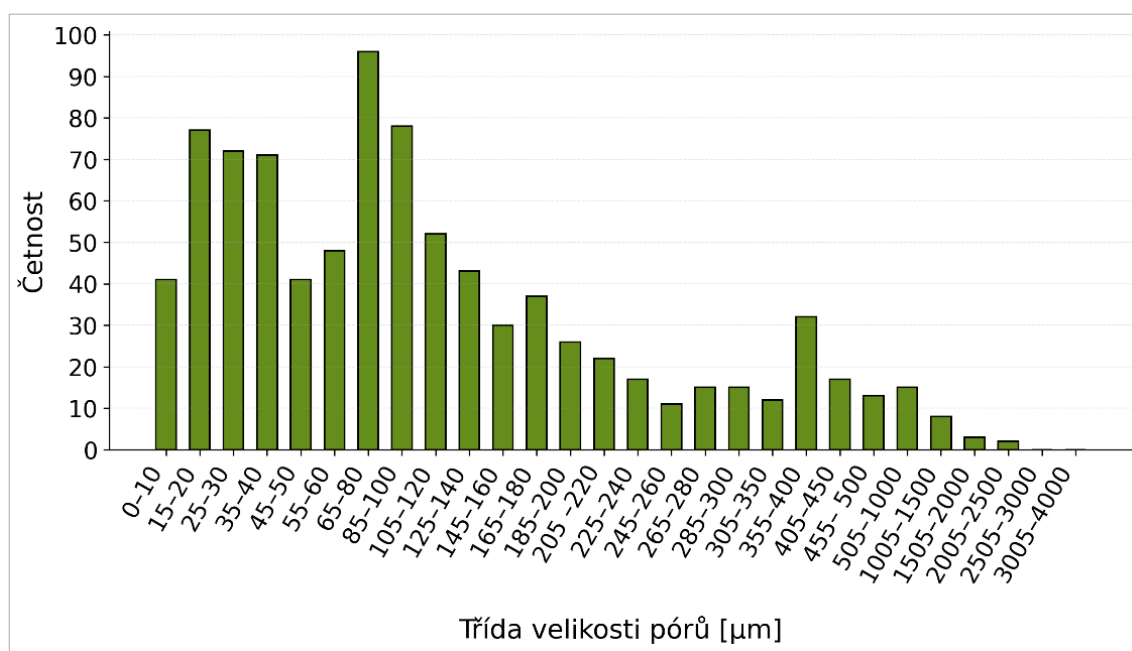
Obr. 53 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 2B



Obr. 55 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 2B

Tab. 29 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 2B

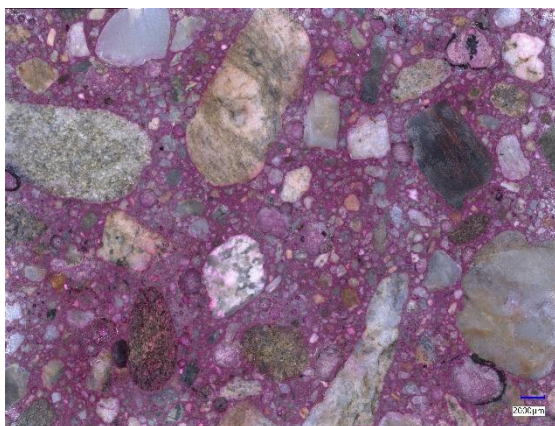
Vlastnost	Vyhodnocení
Celkový obsah vzduchu [%]	5,40
Obsah vzduchu <1000 μm [%]	4,40
Obsah vzduchu <500 μm [%]	4,02
Obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}) [%]	2,60
Spacing factor [mm]	0,17
Specifický povrch [mm^{-1}]	25,574
Poměr tmel: vzduch	5,174



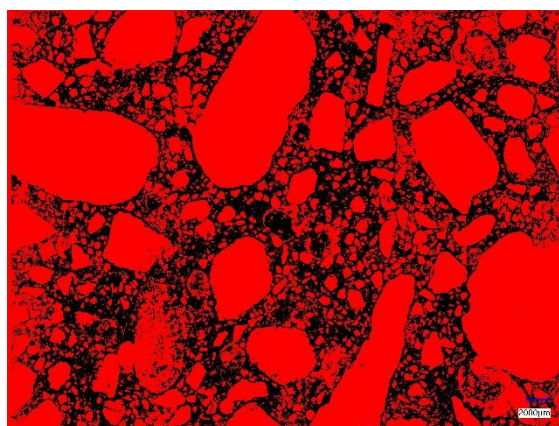
Graf 13 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 2B

Tab. 30 – Vyhodnocení analýzy obsahu kameniva v betonu - receptura 2B

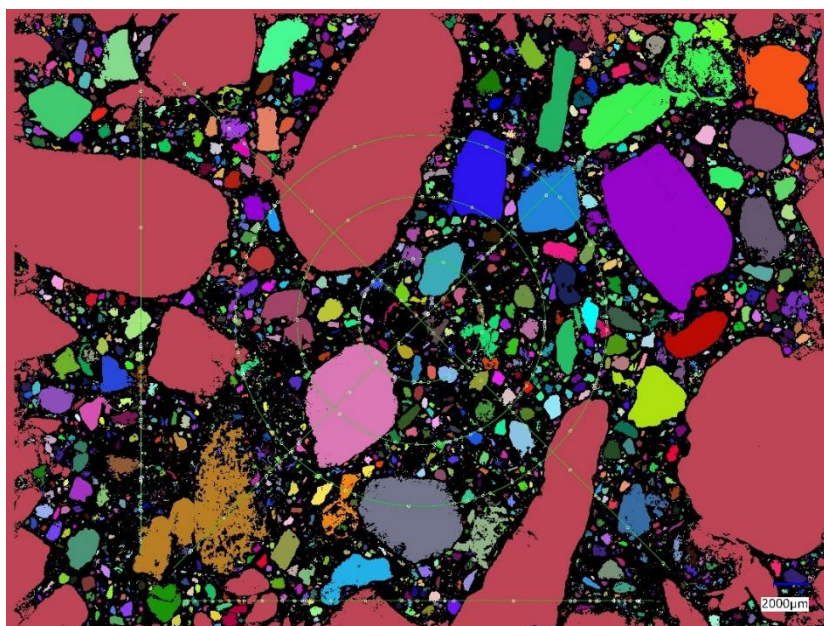
Materiál		Obsah [%]		Obsah kameniva při nezapočtení cementového tmelu [%]
Kamenivo	0/4	35,21	65,4	53,83
	4/8	11,5		17,59
	8/16	18,69		28,58
Cementový tmel		34,6		



Obr. 57 – Analýza obsahu kameniva v betonu – zkoumaný snímek – receptura 2B



Obr. 56 – Analýza obsahu kameniva v betonu – oddělení kameniva (červená) od cementového tmelu (černá) – receptura 2B



Obr. 58 – Analýza obsahu kameniva v betonu – barevné rozlišení dle velikosti jednotlivých zkoumaných prvků – receptura 2B

RECEPTURA 2C – C35/45 S3 (OBSAH VZDUCHU 7,5 %)

Tab. 31 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 2C

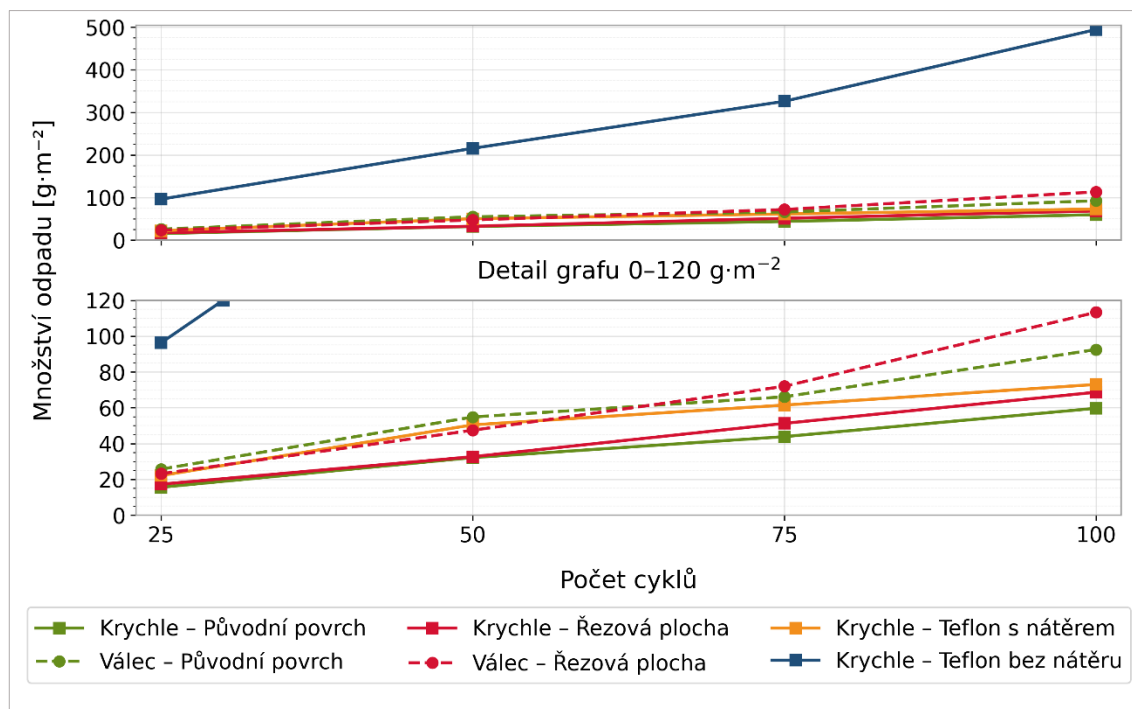
Vlastnost	Vyhodnocení	Vlastnost	Vyhodnocení
Sednutí kužele [mm]	110	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]	4,1
Obsah vzduchu v ČB (tlakoměrná metoda) [%]	8,0	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	47,5
Objemová hmotnost ČB [kg·m ⁻³]	2300	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	54,8
Objemová hmotnost ZB [kg·m ⁻³]	2290		

Tab. 32 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 2C

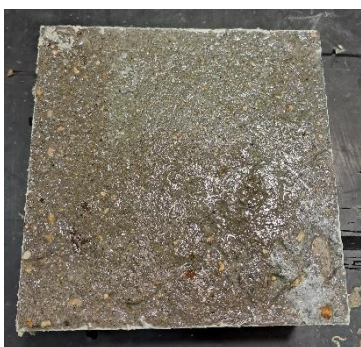
Obsah vzduchu v ČB (AVA) [%]		<3 mm	<1,5 mm	<0,5 mm
	Beton	8,2	4,4	3,2
	Pasta	18,8	18,1	8,4
	Tmel	17,0	16,4	8,1
Spacing factor [mm]		0,187		
Měrný povrch [mm ⁻¹]		23,2		

Tab. 33 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 2C

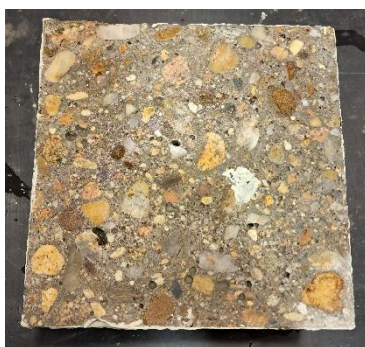
Úprava povrchu		Průměrné množství odpadu [g·m ⁻²]			
		25	50	75	100
Krychle	Původní povrch s nátěrem hran	15,6	32,1	43,9	59,7
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	17,3	32,6	51,3	68,7
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	96,2	215,5	326,0	494,5
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran	22,1	50,4	61,5	73,0
Válec	Původní povrch s nátěrem boční zkušební plochy	25,69	54,80	66,10	92,51
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem boční zkušební plochy	23,1	47,4	72,0	113,3



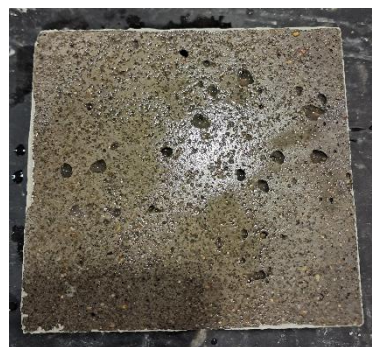
Graf 14 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušebního povrchu – receptura 2C



Obr. 59 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 2C



Obr. 61 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 2C



Obr. 60 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 2C



Obr. 62 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 2C



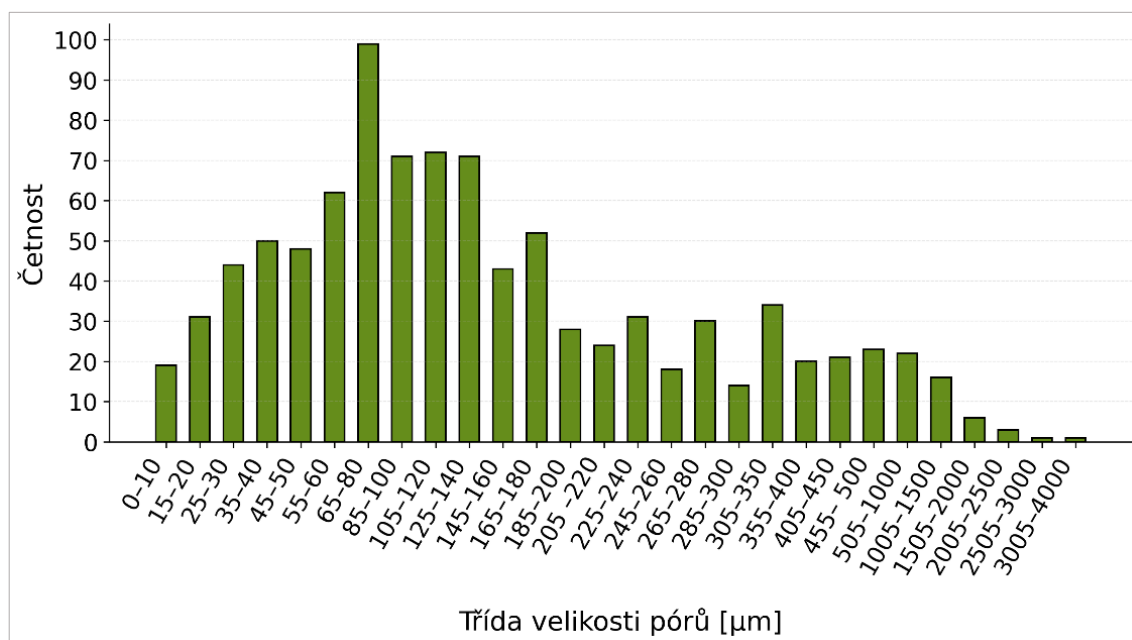
Obr. 64 – Válcové těleso – Vzorek po zkoušce CHRL –
původní povrch s nátěrem hran – receptura 2C



Obr. 63 – válcové těleso -
Vzorek po zkoušce CHRL –
povrch vzniklý řezem
s nátěrem hran – receptura
2C

Tab. 34 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 2C

Vlastnost	Vyhodnocení
Celkový obsah vzduchu [%]	7,76
Obsah vzduchu <1000 μm [%]	5,58
Obsah vzduchu <500 μm [%]	5,12
Obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}) [%]	2,85
Spacing factor [mm]	0,18
Specifický povrch [mm^{-1}]	20,486
Poměr tmel: vzduch	3,602



Graf 15 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 2C

RECEPTURA 4B – C35/45 S4 (OBSAH VZDUCHU 4,5 %)

Tab. 35 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 4B

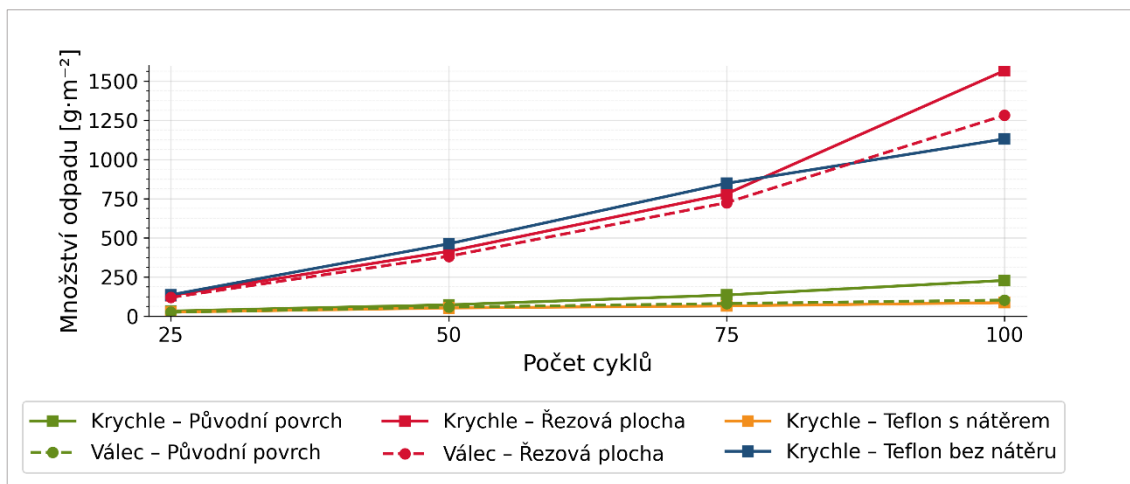
Vlastnost	Vyhodnocení	Vlastnost	Vyhodnocení
Sednutí kužele [mm]	190	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]	3,1
Obsah vzduchu v ČB (tlakoměrná metoda) [%]	5,0	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	43,0
Objemová hmotnost ČB [kg·m ⁻³]	2290	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	48,8
Objemová hmotnost ZB [kg·m ⁻³]	2270		

Tab. 36 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 4B

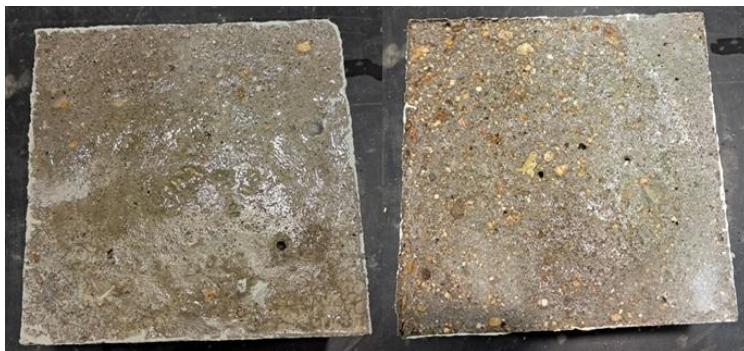
Obsah vzduchu v ČB (AVA) [%]		<3 mm	<1,5 mm	<0,5 mm
	Beton		3,7	2,9
Pasta		12,4	9,7	3,7
Tmel		10,8	8,7	3,2
Spacing factor [mm]		0,182		
Měrný povrch [mm ⁻¹]		24,7		

Tab. 37 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 4B

Úprava povrchu		Průměrné množství odpadu [g·m ⁻²]			
		25	50	75	100
Krychle	Původní povrch s nátěrem hran	33,2	72,8	135,5	228,1
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	132,2	414,0	780,4	1566,3
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	136,6	461,9	847,6	1130,4
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran	26,3	53,1	66,0	87,0
Válec	Původní povrch s nátěrem boční zkušební plochy	25,3	58,8	80,9	102,8
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem boční zkušební plochy	119,6	382,4	724,3	1281,3



Graf 16 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušebního povrchu – receptura 4B



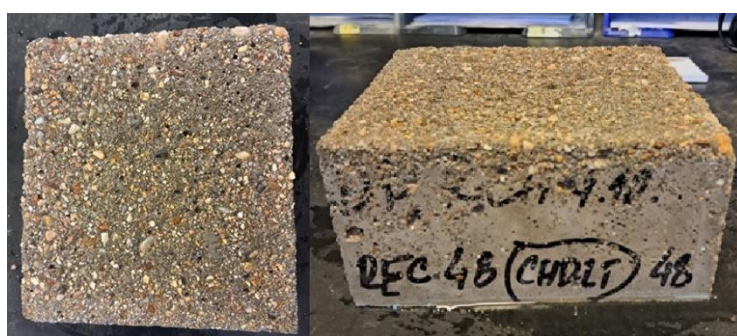
Obr. 68 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran - receptura 4B



Obr. 65 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 4B



Obr. 67 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 4B



Obr. 66 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 4B



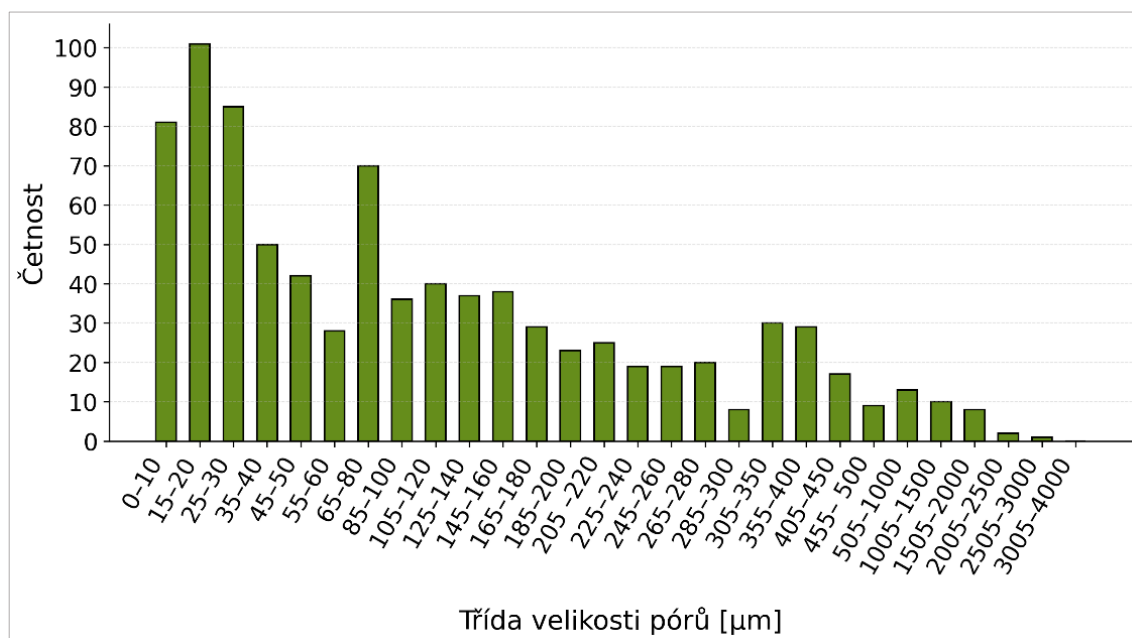
Obr. 70 – Válcové těleso – vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 4B



Obr. 69 – Válcové těleso – vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 4B

Tab. 38 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 4B

Vlastnost	Vyhodnocení
Celkový obsah vzduchu [%]	5,76
Obsah vzduchu <1000 μm [%]	4,12
Obsah vzduchu <500 μm [%]	3,86
Obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}) [%]	1,91
Spacing factor [mm]	0,18
Specifický povrch [mm^{-1}]	25,174
Poměr tmel: vzduch	4,854



Obr. 71 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 4B

RECEPTURA 4C – C35/45 S4 (OBSAH VZDUCHU 7,5 %)

Tab. 39 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 4C

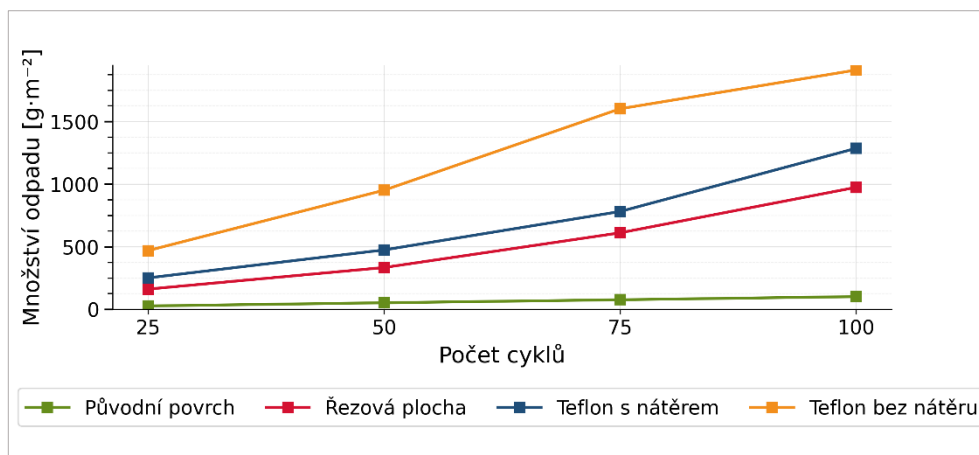
Vlastnost	Vyhodnocení	Vlastnost	Vyhodnocení
Sednutí kužele [mm]	180	Pevnost v tahu povrchových vrstev [MPa]	3,3
Obsah vzduchu v ČB (tlakoměrná metoda) [%]	7,1	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	39,3
Objemová hmotnost ČB [kg·m ⁻³]	2230	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	47,9
Objemová hmotnost ZB [kg·m ⁻³]	2230		

Tab. 40 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 4C

Obsah vzduchu v ČB (AVA) [%]		< 3 mm	< 1,5 mm	< 0,5 mm
	Beton	8,4	5,7	2,4
	Pasta	16,1	15,4	8,1
	Tmel	15,8	15,2	7,4
Spacing factor [mm]		0,216		
Měrný povrch [mm ⁻¹]		24,3		

Tab. 41 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 4C

Úprava povrchu		Průměrné množství odpadu [g·m ⁻²]			
		25	50	75	100
Krychle	Původní povrch s nátěrem hran	27,1	52,3	76,4	101,6
	Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	161,4	333,9	611,2	974,5
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	469,2	951,6	1602,0	1911,6
	Povrch vniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran	251,1	474,5	781,4	1286,0



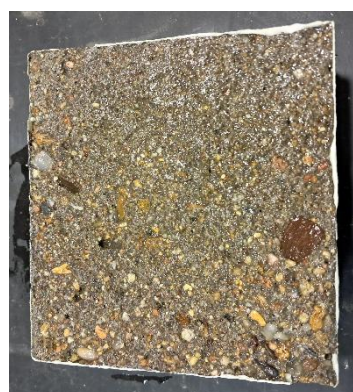
Obr. 76 – Grafické vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušebního povrchu – receptura 4C



Obr. 72 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 4C



Obr. 73 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 4C



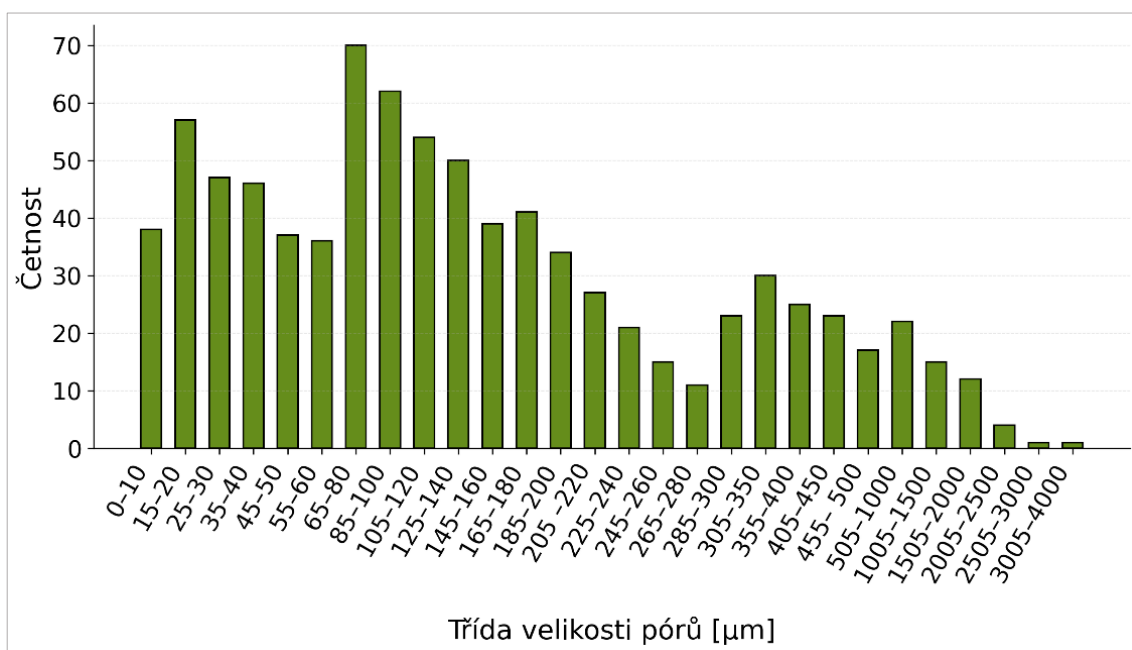
Obr. 75 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 4C



Obr. 74 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 4C

Tab. 42 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 4C

Vlastnost	Vyhodnocení
Celkový obsah vzduchu [%]	7,55
Obsah vzduchu <1000 μm [%]	4,91
Obsah vzduchu <500 μm [%]	4,43
Obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}) [%]	2,32
Spacing factor [mm]	0,20
Specifický povrch [mm^{-1}]	18,932
Poměr tmel: vzduch	3,702



Graf 17 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 4C

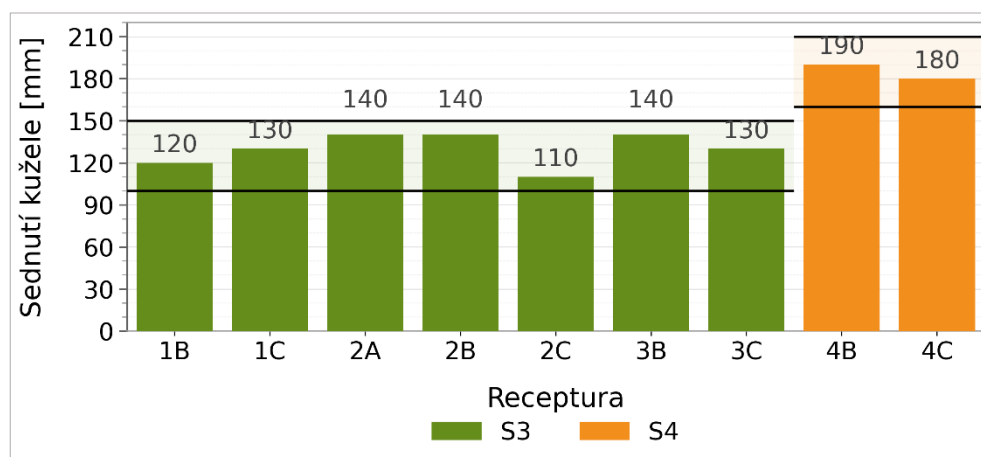
13.2 POROVNÁNÍ ZAKLADNÍCH VLASTNOSTÍ BETONŮ

Tato kapitola se zabývá porovnáním vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu napříč jednotlivými recepturami. Hodnoceny jsou vlastnosti běžně používané pro základní charakteristiku betonu, konkrétně konzistence, obsah vzduchu v ČB stanovený tlakoměrnou metodou, objemová hmotnost ČB i ZB a pevnost betonu v tlaku. Navíc do této kapitoly byla zařazena i pevnost v tahu povrchových vrstev betonu. Výsledky slouží k posouzení vlivu složení betonu na jeho základní fyzikálně-mechanické vlastnosti a zároveň tvoří podklad pro další hodnocení mikrostruktury a trvanlivosti betonu v následujících kapitolách.

KONZISTENCE ČERSTVÉHO BETONU

Tab. 43 – Konzistence betonu

Receptura	Požadovaná konzistence	Sednutí kužele [mm]	Konzistence
2A	S3 (100–150 mm)	140	S3
1B		120	S3
2B		140	S3
3B		140	S3
4B	S4 (160–210 mm)	190	S4
1C	S3 (100–150 mm)	130	S3
2C		110	S3
3C		130	S3
4C	S4 (160–210 mm)	180	S4



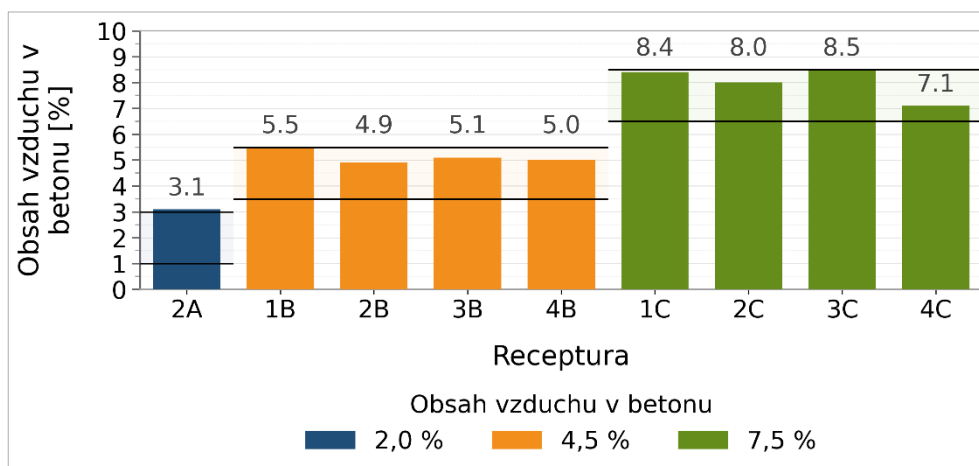
Graf 18 – Porovnání konzistence betonu

Laboratorně bylo ověřeno, že všechny receptury odpovídaly experimentálnímu návrhu. Receptury 1-3 dosáhly konzistence S3, zatímco receptura 4 splnila stupeň konzistence S4.

OBSAH VZDUCHU V ČERSTVÉM BETONU

Tab. 44 – Obsah vzduchu v ČB

Receptura	Požadovaný obsah vzduchu [%]	Obsah vzduchu [%]
2A	2,0 ± 1	3,1
1B	4,5 ± 1	5,5
2B		4,9
3B		5,1
4B		5,0
1C	7,5 ± 1	8,4
2C		8,0
3C		8,5
4C		7,1



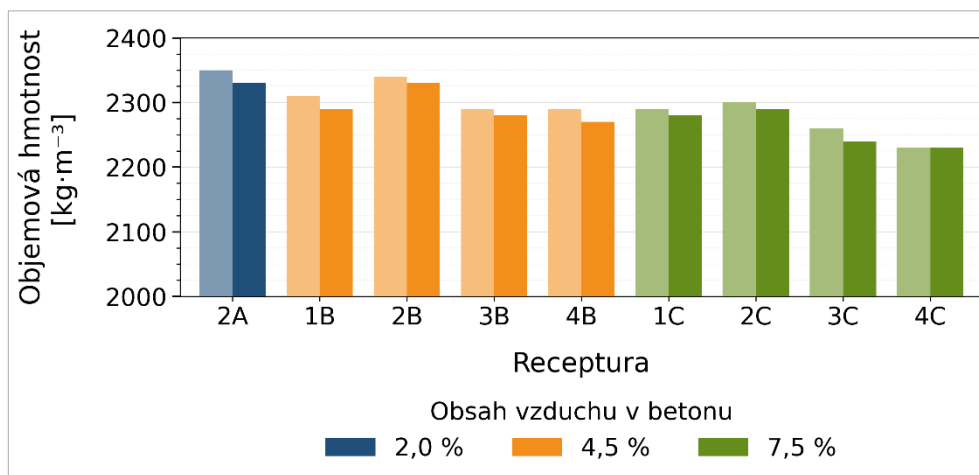
Graf 19 – Porovnání obsahu vzduchu v ČB stanoveného tlakoměrnou metodou

Z naměřených výsledků vyplývá, že obsah vzduchu v ČB se pohyboval v rozsahu požadovaných hodnot. Neprovzdušněná receptura 2A vykázala obsah vzduchu 3,1 %. U receptur 1B, 2B, 3B a 4B (požadovaná míra provzdušnění betonu 4,5 %) se obsah vzduchu pohyboval v rozmezí 4,9 až 5,5 %, u receptur 1C, 2C, 3C a 4C (míra provzdušnění 7,5 %) v rozmezí 7,1 až 8,5 %.

OBJEMOVÁ HMOTNOST BETONU

Tab. 45 – Objemová hmotnost betonu

Receptura	Požadovaná OH [kg·m ⁻³]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	
		ČB	ZB
2A	2290	2290	2280
1B	2310	2290	2290
2B	2290	2310	2280
3B	2320	2260	2240
4B	2290	2340	2330
1C	2310	2300	2290
2C	2290	2290	2270
3C	2320	2350	2330
4C	2290	2230	2230



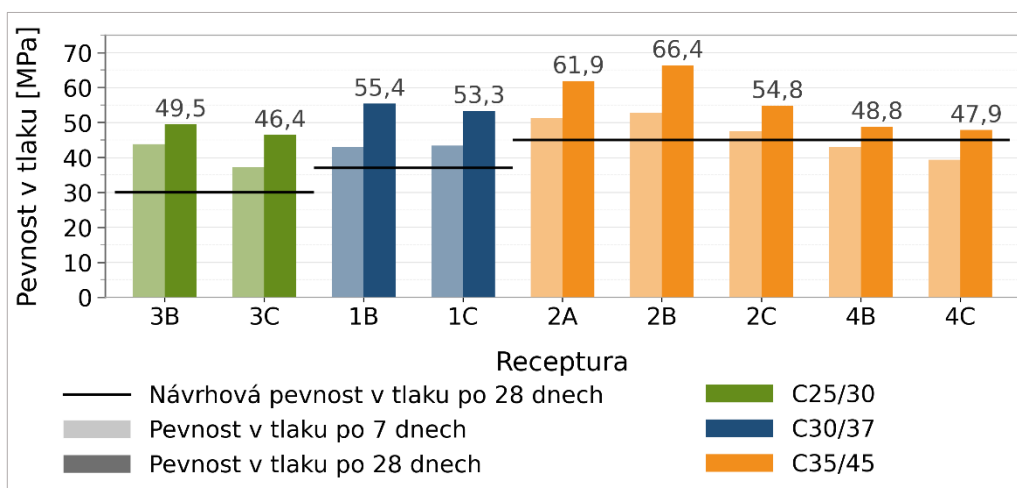
Graf 20 – Porovnání objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu

Objemová hmotnost ČB se pohybovala v rozmezí 2230 až 2350 kg·m⁻³, přičemž rozdíly odpovídaly návrhu a rozdílnému obsahu vzduchu v jednotlivých recepturách. U ZB byly zaznamenány hodnoty nižší o 10 až 20 kg·m⁻³, což odpovídá úbytku záměsové vody a probíhajícím hydratačním procesům.

PEVNOST BETONU V TLAKU

Tab. 46 – Pevnost betonu v tlaku

Receptura	Požadovaná pevnost betonu v tlaku [MPa]	Pevnost betonu v tlaku [MPa]	
		Po 7 dnech	Po 28 dnech
2A	45	51,3	61,9
1B	37	43,0	55,4
2B	45	52,7	66,4
3B	30	43,8	49,5
4B	45	43,0	48,8
1C	37	43,4	53,3
2C	45	47,5	54,8
3C	30	37,2	46,4
4C	45	39,3	47,9



Graf 21 – Porovnání pevnosti betonu v tlaku

U všech receptur byla po 28 dnech splněna požadovaná pevnost betonu v tlaku. Receptura 3B s požadovanou pevnostní třídou C25/30 dosáhla pevnosti 49,5 MPa, zatímco u receptury 3C, stejné pevnostní třídy se zvýšeným obsahem vzduchu v betonu, došlo k poklesu pevnosti na 46,4 MPa. Receptury s požadovanou pevnostní třídou C30/37 měly pevnost betonu v tlaku 55,4 MPa (1B) a 53,3 MPa (1C).

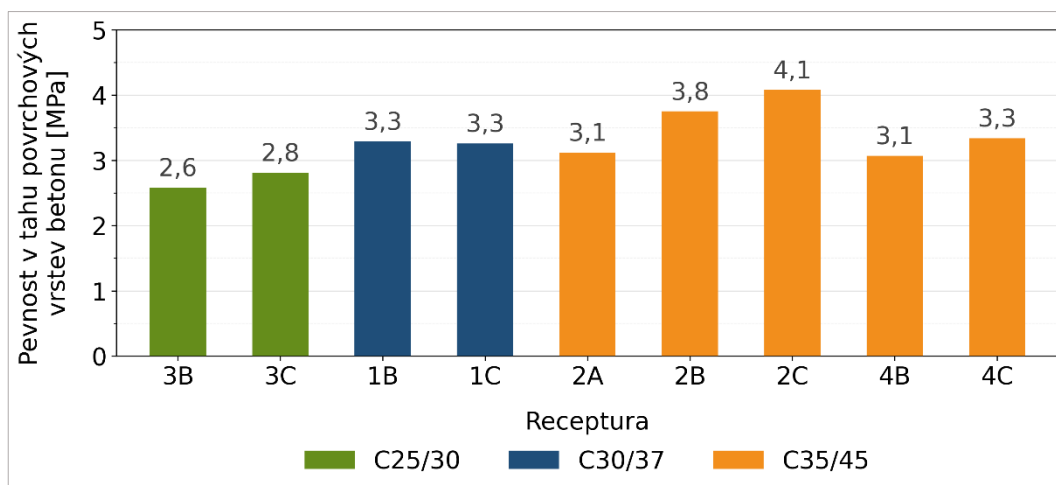
Receptura 2A dosáhla pevnosti 61,9 MPa, receptura 2B 66,4 MPa a receptura 2C 54,8 MPa. Tyto receptury byly navrženy jako pevnostní třída C35/45, shodně jako receptury 4B (48,8 MPa) a 4C (47,9 MPa). Nižší dosažené pevnosti byly pravděpodobně způsobeny vyšší hodnotou konzistence čerstvého betonu.

Pevnost betonu v tlaku po 7 dnech dosahovala u jednotlivých receptur 75 až 85 % pevnosti stanovené po 28 dnech. Projevil se také pokles pevnosti u receptur stejného složení, ale s vyšším obsahem vzduchu v betonu.

PEVNOST V TAHU POVRCHOVÝCH VRSTEV BETONU

Tab. 47 – Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu

Receptura	Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu [MPa]
2A	3,1
1B	3,3
2B	3,8
3B	2,6
4B	3,1
1C	3,3
2C	4,1
3C	2,8
4C	3,3



Graf 22 – Porovnání pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu

Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu byla naměřena v rozmezí 2,6 až 4,1 MPa, přičemž vyšší hodnoty byly zaznamenány u receptur s vyšším obsahem vzduchu v betonu.

Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu byla do analýzy zahrnuta s ohledem na charakter porušení zkušebních těles při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL, kdy dochází k degradaci a porušení povrchové vrstvy vlivem mrazu. Tento parametr umožňuje kvantifikovat samotnou mechanickou soudržnost struktury a povrchových vrstev betonu.

Z tohoto důvodu byla tato vlastnost uvažována jako doplňkový údaj pro zpřesnění predikčního modelu průběhu degradace betonu.

13.3 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ VNITŘNÍ STRUKTURY BETONU

Tato kapitola se věnuje porovnání parametrů vnitřní struktury betonu. Hodnoceny jsou zejména parametry vzduchového systému stanovené metodou AVA a mikroskopickou analýzou. Doplňkově je porovnán také mikroskopicky stanovený obsah kameniva v betonu.

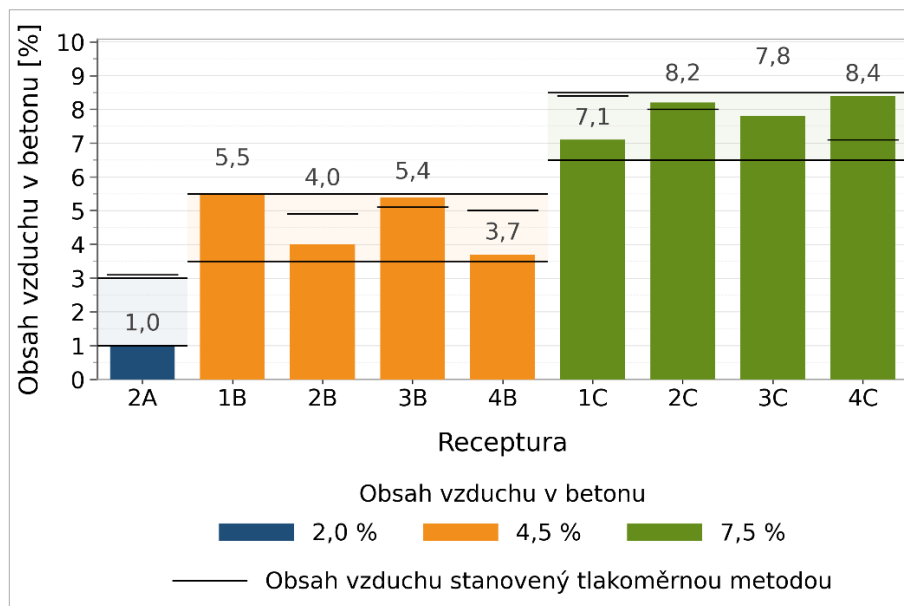
Porovnání je provedeno ve dvou rovinách. Jednak je posuzován vliv receptury na jednotlivé parametry získané oběma metodami a zároveň jsou vzájemně porovnány odpovídající parametry stanovené metodou AVA a mikroskopickou analýzou. Cílem je posoudit vliv vyplývající z použité metody. Výsledky, které jsou v této kapitole uvedeny, tvoří podklad pro následnou tvorbu predikčního modelu závislosti mezi parametry vzduchového systému betonu a jeho odolností proti CHRL.

METODA AVA – ČERSTVÝ BETON

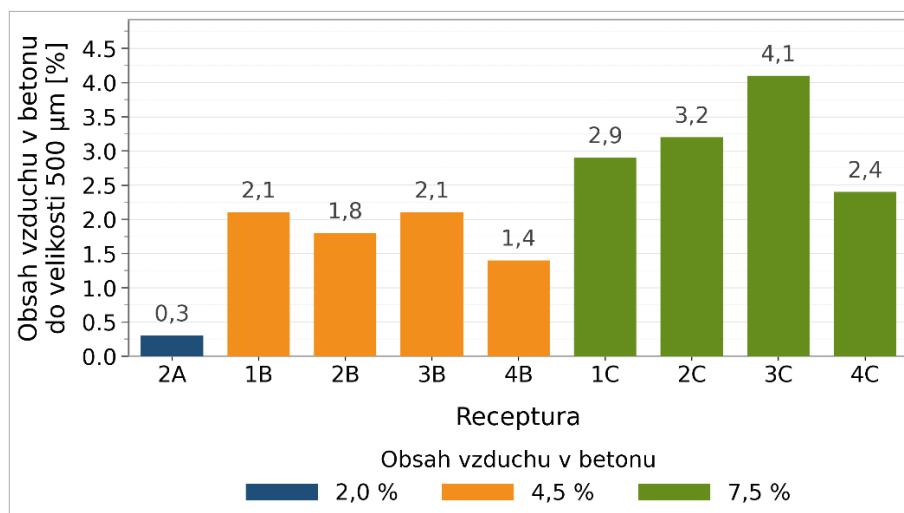
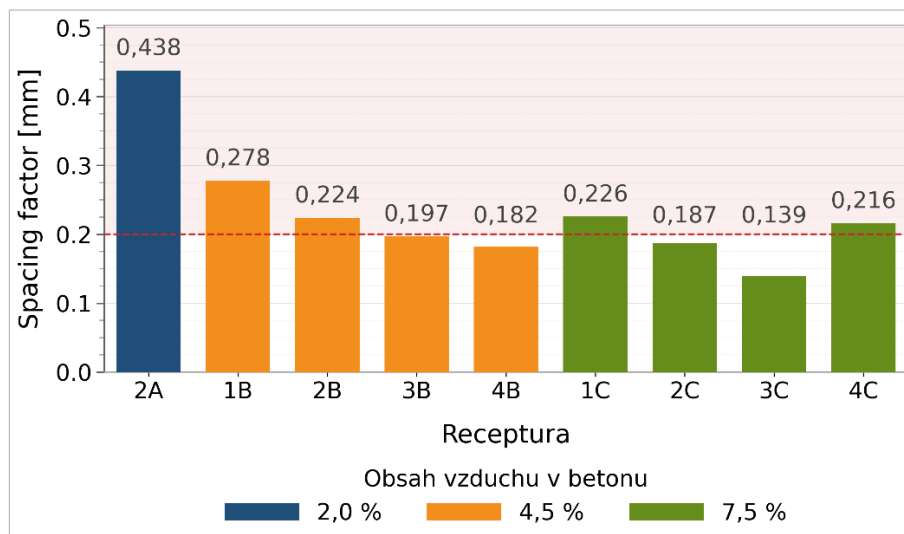
Tab. 48 – Parametry vzduchového systému stanovené metodou AVA

Receptura	Obsah vzduchu [%]	Obsah vzduchu <500 μm [%]	Spacing factor [mm]	Měrný povrch vzduchových pórů [mm^{-1}]
2A	1,0	0,3	0,438	16,5
1B	5,5	2,1	0,278	16,8
2B	4,0	1,8	0,224	21,6
3B	5,4	2,1	0,197	14,9
4B	3,7	1,4	0,182	21,3
1C	7,1	2,9	0,226	16,7
2C	8,2	3,2	0,187	23,2
3C	7,8	4,1	0,139	24,6
4C	8,4	2,4	0,216	22,3

Pozn.: Výsledky naměřené u receptury 2A, je třeba interpretovat s určitou rezervou, protože má nízký obsah vzduchu (3,1 %), který se pohybuje na hranici měřitelnosti metody AVA a nelze určit zda přístroj zkoušku ukončil předčasně.



Graf 23 – Porovnání celkového obsahu vzduchu v betonu – metoda AVA

Graf 24 – Porovnání obsahu vzduchu do 500 μm v betonu – metoda AVA

Graf 25 – Porovnání SF – metoda AVA

Parametry stanovené u receptury 2A byly z vyhodnocení vyloučeny, protože obsah vzduchu 3,1 % stanovený tlakoměrnou metodou je na hranici měřitelnosti metody AVA a získané hodnoty nelze považovat za přesné, přesto dostatečně naznačují, že beton nebude mrazuvzdorný.

Norma ČSN EN 480-11 definuje mikroskopický vzduch jako vzduchové póry do velikosti 300 μm . V rámci analýzy byly do této kategorie zahrnuty vzduchové póry do velikosti 500 μm , protože metoda AVA neumožňuje kvantifikaci menších pórů. Zvolená vyšší hranice tohoto parametru sloužila k následnému vzájemnému porovnání výsledků metody AVA s mikroskopickou analýzou.

Obsah vzduchu se u receptur 1B, 2B, 3B a 4B (míra provzdušnění 4,5 %) pohyboval v rozmezí 3,7 – 5,5 % přičemž podíl mikroskopického vzduchu (do velikosti 500 μm) byl stanoven v rozmezí 1,4 – 2,1 %. U receptur 1C, 2C, 3C a 4C (míra provzdušnění 7,5 %) byl zjištěn celkový obsah vzduchu od 7,1 do 8,4 %, přičemž i obsah mikroskopického vzduchu byl vyšší a dosahoval hodnot 2,4 až 4,1 %, což odpovídá navýšení o 42 až 66 % oproti recepturám s nižším provzdušněním.

Z porovnání jednotlivých receptur vyplynulo, že betony s obdobným celkovým obsahem vzduchu mohou vykazovat výrazně odlišné hodnoty SF a měrného povrchu vzduchových pórů. U receptur s provzdušněním 4,5 % se SF stanovený metodou AVA pohyboval od 0,182 do 0,278 mm. U receptur s obsahem vzduchu 7,5 % se tento parametr pohyboval v rozmezí 0,139 až 0,226 mm. Receptury 1B, 2B, 1C a 4C překročily hodnotu Spacing factoru požadovanou pro mrazuvzdorné betony (0,2 mm). Jedná se však o parametr požadovaný pro mikroskopickou analýzu, a ne pro metodu AVA.

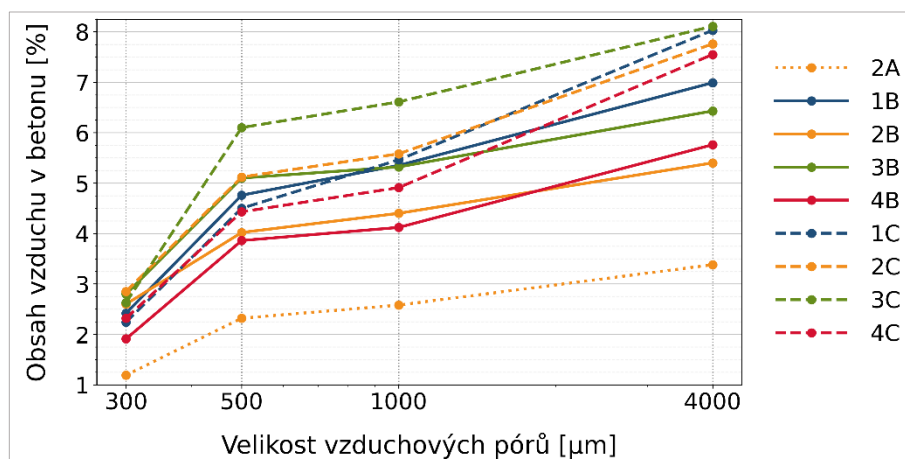
Obsah vzduchu stanovený tlakoměrnou metodou sloužil jako jeden ze vstupních údajů pro výpočet parametrů metodou AVA, a proto se nejednalo o dvě nezávislá měření shodné veličiny. Rozdíl mezi oběma metodami dosahoval u jednotlivých měření až 26 %. Ve srovnání s tlakoměrnou metodou byly metodou AVA zaznamenány vyšší i nižší hodnoty. Tyto rozdíly by mohly souviset s odlišným principem obou metod a s vlivem hrubého kameniva na celkové zhutnění betonu.

Naměřené hodnoty byly dále využity pro tvorbu modelu, který by dokázal predikovat odolnost betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám již v ČB.

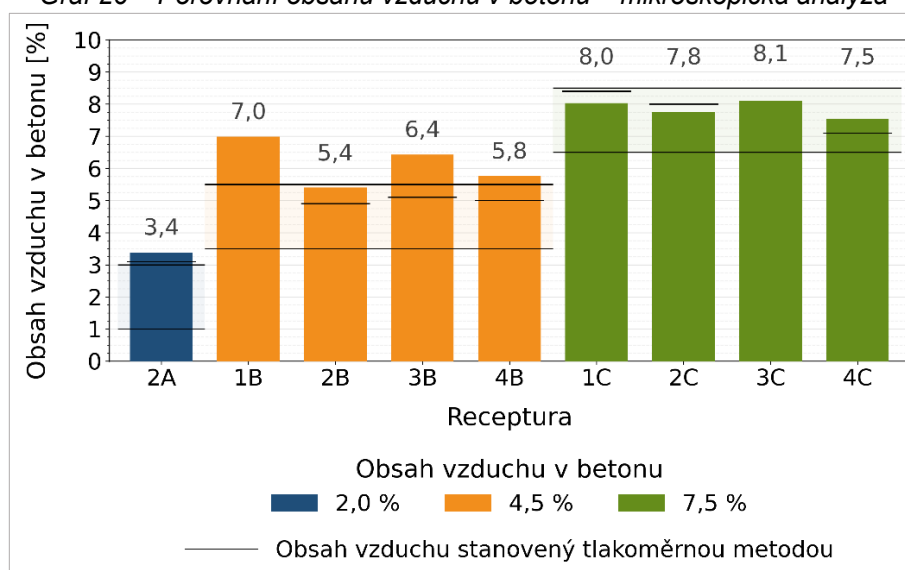
MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA – ZTVRDLÝ BETON

Tab. 49 – Obsah vzduchu v betonu stanovený mikroskopickou analýzou

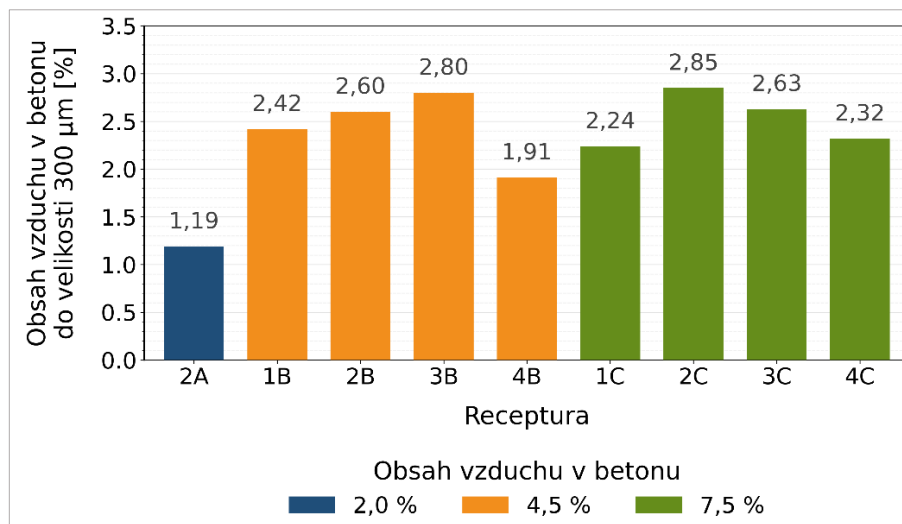
Receptura	Celkový obsah vzduchu [%]	Obsah vzduchu <1000 μm [%]	Obsah vzduchu <500 μm [%]	Obsah vzduchu <300 μm [%]
2A	3,4	2,6	2,3	1,2
1B	7,0	5,4	4,8	2,4
2B	5,4	4,4	4,0	2,6
3B	6,4	5,3	5,1	2,8
4B	5,8	4,1	3,9	1,9
1C	8,0	5,5	4,5	2,2
2C	7,8	5,6	5,1	2,9
3C	8,1	6,6	6,1	2,6
4C	7,5	4,9	4,4	2,3



Graf 26 – Porovnání obsahu vzduchu v betonu – mikroskopická analýza



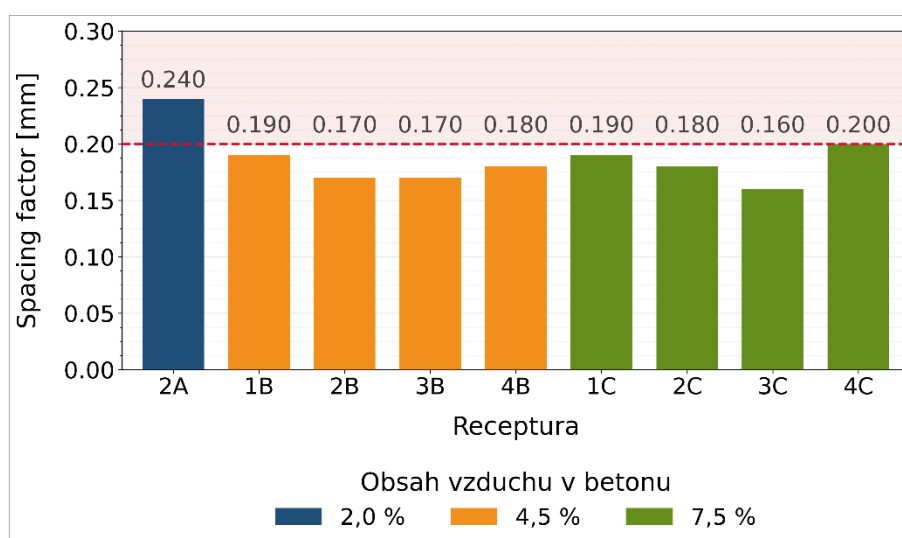
Graf 27 – Porovnání celkového obsahu vzduchu v betonu – mikroskopická analýza



Graf 28 – Porovnání obsahu vzduchu do velikosti 300 μm v betonu – mikroskopická analýza

Tab. 50 – Parametry vzduchového systému stanovené mikroskopickou analýzou

Receptura	Spacing factor [mm]	Měrný povrch [mm ⁻¹]	Poměr tmel:vzduch
2A	0,24	24,5	8,3
1B	0,19	20,9	4,0
2B	0,17	25,6	5,2
3B	0,17	25,4	4,3
4B	0,18	25,2	4,9
1C	0,19	18,7	3,5
2C	0,18	20,5	3,6
3C	0,16	21,6	3,5
4C	0,20	18,9	3,7



Graf 29 – Porovnání SF – mikroskopická analýza

Celkový obsah vzduchu byl u receptury 2A stanoven na 3,4 %, z čehož mikroskopický vzduch tvořil 1,2 %. Tyto hodnoty odpovídají neprovzdušněnému betonu.

U receptur 1B, 2B, 3B a 4B (míra provzdušnění 4,5 %) se celkový obsah vzduchu pohyboval v rozmezí 5,4 až 7,0 %. Receptury 1B, 3B a 4B překročily požadovaný obsah vzduchu i hodnoty obsahu vzduchu stanovené v ČB, což mohlo být způsobeno vyšším podílem větších vzduchových pórů v betonu. U receptur 1C, 2C, 3C a 4C (míra provzdušnění 7,5 %) byl zjištěn celkový obsah vzduchu v rozmezí od 7,5 do 8,1 %. Obsah mikroskopického vzduchu se u všech receptur (s výjimkou 2A) pohyboval v rozmezí 1,9 až 2,9 %.

Naměřené hodnoty Spacing factoru vykazovaly, obdobně jako obsah mikroskopického vzduchu, mezi jednotlivými recepturami menší variabilitu než celkový obsah vzduchu v betonu. Spacing factor receptury 2A byl stanoven na hodnotu 0,24 mm. U ostatních receptur se tento parametr pohyboval v rozmezí 0,16 až 0,20 mm, což odpovídá jemnějšímu a rovnoměrnějšímu rozptýlení vzduchových pórů v cementovém tmelu.

Mikroskopická analýza umožnila detailní studii struktury vzduchového systému v ZB a potvrdila, že samotný celkový obsah vzduchu není dostatečným ukazatelem kvality provzdušnění. Získané výsledky byly dále využity pro tvorbu predikčního modelu závislosti mezi vlastnostmi pórové struktury v betonu a jeho trvanlivostí.

POROVNÁNÍ PARAMETRŮ PROVZDUŠNĚNÍ STANOVENÝCH METODOU AVA A MIKROSKPICKOU ANALÝZOU

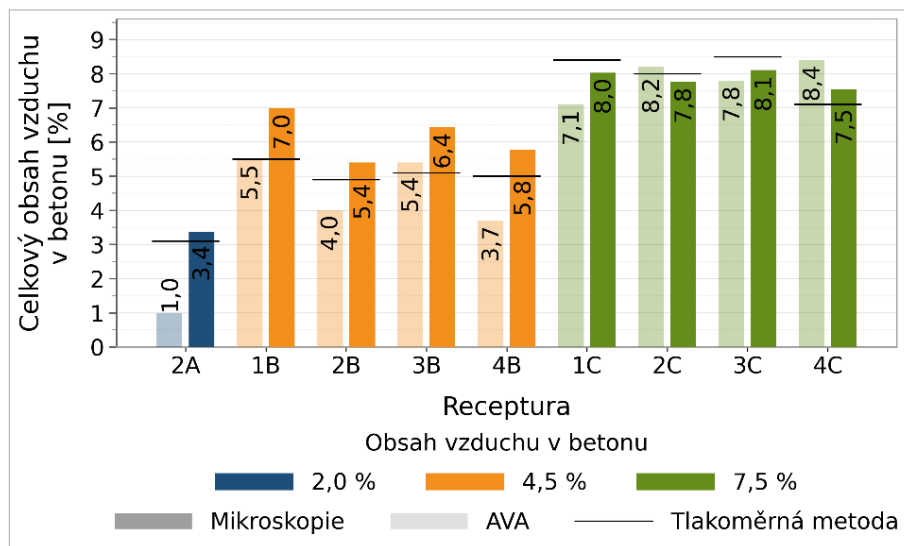
Cílem je stanovit statistické závislosti mezi hodnotami stanovenými metodou AVA v ČB a parametry zjištěnými mikroskopickou analýzou v ZB.

Norma ČSN EN 480-11 definuje mikroskopický vzduch jako vzduchové póry do velikosti 300 μm . V rámci porovnání metody AVA s mikroskopickou analýzou byly do této kategorie zahrnuty vzduchové póry do velikosti 500 μm , protože metoda AVA neumožňuje kvantifikaci menších vzduchových pórů.

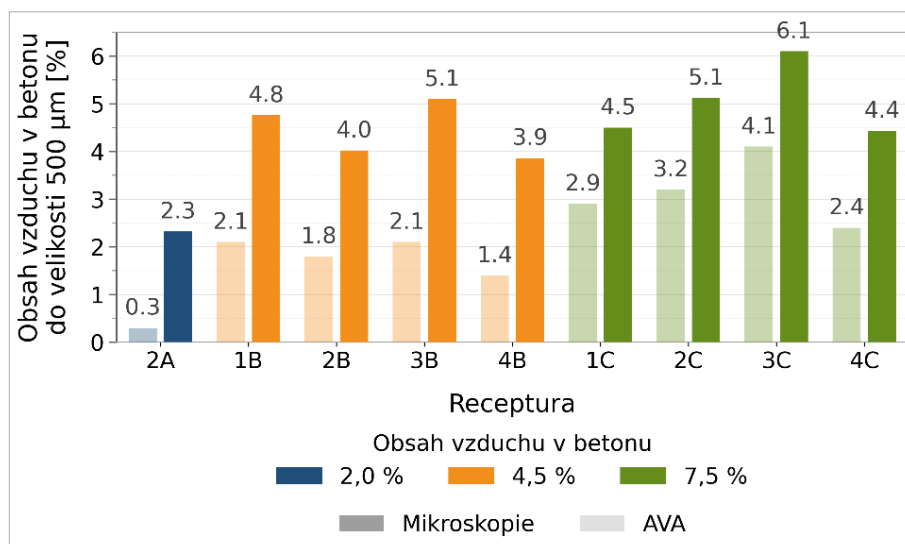
Tab. 51 – Porovnání parametrů vzduchového systému v betonu stanovených metodou AVA a mikroskopickou analýzou

Receptura	Celkový obsah vzduchu v betonu [%]		Obsah vzduchu v betonu do 500 μm [%]		Spacing factor [mm]		Měrný povrch vzduchových pórů [mm^{-1}]	
	Metoda AVA	Mikroskopická analýza	Metoda AVA	Mikroskopická analýza	Metoda AVA	Mikroskopická analýza	Metoda AVA	Mikroskopická analýza
2A	5,4	6,4	0,3	2,3	0,44	0,24	16,5	24,5
1B	5,5	7,0	2,1	4,8	0,28	0,19	16,8	20,9
2B	7,1	8,0	1,8	4,0	0,22	0,17	21,6	25,6
3B	7,8	8,1	2,1	5,1	0,20	0,17	14,9	25,4
4B	1,0	3,4	1,4	3,9	0,18	0,18	21,3	25,2
1C	8,2	7,8	2,9	4,5	0,23	0,19	16,7	18,7
2C	3,7	5,8	3,2	5,1	0,19	0,18	23,2	20,5
3C	4,0	5,4	4,1	6,1	0,14	0,16	24,6	21,6
4C	8,4	7,6	2,4	4,4	0,2	0,20	22,3	18,9

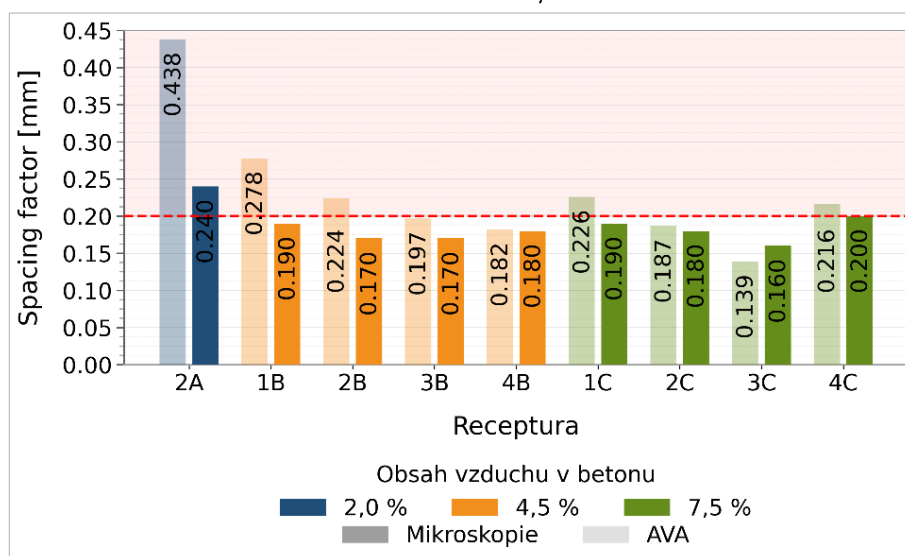
Pozn.: Výsledky naměřené u receptury 2A, je třeba interpretovat s určitou rezervou, protože má nízký obsah vzduchu (3,1 %), který se pohybuje na hranici měřitelnosti metody AVA a nelze určit zda přístroj zkoušku ukončil předčasně.



Graf 30 – Porovnání výsledků stanovených metodou AVA a mikroskopickou analýzou – celkový obsah vzduchu



Graf 31 – Porovnání výsledků stanovených metodou AVA a mikroskopickou analýzou – obsah vzduchu do velikosti 500 µm v betonu



Graf 32 – Porovnání výsledků stanovených metodou AVA a mikroskopickou analýzou – SF

Parametry stanovené u receptury 2A byly z porovnání vyloučeny, protože celkový obsah vzduchu stanovený v ČB na 3,1 % a v ZB na 3,4 % se pohyboval na hranici měřitelnosti metody AVA. Vzhledem k nízké spolehlivosti naměřených parametrů nelze tyto výsledky považovat za vhodné pro kvantitativní porovnání s parametry získanými mikroskopickou analýzou.

Celkový obsah vzduchu zjištěný metodou AVA byl ve většině případů nižší než hodnoty stanovené mikroskopickou analýzou. Průměrný rozdíl mezi oběma metodami byl 19 %, nejvyšší rozdíl byl u receptury 4B (36 %). U receptur 2C a 4C byly naopak naměřeny vyšší hodnoty metodou AVA, a to o 5, respektive 11 %.

V případě obsahu mikroskopického vzduchu (do velikosti 500 μm) byly hodnoty stanovené metodou AVA nižší průměrně o 48 % (od 33 do 64 %) než hodnoty stanovené mikroskopickou analýzou. Z grafického znázornění bylo patrné, že odchylka byla vyšší u receptur 1B, 2B, 3B a 4B (míra provzdušnění 4,5 %) průměrně o 58 %, zatímco u receptur 1C, 2C, 3C a 4C (míra provzdušnění 7,5 %) byl průměrný rozdíl 38 %. Tento trend naznačuje, že při vyšším celkovém obsahu vzduchu vykazuje metoda AVA vyšší shodu naměřených hodnot s mikroskopickou analýzou. Hodnoty obsahu mikroskopického vzduchu stanovené metodou AVA byly přibližně 1,8–2,5krát nižší než hodnoty zjištěné mikroskopickou analýzou.

Hodnoty SF stanovené metodou AVA byly ve většině případů vyšší než hodnoty získané mikroskopickou analýzou, což odpovídá poznatkům uváděným v odborné literatuře. Výjimkou byla receptura 3C, u níž byla zaznamenána opačná tendence, kterou lze pravděpodobně přičíst nejistotě měření. Zajímavým zjištěním je rovněž skutečnost, že receptury 4B a 2C vykazovaly velmi podobné hodnoty SF stanovené oběma metodami. V průměru byly hodnoty Spacing factoru stanovené metodou AVA o 11 % vyšší, přičemž se pohybovaly přibližně 1,1 až 1,3krát nad hodnotami zjištěnými mikroskopickou analýzou. V odborné literatuře jsou přitom uváděny i vyšší rozdíly, kdy hodnoty stanovené metodou AVA bývají až 1,5–1,7krát vyšší.

Z výsledků vyplývá, že mikroskopická analýza zůstává referenční metodou pro hodnocení vzduchového systému v betonu. Vzájemné porovnání obou metod však ukázalo, že vybrané parametry stanovené metodou AVA vykazují systematické vazby na parametry zjištěné mikroskopickou analýzou. Na základě těchto vazeb lze metodu AVA považovat za potencionální predikční nástroj, který umožňuje již v ČB odhadnout kvalitu provzdušnění betonu.

MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA OBSAHU KAMENIVA V BETONU

Mikroskopická analýza obsahu kameniva v betonu byla provedena u dvou vybraných receptur. Tyto receptury reprezentovaly nejnižší a nejvyšší požadovanou pevnostní třídu betonu zahrnutou v experimentu. Zároveň byly vybrány receptury s požadovaným obsahem vzduchu v betonu 4,5 %, což odpovídá běžně používaným provzdušněným betonům. Cílem této analýzy bylo posoudit rozdíly ve vnitřní struktuře betonu. Získané výsledky měli sloužit jako doplňující podklad pro interpretaci vztahu mezi složením betonu, strukturou vzduchového systému a dosaženými vlastnostmi betonu.

Tab. 52 – Obsah kameniva v betonu – mikroskopická analýza

Receptura	3B	2B
Požadovaná pevnostní třída	C25/30	C35/45
Obsah [%]		
Cementový tmel	40,2	34,6
Kamenivo	59,8	65,4

Z porovnání vybraných receptur vyplývá, že receptura 2B s vyšší požadovanou pevnostní třídou C35/45 vykazovala vyšší podíl kameniva (65,4 %) a nižší podíl cementového tmelu ve srovnání s recepturou 3B s požadovanou pevnostní třídou C25/30, u které byl stanoven podíl kameniva na 59,8 %. Rozdíl v zastoupení jednotlivých fází byl stanoven na 5,6 %, u receptury 3B byl vyšší podíl cementového tmelu a u receptury 2B vyšší podíl kameniva.

Tyto hodnoty neodpovídají návrhovému předpokladu, podle něhož vyšší obsah cementového tmelu měla vykazovat receptura 2B, u níž bylo při výrobě použito o $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ cementu více. Je možné, že se jedná o chybu měření, protože byla analyzována jen část zkušební povrchu a přítomnost většího zrna kameniva mohla výsledky významně ovlivnit. Pro potvrzení či vyvrácení naměřených hodnot by bylo nutné provést analýzu na větší ploše nebo na více řezech zkušební tělesa.

13.4 POROVNÁNÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI CHRL VLIV ZKUŠEBNÍHO POVRCHU

Tab. 53 – Odolnost betonu proti CHRL – původní povrch s nátěrem hran

Receptura	Počet zkušebních cyklů			
	25	50	75	100
2A	172,3	232,6	382,1	693,8
1B	50,8	94,9	122,1	143,1
2B	36,0	69,1	192,5	227,0
3B	72,0	110,7	160,4	239,1
4B	33,2	72,8	135,5	228,1
1C	33,1	56,1	79,6	108,0
2C	15,6	32,1	43,9	59,7
3C	43,6	77,7	98,0	120,7
4C	27,1	52,3	76,4	101,6

Tab. 54 – Odolnost betonu proti CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran

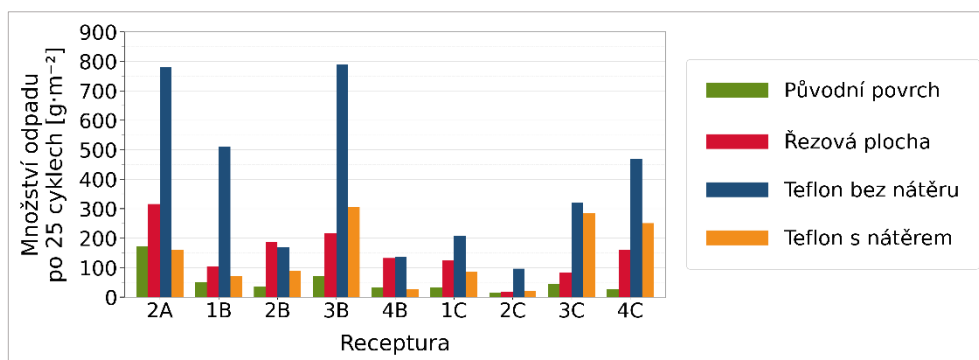
Receptura	Počet zkušebních cyklů			
	25	50	75	100
2A	315,9	1538,2	4244,6 (rozpad)	7524,1 (rozpad)
1B	104,3	380,1	1029,7	2919,0
2B	187,4	466,4	848,5	1509,9
3B	215,8	462,3	1327,7	3130,5 (rozpad)
4B	132,2	414,0	780,4	1566,3
1C	123,9	261,9	465,3	762,2
2C	17,3	32,6	51,3	68,7
3C	83,3	134,3	177,6	229,2
4C	161,4	333,9	611,2	974,5

Tab. 55 – Odolnost betonu proti CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran

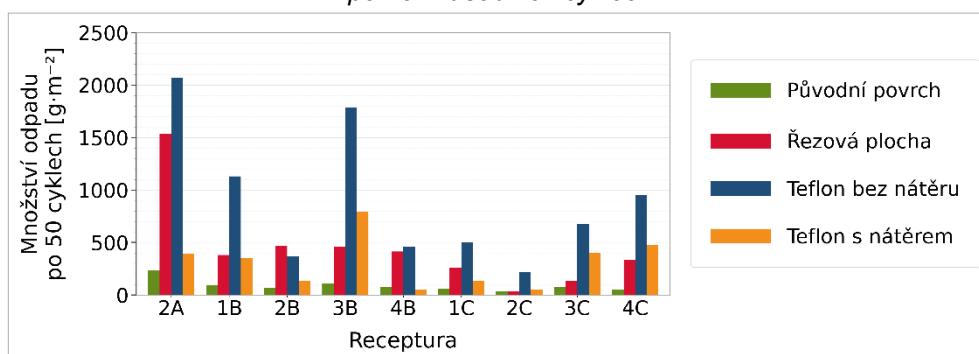
Receptura	Počet zkušebních cyklů			
	25	50	75	100
2A	781,6	2065,5	3817,4 (rozpad)	5177,9 (rozpad)
1B	511,1	1129,7	1757,2	2348,5
2B	169,2	369,1	584,8	720,5
3B	789,6	1788,4	2850,8	4468,0 (rozpad)
4B	136,6	461,9	847,6	1130,4
1C	208,9	498,2	829,4	1137,6
2C	96,2	215,5	326,0	494,5
3C	320,6	677,2	1013,7	1427,4
4C	469,2	951,6	1602,0	1911,6

Tab. 56 – Odolnost betonu proti CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran

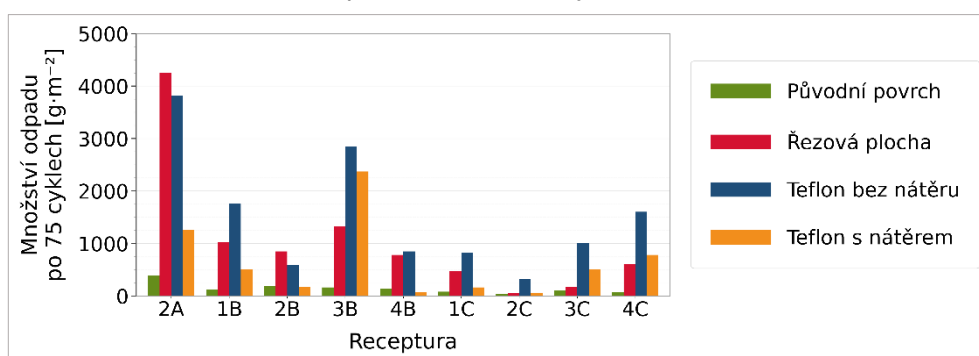
Receptura	Počet zkušebních cyklů			
	25	50	75	100
2A	160,4	390,5	1259,3	1985,7
1B	71,7	352,2	504,7	1010,8
2B	87,9	136,3	178,1	197,4
3B	305,9	791,1	2371,0	5943,7 (rozpad)
4B	26,3	53,1	66,0	87,0
1C	87,3	133,3	161,7	181,2
2C	22,1	50,4	61,5	73,0
3C	284,5	399,9	503,3	664,2
4C	251,1	474,5	781,4	1286,0



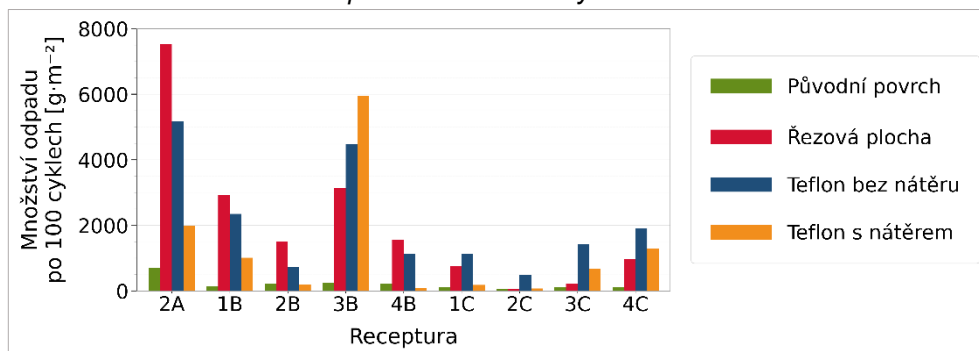
Graf 33 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušební povrchu po 25 zkušebních cyklech



Graf 34 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušební povrchu po 50 zkušebních cyklech



Graf 35 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušební povrchu po 75 zkušebních cyklech



Graf 36 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušební povrchu po 100 zkušebních cyklech

Nejnižší hmotnostní úbytky a zároveň nejmenší rozptyl jednotlivých hodnot byly zaznamenány u zkušebních těles s původním povrchem opatřeným nátěrem hran. Nejvyšší odpady byly, v souladu s očekáváním, naměřeny u neprovzdušněné receptury 2A, a to po 100 zkušebních cyklech $693,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. U receptur 1B, 2B, 3B a 4B (míra provzdušnění 4,5 %) byly zaznamenány odpady v rozmezí od 143,1 do $239,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ a u receptur 1C, 2C, 3C a 4C (míra provzdušnění 7,5 %) 59,7 až $120,7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Tyto výsledky potvrzují, že rovnoměrný povrch bez výrazných geometrických diskontinuit spolu s ochranou hran omezuje koncentraci napětí a zpomaluje rozvoj povrchového poškození.

Výsledky zkoušek provedených na povrchu vzniklém řezem s nátěrem hran byly u jednotlivých receptur méně jednotné. Rozdíly v množství odpadu se pohybovaly od 68,7 po $7524,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, navýšení oproti zkouškám provedeným na původním povrchu bylo o 13 až 95 %. Některé naměřené hodnoty byly ovlivněny vypadnutím zrn kameniva, což vedlo k porušení soudržnosti povrchové vrstvy. U receptur 1C, 2C, 3C a 4C byly naměřeny nižší hodnoty úbytku hmotnosti ($68,7\text{--}974,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), což naznačuje příznivější chování povrchové vrstvy betonu při vyšším stupni provzdušnění. Hodnoty byly v průměru o 59 % vyšší než u zkoušek provedených na původním povrchu. Receptury s nižší dávkou provzdušnění (1B, 2B, 3B a 4B) měly vyšší ztráty hmotnosti po 100 zkušebních cyklech, a to v rozmezí 1509,9 až $3130,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (průměrně o 89 % více než u původního povrchu). Receptury 2A a 3B dosáhly hranice rozpadu zkušebních těles.

Výsledky získané na vzorcích s povrchem vzniklým pomocí teflonové vložky s nátěrem hran byly nejednotné v rozmezí od 73,0 do $1985,7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. U receptury 3B byla zaznamenána ještě vyšší hmotnostní ztráta ($5943,7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), avšak po porušení ochranného nátěru došlo k utržení hran zkušebních těles. Receptury 1B, 2B a 4B měly odpadlé částice v rozmezí 87,0 až $1010,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. U receptur 1C, 2C, 3C a 4C byly naměřeny úbytky hmotnosti od 73,0 do $1286,0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.

U povrchu vytvořeného pomocí PTFE vložky s nátěrem hran byly hmotnostní úbytky v průměru o 64 % nižší než u části vzorků bez aplikovaného nátěru hran. Tento jev lze přičíst vlivu hran zkušebního tělesa, kdy jejich porušení vedlo současně k narušení zkušebního povrchu.

Výsledky získané u zkušebních vzorků s povrchem vytvořeným pomocí teflonové vložky s nátěrem hran byly v průměru o 64 % vyšší než u vzorků s původním povrchem (od 18 do 92 %). Výjimkou jsou receptury 2B a 4B u nichž byl zaznamenán opačný trend (u receptury 4B o 62 %). Tyto rozdílné hodnoty si mohou vzájemně odpovídat, protože vycházejí z odlišných způsobů přípravy zkušebních povrchů. Je pravděpodobné, že u povrchu vytvořeného pomocí PTFE vložky se v povrchové vrstvě nachází vyšší podíl

cementového tmelu než u původního povrchu, kde při výrobě zkušebních těles dochází ke stržení povrchové vrstvy. Zároveň je povrch vytvořený pomocí PTFE vložky zkoušen kolmo ke směru hutnění, na rozdíl od původního povrchu a povrchu vzniklého řezem, které jsou orientovány ve směru hutnění. Tyto výsledky korespondují s výsledky aktuální studie Ředitelství silnic a dálnic.

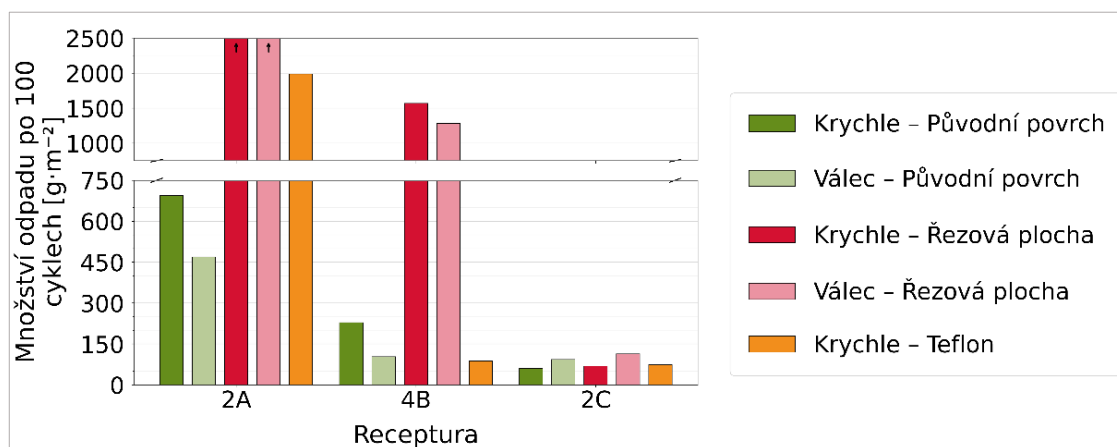
Pro navazující tvorbu predikčního modelu závislosti mezi provzdušněním betonu a jeho odolností proti CHRL byla zvolena data získaná ze zkoušek provedených na tělesech s původním povrchem s nátěrem hran, která vykazovala nejtěsnější shodu výsledků. Současně byl vytvořen doplňkový model, pro jehož sestavení byly použity hodnoty získané ze zkušebních těles s povrchem vzniklým pomocí PTFE vložky s nátěrem hran. Tímto postupem bylo možné posoudit citlivost vztahu mezi provzdušněním betonu a jeho odolností proti CHRL při alternativním zkušebním povrchu.

VLIV TVARU ZKUŠEBNÍHO TĚLESA

Do analýzy byly vybrány receptury pevnostní třídy C35/45, ve všech variantách provzdušnění. Jedna z vybraných receptur měla vyšší konzistenci ČB, aby bylo možné ověřit, zda se vliv tvaru zkušebního tělesa odlišuje při odlišném stupni zpracovatelnosti betonu.

Tab. 57 – Odolnost betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušebního povrchu a tvaru zkušebního tělesa po 100 zkušebních cyklech

Receptura	Původní povrch		Povrch vzniklý řezem		Povrch vzniklý pomocí PTFE vložky
	Krychle	Válec	Krychle	Válec	Krychle
2A	693,8	468,8	7524,1	7601,6	1985,7
4B	228,1	102,8	1566,3	1281,3	87,0
2C	59,7	92,5	68,7	113,3	73,0



Graf 37 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušebního povrchu a tvaru zkušebního tělesa po 100 zkušebních cyklech

Vliv tvaru zkušební tělesa byl ve sledovaném souboru zkoušek méně výrazný, než vliv úpravy zkušební povrchu. Tento efekt byl pravděpodobně omezen aplikací mrazuvzdorného nátěru hran, který snížil riziko porušení hran zkušební tělesa a následné narušení zkoušeného povrchu. U některých receptur byl zaznamenán vyšší hmotnostní úbytek u těles válcového tvaru, u jiných naopak u těles tvaru krychle. Nebyla však nalezena jednoznačná souvislost, která by rozdíl systematicky vysvětlovala. Pro podrobnější výsledky by bylo třeba rozšířit soubor zkoušek.

Vliv tvaru zkušební tělesa byl nižší u povrchu vzniklého řezem, kde se zaznamenané rozdíly pohybovaly v rozmezí $\pm 19,6$ %. Naproti tomu u zkušebních těles s původním povrchem dosahovaly rozdíly mezi tělesy různých tvarů $\pm 60,9$ %.

14 PREDIKČNÍ MODEL Y ZÁVISLOSTI MEZI PROVZDUŠNĚNÍM BETONU A JEHO ODOLNOSTÍ PROTI CHRL

Predikční model byl založen na lineární regresi s L2 regularizací (Ridge regrese). Tento typ modelu byl zvolen s ohledem na omezený rozsah experimentální datové sady a současné použití většího počtu vstupních proměnných, u nichž lze předpokládat vzájemnou korelaci. Vstupní proměnné byly před regresní analýzou standardizovány, aby byla zajištěna numerická stabilita výpočtu a rovnoměrné působení regularizačního členu na proměnné s rozdílnými jednotkami a řádovými velikostmi.

Tvorba predikčního modelu byla zahájena sestavením výchozího (masivního) modelu, který zahrnoval všechny dostupné experimentální údaje a široký rozsah vstupních proměnných. Cílem tohoto kroku bylo ověřit, zda je mezi parametry vzduchového systému betonu a jeho odolností proti působení CHRL identifikovatelný statisticky popsatelný vztah a současně posoudit chování modelu při použití kompletní datové sady.

Na základě výsledků jednotlivých mezikroků byly postupně prováděny úpravy vedoucí k jeho zjednodušení a zpřesnění. Upravována byla skladba vstupních dat a současně byly testovány alternativní varianty modelu. V rámci tohoto procesu byly vyřazeny extrémní případy, které významně zkreslovaly obecný trend chování dat, přičemž tento vliv byl vzhledem k omezené velikosti vstupního datasetu zvláště výrazný.

V dalším kroku byly vytvořeny varianty modelů zaměřené na konkrétní podmínky experimentu. Samostatně byly navrženy modely pro dvě varianty úpravy povrchu zkušebních těles v průběhu zkoušky stanovující odolnost betonu proti CHRL:

- Původní povrch s nátěrem hran
- Povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran

V případě původního povrchu byly dále porovnávány varianty modelu se zahrnutím a bez zahrnutí neprovzdušněné receptury. Chování této receptury se lišilo od ostatních provzdušněných betonů a její zahrnutí vedlo k nárůstu chyby predikce. Pro variantu s původním povrchem byl navíc navržen predikční model, jehož vstupní data byla získána pomocí metody AVA.

Jednotlivé varianty modelů byly průběžně ověřovány validační metodou leave-one-recipe-out, přičemž hlavním kritériem pro jejich posouzení byla stabilita predikce a velikost dosažené chyby. Na základě takto získaných dat bylo možné identifikovat konfiguraci, která nejlépe vystihovala pozorované závislosti při zachování přiměřené jednoduchosti modelu.

Výsledkem tohoto postupného procesu zpřesňování byl konečný predikční model, sestavený na základě metodicky konzistentní sady dat, který slouží k popisu vztahu mezi parametry vzduchového systému betonu a jeho odolnosti proti působení CHRL.

LINEÁRNÍ REGRESE S L2 REGULARIZACÍ A STANDARDIZACE VSTUPNÍCH PROMĚNNÝCH

Základní princip lineární regrese spočívá v hledání lineární závislosti mezi vstupními proměnnými a cílovou veličinou tak, aby byla minimalizována chyba mezi experimentálně naměřenými a modelově predikovanými hodnotami. Model je popsán soustavou regresních koeficientů, které vyjadřují velikost a směr vlivu jednotlivých vstupních proměnných na výslednou predikci.

Vzhledem k omezenému počtu dostupných experimentálních dat a současnému použití většího počtu vstupních proměnných byla do lineární regrese modelu zahrnuta L2 regularizace. Regularizační člen penalizuje velikost regresních koeficientů a omezuje jejich nadměrné zvětšování, čímž přispívá ke zvýšení stability modelu a ke snížení rizika přeučení. Lineární regrese je v tomto kontextu vhodná zejména tehdy, pokud mezi vstupními proměnnými existují vzájemné korelace nebo pokud je poměr počtu proměnných k počtu pozorování relativně vysoký.

Součástí modelu byla standardizace vstupních proměnných před samotnou regresí. Každá vstupní proměnná byla transformována na bezrozměrnou podobu s nulovou střední hodnotou a jednotkovou směrodatnou odchylkou. Tento krok je nezbytný při použití regularizace, protože jednotlivé proměnné mají rozdílné jednotky i řádové velikosti. Bez standardizace by regularizační člen nepůsobil rovnoměrně na všechny

proměnné a výsledné koeficienty by mohly být zkruseny ve prospěch proměnných s větším číselným rozsahem.

Po natrénování modelu byly regresní koeficienty zpětně přepočteny do původních jednotek vstupních proměnných, aby bylo možné jejich hodnoty interpretovat z hlediska fyzikálního významu. Tím je zachována jak numerická stabilita modelu během výpočtu, tak i možnost odborné interpretace vlivu jednotlivých parametrů na průběh degradace betonu.

METODA LEAVE-ONE-RECIPE-OUT (LORO)

Metoda LORO představuje specifickou formu křížové validace, která je vhodná zejména pro analýzu dat s omezeným počtem experimentálních jednotek. V každém validačním kroku je z dostupného souboru dat vyřazena jedna receptura, zatímco zbývající receptury slouží k sestavení predikčního modelu. Takto vytvořený model je následně použit k predikci výstupních hodnot vyřazené receptury.

Tento postup je opakován tak, aby každá receptura byla jednou použita jako validační sada, čímž je zajištěno, že predikční schopnost modelu je ověřena na všech dostupných datech. Rozdíly mezi predikovanými a experimentálně naměřenými hodnotami jednotlivých receptur jsou následně využity k výpočtu chybových charakteristik modelu.

Použití metody LORO umožňuje posoudit nejen celkovou přesnost predikce, ale také stabilitu modelu při změně trénovací datové sady. Tento přístup je zvláště vhodný v případech, kdy je vstupní dataset omezený a není účelné vyčleňovat samostatnou validační nebo testovací sadu.

14.1 MODEL A – ZÁVISLOST MEZI MIKROSKOPICKOU ANALÝZOU A TRVANLIVOSTÍ BETONU ZKOUŠENÉ NA PŮVODNÍM POVRCHU

MODEL A1 – VYŘAZENÍ NEPROVZDUŠNĚNÉ RECEPTURY

Neprovzdušněná receptura 2A byla z této analýzy vyřazena, protože se svým chováním odlišovala od ostatních provzdušněných betonů a její zahrnutí vedlo ke zkreslení identifikovaných závislostí mezi parametry pórového systému a trvanlivostí betonu.

Model byl navržen s cílem predikovat průběh degradace betonu v čase. Degradace byla rozdělena do čtyř po sobě následujících etap o délce 25 cyklů, přičemž pro každou etapu byl vytvořen samostatný regresní model. Takto definované cíle umožňují zachytit změny v průběhu zkoušky a zároveň snižují riziko, že by model byl ovlivněn

pouze konečnou kumulativní hodnotou. Predikované přírůstky byly následně sečteny do kumulativního průběhu degradace.

Datová sada byla sestavena z parametrů vzduchového systému stanovených mikroskopickou analýzou a vybraných dávek surovin použitých pro přípravu betonu. Základní sada vstupních proměnných byla pro všechny etapy shodná a zahrnovala následující parametry:

- SF stanovený mikroskopickou analýzou [mm]
- Poměr tmel:vzduch [-]
- Cementový tmel [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], který spojuje dávku cementu a vodní součinitel a zároveň snižuje množství vstupních parametrů
- Dávka plastifikační přísady [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
- Dávka provzdušňující přísady [% z hmotnosti cementu]

Některé proměnné byly zahrnuty pouze do vybraných etap, ve kterých byl zaznamenán jejich vliv na přesnost modelu. Měrný povrch vzduchových pórů stanovený mikroskopickou analýzou byl zahrnut pouze pro predikci prvních 25 cyklů a pevnost v tahu povrchových vrstev betonu pro predikci posledních 25 cyklů.

Predikční modely

$$y_{0-25} = 25,807 + 1539,80 \cdot x_1 - 112,98 \cdot x_2 + 0,29754 \cdot x_3 - 95,71 \cdot x_4 - 445,2 \cdot x_5 + 17,23 \cdot x_6$$

$$y_{25-50} = 87,489 + 28,635 \cdot x_1 + 1,08654 \cdot x_2 - 0,02503 \cdot x_3 - 7,28812 \cdot x_4 - 135,6 \cdot x_5$$

$$y_{50-75} = 36,503 + 50,218 \cdot x_1 + 10,38 \cdot x_2 + 0,02958 \cdot x_3 + 10,213 \cdot x_4 - 319,23 \cdot x_5$$

$$y_{75-100} = 126,47 - 202,6 \cdot x_1 + 66,985 \cdot x_2 - 0,08629 \cdot x_3 - 25,139 \cdot x_4 + 1,56748 \cdot x_5 - 34,409 \cdot x_7$$

- x_1 – SF stanovený mikroskopickou analýzou [mm]
- x_2 – Poměr tmel:vzduch [-]
- x_3 – Cementový tmel [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – model ovlivňuje minimálně, ale spojuje ho
- x_4 – Plastifikační přísada [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
- x_5 – Provzdušňující přísada [% z m_c]
- x_6 – Měrný povrch vzduchových pórů stanovený mikroskopickou analýzou [mm^{-1}]
- x_7 – Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu [MPa]

Tab. 58 – Porovnání naměřených hodnot odolnosti betonu proti CHRL s hodnotami predikovanými modelem A1

Receptura	25 cyklů		50 cyklů		75 cyklů		100 cyklů	
	Skutečnost [g·m ⁻²]	Predikce [g·m ⁻²]	Skutečnost [g·m ⁻²]	Predikce [g·m ⁻²]	Skutečnost [g·m ⁻²]	Predikce [g·m ⁻²]	Skutečnost [g·m ⁻²]	Predikce [g·m ⁻²]
1B	50,8	51,1	94,9	84,8	122,1	139,0	143,1	183,9
2B	36,0	35,7	69,1	69,6	192,5	107,2	227,0	143,6
3B	72,0	71,1	110,7	110,0	160,4	150,7	239,1	205,4
4B	33,2	44,0	72,8	73,5	135,5	143,4	228,1	236,8
1C	33,1	32,8	56,1	63,7	79,6	97,5	108,0	124,5
2C	15,6	15,8	32,1	46,1	43,9	92,4	59,7	92,4
3C	43,6	43,1	77,7	67,9	98,0	87,5	120,7	134,1
4C	27,1	13,0	52,3	39,8	76,4	84,9	101,6	113,7

Tab. 59 – Kumulativní chyby predikčního modelu A1

Počet cyklů	Průměrná absolutní chyba [%]	Odmocnina ze střední kvadratické chyby [%]
0-25	11,4	21,7
0-50	13,3	19,1
0-75	28,1	43,6
0-100	22,0	27,1

Pro každých 25 zkušebních cyklů byl navržen samostatný regresní model, který predikoval přírůstek poškození v daném intervalu 25 cyklů. Celková predikce byla stanovena kumulativním součtem jednotlivých přírůstků.

Průměrná absolutní chyba predikce modelu A1 po prvních 25 zkušebních cyklech byla stanovena na 11,4 %. Pro kumulativní predikci po 100 zkušebních cyklech dosáhla tato chyba 22,0 %. Pro jednotlivé regresní modely byla rovněž vypočtena odmocnina ze střední kvadratické chyby, která penalizuje výskyt větších chyb a lépe tak vystihuje chování modelu v méně příznivých případech, po 100 zkušebních cyklech dosáhla hodnoty 27,1 %.

Nejvyšší chyba byla zaznamenána v intervalu 50–75 zkušebních cyklů, což souvisí s větším rozptylem naměřených hodnot a méně stabilním průběhem degradace povrchu v této fázi zkoušky. V pozdější fázi je chování betonu opět předvídatelnější a chyba predikce se snižuje.

Po zařazení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu do regresního modelu pro interval 75–100 zkušebních cyklů došlo ke snížení průměrné absolutní chyby přibližně o 8 %.

V použitém datasetu je model A1 na základě vstupních parametrů schopen odhadnout odolnost betonu proti působení CHRL s průměrnou absolutní chybou 22 %, přičemž u jednotlivých receptur se mohou vyskytnout i vyšší odchylky. Pro další zpřesnění modelu a snížení nejistoty odhadu by bylo nutné rozšířit vstupní dataset, na kterém je model trénován.

MODEL A2 – SE ZAHRNUTÍM NEPROVZDUŠNĚNÉ RECEPTURY

Model byl sestaven shodným postupem jako předchozí model A1. Rozdílem bylo zahrnutí neprovzdušněné receptury 2A do analýzy.

Predikční modely

$$y_{0-25} = 270,06 + 356,04 \cdot x_1 + 15,631 \cdot x_2 - 0,20163 \cdot x_3 - 42,241 \cdot x_4 - 286,16 \cdot x_5 - 3,10526 \cdot x_6$$

$$y_{25-50} = 61,207 + 47,122 \cdot x_1 + 3,03216 \cdot x_2 - 0,01711 \cdot x_3 - 3,17492 \cdot x_4 - 43,825 \cdot x_5 - 5,19126 \cdot x_7$$

$$y_{50-75} = -33,238 + 159,02 \cdot x_1 + 13,774 \cdot x_2 + 0,02570 \cdot x_3 + 13,621 \cdot x_3 - 149,23 \cdot x_4$$

$$y_{75-100} = 78,424 + 643,98 \cdot x_1 + 36,614 \cdot x_2 - 0,08041 \cdot x_3 - 5,75473 \cdot x_4 - 377,13 \cdot x_5 - 28,886 \cdot x_7$$

- x_1 – SF stanovený mikroskopickou analýzou [mm]
- x_2 – Poměr tmel:vzduch [-]
- x_3 – Cementový tmel [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] – model ovlivňuje minimálně, ale spojuje ho
- x_4 – Plastifikační přísada [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- x_5 – Provzdušňující přísada [% z m_c]
- x_6 – Měrný povrch vzduchových pórů stanovený mikroskopickou analýzou [mm^{-1}]
- x_7 – Pevnost povrchové vrstvy betonu [MPa]

Tab. 60 – Kumulativní chyby predikčního modelu A2

Počet cyklů	Průměrná absolutní chyba [%]	Odmocnina ze střední kvadratické chyby [%]
0-25	16,9	20,6
0-50	14,9	20,3
0-75	34,1	49,8
0-100	31,7	36,0

Model byl sestaven shodně jako jeho předchozí alternativa. Rozdílem bylo, že pevnost v tahu povrchových vrstev betonu byla zahrnuta i do regresního modelu pro interval 25-50 zkušebních cyklů, protože v této fázi byl rovněž zaznamenán její možný vliv. Zda je zařazení tohoto parametru v daném intervalu opodstatněné, by však bylo možné spolehlivě posoudit až na základě rozšířeného vstupního datasetu.

Pro prvních 50 zkušebních cyklů se průměrná absolutní chyba predikce pohybovala v rozmezí 15 až 17 %. V druhé polovině predikce došlo k výraznému nárůstu chyby, která se v porovnání s první polovinou zkoušky přibližně zdvojnásobila. **Pro kumulativní predikci po 100 zkušebních cyklech byla průměrná absolutní chyba spočtena na 32 %, přičemž odmocnina ze střední kvadratické chyby dosáhla hodnoty 36 %.**

Blížkost hodnot průměrné absolutní chyby a odmocniny ze střední kvadratické chyby naznačuje relativně rovnoměrné rozdělení chyb a absenci výrazných extrémních odchylek v predikci. Tento výsledek indikuje, že i neprovzdušněné receptury mohou být do vstupního datasetu zahrnuty, avšak jejich vliv na stabilitu a přesnost modelu by bylo vhodné ověřit na rozsáhleším souboru dat s vyšším zastoupením těchto receptur.

14.2 MODEL B – ZÁVISLOST MEZI MIKROSKOPICKOU ANALÝZOU A TRVANLIVOSTÍ BETONU ZKOUŠENÉ NA POVRCHU VZNIKLEM POMOCÍ TEFLONOVÉ VLOŽKY

V tomto modelu byla provedena jednorázová predikce odolnosti betonu proti působení CHRL po 100 zkušebních cyklech. Důvodem bylo, že naměřené hodnoty odpadu se pohybovaly v širokém rozsahu (řádově od desítek po tisíce $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), což při omezeném počtu receptur vedlo ke zvýšené citlivosti modelu na extrémní hodnoty. Z tohoto důvodu byla cílová veličina v průběhu učení transformována pomocí logaritmické funkce. Tato transformace zmenšuje relativní vliv vysokých hodnot, stabilizuje regresní úlohu a následně umožňuje převod predikce zpět do původních jednotek pomocí inverzní transformace.

V každém trénovacím kroku byla aplikována váhová schémata vzorků. Jednotlivé trénovací body byly váženy inverzně k velikosti cílové veličiny. Tím byl zvýšen vliv nízkých hodnot a omezen vliv vysokých hodnot. Vstupní proměnné byly zvoleny shodně s předchozími modely.

Z datové sady byla vyřazena receptura 3B, protože během zkoušky odolnosti betonu proti CHRL došlo k porušení hran zkušebního tělesa a naměřená hodnota odpadu tak nebyla reprezentativní pro hodnocený mechanismus degradace. Receptura 2A byla do modelu naopak zahrnuta s cílem zachovat dostatečný rozsah vstupních dat pro následnou tvorbu modelu.

Predikční model

$$\log(1 + y) = 14,8317 + 7,5189 \cdot x_1 - 0,2973 \cdot x_2 - 0,0073 \cdot x_3 - 1,7913 \cdot x_4 - 6,1964 \cdot x_5$$

$$y = \exp(\log(1 + y)) - 1$$

- x_1 – SF stanovený mikroskopickou analýzou [mm]
- x_2 – Poměr tmel:vzduch [-]
- x_3 – Cementový tmel [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] – model ovlivňuje minimálně, ale spojuje ho
- x_4 – Plastifikační přísada [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- x_5 – Provozdušňující přísada [% z m_c]

Průměrná absolutní chyba = 65,8 %

Odmocnina ze střední kvadratické chyby = 68,1 %

Byla provedena pouze jednorázová predikce po 100 zkušebních cyklech, protože vlivem výrazných rozdílů v experimentálně stanovených hodnotách vykazoval model silnou nestabilitu. V případě rozšíření vstupního datasetu by bylo možné uvažovat o úpravě modelu i pro výpočet kumulativních přírůstků po jednotlivých intervalech zkoušky.

Průměrná absolutní chyba tohoto modelu byla stanovena na 65,8 %, přičemž odmocnina ze střední kvadratické chyby dosáhla hodnoty 68,1 %. To naznačuje, že chyby predikce byly obecně vysoké, přičemž větší odchylky se sice vyskytovaly, avšak bez výskytu výrazných extrémních chyb u jednotlivých receptur, tedy že model selhává systematicky napříč datasetem.

Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu nebyla do tohoto regresního modelu zahrnuta, protože model již v základním nastavení vykazoval vysokou nestabilitu a po přidání další vstupní proměnné došlo k dalšímu výraznému zhoršení přesnosti predikce.

14.3 MODEL C – ZÁVISLOST MEZI METODOU AVA A TRVANLIVOSTÍ BETONU ZKOUŠENÉ NA PŮVODNÍM POVRCHU

Predikce v tomto modelu probíhala shodně jako u modelu A1, přičemž hlavní rozdíl spočíval ve skladbě vstupních dat. Do modelu byly zahrnuty následující parametry:

- SF stanovený metodou AVA [mm]
- Dávka provozdušňovací přísady [% z množství cementu]
- Dávka plastifikační přísady [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- Obsah vzduchu v betonu do velikosti 500 μm stanovený metodou AVA (A_{500}) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- Cementový tmel [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], který spojuje dávku cementu a vodní součinitel a zároveň snižuje množství vstupních parametrů

Z modelu byla vyřazena neprovzdušněná receptura 2A, u níž byl naměřen velmi nízký obsah vzduchu pohybující se na hranici měřitelnosti metody AVA. Takto získané hodnoty proto nelze považovat za dostatečně reprezentativní pro spolehlivou predikci chování betonu v rámci tohoto modelu.

Predikční modely

$$y_{0-25} = 288,18 - 8,05571 \cdot x_1 + 12,586 \cdot x_2 - 0,13518 \cdot x_3 - 47,874 \cdot x_4 - 139,17 \cdot x_5$$

$$y_{25-50} = 145,68 + 13,029 \cdot x_1 + 81,003 \cdot x_2 + 0,79935 \cdot x_3 - 155,22 \cdot x_4 - 576,51 \cdot x_5$$

$$y_{50-75} = 77,087 - 6,77248 \cdot x_1 - 21,006 \cdot x_2 + 0,03809 \cdot x_3 + 12,177 \cdot x_4 - 292,53 \cdot x_5$$

$$y_{75-100} = 390,08 - 42,902 \cdot x_1 - 497,54 \cdot x_2 - 0,02331 \cdot x_3 - 59,116 \cdot x_4 + 157,92 \cdot x_5$$

- x_1 – A_{500} stanovený metodou AVA [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- x_2 – SF stanovený metodou AVA [mm]
- x_3 – Cementový tmel [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] – model ovlivňuje minimálně, ale spojuje ho
- x_4 – Plastifikační přísada [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- x_5 – Provzdušňující přísada [% z m_c]

Tab. 61 – Kumulativní chyby predikčního modelu C

Počet cyklů	Průměrná absolutní chyba [%]	Odmocnina ze střední kvadratické chyby [%]
0-25	16,8	21,7
0-50	10,6	13,5
0-75	28,6	38,8
0-100	19,8	25,6

Pro tento regresní model byly použity pouze údaje, které jsou známy již při návrhu a přípravě ČB. Cílem bylo na základě parametrů stanovených metodou AVA predikovat odolnost betonu proti působení CHRL po 100 zkušebních cyklech. Model byl sestaven jako kumulativní predikce s krokem 25 zkušebních cyklů.

Průměrná absolutní chyba predikce po 100 zkušebních cyklech dosáhla hodnoty 20 %, přičemž odmocnina střední kvadratické chyby činila 26 %. Tyto hodnoty jsou srovnatelné s modelem A1, ve kterém byla predikce založena na mikroskopické analýze. Do modelu však vstupují omezení a nejistoty metody AVA, které mohou ovlivnit výslednou přesnost modelu a ke kterým je proto nutné při interpretaci výsledků přihlídnout.

14.4 SHRNUÍ PREDIKČNÍCH MODELŮ

Navržené predikční modely se lišily složením vstupních dat a stabilitou predikce. Model A1, založený na parametrech vzduchového systému stanovených mikroskopickou

analýzou a na použití výhradně provzdušněných receptur, jejichž odolnost proti působení CHRL byla hodnocena na původním povrchu, vykázal nejvyváženější poměr mezi přesností a stabilitou. Postupná predikce po intervalech 25 zkušebních cyklů umožnila zachytit změny v průběhu degradace betonu a zároveň omezila vliv extrémních hodnot. Výsledky ukazují, že model A1 je schopen s relativně dobrou přesností popsat chování provzdušněných betonů v celém průběhu zkoušky, přičemž největší nejistota se objevuje ve fázi degradace mezi 50 a 75 zkušebními cykly. Model dokáže odhadnout odolnost betonu proti působení CHRL po 100 zkušebních cyklech s průměrnou absolutní chybou 22 %, přičemž u jednotlivých receptur se mohou vyskytnout i vyšší odchylky.

Model A2, do kterého byla zahrnuta i neprovzdušněná receptura, potvrdil, že výsledky neprovzdušněného betonu zvyšují rozptyl dat. Přestože podobnost hodnot průměrné absolutní chyby (32 % po 100 zkušebních cyklech) a odmocniny ze střední kvadratické chyby (36 %) naznačuje absenci výrazných extrémních odchylek, celkově vyšší chybovost ukazuje na omezenou použitelnost tohoto modelu při malém počtu receptur. Model A2 tak slouží spíše k metodickému ověření vlivu neprovzdušněných betonů než jako nástroj pro praktickou predikci.

Model B, založený na parametrech vzduchového systému stanovených mikroskopickou analýzou a na odolnosti betonu proti působení CHRL zkoušené na povrchu vzniklém pomocí teflonové vložky, se ukázal jako nejméně stabilní. Vysoké hodnoty chyb, které dosahovaly 70 % a nutnost logaritmické transformace cílové veličiny potvrzují, že při omezeném rozsahu datasetu není tento přístup vhodný pro spolehlivou kvantitativní predikci. Jeho přínos spočívá především v ilustraci limitů predikčního přístupu při silně heterogenních datech.

Model C, založený na parametrech stanovených metodou AVA, dosáhl přesnosti srovnatelné s modelem A1. Po 100 zkušebních cyklech dosáhl průměrné absolutní chyby 20 % a odmocniny ze střední kvadratické chyby 26 %. Tento model vykazuje aplikační potenciál, protože umožňuje odhadnout trvanlivost betonu již ve fázi návrhu a přípravy ČB. Jeho přesnost je však ovlivněna omezeními metody AVA, zejména při hodnocení betonů s nízkým obsahem vzduchu.

Z hlediska dalšího rozvoje a rozšíření datasetu se jako nejvhodnější základní model jeví model A1, který vykazuje nejstabilnější chování a umožňuje detailní analýzu průběhu degradace betonu. Pro praktické využití v návrhové fázi betonu je však perspektivní model C, jehož další zpřesnění by bylo možné dosáhnout rozšířením vstupního datasetu a lepším zachycením variability parametrů vzduchového systému stanovených metodou AVA.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjistit, zda existuje závislost mezi provzdušněním čerstvého a ztvrdlého betonu a jeho trvanlivostí při cyklickém mrazovém namáhání za přítomnosti chemických rozmrazovacích látek.

Voda při přechodu do pevného skupenství zvětšuje svůj objem přibližně o 9 %, čímž vzniká expanzní tlak vedoucí ke vzniku mikrotrhlin v betonu. Z tohoto důvodu je do cementové matrice vnášen systém mikropórů, obvykle o velikosti 10 až 300 μm , který slouží jako retenční prostor během skupenské přeměny vody. Při kombinaci mrazového namáhání a působení chemických rozmrazovacích látek dochází k odlupování povrchové vrstvy betonu (scaling).

Trvanlivost betonu je ovlivněna řadou charakteristik vzduchového systému. Kombinace těchto parametrů poskytuje komplexní pohled na to, zda je vzduchový systém v betonu dostatečně jemný, rovnoměrně rozptýlený a schopný zajistit požadovanou mrazuvzdornost betonu. Základním hodnocením prováděným v čerstvém betonu je jednoduchá tlakoměrná analýza, která určuje pouze celkový obsah vzduchu v betonu. Alternativní přístup představuje metoda AVA (Air Void Analyzer), jež umožňuje vyhodnotit vybrané parametry vzduchového systému již v čerstvém betonu, tato metoda je založena na principu Stokesova zákona. Tyto parametry jsou obvykle posuzovány až ve ztvrdlém betonu pomocí mikroskopické analýzy, která zůstává referenční metodou pro jejich posouzení. Mezi jednotlivými metodami jsou jisté statistické závislosti, například Spacing factor stanovený metodou AVA dosahuje přibližně 1,5 až 1,7krát vyšších hodnot než při mikroskopické analýze.

V České republice se samotná trvanlivost betonu nejčastěji hodnotí dle postupů uvedených v normě ČSN 73 1326/Z1, jejichž princip spočívá ve vystavení povrchu ztvrdlého betonu působení roztoku chemické rozmrazovací látky během opakovaných cyklů zmrazování a rozmrazování. Tyto postupy jsou však problematické z hlediska jejich opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, tedy těsnosti shody výsledků. Obdobné trendy a nedostatky vykazují také zahraniční metody. Z těchto důvodů jsou hledány možnosti zpřesnění zkušebních postupů, případně možnosti predikce trvanlivosti betonu na základě nepřímých parametrů, například provzdušnění betonu.

V rámci experimentální části práce bylo navrženo 9 receptur betonu, lišících se pevnostní třídou, konzistencí a obsahem vzduchu v betonu. U jednotlivých receptur byla v čerstvém betonu stanovena konzistence, objemová hmotnost, obsah vzduchu v betonu tlakoměrnou metodou a metodou AVA. U ztvrdlého betonu byla zjišťována

objemová hmotnost, pevnost betonu v tlaku, pevnost v tahu povrchových vrstev betonu, mikroskopická analýza parametrů provzdušnění a obsahu kameniva v betonu a jeho odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám, která byla zkoušena na čtyřech různých úpravách zkoušeného povrchu:

- Původní povrch s nátěrem hran
- Povrch vzniklý řezem s nátěrem hran
- Povrch vzniklý pomocí teflonové desky bez nátěru hran
- Povrch vzniklý pomocí teflonové desky s nátěrem hran

Nejtěsnější shoda výsledků byla naměřena u původního povrchu s nátěrem hran. Povrch vzniklý pomocí teflonové desky měl výsledné odpady průměru o 42 % vyšší. Hodnoty stanovené na povrchu vzniklém řezem byly nejednotné a lišili se oproti původnímu povrchu o 9,0 až 2775,9 g·m⁻² (13 až 95 %). U zkušebních těles, jejichž hrany nebyly opatřeny mrazuvzdorným nátěrem, byly odpady v průměru o 64 % vyšší než u vzorků s ošetřenými hranami.

Hodnoty stanovené u vzorků zkoušených na původním povrchu (normový postup) byly nižší než u vzorků zkoušených na povrchu vzniklém pomocí teflonové vložky. Přesto může jít o hodnoty co si vzájemně odpovídají, protože se jedná o jiný způsob přípravy zkušebního povrchu.

Byl zkoumán také vliv tvaru zkušebního tělesa na zkoušku odolnosti betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám. Bylo zjištěno, že při použití mrazuvzdorného nátěru hran je tento vliv zanedbatelný, pokud nedojde k porušení nátěru.

U některých receptur s obdobnými hodnotami parametrů provzdušnění se projevily rozdíly v rychlosti degradace betonu, což poukazuje na komplexní charakter trvanlivosti betonu a vzájemné působení více faktorů než pouze míry provzdušnění.

Byly porovnány parametry vzduchového systému stanovené metodou AVA v čerstvém betonu a mikroskopickou analýzou ve ztvrdlém betonu. Mikroskopická analýza zůstává referenční metodou pro stanovení těchto parametrů, ale vzájemné porovnání obou metod vykázalo systematické vazby mezi jednotlivými hodnotami. Hodnoty mikroskopického vzduchu do 500 μm (metoda AVA nedokáže kvantifikovat menší vzduchové póry) stanovené metodou AVA byly 1,8-2,5krát nižší než hodnoty naměřené mikroskopickou analýzou, průměrný rozdíl byl 48 %. Naopak Spacing factor metoda AVA nadhodnocovala a to 1,1 až 1,3krát (průměrně o 11 %). Na základě těchto vazeb lze metodu AVA považovat za potencionální predikční nástroj, který umožňuje již v čerstvém betonu odhadnout kvalitu provzdušnění.

Součástí práce bylo ověření možností statistického modelování vztahu mezi vybranými parametry vzduchového systému v betonu a jeho odolností proti chemickým rozmrazovacím látkám. Bylo prokázáno, že při vhodné volbě vstupních proměnných a způsobu ověřování (metoda leave-one-recipe-out) lze i z omezeného množství dat získat modely, které dokážou popsat průběh degradace betonu. Tyto modely nelze chápat jako univerzální predikční nástroje, ale jako podpůrný prostředek pro interpretaci experimentálních výsledků. Do některých predikčních modelů byla zahrnuta i pevnost v tahu povrchových vrstev betonu, která pomohla zpřesnit predikční schopnosti v pozdějších fázích degradačních procesů.

I při takto malém vstupním datasetu byly pomocí lineární regrese s L2 regularizací a standardizací vstupních proměnných získány modely, které byly schopny odhadnout odolnost betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám s průměrnou absolutní chybou 22 % (u jednotlivých receptur se mohli vyskytovat i vyšší i nižší odchylky). Nejpresnější byly modely prvních 50 zkušebních cyklů kdy se jejich průměrná absolutní chyba pohybovala pod 15 %. Největší nejistota predikce se objevuje ve fázi degradace mezi 50 a 75 zkušebními cykly. Z hlediska dalšího rozvoje predikčních modelů by bylo vhodné rozšířit dataset, který slouží pro trénování jednotlivých modelů.

V rámci diplomové práce byly identifikovány systematické vazby mezi metodou AVA a mikroskopickou analýzou. Současně bylo potvrzeno, že je možné hledat souvztáhnosti mezi vybranými parametry vzduchového systému betonu a jeho odolností proti chemickým rozmrazovacím látkám. Pro další zpřesnění predikce by bylo vhodné v práci pokračovat na rozsáhlejším souboru experimentálních dat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN 206+A2. *BETON – SPECIFIKACE, VLASTNOSTI, VÝROBA A SHODA*. Říjen 2021.
- [2] *Freeze-Thaw Resistance of Concrete With Marginal Air Content, Chapter 1*. Federální správa dálnic (FHWA), Office of Infrastructure Research and Development. 2006.
- [3] *Guide to Durable Concrete: Reported by ACI Committee 201*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA. 2016.
- [4] HALEŠOVÁ, Adéla. *Studium vlivu příměsí na trvanlivost provzdušněných betonů*. Brno, 2015. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [5] ŤAŽKÝ, Ing. Martin, Martin ING. ŤAŽKÝ, Ing. Ondřej PIKNA a Ing. Marek HOŠKO. Studium vlivu druhu provzdušňovacích přísad na vlastnosti provzdušněných betonů. *EBETON* [online]. 2022 [cit. 2025-08-31]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2022_4_70_studium-vlivu-druhu-provzdušnovacich-prisah-na-vlastnosti-provzdušnenych-betonu/?utm_source=chatgpt.com
- [6] CHALOUPKOVÁ, Kristýna. *Metodika pro stanovení trvanlivosti betonu a jeho odolnosti vůči působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek*. Brno, 2024. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [7] *Choosing the proper pcc mix for durability: https://www.intrans.iastate.edu/wp-content/uploads/sites/7/2019/08/35_Choosing-the-Proper-PCC-Mix-for-Durability.pdf*.
- [8] *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Přísady do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem*. 2012.
- [9] NEVILLE, Adam M. *Properties of Concrete*. 5. vydání. Harlow: Pearson Education Limited, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.
- [10] *Chemical Admixtures for Concrete*. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA. 2013.
- [11] ING. MISÁK, Petr, Ph.D., Ing. Dalibor KOCÁB, PH. D., doc. Ing. Tomáš VYMAZAL, PH. D., Ing. Patrik BAYER, PH. D. a prof. RNDr. Pavla ROVNANÍKOVÁ, CSC. Effect of De-Icing Chemicals on Concrete Scaling: The Role of Storage Water. *Materials (Basel, Switzerland)* [online]. 2023 [cit. 2025-09-07]. Dostupné z: doi:10.3390/ma16144928
- [12] LUO, San, Tianwen BAI, Mingqin GUO, Yi WEI a Wenbo MA. Impact of Freeze–Thaw Cycles on the Long-Term Performance of Concrete Pavement and Related Improvement Measures: A Review. *Materials (Basel)* [online]. 2022 [cit. 2025-09-07]. Dostupné z: doi:10.3390/ma15134568
- [13] THOMAS, Michael D., Kevin J. FOLLIARD a Terrence J. RASMUSSEN. *Guidelines for Diagnosis and Treatment of Alkali–Silica Reaction (ASR) in Concrete Pavements and Structures: FHWA-HIF-13-019*. Washington, D.C. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/asr/pubs/hif13019.pdf>, 2013.
- [14] DROCHYTKA, Rostislav. *Trvanlivost stavebních materiálů*. Brno, 2007. Skripta. VUT Brno.

- [15] *Tech Brief: Air Entrainment and Concrete Durability*. Washington, D.C. 2019.
- [16] ČSN P 73 2404. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace*. 2024.
- [17] RANGELOV, Milena, Olaniyi S. AROWOJOLU, Somayeh NASSIRI, Fouad BAYOMY a Ahmed IBRAHIM. *Concrete Durability Performance in Aggressive Salt and Deicing Environments—Case Study of Select Pavement and Bridge Concrete Mixtures* [online]. 2025 [cit. 2025-09-07]. Dostupné z: doi:10.3390/ma18061266
- [18] HOŘEJŠÍ, Bohumil, Vladimír KŘÍSTEK, Milan ŠTĚVULA a Jiří KREJČÍ. *Technologie betonu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze (ČVUT), 2018. ISBN 978-80-01-06467-5.
- [19] *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA: https://store.astm.org/c0457_c0457m-16.html, 2016.
- [20] STEFFES, Bob, Jim GROVE, P. E. a Mark ANDERSON-WILK. *Using the Air Void Analyzer for Real-Time Quality Control Adjustments in the Field*. Ames, Iowa, USA. CP Tech Center, Iowa State University, 2006.
- [21] *AIR ENTRAINMENT AND CONCRETE DURABILITY: FHWA-HIF-17-009*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif17009.pdf>, 2019.
- [22] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. 2020.
- [23] *FHWA-SA-96-062 Air Void Analyzer Evaluation*. U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. 1996.
- [24] *Air Void Analyzer (AASHTO TP 75-08)* [online]. 2017 [cit. 2025-09-14]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/airvoid.cfm>
- [25] *AVA - Air Void Analyzer*: <https://www.germanninstruments.com/wp-content/uploads/2022/01/AVA-Air-Void-Analyzer.pdf>. Emdrupvej 102, DK-2400 Copenhagen, Dánsko / Evanston, Illinois, USA. 2022.
- [26] WANG, Kejin, Mohamed MOHAMED-METWALLY, Fatih BEKTAS a Jim GROVE. *Improving Variability and Precision of Air-Void Analyzer (AVA) Test Results and Developing Rational Specification Limits: Phase I Report DTFH-61-06-H-00011, W03*. Center for Transportation Research and Education (CTRE), Iowa State University. 2008.
- [27] , AVA 3000 – Air Void Analyzer (Technical Data Sheet). *AVA 3000 – Air Void Analyzer (Technical Data Sheet): Technical Data Sheet*. <https://www.germanninstruments.com/wp-content/uploads/2021/12/AVA-3000-TDS-data-sheet-Germann-Instruments.pdf>, 2021.
- [28] CONCRETE EXPERTS INTERNATIONAL. *RapidAir 457: Automatic test of air void distribution in hardened concrete* [online]. [cit. 2025-09-14]. Dostupné z: <https://www.concrete-experts.com/rapidair457/>
- [29] LINDQUIST, Will a Rodney MONTNEY. NATIONAL CONCRETE PAVEMENT TECHNOLOGY CENTER (INTRANS, IOWA STATE UNIVERSITY). *Comparison of Spacing Factors as Measured by the Air-Void Analyzer and ASTM C457: Report No. FHWA-KS-15-10, Final report* [online]. Kansas Department of Transportation Bureau of Research. 2015 [cit. 2025-09-14].

- [30] JAKOBSEN, U.H., C. PADE, N. N. THAULOW, D. BROWN, S. SAHU, O. MAGNUS-SON, S. DE BUCK a G. DE SCHUTTER. The RapidAir System for Air Void Analysis of Hardened Concrete – A Round Robin Study. https://www.germanninstruments.com/wp-content/uploads/2022/01/Eurosem-2005_paper_airvoid_uhj_et_al_reviewed.pdf. **2005**.
- [31] Petrographic Methods of Examining Hardened Concrete: A Petrographic Manual. In: *FHWA-HRT-04-150* [online]. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2006 [cit. 2025-09-14]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/chapt6.cfm>
- [32] ČSN EN 480-11. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. 2006.
- [33] JAKOBSEN, U. H., C. PADE, N. THAULOW, D. BROWN, S. SAHU, O. MAGNUS-SON, S. DE BUCK a G. DE SCHUTTER. *Automated air void analysis of hardened concrete — a Round Robin study* [online]. [cit. 2025-09-14]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.005)
- [34] LOZYNSKYI, V., I. IVASENKO, R. VOROBEL, et al. *Evaluation of Air Voids in Concrete Based on Cross-Section Images of Its Test Specimens* [online]. 2025, Buildings [cit. 2025-11-29]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/buildings15132241>
- [35] LI, Gui, Marianne Tange HASHOLT, Vedrana Andersen DAHL a Ole Mejlhede JENSEN. Automated analysis of the void structure in hardened concrete based on shape from focus. *Materials and Structures*. **2024**. ISSN <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02448-1>.
- [36] RESEARCHGATE. [online]. [cit. 2025-09-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/RapidAir-457-device-to-analyze-the-pore-characteristics_fig3_321295867
- [37] ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA O VÝSLEDČÍCH EXPERIMENTU SHODNOSTI: program zkoušení způsobilosti - pevnost a trvanlivost ztvrdlého betonu ZZB 2022/1. Poskytovatel zkoušení způsobilosti při SZK FAST, Brno. 2022.
- [38] ČSN 73 1322. *STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU*. 1968.
- [39] ČSN 73 1322 Z1. *STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI ZMĚNA Z1*. 2003.
- [40] ČSN 73 1380. *ZKOUŠENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ - PORUŠENÍ VNITŘNÍ STRUKTURY*. 2007.
- [41] ČSN 73 1326. *STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRCHU CEMENTOVÉHO BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK*. 1984.
- [42] ČSN 73 1326 Z1. *STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRCHU CEMENTOVÉHO BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK ZMĚNA Z1*. 2003.
- [43] ČSN P CEN/TS 12390-9. *ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU - ČÁST 9: ODOLNOST PROTI ZMRAZOVÁNÍ ROZMRAZOVÁNÍ V ROZMRAZOVACÍCH SOLÍCH - ODLUPOVÁNÍ*. 2023.
- [44] KOCÁB, Dalibor, Petr MISÁK, Tomáš VYMAZAL, Tereza KOMÁRKOVÁ a Romana HALAMOVÁ. *STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRCHU BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK – METODY, PRAXE, PROBLÉMY*. *Ebeton*. 2017, **2017**(2), 42-47.

- [45] ŠNOBL, Patrik. *Odolnost betonu vůči mrazu a CHRL: možnosti, problémy, zkušenosti*. Praha, 2022. Diplomová práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze.
- [46] VYMAZAL, Tomáš, Oldřich ŽALUD, Petr MISÁK, Barbara KUCHARCZYKOVÁ a Ivo RUMEL. VLIV ZKUŠEBNÍCH FOREM A OŠETŘOVÁNÍ TĚLES NA VÝSLEDKY ZKOUŠEK FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH A TRVANLIVOSTNÍCH CHARAKTERISTIK ZTVRDLÉHO BETONU. *E BETON*. **2011**(4), 76-79.
- [47] MISÁK, Petr, Tomáš VYMAZAL, Oldřich ŽALUD a Barbara KUCHARCZYKOVÁ. STANOVENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI PŮSOBENÍ CHRL PODLE ČSN 73 1326 – OPAKOVATELNOST A REPRODUKOVATELNOST ZKOUŠEK. *Ebeton*. 2013, **2013**(4), 120-124.
- [48] SETZER, M. J., G. FAGERLUND a D. J. JANSSEN. CDF Test – Test method for the freeze–thaw resistance of concrete – tests with sodium chloride solution (CDF). *Materials and Structures*. 1996. ISSN 0025-5432.
- [49] RILEM. [online]. [cit. 2025-12-07]. Dostupné z: <https://www.rilem.net/>
- [50] RILEM. *TC 117-FDC: Freeze-thaw and deicing resistance of concrete* [online]. 1997 [cit. 2025-12-07]. Dostupné z: https://www.rilem.net/publication/publication/302?id_papier=6345
- [51] RILEM. *TC 117-FDC Recommendation - CDF test - test method for the freeze thaw and deicing resistance of concrete - Tests with sodium chloride (CDF)* [online]. 1996 [cit. 2025-12-07]. Dostupné z: https://www.rilem.net/publication/publication/299?id_papier=6306
- [52] ŠAFRATA, Pavel. *STUDIUM ZLEPŠENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONŮ*. Brno, 2017. Diplomová práce. Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně.
- [53] ŽÍLA, František. *METODY POSOUZENÍ TRVANLIVOSTI BETONŮ VŮČI PŮSOBENÍ MRAZU A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK V ČESKÉ REPUBLICE A V EVROPE*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně.
- [54] *ASTM C672 – Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*: <https://salmanco.com/wp-content/uploads/2017/04/C-672.pdf>.
- [55] *Freeze-Thaw Testing of Concrete (ASTM C666 / C666M): MBS – Masonry Building Solutions*. https://assets.ctfassets.net/ctspkgm1yw3s/DMSY-739242322-5067/772e89f2363b480040c8e41a6240c8ef/mbs-astm-c666_06_24_2020.pdf, 2020.
- [56] RAMEZANIANPOUR, A. A., M. JAFARI NADOOSHAN, M. PEYDAYESH a A. M. RAMEZANIANPOUR. Effect of Entrained Air Voids on Salt Scaling Resistance of Concrete Containing a New Composite Cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*. **2014**, 213-219. ISSN <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0365-x>.
- [57] AMINI, Kamran, Payam VOSOUGHI, Halil CEYLAN a Peter TAYLOR. Linking air-void system and mechanical properties to salt-scaling resistance of concrete containing slag cement. *Cement and Concrete Composites*. **2019**. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103364>.
- [58] YUAN, Jie, Zhenyu DU, Yue WU a Feipeng XIAO. Freezing–thawing resistance evaluations of concrete pavements with deicing salts based on various surfaces and air

- void parameters. *Construction and Building Materials*. **2019**, 317-326. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.149>.
- [59] HOU, Mengjun, Yuguo ZHONG a Will HANSEN. Correlating frost durability and liquid transport properties of concrete with a modified penetration depth model: Effect of aggregate, water/cementitious ratio, and supplementary cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*. **2025**. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04597>.
- [60] GIERGICZNY, Zbigniew, Michal A. GLINICKI, Marcin SOKOŁOWSKI a Marek ZIELINSKI. Air void system and frost-salt scaling of concrete containing slag-blended cement. *Construction and Building Materials*. **2009**. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.001>.
- [61] KREJCAR, Vojtěch. *Studie závislosti mezi součinitelem prostorového rozložení pórů a odolností betonů proti CHRL*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [62] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. 2016.
- [63] ČSN EN 196-6. *Metody zkoušení cementu – Část 6: Stanovení jemnosti mletí*. 2019.
- [64] ČSN 72 2113. *Stanovení měrné hmotnosti cementu*. 1987. Praha.
- [65] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. 2012.
- [66] ČSN EN 933-4. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index*. 2008.
- [67] ČSN EN 1097-6. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. 2023.
- [68] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. 2020.
- [69] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. 2020.
- [70] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2020.
- [71] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2020.
- [72] ČSN 73 1318. *Stanovení pevnosti betonu v tahu*. 1986.
- [73] LABTECH. *Měření obsahu vzduchu* [online]. [cit. 2025-09-14]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/mereni-obsahu-vzduchu.html>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Nárůst objemu vody při skupenské přeměně a vznik trhlin v cementové matici [8]	15
Obr. 2 - Chování vody a ledu v kapilárním póru při cyklickém mrazovém namáhání [7]	16
Obr. 3 - Koroze výztuže za přítomnosti mrazu a CHRL [14].....	18
Obr. 4 - Spacing factor [7]	20
Obr. 5 - Znázornění vztahu velikosti pórů, měrného povrchu a SF při stejném objemu	21
Obr. 6 - Tlakoměrný hrnec.....	22
Obr. 7 – Zkušební zařízení AVA [25]	23
Obr. 8 – Histogram Spacing factoru, hodnoty získané: (a) metoda AVA s pitnou vodou, (b) metoda AVA s deionizovanou vodou, (c) mikroskopická analýza dle ASTM C457 [29]	25
Obr. 9 – Ilustrace převodu skutečné 3D distribuce pórů na 2D plošnou, 1D přímkovou a 0D bodovou analýzu [34]	27
Obr. 10 - RapidAir 457 [36].....	28
Obr. 11 – Zařízení pro mikroskopickou analýzu	29
Obr. 12 - Snímek hranice mezi recyklovaným kamenivem a cementovým tmelem při mikroskopické analýze	29
Obr. 13 – Vzorky během zkoušky stanovení odolnosti betonu proti CHRL metodou A	32
Obr. 14 – Metodika práce	40
Obr. 15 – Nálevka v testovacím válci při vypouštění modré kapaliny AVA	46
Obr. 16 - Odběr vzorku pro analýzu AVA.....	47
Obr. 17 – Zařízení AVA během zkoušky [73].....	47
Obr. 18 - Příklad vyhodnocení analýzy AVA.....	48
Obr. 19 – Příprava zkušební vzorku pro mikroskopickou analýzu betonu [32]	48
Obr. 20 – Rozložení měřících přímek na zkušební povrchu [32].....	49
Obr. 21 - Vzorky připravené na mikroskopickou analýzu obsahu kameniva v betonu	49
Obr. 22 – Vzorky připravené na mikroskopickou analýzu (zleva receptura 1, 2, 3 a 4, zezhora varianta A, B a C)	50
Obr. 23 - Povrch vzniklý pomocí teflonové vložky	50
Obr. 24 - Teflonová vložka umístěná ve formě	50
Obr. 25 – Zkušební vzorky připravené na zkoušku odolnosti betonu proti CHRL (zleva: povrch vzniklý pomocí teflonové vložky bez nátěru hran, povrch vzniklý pomocí teflonové vložky s nátěrem hran, původní povrch s nátěrem hran, povrch vzniklý řezem s nátěrem hran).....	51
Obr. 26 - Rozdílné zkušební povrchy pro zkoušku odolnosti betonu proti CHRL (zleva: povrch vzniklý pomocí teflonové vložky, původní povrch, povrch vzniklý řezem).....	51
Obr. 27 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 3B	54
Obr. 28 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 3B	54

Obr. 29 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 3B	54
Obr. 30 – Vzorek po zkoušce CHRL původní povrch s nátěrem hran – receptura 3B.....	54
Obr. 33 – Analýza obsahu kameniva v betonu – barevné rozlišení kameniv dle velikosti jednotlivých zkoumaných prvků – receptura 3B.....	56
Obr. 31 – Analýza obsahu kameniva v betonu – zkoumaný snímek – receptura 3B	56
Obr. 32 – Analýza obsahu kameniva v betonu – oddělení kameniva (červená) od cementového tmelu (černá) – receptura 3B.....	56
Obr. 37 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 3C.....	58
Obr. 34 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 3C	58
Obr. 35 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 3C.....	58
Obr. 36 – Vzorek po zkoušce CHRL - původní povrch s nátěrem hran – receptura 3C	58
Obr. 38 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 1B.....	60
Obr. 41 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 1B	61
Obr. 39 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 1B	61
Obr. 40 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 1B	61
Obr. 42 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 1C	63
Obr. 43 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 1C	63
Obr. 44 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 1C.....	64
Obr. 45 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 1C.....	64
Obr. 46 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 2A	66
Obr. 47 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 2A	66
Obr. 48 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 2A	66
Obr. 49 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 2A.....	66
Obr. 50 – Vzorek po zkoušce CHRL – Válcové těleso – původní povrch s nátěrem hran – receptura 2A.....	67
Obr. 51 – Vzorek po zkoušce CHRL – Válcové těleso – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 2A.....	67
Obr. 52 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 2B	69

Obr. 53 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 2B	69
Obr. 54 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 2B.....	69
Obr. 55 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 2B	70
Obr. 56 – Analýza obsahu kameniva v betonu – oddělení kameniva (červená) od cementového tmelu (černá) – receptura 2B.....	71
Obr. 57 – Analýza obsahu kameniva v betonu – zkoumaný snímek – receptura 2B	71
Obr. 58 – Analýza obsahu kameniva v betonu – barevné rozlišení dle velikosti jednotlivých zkoumaných prvků – receptura 2B.....	71
Obr. 59 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 2C	73
Obr. 60 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 2C.....	73
Obr. 61 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 2C	73
Obr. 62 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 2C.....	73
Obr. 63 – válcové těleso - Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 2C.....	74
Obr. 64 – Válcové těleso – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 2C.....	74
Obr. 65 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 4B	76
Obr. 66 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 4B	76
Obr. 67 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 4B	76
Obr. 68 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran - receptura 4B	76
Obr. 69 – Válcové těleso – vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 4B.....	77
Obr. 70 – Válcové těleso – vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 4B	77
Obr. 71 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 4B...	77
Obr. 76 – Grafické vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební povrchu – receptura 4C	79
Obr. 72 – Vzorek po zkoušce CHRL – původní povrch s nátěrem hran – receptura 4C	79
Obr. 73 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran – receptura 4C	79
Obr. 74 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran – receptura 4C.....	79
Obr. 75 – Vzorek po zkoušce CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran – receptura 4C.....	79

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Zrnitost kameniva	45
Graf 2 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební povrchu – receptura 3B	54
Graf 3 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 3B.....	55
Graf 4 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební povrchu – receptura 3C	57
Graf 5 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 3C.....	59
Graf 6 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební povrchu – receptura 1B	60
Graf 7 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 1B.....	62
Graf 8 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební	63
Graf 9 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 1C.....	64
Graf 10 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební ...	66
Graf 11 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 2A... 68	
Graf 12 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební povrchu – receptura 2B	69
Graf 13 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 2B... 70	
Graf 14 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební povrchu – receptura 2C	73
Graf 15 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 2C... 74	
Graf 16 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL při různých úpravách zkušební ... 76	
Graf 17 – Histogram velikostního rozložení vzduchových pórů v betonu – receptura 4C... 80	
Graf 18 – Porovnání konzistence betonu.....	81
Graf 19 – Porovnání obsahu vzduchu v ČB stanoveného tlakoměrnou metodou.....	82
Graf 20 – Porovnání objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu.....	83
Graf 21 – Porovnání pevnosti betonu v tlaku	84
Graf 22 – Porovnání pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu	85
Graf 23 – Porovnání celkového obsahu vzduchu v betonu – metoda AVA.....	87
Graf 24 – Porovnání obsahu vzduchu do 500 μ m v betonu – metoda AVA	87
Graf 25 – Porovnání SF – metoda AVA	87
Graf 26 – Porovnání obsahu vzduchu v betonu – mikroskopická analýza.....	89
Graf 27 – Porovnání celkového obsahu vzduchu v betonu – mikroskopická analýza.....	89
Graf 28 – Porovnání obsahu vzduchu do velikosti 300 μ m v betonu – mikroskopická analýza	90
Graf 29 – Porovnání SF – mikroskopická analýza.....	90
Graf 30 – Porovnání výsledků stanovených metodou AVA a mikroskopickou analýzou – celkový obsah vzduchu	92
Graf 31 – Porovnání výsledků stanovených metodou AVA a mikroskopickou analýzou – obsah vzduchu do velikosti 500 μ m v betonu.....	93

Graf 32 – Porovnání výsledků stanovených metodou AVA a mikroskopickou analýzou – SF	93
Graf 33 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušebnímu povrchu po 25 zkušebních cyklech	97
Graf 34 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušebnímu povrchu po 50 zkušebních cyklech	97
Graf 35 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušebnímu povrchu po 75 zkušebních cyklech	97
Graf 36 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušebnímu povrchu po 100 zkušebních cyklech	97
Graf 37 – Porovnání odolnosti betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušebnímu povrchu a tvaru zkušebnímu tělesa po 100 zkušebních cyklech.....	99

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Vlastnosti cementu.....	44
Tab. 2 – Vlastnosti kameniva	44
Tab. 3 – Požadované vlastnosti receptur betonů.....	52
Tab. 4 - Receptury betonů.....	52
Tab. 5 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 3B	53
Tab. 6 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 3B	53
Tab. 7 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 3B.....	53
Tab. 8 – Vyhodnocení mikroskopické provzdušnění betonu – receptura 3B	55
Tab. 9 – Vyhodnocení analýzy obsahu kameniva v betonu – receptura 3B	55
Tab. 10 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 3C	56
Tab. 11 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 3C.....	57
Tab. 12 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 3C	57
Tab. 13 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 3C.....	58
Tab. 14 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 1B	59
Tab. 15 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 1B.....	59
Tab. 16 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 1B.....	60
Tab. 17 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 1B.....	61
Tab. 18 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 1C	62
Tab. 19 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 1C.....	62
Tab. 20 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 1C	63
Tab. 21 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 1C.....	64
Tab. 22 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 2A	65
Tab. 23 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 2A.....	65
Tab. 24 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 2A.....	65
Tab. 25 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 2A.....	67
Tab. 26 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 2B	68
Tab. 27 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 2B.....	68
Tab. 28 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 2B.....	69
Tab. 29 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 2B.....	70
Tab. 30 – Vyhodnocení analýzy obsahu kameniva v betonu - receptura 2B	71
Tab. 31 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 2C	72
Tab. 32 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 2C.....	72
Tab. 33 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 2C	72
Tab. 34 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 2C.....	74
Tab. 35 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 4B	75
Tab. 36 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 4B.....	75
Tab. 37 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 4B.....	75

Tab. 38 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 4B.....	77
Tab. 39 – Vyhodnocení základních vlastností betonu – receptura 4C	78
Tab. 40 – Vyhodnocení provzdušnění betonu metodou AVA – receptura 4C.....	78
Tab. 41 – Vyhodnocení odolnosti betonu proti CHRL – receptura 4C	78
Tab. 42 – Vyhodnocení mikroskopické analýzy provzdušnění betonu – receptura 4C.....	80
Tab. 43 – Konzistence betonu.....	81
Tab. 44 – Obsah vzduchu v ČB	82
Tab. 45 – Objemová hmotnost betonu	83
Tab. 46 – Pevnost betonu v tlaku.....	84
Tab. 47 – Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu	85
Tab. 48 – Parametry vzduchového systému stanovené metodou AVA	86
Tab. 49 – Obsah vzduchu v betonu stanovený mikroskopickou analýzou	89
Tab. 50 – Parametry vzduchového systému stanovené mikroskopickou analýzou	90
Tab. 51 – Porovnání parametrů vzduchového systému v betonu stanovených metodou AVA a mikroskopickou analýzou	92
Tab. 52 – Obsah kameniva v betonu – mikroskopická analýza.....	95
Tab. 53 – Odolnost betonu proti CHRL – původní povrch s nátěrem hran	95
Tab. 54 – Odolnost betonu proti CHRL – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran	96
Tab. 55 – Odolnost betonu proti CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky bez nátěru hran	96
Tab. 56 – Odolnost betonu proti CHRL – povrch vzniklý pomocí PTFE vložky s nátěrem hran.....	96
Tab. 57 – Odolnost betonu proti CHRL v závislosti na úpravě zkušební povrchu a tvaru zkušební tělesa po 100 zkušebních cyklech.....	99
Tab. 58 – Porovnání naměřených hodnot odolnosti betonu proti CHRL s hodnotami predikovanými modelem A1	104
Tab. 59 – Kumulativní chyby predikčního modelu A1	104
Tab. 60 – Kumulativní chyby predikčního modelu A2.....	105
Tab. 61 – Kumulativní chyby predikčního modelu C.....	108

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AAVA – automated air void analysis

AVA – Air Void Analyzer

C₃A – trikalciumpuluminát

Ca(OH)₂ – hydroxid vápenatý

CaCl₂ – chlorid vápenatý

Cl⁻ – chloridový ion

ČB – čerstvý beton

ČR – Česká republika

ČSN – česká státní norma

EN – evropská norma

EU – Evropská unie

CHRL – chemické rozmrazovací látky

K⁺ – alkalický iont draslík

KDOT – Kansas Department of Transportation

LORO – metoda leave-one-recipe-out

m_c – hmotnost cementu [kg·m⁻³]

Metoda A – metoda automatického cyklování I dle ČSN 73 1326/Z1

Metoda B – metoda ruční manipulace se vzorky dle ČSN 73 1326/Z1

Metoda C – metoda automatického cyklování II dle ČSN 73 1326/Z1

MPZ – mezilaboratorní porovnávací zkoušky

Na⁺ – alkalický iont sodík

NaCl – chlorid sodný

OH – objemová hmotnost

Pitná voda – voda z vodovodního řadu

PTFE – teflon

SF – Spacing factor – Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů

SiO₂ – oxid křemičitý

USA – Spojené státy americké

XF – stupeň vlivu prostředí – mrazové namáhání za přítomnosti vody nebo chemických rozmrazovacích látek

ZB – ztvrdlý beton

Zkrácené texty použité v grafech:

Původní povrch – původní povrch s nátěrem hran

Řezová plocha – povrch vzniklý řezem s nátěrem hran

Teflon s nátěrem – povrch vzniklý pomocí teflonové vložky s nátěrem hran

Teflon bez nátěru – povrch vzniklý pomocí teflonové vložky bez nátěrem hran

PŘÍLOHA 1 – Výpočetní kód – model A1

Predikční model degradace betonu (CHRL)

Vygenerováno: 16.01.2026 04:07

Kontrola vyřazení receptury 2A

- 2A před filtrací: ANO
- 2A po filtraci: NE
- Počet receptur (po filtraci): 8

Predikční vzorce (D0–D3)

D0_d0_25: $y = 25.807 + (1539.80) \cdot \text{Spacing factor [mm]} - (112.98) \cdot \text{Poměr tmel:vzduch} + (0.29754) \cdot \text{Cementovy_tmel_kg_m3} - (95.710) \cdot \text{Plastifikator_kg_m3} - (445.20) \cdot \text{Prisada_provzduch_pct_cement} + (17.230) \cdot \text{Specifický_povrch [mm-1]}$

D1_d25_50: $y = 87.489 + (28.635) \cdot \text{Spacing factor [mm]} + (1.08654) \cdot \text{Poměr tmel:vzduch} - (0.02503) \cdot \text{Cementovy_tmel_kg_m3} - (7.28812) \cdot \text{Plastifikator_kg_m3} - (135.60) \cdot \text{Prisada_provzduch_pct_cement}$

D2_d50_75: $y = 36.503 + (50.218) \cdot \text{Spacing factor [mm]} + (10.380) \cdot \text{Poměr tmel:vzduch} + (0.02958) \cdot \text{Cementovy_tmel_kg_m3} + (10.213) \cdot \text{Plastifikator_kg_m3} - (319.23) \cdot \text{Prisada_provzduch_pct_cement}$

D3_d75_100: $y = 126.47 - (202.60) \cdot \text{Spacing factor [mm]} + (66.985) \cdot \text{Poměr tmel:vzduch} - (0.08629) \cdot \text{Cementovy_tmel_kg_m3} - (25.139) \cdot \text{Plastifikator_kg_m3} + (1.56748) \cdot \text{Prisada_provzduch_pct_cement} - (34.409) \cdot \text{Pevnost_povrchových_vrstev_betonu}$

Přehled metrik – přírůstky (D0–D3)

	Target	MAE [g-m-2]	RMSE [g-m-2]	MAE [%]	RMSE [%]	valid_n
D0_d0_25	3.44		6.29	11.4	21.7	8
D1_d25_50	6.72		8.28	25.2	35.3	8
D2_d50_75	24.44		35.31	78.5	118.4	8
D3_d75_100	12.25		16.14	49.1	69.9	8

Kumulativní metrik (%) – 25/50/75/100

Fáze	MAE_cum_%	RMSE_cum_%	valid_n
25	11.4	21.7	8
50	13.3	19.1	8
75	28.1	43.6	8
100	22.0	27.1	8

Porovnání predikce a skutečnosti – přírůstky (D0–D3)

Receptura	D0_d0_25_true	D0_d0_25_pred	D0_d0_25_err	D1_d25_50_true	D1_d25_50_pred	D1_d25_50_err	D2_d50_75_true	D2_d50_75_pred	D2_d50_75_err	D3_d75_100_true
1B	50.79	51.145	0.355	44.11	33.646	-10.464	27.20	54.175	26.975	20.95
1C	33.13	32.839	-0.291	22.92	30.818	7.898	23.54	33.818	10.278	28.40
2B	35.97	35.722	-0.248	33.14	33.869	0.729	123.43	37.593	-85.837	34.48
2C	15.56	15.829	0.269	16.58	30.241	13.661	11.71	46.347	34.637	15.85
3B	71.97	71.063	-0.907	38.77	38.888	0.118	49.69	40.717	-8.973	78.65
3C	43.64	43.050	-0.590	34.07	24.830	-9.240	20.26	19.665	-0.595	22.72
4B	33.19	43.986	10.796	39.57	29.511	-10.059	62.70	69.920	7.220	92.68
4C	27.06	12.967	-14.093	25.27	26.851	1.581	24.09	45.104	21.014	25.13

% odchylka – kumulativně (25/50/75/100)

Receptura	y25_true	y25_hat	pct_25	y50_true	y50_hat	pct_50	y75_true	y75_hat	pct_75	y100_true	y100_hat	pct_100
1B	50.79	51.15	0.7	94.90	84.79	-10.7	122.10	138.97	13.8	143.05	183.93	28.6
1C	33.13	32.84	-0.9	56.05	63.66	13.6	79.59	97.48	22.5	107.99	124.45	15.2
2B	35.97	35.72	-0.7	69.11	69.59	0.7	192.54	107.18	-44.3	227.02	143.56	-36.8
2C	15.56	15.83	1.7	32.14	46.07	43.3	43.85	92.42	110.8	59.70	92.42	54.8
3B	71.97	71.06	-1.3	110.74	109.95	-0.7	160.43	150.67	-6.1	239.08	205.37	-14.1
3C	43.64	43.05	-1.4	77.71	67.88	-12.7	97.97	87.54	-10.6	120.69	134.13	11.1
4B	33.19	43.99	32.5	72.76	73.50	1.0	135.46	143.42	5.9	228.14	236.75	3.8
4C	27.06	12.97	-52.1	52.33	39.82	-23.9	76.42	84.92	11.1	101.55	113.70	12.0

Průběh predikce – kumulativně (25/50/75/100)

Receptura	y25_hat	y50_hat	y75_hat	y100_hat
1B	51.145371	84.791853	138.966900	183.927800
1C	32.838811	63.657258	97.475341	124.450338
2B	35.721609	69.590495	107.183743	143.559955
2C	15.828724	46.070008	92.417134	92.417134
3B	71.062881	109.951020	150.667704	205.369381
3C	43.049639	67.879461	87.544882	134.133872
4B	43.986325	73.496940	143.416664	236.754149
4C	12.966907	39.817897	84.922070	113.701364

Zdrojový kód (pouze predikční část)

```

import numpy as np
import pandas as pd
import re
from datetime import datetime
import os
import html

# =====
# Predikční model (Ridge + leave-one-recipe-out)
# -----
# Výpočet:
# - 4 dílčí modely pro přírůstky po 25 cyklech (D0-D3)
# - rekonstrukce kumulativní predikce (25/50/75/100) s CLIP na 0
#
# Kontroly a výstupy:
# - potvrzení vyřazení 2A
# - metriky a tabulky pro přírůstky i kumulativní průběh
# - predikční vzorce D0-D3
# =====

# -----
# Řízení výpisů (pouze prezentace)
# -----
PRINT_INPUT_DEBUG = False # info o vstupních datech (wide DF, NaN ve
sloupcích, seznamy)
PRINT_MODEL_OUTPUT = True # výsledky modelu (metriky, predikce,
koeficienty, vzorce, tabulky)

# -----
# Sloupce odpadu
# -----
COL_25 = "Množství odpadu po 25 cyklech [g·m-2]"
COL_50 = "Množství odpadu po 50 cyklech [g·m-2]"
COL_75 = "Množství odpadu po 75 cyklech [g·m-2]"
COL_100 = "Množství odpadu po 100 cyklech [g·m-2]"

# =====
# 0) pomocné funkce
# =====
def _norm_col(s: str) -> str:
    s = str(s)
    s = s.replace("\xa0", " ").replace("\n", " ")
    s = re.sub(r"\s+", " ", s)
    return s.strip()

def to_float(x):
    if pd.isna(x):
        return np.nan
    if isinstance(x, str):
        x = x.strip().replace(",", ".")
        if x in {"", "-", "-"}:
            return np.nan
    try:
        return float(x)
    except Exception:
        return np.nan

def pct_diff(y_hat, y_true):
    """Relativní odchylka v %: (pred - true)/true*100; true==0 -> NaN."""
    y_true = y_true.astype(float)
    y_hat = y_hat.astype(float)
    out = 100.0 * (y_hat - y_true) / y_true
    out = out.where(y_true != 0, np.nan)
    return out

def cumulative_pct_metrics(y_true, y_hat):
    """
    Relativní metriky v % (MAPE/RMSPE) z rel_err = (pred - true)/true.
    true==0 se ignoruje.
    """
    y_true = y_true.astype(float)
    y_hat = y_hat.astype(float)

    mask = y_true != 0

```

```

if int(mask.sum()) == 0:
    return np.nan, np.nan, 0

rel_err = (y_hat[mask] - y_true[mask]) / y_true[mask]
mae_pct = float(np.mean(np.abs(rel_err)) * 100.0)
rmse_pct = float(np.sqrt(np.mean(rel_err ** 2)) * 100.0)
return mae_pct, rmse_pct, int(mask.sum())

# =====
# 0b) kontrola, že DF jsou v paměti
# =====
for name in ["df_A", "df_rec_for_A", "df_air_for_A"]:
    assert name in globals(), f"✘ {name} neexistuje v paměti."

# =====
# 1) sestavení df_model (základ = df_A) + cement/w_c + provzdušnění
# =====
df_model = df_A.merge(
    df_rec_for_A[["Receptura", "Cement_kg_m3", "w_c"]],
    on="Receptura", how="left"
).merge(
    df_air_for_A[["Receptura", "Prisada_provzduš_pct_cement"]],
    on="Receptura", how="left"
)

# =====
# 1b) výpočet cementového tmele
# =====
df_model["Cement_kg_m3"] = df_model["Cement_kg_m3"].map(to_float)
df_model["w_c"] = df_model["w_c"].map(to_float)

assert df_model["Cement_kg_m3"].isna().sum() == 0, "Cement_kg_m3 má NaN
po merge."
assert df_model["w_c"].isna().sum() == 0, "w_c má NaN po merge."

df_model["Cementovy_tmel_kg_m3"] = df_model["Cement_kg_m3"] * (1.0 +
df_model["w_c"])
assert np.isfinite(df_model["Cementovy_tmel_kg_m3"]).all(),
"Cementovy_tmel_kg_m3 obsahuje NaN/inf."

# =====
# 1c) plastifikátor (wide list 'receptury' musí být v paměti jako DF)
# =====
RECS_SET = {"1B", "1C", "2A", "2B", "2C", "3B", "3C", "4B", "4C"}

def find_receptury_wide_df():
    candidates = []
    for name, obj in globals().items():
        if isinstance(obj, pd.DataFrame) and "Receptura" in obj.columns:
            cols = set(map(str, obj.columns))
            if len(cols.intersection(RECS_SET)) >= 5:
                candidates.append((name, obj.copy()))
    if not candidates:
        raise AssertionError(
            "Nenašla jsem v paměti wide tabulku listu 'receptury'. "
            "Musí existovat DF se sloupcem 'Receptura' a vedle něj
sloupce 1B,1C,2A,..."
        )
    if len(candidates) > 1 and PRINT_INPUT_DEBUG:
        print("\nPozor: více kandidátů na wide receptury DF:")
        for n, _ in candidates:
            print(" -", n)
        print("Používám první:", candidates[0][0])
    return candidates[0]

def extract_plast_from_wide(df_wide: pd.DataFrame) -> pd.DataFrame:
    df = df_wide.copy()
    df["__desc__"] =
df["Receptura"].astype(str).map(_norm_col).str.lower()
    df["__desc__"] = df["__desc__"].replace({r"^\[.*\]$": ""},
regex=True).str.strip()

    mask = (
        df["__desc__"].str.contains("plast", na=False)
        | df["__desc__"].str.contains("optima", na=False)
        | df["__desc__"].str.contains("309", na=False)
        | df["__desc__"].str.contains("chryso", na=False)

```

```

)
if int(mask.sum()) == 0:
    if PRINT_INPUT_DEBUG:
        print("\nDEBUG - první řádky popisů ve wide receptury:")
        print(df["Receptura"].head(20).to_string(index=False))
        raise AssertionError(
            "V wide tabulce 'receptury' nebyl nalezen řádek
plastifikátoru "
            "(plast/optima/309/chryso).")
    )

row = df.loc[mask].iloc[0]
rec_cols = [c for c in df.columns if str(c) in RECS_SET]

out = pd.DataFrame({
    "Receptura": [str(c) for c in rec_cols],
    "Plastifikator_kg_m3": [to_float(row[c]) for c in rec_cols],
})
if out["Plastifikator_kg_m3"].isna().any():
    bad = out.loc[out["Plastifikator_kg_m3"].isna(),
"Receptura"].tolist()
    raise AssertionError(f"Plastifikátor má NaN u receptur: {bad}")
return out

wide_name, df_receptury_wide = find_receptury_wide_df()
df_plast = extract_plast_from_wide(df_receptury_wide)

if PRINT_INPUT_DEBUG:
    print("\n===== INFO: Plastifikátor
=====")
    print("Použitý wide DF:", wide_name)
    print(df_plast.sort_values("Receptura").to_string(index=False))

df_model = df_model.merge(df_plast, on="Receptura", how="left")
assert df_model["Plastifikator_kg_m3"].isna().sum() == 0,
"Plastifikator_kg_m3 má NaN po merge."

# =====
# 2) vyřazení 2A (+ potvrzení ve výstupech)
# =====
had_2a_before = bool((df_model["Receptura"].astype(str) == "2A").any())
n_before_filter = len(df_model)

df_model = df_model[df_model["Receptura"] != "2A"].reset_index(drop=True)

had_2a_after = bool((df_model["Receptura"].astype(str) == "2A").any())
n_after_filter = len(df_model)

# =====
# 3) definice vstupů (✅ pevnost jen do D3)
# =====
BASE_X = [
    "Spacing factor [mm]",
    "Poměr tmel:vzduch",
    "Cementovy_tmel_kg_m3",
    "Plastifikator_kg_m3",
    "Prisada_provzdus_pct_cement",
]

SPEC_SURF = "Specifický povrch [mm-1]"
SURF_STRENGTH = "Pevnost povrchových vrstev betonu"

assert SPEC_SURF in df_model.columns, f"Chybí '{SPEC_SURF}' v df_model."
assert SURF_STRENGTH in df_model.columns, f"Chybí '{SURF_STRENGTH}' v
df_model."

X_COLS_BY_TARGET = {
    "D0_d0_25": BASE_X + [SPEC_SURF],
    "D1_d25_50": BASE_X,
    "D2_d50_75": BASE_X,
    "D3_d75_100": BASE_X + [SURF_STRENGTH], # ✅ jen D3
}

# =====
# 4) cíle (přírůstky)
# =====
need_cols_common = ["Receptura", COL_25, COL_50, COL_75, COL_100]

```

```

missing_common = [c for c in need_cols_common if c not in
df_model.columns]
assert not missing_common, f"Chybí sloupce (odpad/receptura):
{missing_common}"

need_x_all = sorted({x for xs in X_COLS_BY_TARGET.values() for x in xs})
missing_x = [c for c in need_x_all if c not in df_model.columns]
assert not missing_x, f"Chybí vstupní sloupce: {missing_x}"

df_model[COL_25] = df_model[COL_25].map(to_float)
df_model[COL_50] = df_model[COL_50].map(to_float)
df_model[COL_75] = df_model[COL_75].map(to_float)
df_model[COL_100] = df_model[COL_100].map(to_float)

df_model["D0_d0_25"] = df_model[COL_25]
df_model["D1_d25_50"] = df_model[COL_50] - df_model[COL_25]
df_model["D2_d50_75"] = df_model[COL_75] - df_model[COL_50]
df_model["D3_d75_100"] = df_model[COL_100] - df_model[COL_75]

targets_list = ["D0_d0_25", "D1_d25_50", "D2_d50_75", "D3_d75_100"]

if PRINT_MODEL_OUTPUT:
    print("\n===== VSTUPY PODLE FÁZE
=====")
    for tgt in targets_list:
        print(f"{tgt}: {X_COLS_BY_TARGET[tgt]}")

# =====
# 5) Ridge + L00
# =====
from sklearn.pipeline import Pipeline
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.linear_model import Ridge

alphas = np.logspace(-4, 4, 81)

def run_ridge_loo(df_model, target_col, x_cols, alphas):
    df_use = df_model[["Receptura", target_col] + x_cols].copy()

    df_use[target_col] = df_use[target_col].map(to_float)
    for c in x_cols:
        df_use[c] = df_use[c].map(to_float)

    if PRINT_INPUT_DEBUG:
        print("\n===== DATASET =====")
        print("Target:", target_col)
        print("Počet řádků:", len(df_use))
        print("NaN ve sloupcích:")
        print(df_use.isna().sum())

    assert df_use.isna().sum().sum() == 0, "V datech jsou NaN."
    assert df_use["Receptura"].duplicated().sum() == 0, "Duplicitní
receptury."

    X = df_use[x_cols].to_numpy(float)
    y = df_use[target_col].to_numpy(float)
    recs = df_use["Receptura"].astype(str).to_numpy()
    n = len(y)

    def loo_predict(alpha):
        yp = np.zeros(n)
        model = Pipeline([
            ("scaler", StandardScaler()),
            ("ridge", Ridge(alpha=float(alpha), fit_intercept=True))
        ])
        for i in range(n):
            mask = np.ones(n, dtype=bool)
            mask[i] = False
            model.fit(X[mask], y[mask])
            yp[i] = model.predict(X[i:i+1])[0]
        return yp

    scores = []
    preds = {}

    for a in alphas:
        yp = loo_predict(a)

```

```

        preds[a] = yp
        MAE = float(np.mean(np.abs(y - yp)))
        RMSE = float(np.sqrt(np.mean((y - yp) ** 2)))
        mae_pct, rmse_pct, valid_n = cumulative_pct_metrics(pd.Series(y),
        pd.Series(yp))
        scores.append((float(a), MAE, RMSE, mae_pct, rmse_pct, valid_n))

    df_scores = (
        pd.DataFrame(scores, columns=["alpha", "MAE", "RMSE", "MAE_pct",
"RMSE_pct", "valid_n"])
        .sort_values("MAE")
        .reset_index(drop=True)
    )
    best_alpha = float(df_scores.loc[0, "alpha"])
    y_pred = preds[best_alpha]

    MAE = float(np.mean(np.abs(y - y_pred)))
    RMSE = float(np.sqrt(np.mean((y - y_pred) ** 2)))
    mae_pct, rmse_pct, valid_n = cumulative_pct_metrics(pd.Series(y),
    pd.Series(y_pred))

    df_pred = pd.DataFrame({
        "Receptura": recs,
        "y_skutecnost": y,
        "y_pred_LOO": y_pred,
        "chyba": y_pred - y,
        "abs_chyba": np.abs(y_pred - y),
    }).sort_values("Receptura").reset_index(drop=True)

    df_top = df_pred.sort_values("abs_chyba",
    ascending=False).head(5).reset_index(drop=True)

    # koeficienty + vzorec (fit na všech datech)
    final_model = Pipeline([
        ("scaler", StandardScaler()),
        ("ridge", Ridge(alpha=float(best_alpha), fit_intercept=True))
    ])
    final_model.fit(X, y)

    scaler = final_model.named_steps["scaler"]
    ridge = final_model.named_steps["ridge"]
    coef_scaled = ridge.coef_
    intercept_scaled = ridge.intercept_

    coef_unscaled = coef_scaled / scaler.scale_
    intercept_unscaled = intercept_scaled - np.sum(coef_scaled *
    scaler.mean_ / scaler.scale_)

    df_coef = pd.DataFrame({
        "Promenna": x_cols,
        "Koeficient": coef_unscaled
    }).sort_values("Koeficient", key=lambda s: np.abs(s),
    ascending=False).reset_index(drop=True)

    def fmt(x):
        ax = abs(x)
        if ax >= 100:
            return f"{x:.2f}"
        elif ax >= 10:
            return f"{x:.3f}"
        else:
            return f"{x:.5f}"

    terms = []
    for var, c in zip(x_cols, coef_unscaled):
        sign = "+" if c >= 0 else "-"
        terms.append(f" {sign} ({fmt(abs(c))})·{var}")
    formula = f"y = {fmt(intercept_unscaled)}" + "".join(terms)

    if PRINT_MODEL_OUTPUT:
        print("\n===== MODEL Ridge + LOO
=====")
        print("Target:", target_col)
        print("Vstupy:", x_cols)
        print("Vybrané alpha:", best_alpha)
        print(f"MAE (LOO): {MAE:.3f} g·m-2")
        print(f"RMSE (LOO): {RMSE:.3f} g·m-2")

```

```

        print(f"MAE% (LOO): {mae_pct:.1f} % (z {valid_n}/{len(y)}); y=0
ignorováno")
        print(f"RMSE%(LOO): {rmse_pct:.1f} % (z {valid_n}/{len(y)}); y=0
ignorováno")
        print("\nPredikce (LOO):")
        print(df_pred.to_string(index=False))
        print("\nNejvětší chyby:")
        print(df_top.to_string(index=False))
        print("\nKoeficienty (původní jednotky):")
        print("Intercept:", float(intercept_unscaled))
        print(df_coef.to_string(index=False))
        print("\n===== VÝPOČETNÍ VZOREC MODELU
=====")
        print("Target:", target_col)
        print(formula)

    return {
        "target": target_col,
        "x_cols": x_cols,
        "best_alpha": best_alpha,
        "MAE": MAE,
        "RMSE": RMSE,
        "MAE_pct": mae_pct,
        "RMSE_pct": rmse_pct,
        "valid_n": valid_n,
        "df_pred": df_pred,
        "df_top_errors": df_top,
        "intercept": float(intercept_unscaled),
        "df_coef": df_coef,
        "formula": formula
    }

# =====
# 6) spuštění 4 přírůstků
# =====
results = {tgt: run_ridge_loo(df_model, tgt, X_COLS_BY_TARGET[tgt],
alphas) for tgt in targets_list}

if PRINT_MODEL_OUTPUT:
    print("\nHotovo - modely přírůstků (po 25 cyklech).")

# =====
# 7) Rekonstrukce průběhu (LOO) + CLIP záporných přírůstků
# =====
def pred_series_for(target_key):
    dfp = results[target_key]
    ["df_pred"].sort_values("Receptura").reset_index(drop=True)
    return dfp["y_pred_LOO"].to_numpy(), dfp["Receptura"].to_numpy()

D0_hat, recs0 = pred_series_for("D0_d0_25")
D1_hat, recs1 = pred_series_for("D1_d25_50")
D2_hat, recs2 = pred_series_for("D2_d50_75")
D3_hat, recs3 = pred_series_for("D3_d75_100")

assert np.array_equal(recs0, recs1) and np.array_equal(recs0, recs2) and
np.array_equal(recs0, recs3), \
    "Neshoda pořadí receptur v predikcích."

inc_names = ["D0_d0_25", "D1_d25_50", "D2_d50_75", "D3_d75_100"]
inc_arrays = [D0_hat.copy(), D1_hat.copy(), D2_hat.copy(), D3_hat.copy()]

neg_rows = []
for name, arr in zip(inc_names, inc_arrays):
    for r, v in zip(recs0, arr):
        if v < 0:
            neg_rows.append((str(r), name, float(v)))

df_neg = pd.DataFrame(neg_rows, columns=["Receptura", "Fáze",
"Predikce_prirustku"])
if PRINT_MODEL_OUTPUT:
    print("\n===== KONTROLA: ZÁPORNÉ PŘÍRŮSTKY (PŘED CLIP)
=====")
    if len(df_neg) == 0:
        print("Žádné záporné přírůstky.")
    else:
        print("Nalezeno záporných přírůstků:", len(df_neg))
        print(df_neg.sort_values(["Receptura",

```

```

"Fáze"].to_string(index=False))

D0_hat_clip = np.maximum(D0_hat, 0)
D1_hat_clip = np.maximum(D1_hat, 0)
D2_hat_clip = np.maximum(D2_hat, 0)
D3_hat_clip = np.maximum(D3_hat, 0)

y25_hat = D0_hat_clip
y50_hat = y25_hat + D1_hat_clip
y75_hat = y50_hat + D2_hat_clip
y100_hat = y75_hat + D3_hat_clip

df_curve_hat = pd.DataFrame({
    "Receptura": recs0,
    "y25_hat": y25_hat,
    "y50_hat": y50_hat,
    "y75_hat": y75_hat,
    "y100_hat": y100_hat,
})

df_curve_hat.sort_values("Receptura").reset_index(drop=True)

if PRINT_MODEL_OUTPUT:
    print("\n===== PRŮBĚH (LOO) – KUMULATIVNĚ =====")
    print(df_curve_hat.to_string(index=False))

    print("\n===== SOUHRN VZORCŮ (PŘÍRŮSTKY) =====")
    for tgt in targets_list:
        print(f"\n{tgt} (vstupy: {results[tgt]['x_cols']}):")
        print(results[tgt]["formula"])

# =====
# 8) TABULKA: % ODCHYLKA (kumulativně 25/50/75/100)
# =====
df_true = df_model[["Receptura", COL_25, COL_50, COL_75, COL_100]].copy()
df_true = df_true.rename(columns={
    COL_25: "y25_true",
    COL_50: "y50_true",
    COL_75: "y75_true",
    COL_100: "y100_true",
})

df_true.sort_values("Receptura").reset_index(drop=True)

df_cmp = df_true.merge(df_curve_hat, on="Receptura", how="left")
assert df_cmp[["y25_hat", "y50_hat", "y75_hat", "y100_hat"]].isna().sum().sum() == 0, "Chybí predikce po merge."

df_cmp["pct_25"] = pct_diff(df_cmp["y25_hat"], df_cmp["y25_true"])
df_cmp["pct_50"] = pct_diff(df_cmp["y50_hat"], df_cmp["y50_true"])
df_cmp["pct_75"] = pct_diff(df_cmp["y75_hat"], df_cmp["y75_true"])
df_cmp["pct_100"] = pct_diff(df_cmp["y100_hat"], df_cmp["y100_true"])

df_pct = df_cmp[[
    "Receptura",
    "y25_true", "y25_hat", "pct_25",
    "y50_true", "y50_hat", "pct_50",
    "y75_true", "y75_hat", "pct_75",
    "y100_true", "y100_hat", "pct_100"
]].copy()

for c in
["y25_true", "y25_hat", "y50_true", "y50_hat", "y75_true", "y75_hat", "y100_true", "y100_hat"]:
    df_pct[c] = df_pct[c].astype(float).round(2)
for c in ["pct_25", "pct_50", "pct_75", "pct_100"]:
    df_pct[c] = df_pct[c].astype(float).round(1)

if PRINT_MODEL_OUTPUT:
    print("\n===== % ODCHYLKA: KUMULATIVNĚ (pred vs true) =====")
    print(df_pct.to_string(index=False))

# =====
# 9) KUMULATIVNÍ MAE% a RMSE% (25/50/75/100)
# =====
cum_metrics = []
for lbl in ["25", "50", "75", "100"]:
    mae_pct, rmse_pct, valid_n =

```

```

cumulative_pct_metrics(df_cmp[f"y{lbl}_true"], df_cmp[f"y{lbl}_hat"])
    cum_metrics.append({
        "Fáze": lbl,
        "MAE_cum_%": round(mae_pct, 1) if np.isfinite(mae_pct) else
np.nan,
        "RMSE_cum_%": round(rmse_pct, 1) if np.isfinite(rmse_pct) else
np.nan,
        "valid_n": valid_n
    })

df_cum_metrics = pd.DataFrame(cum_metrics)

if PRINT_MODEL_OUTPUT:
    print("\n===== KUMULATIVNÍ METRIKY (%)
=====")
    print(df_cum_metrics.to_string(index=False))

# =====
# 10) přehled metrik pro PŘÍRŮSTKY (včetně %)
# =====
df_inc_metrics = pd.DataFrame([[
    "Target": k,
    "MAE [g·m-2]": round(v["MAE"], 2),
    "RMSE [g·m-2]": round(v["RMSE"], 2),
    "MAE [%]": round(v["MAE_pct"], 1) if np.isfinite(v["MAE_pct"]) else
np.nan,
    "RMSE [%]": round(v["RMSE_pct"], 1) if np.isfinite(v["RMSE_pct"])
else np.nan,
    "valid_n": int(v["valid_n"])
] for k, v in
results.items()).sort_values("Target").reset_index(drop=True)

if PRINT_MODEL_OUTPUT:
    print("\n===== PŘEHLED METRIK (včetně %) - PŘÍRŮSTKY
=====")
    print(df_inc_metrics.to_string(index=False))

# =====
# 11) tabulka porovnání predikce/skutečnost (D0-D3) - přírůstky
# =====
df_cmp_inc = None
for tgt in targets_list:
    dfp = results[tgt]["df_pred"].copy()
    dfp = dfp.rename(columns={
        "y_skutečnost": f"{tgt}_true",
        "y_pred_L00": f"{tgt}_pred",
        "chyba": f"{tgt}_err",
    })
    keep = ["Receptura", f"{tgt}_true", f"{tgt}_pred", f"{tgt}_err"]
    dfp = dfp[keep].sort_values("Receptura").reset_index(drop=True)
    df_cmp_inc = dfp if df_cmp_inc is None else df_cmp_inc.merge(dfp,
on="Receptura", how="inner")

for c in df_cmp_inc.columns:
    if c != "Receptura":
        df_cmp_inc[c] = df_cmp_inc[c].astype(float).round(3)

if PRINT_MODEL_OUTPUT:
    print("\n===== POROVNÁNÍ PREDIKCE / SKUTEČNOST (D0-D3)
=====")
    print(df_cmp_inc.to_string(index=False))

# =====
# 12) potvrzení vyřazení 2A (výstupní kontrola)
# =====
if PRINT_MODEL_OUTPUT:
    print("\n===== POTVRZENÍ VYŘAZENÍ 2A
=====")
    print("2A přítomna před filtrací:", "ANO" if had_2a_before else "NE")
    print("2A přítomna po filtrací: ", "ANO" if had_2a_after else "NE")
    print("Počet řádků před filtrací:", n_before_filter)
    print("Počet řádků po filtrací: ", n_after_filter)

```