



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Meno a priezvisko:

Ing. Jakub Gašpárek

Autoreferát dizertačnej práce:

**Spresňovanie súčasných difúzných modelov pre
chloridy a vývoj nových ochranných mált na základe
in-situ diagnostík betónových mostov**

na získanie akademického titulu: philosophiae doctor „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore: stavebníctvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum:

Bratislava, 16.7.2023



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre betónových konštrukcií a mostov, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Jakub Gašpárek

Katedra betónových konštrukcií a mostov

Stavebná fakulta, STU v Bratislave

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ:

doc. Ing. Peter Paulík, PhD.

Katedra betónových konštrukcií a mostov

Stavebná fakulta, STU v Bratislave

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:2023

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa2023 o h na Katedre
Betónových konštrukcií a mostov (SvF, STU v BA), Radlinského 11, 810 05
Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan fakulty

Abstrakt

Dizertačná práca sa zaoberá problematikou degradácie existujúcich mostov s možnosťou využitia získaných poznatkov na spresňovanie súčasných difúzných modelov pre chloridy a vývoj nových materiálov na báze silikátov. Z existujúcich objektov bolo odobraté veľké množstvo vzoriek, ktoré sa následne podrobili laboratórnym analýzám v Technickom a skúšobnom ústave stavebnom (TSÚS) a v laboratóriu Stavebnej fakulty STU v Bratislave (STU SVF). Na základe zistených skutočností boli výsledky ďalej analyzované v experimentálnej a teoretickej časti práce. Experimentálna časť práce sa zaoberá analýzou ochrannnej krycej omietky, ktorá bola objavená na existujúcich mostoch s možnosťou vývoja materiálového ekvivalentu s rovnakou protikarbonatizačnou funkciou pri použití dnes používaných cementov. Teoretická časť práce nadväzuje na údaje získané z diagnostík mostov a zaoberá sa vývojom časticového modelu na podklade Einstein – Brownovej teórie pohybu častíc so zohľadnením matematického problému pohyblivých hraníc.

Obsah

1	Úvod	4
2	Súčasný stav problematiky	4
3	Praktická časť práce - diagnostiky mostov ako základ pre výskum a vývoj	5
4	Experimentálna časť práce – výskum a vývoj ochrannej krycej omietky	8
5	Teoretická časť práce – spresnenie súčasných výpočtových modelov pre difúziu chloridov	11
5.1	Úskalia časticovej simulácie	13
5.2	Vplyv karbonatizácie na difúziu chloridov – problém pohyblivých hraníc	13
5.3	Porovnanie simulácie so zjednodušeným modelom	15
6	Záver.....	17
6.1	Zhrnutie.....	17
6.2	Záver z diagnostík existujúcich mostov	17
6.3	Záver z výskumu a vývoja ochranných krycích omietok	17
6.4	Záver z spresneniu súčasných difúzných modelov	18
7	Použitá literatúra.....	19
8	Zoznam vybraných publikovaných prác autora	20

1 Úvod

Podľa dostupných informácií na základe údajov Slovenskej správy ciest je na Slovensku ku dňu 1.1.2022 postavených 8266 mostov (železničné mosty, lávky pre peších ani mosty na cestách IV triedy v správe samospráv štatistika neuvažuje preto skutočný počet mostov je ešte oveľa väčší). Z toho viac ako 7000 je mostov postavených z betónu alebo železobetónu. Veľké množstvo mostov postavených na Slovensku sa blíži ku prevádzkovému veku 40-60 rokov, z toho približne polovica všetkých mostov na Slovensku dosiahla vek 50 rokov [1]. Vývoj stavebnotechnického stavu mostov v správe SSC je podľa štatistických údajov [1] nepriaznivý s tendenciou postupného zhoršovania a nárastu počtu mostov v štyroch najhorších kategóriách IV až VII. Mosty sú jedným z kritických súčastí infraštruktúry a zabezpečujú dôležité dopravné spojenia vplývajúce na ekonomiku, obyvateľstvo prípadne vojenskú obranu štátu. K súčasnému stavu mostov prispel aj fakt, že v minulosti neboli dostatočne známe niektoré environmentálne fenomény ako pôsobenie karbonatizácie alebo difúzia chloridov do betónu ako aj ich kombinované pôsobenie. Zanedbávanie prehliadok mostov, ktoré majú odhaliť chyby vznikajúce počas užívania mosta vedie na neefektívnu údržbu a opravy. Existujúce mosty sú zdrojom podstatných informácií z dôvodu kombinovaného pôsobenia environmentálneho zaťaženia, ktoré ani v laboratórnych podmienkach nie je možné verne napodobniť. Odpovede ako zvrátiť nepriaznivý trend vývoja stavebnotechnického stavu mostov sa nachádzajú v existujúcich konštrukciách.

2 Súčasný stav problematiky

Vzhľadom na rastúci počet problémov s trvanlivosťou železobetónových konštrukcií sa v posledných desaťročiach venuje značná pozornosť účinkom karbonatizácie a chloridov na zmeny v hydratovaných cementových systémoch. Výskumníci v tejto oblasti dosiahli značný pokrok a odhalili mnohé javy, ktoré sa vyskytujú kombinovaným pôsobením týchto látok v betóne [2]–[7]. Podľa najnovších poznatkov karbonatizácia betónu ovplyvňuje pórovú štruktúru cementovej matrice [8] takým spôsobom, že znižuje schopnosť betónu viazať voľné chloridy [9]–[11], čím sa znižuje schopnosť betónu spomaľovať rýchlosť difúzie viazaním chloridov do kryštalickej formy Friedelových solí [12]. Okrem toho karbonatizácia betónu v niektorých prípadoch zvyšuje rýchlosť difúzie chloridových aniónov v skarbonatizovanej vrstve betónu [2], [13], čo môže viesť ku komplikáciám pri predikcii difúznej hĺbky chloridov z dôvodu neštandardného tvaru krivky chloridového profilu. Okrem toho kombinovaný prienik Cl^- a CO_2 závisí od poradia ich výskytu. Ak je betón najprv kontaminovaný chloridmi a potom nasleduje jeho karbonatizácia, dochádza k redistribúcii chloridových aniónov v závislosti od stupňa karbonatizácie betónu. Ak je skarbonatizovaná vrstva betónu vystavená difúzií chloridových aniónov, dochádza k zvýšenému prenikaniu chloridov do betónu cez túto vrstvu [4].

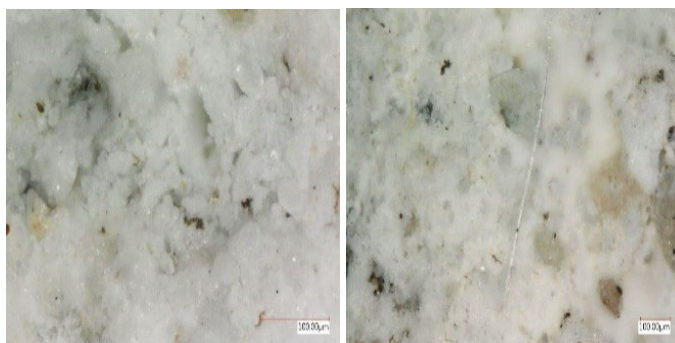
Ďalšou oblasťou výskumu je popísanie transportného mechanizmu difúzie chloridov v hydratovaných cementových systémov. V súčasnej dobe sa v modeloch uvažuje oddelené pôsobenie karbonatizácie, ktorá sa uvažuje bez vplyvu na difúziu chloridov. Najčastejšie používaným transportným mechanizmom difúzie chloridov v súčasnosti je analytické riešenie nelineárnej diferenciálnej rovnice pre difúziu popísanú v roku 1855 Albertom Fickom [14], [15]. Ešte predtým, v roku 1827, pozoroval Robert Brown náhodný pohyb peľových zŕn v kvapke vody pri pokuse s mikroskopom [16]. Neskôr v roku 1956 Albert Einstein interpretoval tento pohyb ako náhodnú fluktuáciu polohy častice v podobe kvapaliny s následným presunom do inej podobe, tzv. Einstein – Brown-ov pohyb [17]. Vzhľadom na jednoduchosť analytického riešenia Fick-ovej nelineárnej diferenciálnej rovnice pre difúziu a vzhľadom na absenciu rýchlych počítačov v minulosti sa na opis difúzie chloridov do hydratovaných cementových kompozitov zaužíval Fick-ov druhý difúzny zákon [18]–[21]. Mnohí autori sa v dnešnej dobe opierajú o komplexné riešenie Fick-ovho difúzneho modelu. Pravdepodobne ako prví kto sa pokúsil kvantifikovať kinetiku prenikania chloridov do vzoriek betónu pomocou druhého Fick-ovho zákona bol Collepardi a kol. [18,21]. Napriek širokému používaniu Fick-ovho druhého difúzneho zákona na modelovanie prieniku chloridov do hydratovaných cementových kompozitov, existujú aj autori, ktorí tento postup kritizujú. Marchand a Samson [21] poukázali na nevhodnosť použitia zjednodušeného modelu a jeho nesprávnu aplikáciu niektorými autormi [22]. V dôsledku vlhkostných cyklov sa často pozoruje, že profil prieniku chloridov získaný z existujúcich konštrukcií vykazuje značné odchýlky od typickej krivky druhého Fick-ovho zákona [20,21]. V reálnych konštrukciách dochádza k prenikaniu chloridov do betónu kombinovanou difúziou, kapilárnym nasávaním, hydrostatickým tlakom a prenikaním cez trhliny a škáry [22]. Ak vezmeme do úvahy aj chemické zmeny betónu, pravdepodobne z tohto dôvodu sa na existujúcich konštrukciách pozoruje, že maximálna koncentrácia chloridov sa nedosahuje na úrovni povrchu, ale skôr v určitej hĺbke od povrchu [20]. Zároveň je podľa Marchanda a Samsona [21,23] potrebné betón považovať za multi-iónový kompozit s vnútorným elektrickým potenciálom, ktorý vzniká z dôvodu zachovania elektro neutrality.

3 Praktická časť práce - diagnostiky mostov ako základ pre výskum a vývoj

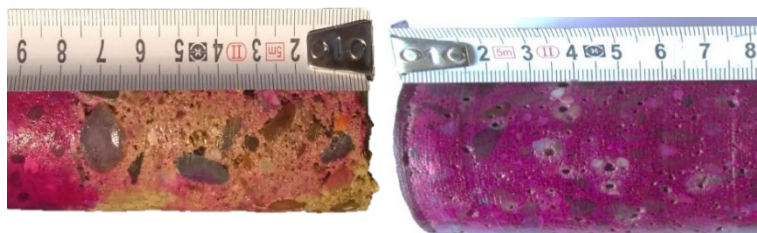
V rámci praktickej časti práce boli vykonané diagnostiky viac ako 30-tich mostov, priepustov alebo lávok pre peších. V rámci diagnostických prác boli realizované odbery vzoriek, nedeštruktívne skúšky betónov a viaceré in-situ merania ako napríklad meranie hĺbky karbonatizácie 1,0 % roztokom fenolftaleínu. Odobraté vzorky boli následne analyzované v laboratóriách Technického a skúšobného ústavu stavebného v Bratislave a laboratóriách Stavebnej fakulty STU v Bratislave. Vykonali sa rôzne typy laboratórnych skúšok na stanovenie obsahu chloridov v betóne, deštruktívne získavanie pevnosti betónu, difrakčné RTG alebo termické TG-

DTA analýzy. Výsledky z laboratórnych analýz boli ďalej použité v experimentálnej a teoretickej časti práce.

Na základe údajov z diagnostík mostov boli zistené rôzne skutočnosti. Najvýznamnejšou skutočnosťou bolo objavenie ochrannej krycej omietky (OKO) pri diagnostike viac ako 100 rokov starého železničného mosta v blízkosti Rimavskej Soboty. Tento materiál bol objavený aj v minulosti pri spolupráci TSÚS a STU Bratislava na mostoch v Sládkovičove a Krásne nad Kysucou [22]. OKO, ktorým boli ošetrované opory mosta v Rimavskej Sobote v dôsledku fenoménu tvorby hutnej štruktúry až amorfného charakteru nazvaného „karbonatizačný mlieč“ na povrchu omietky (Obr. 3.1) [I-II], dokázalo znížiť hĺbku karbonatizácie betónu nízkej pevnostnej triedy C 10/12 na minimum (hĺbka karbonatizácie do 5 mm) v porovnaní s miestami kde došlo ku odpadnutiu omietky v neznámom čase (Obr. 3.2). Odobratý materiál bol neskôr analyzovaný v laboratóriu a slúžil ako podklad pre vývoj materiálového ekvivalentu z dnes dostupných cementov v experimentálnej časti práce.

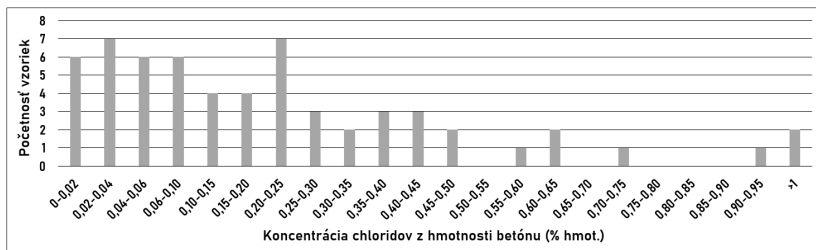


Obr. 3.1: Hutná bariéra na povrchu omietky vytvorená z produktov karbonatizácie.

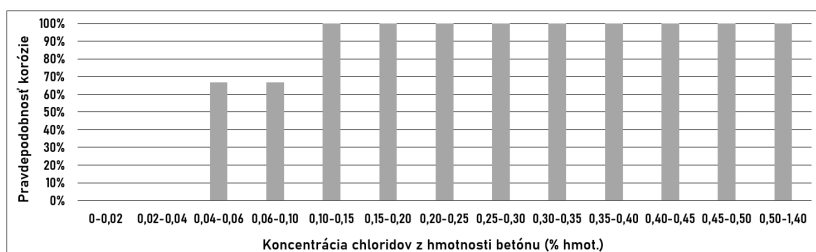


Obr. 3.2: Karbonatizácia betónu na miestach bez omietky (vľavo) a na miestach krytých ochrannou krycou omietkou (vpravo).

V rámci diagnostík mostov bolo odobratých viac ako 60 vzoriek chloridmi kontaminovaných betónov. Na základe výsledkov laboratórnej analýzy obsahu chloridov a vizuálneho potvrdenia korózie ocelevej výstuže boli získané pravdepodobnosti korózie ocelevej výstuže pri danom koncentračnom rozsahu chloridových aniónov v betóne podľa Obr. 3.3 a Obr. 3.4.



Obr. 3.3: Početnosť odobratých vzoriek v danom koncentračnom rozsahu.



Obr. 3.4: Pravdepodobnosť korózie výstuže v betóne.

Limitné hodnoty sú v súčasnej dobe stanovené len ako koncentrácie z hmotnosti cementu, ktoré nemôžu byť prekročené podľa STN EN 206+A2: 2021 [23] alebo ako koncentrácie z hmotnosti betónu, ktoré nemôžu byť prekročené podľa metodické príručky SSC TP 003 [24] bez uvedenia rizika vzniku korózie ocelevej výstuže podľa tabuľky Tab. 3.1.

Ako možno pozorovať z Obr. 3.4 pre koncentrácie chloridových aniónov do 0,04 % z hmotnosti betónu nebola pozorovaná korózia ocelevej výstuže. Pre koncentrácie chloridových aniónov od 0,04 do 0,10 % z hmotnosti betónu bola pozorovaná 66 % pravdepodobnosť korózie ocelevej výstuže v betóne. Pri konfrontácii hodnôt z Obr. 3.4 s tabuľkou Tab. 3.1 možno pozorovať, že limitné hodnoty udávané pre železobetón sa podľa oboch predpisov nachádzajú v koncentračnom rozsahu kde existuje 66 % pravdepodobnosti korózie ocelevej výstuže.

Tab. 3.1: Limitné hodnoty obsahu chloridov v betóne.

Predpis	Hodnoty Cl ⁻ platné pre	Limitná hodnota Cl ⁻ [% z hmot. betónu]	Limitná hodnota Cl ⁻ [% z hmot. cementu]
STN EN 206+A2:2021 [23]	železobetón	0,067*	0,4
	predpätý betón (podľa typu predpätia)	0,033*	0,2
		0,017*	0,1
TP 003 [24]	železobetón	0,080	0,48*
	predpätý betón	0,040	0,24*

*pri uvážení obj. hmotnosti betónu 2400 kg/m³ a 400 kg/m³ použitého cementu pre účely porovnania

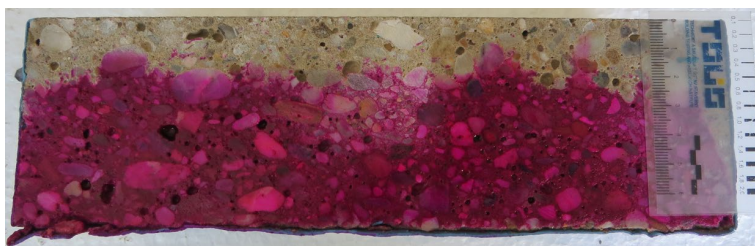
V prípade karbonatizácie betónu v minulosti používaných prefabrikovaných nosníkov pre mostné staviteľstvo typu Vlošák, KA, I-67 a I-73 bolo zistené, že hĺbky karbonatizácie prefabrikátov v časovom rozsahu súčasnej životnosti mostov dosahujú zanedbateľných hĺbok okolo 5 mm, lokálne do 10 mm. Tento jav bol pripísaný vysokej pevnostnej triede použitého betónu prefabrikátov. Avšak z dôvodu subtilných prefabrikátov, ktorých účelom bolo minimalizovať vlastnú tiaž hornej stavby mosta, sú krytia výstuže relatívne nízke. Relatívne nízke krycie vrstvy výstuže sú pri zatekaní konštrukcie nedostatočné z hľadiska prieniku chloridových aniónov a kritické koncentrácie chloridov sa dosiahnu skôr ako je plánovaná životnosť mostov na Slovensku (100 rokov). Tento problém je príčinou súčasného negatívneho vývoja stavebnotechnického stavu mostov aj v dôsledku zanedbania prehliadok mostov, ktoré majú vizuálne objaviť zatekanie, ktoré údržba musí bezodkladne odstrániť. Súčasne nastavená metodika, kde pevnostná trieda betónu je dominantným nositeľom životnosti konštrukcie, nemusí byť v prípade zvýšeného obsahu chloridov dostatočná.

4 Experimentálna časť práce – výskum a vývoj ochrannej krycej omietky

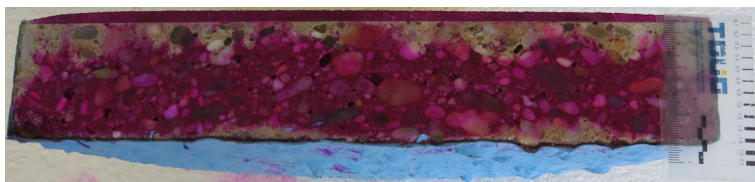
Cieľom výskumu bolo vyvinúť zmes z dnes dostupných cementov a kremičitého piesku v takom pomere zložiek, ktorá vo výsledku zabezpečí primárne ochrannú funkciu podkladného betónu proti difúzií CO₂. Popri primárnej funkcii sa sledovali aj iné vlastnosti rôznych zmesí a to priľnavosť k podkladnému betónu, eliminácia tvorby skorých trhlin vznikajúcich vplyvom hydratácie cementu v laboratórnom prostredí a odolnosť voči difúzií chloridov. Na základe skúseností TSÚS a po odporúčaníach výrobcov omietok boli zvolené celkovo 3 systémy – omietka čisto cementová označená ako „čistá“; omietka cementová s prísadou celulózy (za účelom retencie vody) s označením „cel“ a omietka cementová s polymérnou disperziou VINNAPAS (pre zlepšenie priľnavosti) s označením „vin“. Množstvo prísady bolo zvolené ako maximálne 1% z hmotnosti použitého cementu.

Zvolené prísady mali čiastočne zmierňovať problémy vznikajúce pri používaní jemne mletých portlandských cementov.

Prvú časť vývoja OKO charakterizovalo nastavenie konzistencie zmesi z praktického dôvodu aplikovateľnosti na existujúce konštrukcie. Skúška rozliatím prebiehala na Hegermanovom stole tesne po zamiešaní a 30 minút od zamiešania. Skúška obmedzila počet zmesí, ktoré boli následne nanesené na skúšobnú panelovú stenu. Skúšky priepustnosti (Torrent permeability test) a odtrhové skúšky (príľnavosť ku podkladu) opätovne vymedzili vhodnosť jednotlivých zmesí nanesených na panelovej stene. Na základe dosiahnutých výsledkov bol zúžený okruh zmesí na tri a to EXP 10-39 (čistá), EXP 10-39 (vin), EXP 10-39 (cel), ktoré boli neskôr nanesené na valcové skúšobné vzorky a podrobené skúškam UKS (urýchlená skúška v klimatickej komore) a CHRL (urýchlená skúška v 3 % roztoku soli). Urýchlená skúška UKS prebiehala po dobu 28 dní v klimatickej komore MEMMERT ICH 260 C pri 20 °C, 60 % relatívnej vlhkosti a 20 % obj. CO₂ v atmosfére komory. Dosiahnuté výsledky hĺbok karbonatizácie po 28 dňovej UKS zobrazuje Obr. 4.1 až Obr. 4.4 [III].



Obr. 4.1: Hĺbka karbonatizácie referenčného, nekrytého betónu [III].



Obr. 4.2: Hĺbka karbonatizácie betónu krytého omietkou EXP 10-39 (cel) [III].



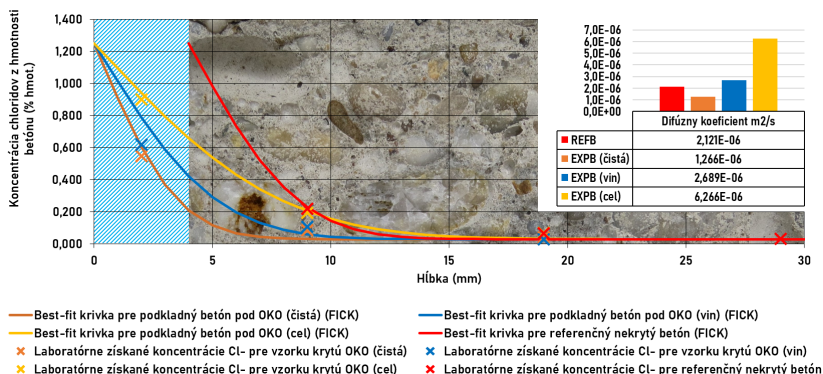
Obr. 4.3: Hĺbka karbonatizácie betónu krytého omietkou EXP 10-39 (čistá) [III].



Obr. 4.4: Hĺbka karbonatizácie betónu krytého omietkou EXP 10-39 (vin) [III].

Najlepšie výsledky s ohľadom na protikarbonatizačnú funkciu experimentálnych zmesí dosahuje omietka EXP 10-39 (vin) s prísadou VINNAPAS (Obr. 4.4). Dosahuje najlepšiu adhéziu ku podkladnému betónu, ako aj nízke hodnoty plynopriepustnosti. Omietka EXP 10-39 (cel) s prísadou celulózy naopak dosahuje najhoršie výsledky z pomedzi troch experimentálne skúšaných zmesí (Obr. 4.2). Omietka EXP 10-39 (čistá) vykazuje druhú najlepšiu adhéziu k podkladnému betónu, avšak najhoršiu plynopriepustnosť, ktorá je výrazne ovplyvnená tvorbou malých mikrotŕhliniek na povrchu (Obr. 4.3). Tie vytvárajú lokálne defekty, cez ktoré môže CO_2 difundovať výrazne rýchlejšie.

Urýchlená skúška CHRL experimentálnych zmesí omietok prebiehala v 3,0 % roztoku NaCl po dobu 35 dní s pravidelnou výmenou roztoku v týždňovom intervale. Skúšobné vzorky neboli pred skúškou CHRL vystavené karbonatizácií. Po CHRL sa z povrchu vzoriek odobrala omietka a valce boli narezané kotúčovou pilou na menšie vzorky s hrúbkou 1,0 cm, ktoré sa vysušili pri teplote $105 \pm 5^\circ\text{C}$, následne boli pomleté na prášok s veľkosťou zrna 0,125 mm a analyzované v TSÚS podľa STN EN 14629 [25] a STN EN 196-2 [26]. Dosiahnuté výsledky jednotlivých zmesí nanesených na betón ako aj nekrytého referenčného betónu dokumentuje graf na Obr. 4.5. Podľa grafu na Obr. 4.5 možno pozorovať, že experimentálne zmesi EXP 10-39 (čistá) a EXP 10-39 (vin) vykazujú určité retardačné vlastnosti pri prieniku chloridových aniónov z roztoku do betónu. Naproti tomu experimentálna zmes s prísadou celulózy EXP 10-39 (cel) vykazuje zanedbateľnú ochrannú funkciu voči prieniku chloridov, čo je pravdepodobne spôsobené prísadou celulózy, ktorá pravdepodobne absorbuje slaný roztok do štruktúry omietky.

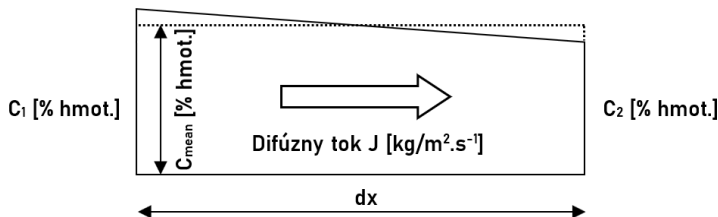


Obr. 4.5: Porovnanie výsledkov urýchlených skúšok omietok a referenčného nekrytého betónu v 3 % roztoku NaCl

5 Teoretická časť práce – spresnenie súčasných výpočtových modelov pre difúziu chloridov

Koncentračné profily chloridov, získané z existujúcich konštrukcií mostov, boli použité pri vývoji inovatívnej simulačnej metódy aproximácie difúzie chloridov aj so zohľadnením karbonatizácie betónu. Ako teoretický podklad simulácie bola použitá Einstein – Brown-ová teória pohybu častíc [17].

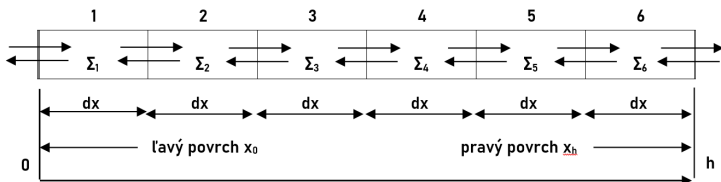
Betón konštrukčného prvku bol rozdelený na konečné množstvo malých elementov. V týchto malých elementoch šírky dx podľa Obr. 5.1 sa na jeho hraniciach nachádza koncentrácia C_1 a C_2 . Z dôvodu, že koncentrácie nie sú rovnaké, existuje medzi nimi difúzny tok J na základe existujúceho koncentračného gradientu. Koncentrácia vo vnútri elementu C_{mean} bude priemerom koncentrácií C_1 a C_2 a šípka znázorňuje smer difúzneho toku. Priemerná koncentrácia C_{mean} bude ďalej uvažovaná ako reálny počet častíc Cl^- podľa vzťahu (1).



Obr. 5.1: Difúzia chloridov cez element šírky dx [IV], [V].

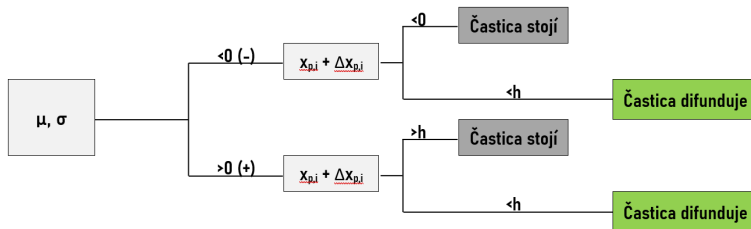
$$\Sigma_{P,i}(x_i, t_{SL}) = \frac{C_i(x_i, t_{SL})/100}{M_{Cl}} \times N_a \times \gamma_{con,exp} \times dx - \Sigma_{0P,i} \left[\frac{\text{častice}}{m^2} \right] \quad (1)$$

Podľa Obr. 5.2 jednotlivé elementy zoradíme za sebou. Ak uvažujeme že Obr. 5.2 predstavuje uzavretý systém, ktorý môže byť kontaminovaný chloridmi z pravej alebo ľavej strany je potrebné difúzny tok uvažovať oboma smermi. Je to z toho dôvodu, že difúzia je všeobecne považovaná za náhodný pohyb častíc v smere koncentračného gradientu podľa Einstein – Brownovej teórie pohybu častíc [17]. Ďalej zohľadnime náhodnosť pohybu častíc matematickou pravdepodobnosťou podľa Bellovej krivky náhodného rozdelenia pravdepodobnosti. Ak bude existovať pravdepodobnosť, že 50 % častíc v každom elemente po hrúbke vyšetrovanej vzorky skočí doprava, respektíve doľava, je hnacia sila simulovanej difúzie v počte častíc Σ_i , ktoré sa nachádzajú v elementoch s hrúbkou dx . Práve počet častíc Σ_i a ich 50 %-ná pravdepodobnosť skoku doľava alebo doprava v konkrétnom elemente i má za následok, že v skúmanom profile existuje obojsmerný difúzny gradient a s ním aj tok častíc po hĺbke vyšetrovanej vzorky jedným aj druhým smerom. Difúzny tok J je prostredníctvom takejto počítačovej simulácie v každom časovom kroku merateľný. Takýmto spôsobom potom môžeme simulovať difúziu častíc z jedného elementu do druhého a v určitom čase tak dôjde ku rovnomernému rozdeleniu častíc vo všetkých elementoch $\Sigma_1 \approx \Sigma_2 \approx \Sigma_3 \approx \Sigma_4 \approx \Sigma_5 \approx \Sigma_6$ podľa Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Obojsmerná schéma difúzie [IV], [V].

Keďže častice nemôžu na povrchových elementoch Σ_1 a Σ_6 „vyskočiť“ do prázdneho priestoru je potrebné povrchové elementy ošetriť základnou matematickou podmienkou. Ak nastane takáto situácia častica môže zostať len v povrchovom elemente alebo difundovať smerom do vnútra do nasledujúceho elementu šírky dx podľa Obr. 5.3. Podľa toho aká kontaminácia povrchu nastáva (priemerná ročná jednorazová, konštantná kontinuálna v každom časovom kroku dt , žiadna – vyšetruje sa pohyb len reziduálnych častíc) je povrchový element ošetrený ďalšou podmienkou.



Obr. 5.3: Všeobecný kontrolný blok pre povrchové vrstvy [IV], [V].

Ak uvážime že vzorka je umiestnená do jednodimenzionálneho súradnicového systému X, kde X reprezentuje hĺbku, je skok častice smerom doprava definovaný znamienkom „+“ a v smere doľava „-“. Aby platil teoretický predpoklad 50% pravdepodobnosti skoku častíc doprava a zároveň doľava, stredná hodnota μ musí byť rovná 0 a smerodajná odchýlka σ bude neznáma difúzna pravdepodobnosť. Tá bude nahrádzať všetky neznáme fyzikálne a chemické vlastnosti materiálu vzdorujúceho difúzií chloridov, ktoré by bolo potrebné získať rozsiahlou laboratórnou analýzou.

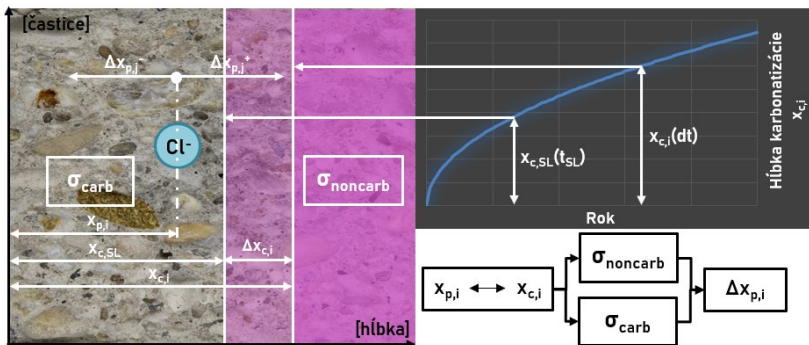
5.1 Úskalia časticovej simulácie

Ak chceme vyššie popísaným spôsobom simulovať pohyb častíc, po výpočte polohy častíc v danom časovom kroku dt zistíme, že gradient koncentrácie nie je hladký, a to aj napriek jemnej diskretizácii prvku po hĺbke a v čase. Dôvodom tohto javu je efekt štatistického hluku. V dôsledku náhodného pohybu častíc vznikajú také prípady, keď skok častíc nie je vždy rovnomerne rozdelený 50 % dielom do príslušného praveho a ľaveho elementu čo porušuje vyššie popísanú teóriu. Počet simulácií s ich následným spriemerovaním môže tento jav eliminovať. Aby sa eliminoval efekt štatistického hluku musí byť simulácia prepočítaná dostatočný počet krát. Na tento účel možno použiť metódu Monte Carlo [27], [28]. Počet simulácií výrazne ovplyvňuje presnosť daného riešenia a pri použití metódy Monte Carlo všeobecne platí, že čím vyšší je počet simulácií, tým sú výsledky presnejšie. Treba ale poznamenať, že s rastúcim počtom simulácií sa zvyšuje aj časová a hardvérová náročnosť výpočtu.

5.2 Vplyv karbonatizácie na difúziu chloridov – problém pohyblivých hraníc

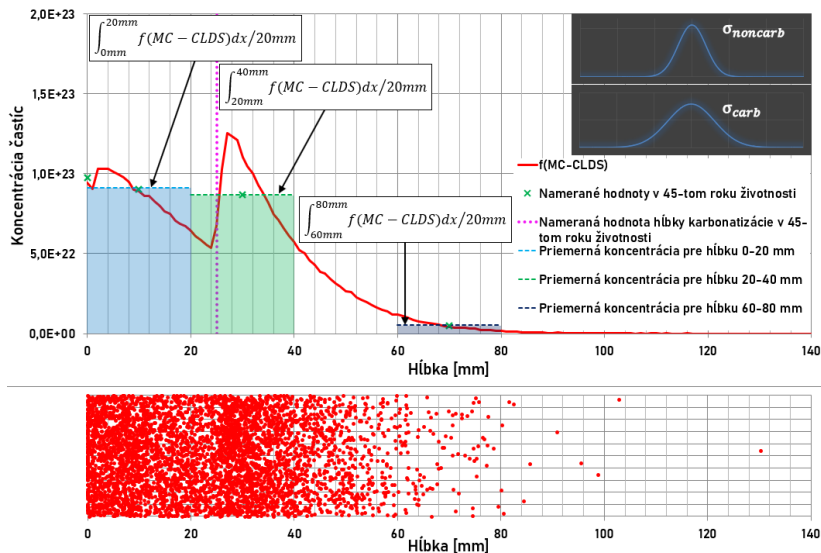
Na základe diagnostiky konštrukčného prvku mosta, použitím metodiky *fib* Model Code for Service Life Design [29], je v danom veku mosta získaná priemerná ročná rýchlosť prírastku karbonatizácie $x_{c,i}$ (mm/a^{0,5}). Hĺbka karbonatizácie konštrukčného prvku v danom veku je potom definovaná krivkou. Takýto spôsobom je možné každému časovému kroku dt priradiť predpokladanú hĺbku karbonatizácie, respektíve definovať pohyblivú hranicu, ktorá delí konštrukčný prvok mosta na dve vrstvy. V každej vrstve existujú rozdielne difúzne pravdepodobnosti

pohybu častíc σ_{carb} a $\sigma_{noncarb}$. Podľa Obr. 5.4 simulácia priradzuje časticiam difúzne pravdepodobnosti pre skarbonatizovaný (σ_{carb}) alebo nesarbonatizovaný betón ($\sigma_{noncarb}$) na základe ich polohy, v každom časovom kroku dt . Častice skáču náhodným spôsobom do novej polohy o hodnotu $\Delta x_{p,j}$. V prípade ak karbonatizácia neovplyvňuje difúziu chloridov tieto dve vrstvy budú mať podobnú difúznu pravdepodobnosť pre pohyb častíc ($\sigma_{carb} \approx \sigma_{noncarb}$).



Obr. 5.4: Diagram riešenia pohyblivých hraníc – súčasné zohľadnenie difúzie chloridov a karbonatizácie betónu [IV], [V]. Vysvetlivky: $x_{c,SL}$ – hĺbka karbonatizácie betónu získaná v danom veku konštrukčného prvku mosta t_{SL} , $x_{c,i}$ – je hĺbka karbonatizácie v určitom veku $t = t_{SL} + dt$, $\Delta x_{c,i}$ – je prírastok hĺbky karbonatizácie v definovanom časovom kroku dt , $x_{p,i}$ – súčasná poloha častice, $\Delta x_{p,j}$ – budúci skok častice z originálnej pozície.

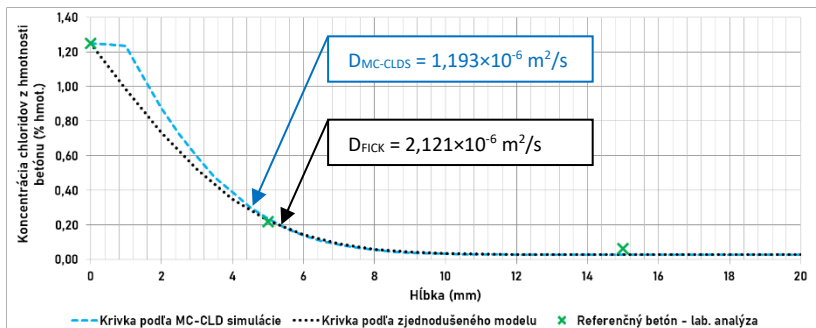
Simulácia sa iteračným spôsobom snaží dosiahnuť splnenie konvergenčného kritéria v danom veku mosta t_{SL} na základe skutočne získaných laboratórnych koncentrácií v jednotlivých hĺbkach zmenou difúzných pravdepodobností σ_{carb} a $\sigma_{noncarb}$ podľa OBR. Výpočet končí ak je toto kritérium splnené v dostatočnej presnosti. Na základe Obr. 5.4 musí byť časový krok výpočtu dt dostatočne malý rovnako tak aj skok častíc, aby bol v dostatočnej miere zohľadnený vplyv karbonatizácie na difúziu častíc. Do doby než je splnené konvergenčné kritérium dochádza ku zmene difúzných pravdepodobností častíc.



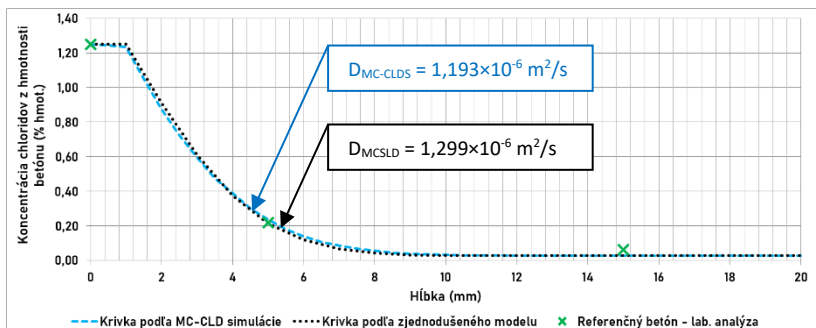
Obr. 11.5: MC-CLD simulácia najlepšie vystihujúca 45 ročnú kontamináciu betónu chloridmi aj zo zobrazením konvergenčného kritéria – valcová vzorka P1 mosta ev. č. M-044 nad cestou II/502, ulica Rybníčná, Bratislava ($dx = 1$ mm; $dt = 10,4$ dní; $\mu = 0$; $\sigma_{noncarb} = 0,750$; $\sigma_{carb} = 1,260$; $D_{carb} = 5,61 \times 10^{-7}$ m²/s, $D_{noncarb} = 1,99 \times 10^{-7}$ m²/s).

5.3 Porovnanie simulácie so zjednodušeným modelom

Porovnanie presnosti výpočtu difúzneho koeficienta novo vyvinutou simulačnou metódou bolo realizované aj na laboratórnom experimente. Porovnanie so zjednodušeným modelom sa realizovalo na vzorke betónu, ktorý bol ponorený v 3 % roztoku NaCl pri urýchlenej skúške CHRL. V prípade MC-CLD simulácie dochádza v povrchovej vrstve ku vytvoreniu absorpčnej zóny čo zjednodušeným modelom nie je možné zohľadniť (Obr. 5.5). V takom prípade sú spočítané difúzne koeficienty značne odlišné, čomu napovedá aj sklon kriviek na Obr. 5.5. Na Obr. 5.6 je porovnanie simulácie s krivkou, ktorá bola upravená podľa metodiky *fib* Model Code for Service Life Design [19] a *fib* Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards [20]. Po zohľadnení absorpčnej zóny sú difúzne koeficient získané výpočtom v dobrej zhode v rovnakom čase.



Obr. 5.6: Porovnanie zjednodušeného modelu so simuláciou pri skúške referenčného betónu CHRL pre 35-ty deň.



Obr. 5.7: Porovnanie difúzneho modelu podľa [19] a [20] so simuláciou pri skúške referenčného betónu CHRL pre 35-ty deň.

6 Záver

6.1 Zhrnutie

V inžinierskej praxi bola životnosť mostov, a to najmä v minulom storočí, často zanedbávaným aspektom pri návrhu konštrukcie. Vplyv agresívneho prostredia na betón nebol dostatočne preskúmaný. Pri statickom návrhu konštrukcie v snahe minimalizovať vlastnú tiaž hornej stavby mostov, boli vyvinuté subtilné konštrukčné prvky, pre ktoré sa volilo nízke krytie nosnej výstuže v spojení s vysokou pevnostnou triedou betónu v mylnom domnení, že mimo statických dôvodov poskytne aj dostatočnú ochranu zabudovanej výstuži. V súčasnej dobe je vplyv agresívneho prostredia lepšie preskúmaný a pri návrhu konštrukcií sa začína klásať výrazne väčší dôraz na plánovanú dobu životnosti konštrukcie. Tá je posudzovaná na základe existujúcich noriem a predpisov, kde dominantným nositeľom budúcej životnosti konštrukcie stále zostáva pevnostná trieda betónu. Hlavným cieľom zrealizovaného výskumu bolo zozbierať a zosumarizovať údaje získané z existujúcich mostov, ktoré plnia svoj účel v reálnych podmienkach v cestnej infraštruktúre na Slovensku. Skutočné podmienky sa v závislosti od lokality mosta menia, čo nemusia súčasne používané normy a predpisy dostatočne zohľadniť. Preto poznanie reálnej degradácie konštrukcie v danom prostredí môže byť neoceniteľným prínosom pre projekčnú prax, ako aj pre správcov mostných objektov. Na základe zistených skutočností je možné vyselektovať existujúce konštrukcie, ktoré sú viac náchylné na zvýšenú mieru degradácie a tým prioritizovať opravy a údržbu mostov.

6.2 Závery z diagnostík existujúcich mostov

Na základe poznatkov z diagnostikovaných mostov možno konštatovať, že korózia betonárskej alebo predpínacej výstuže mostov na Slovensku nastáva dominantne v dôsledku zatekania a progresívneho zasoľovania nosnej konštrukcie mostov. Z dôvodu subtilných prefabrikátov je nosná výstuž často relatívne blízko pri povrchu a následným zatekaním chloridové anióny difundujú rýchlo ku jej povrchu a spôsobujú jej koróziu, ktorá sa následne prejavuje delamináciou krycej vrstvy. Na základe získaných koncentrácií chloridov v konfrontácií so stavom zabudovanej výstuže na diagnostikovaných mostoch bolo zistené, že korózia výstuže v betóne môže nastávať ešte pred dosiahnutím normou STN EN 206+A2 stanovenej hodnoty a ešte pred dosiahnutím odporúčaných hodnôt podľa metodického príručky Slovenskej správy ciest TP 003. Tento prípad je však veľmi ojedinelý.

6.3 Závery z výskumu a vývoja ochranných krycích omietok

Výskumom bolo zistené, že 2 – 4 mm hrubá vrstva ochrannej omietky vyrobená zo súčasných materiálov, môže byť rovnako účinnou protikarbonatizačnou bariérou ako 100 rokov starý ekvivalent, ktorý bol objavený počas diagnostík na mostoch v Sládkovičove, Krásne nad Kysucou a Rimavskej Sobotě. Príčina zníženia karbonatizácie podkladného betónu novo vyvinutou omietkou spočíva v hutnej mikroštruktúre vytvorenej v tenkej vrstve OKO, vyrobenej použitím dnes dostupných

portlandských cementov, ktoré sú schopné hydratovať vo veľmi úzkom profile s jemnou štruktúrou pórov tak, že ju zahustí, čím vytvorí nepriepustnú bariéru proti prenikaniu ďalšieho CO_2 do betónu pod ňou.

6.4 Závery k spresneniu súčasných difúzných modelov

Na základe existujúcej Einstein – Brown-ovej teórie bola použitá teoretická časticová simulácia, ktorá obchádza neznáme fyzikálne a chemické charakteristiky betónu a dokáže simulovať pohyb chloridov po hĺbke konštrukčného prvku. Neznáme difúzne vlastnosti betónu, metodika nahrádza difúznou pravdepodobnosťou a difuzivitou častíc, ktorá je definovaná pre skarbonatizovaný a nesarbonatizovaný betón. Simulačná metóda je na rozdiel od súčasne používaných zjednodušených modelov plne variabilná a dokáže zohľadniť fixnú koncentráciu chloridov na povrchu (laboratórne skúšky v roztoku, konštrukcie permanentne vystavené slanej vode), priemernú ročnú kontamináciu betónu chloridmi (konštrukcie sezónne vystavené chloridom) alebo vyšetrovať len ich reziduálny pohyb po hĺbke konštrukčného elementu (v prípade úplného zabránenia ďalšej kontaminácií povrchu chloridmi) aj so zohľadnením postupujúcej karbonatizácie betónu.

7 Použitá literatúra

- [1] Slovenská správa ciest, "Cestné objekty - Stav cestných komunikácií k 1.1.2022," Bratislava, 2022. [Online]. Available: https://www.cdb.sk/files/documents/cestna-databanka/vystupy-cdb/2022/kniha_mosty_sts_2022-01-01.pdf.
- [2] K. Li, Y. Zhang, S. Wang, and J. Zeng, "Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application," *Mater. Struct.*, vol. 51, no. 6, p. 164, Dec. 2018, doi: 10.1617/s11527-018-1295-8.
- [3] B.-H. Oh, S.-K. Lee, M.-K. Lee, and S.-H. Jung, "Influence of Carbonation for Chloride Diffusion in Concrete," *J. Korea Concr. Inst.*, vol. 17, no. 2, pp. 179–189, Apr. 2005, doi: 10.4334/JKCI.2005.17.2.179.
- [4] Y. Wang, S. Nanukuttan, Y. Bai, and P. A. M. Basheer, "Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 173–183, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.121.
- [5] P. Castro, E. I. Moreno, and J. Genescá, "Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 1565–1571, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00344-6.
- [6] K. Li, F. Zhao, and Y. Zhang, "Influence of carbonation on the chloride ingress into concrete: Theoretical analysis and application to durability design," *Cem. Concr. Res.*, vol. 123, no. June, p. 105788, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105788.
- [7] R. Liu, L. Jiang, J. Xu, C. Xiong, and Z. Song, "Influence of carbonation on chloride-induced reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 56, pp. 16–20, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.030.
- [8] V. T. Ngala and C. L. Page, "EFFECTS OF CARBONATION ON PORE STRUCTURE AND DIFFUSIONAL PROPERTIES OF HYDRATED CEMENT PASTES," *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 7, pp. 995–1007, Jul. 1997, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00102-6.
- [9] M. Saillio, V. Baroghel-Bouny, and F. Barberon, "Chloride binding in sound and carbonated cementitious materials with various types of binder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 82–91, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.049.
- [10] T. Luping and L. O. Nilsson, "Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars," *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, no. 2, pp. 247–253, 1993, doi: 10.1016/0008-8846(93)90089-R.
- [11] A. K. Suryavanshi and R. Narayan Swamy, "Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 5, pp. 729–741, 1996, doi: 10.1016/S0008-8846(96)85010-1.
- [12] G. K. Glass and N. R. Buenfeld, "The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete," *Corros. Sci.*, vol. 42, no. 2, pp. 329–344, 2000, doi: 10.1016/S0010-938X(99)00083-9.
- [13] J. Geng, D. Easterbrook, Q.-F. Liu, and L.-Y. Li, "Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloride-contaminated concrete," *Mag. Concr. Res.*, vol. 68, no. 7, pp. 353–363, Apr. 2016, doi: 10.1680/jmacr.15.00234.
- [14] A. Fick, "Ueber Diffusion," *Ann. Phys.*, vol. 170, no. 1, pp. 59–86, 1855, doi: <https://doi.org/10.1002/andp.18551700105>.
- [15] D. A. Fick, "V. On liquid diffusion," *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 10, no. 63, pp. 30–39, 1855, doi: 10.1080/14786445508641925.
- [16] R. Brown, "XXVII. A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies," *Philos. Mag.*, vol. 4, no. 21, pp. 161–173, Sep. 1828, doi: 10.1080/14786442808674769.
- [17] A. Einstein and R. Fürth, *Investigations on the Theory of the Brownian movement*. New York: Dover Publications, 1956.
- [18] C. L. Page, N. R. Short, and A. El Tarras, "Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 395–406, May 1981, doi: 10.1016/0008-8846(81)90111-3.
- [19] M. COLLEPARDI, A. MARCIALIS, and R. TURRIZIANI, "Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 55, no. 10, pp. 534–535, Oct. 1972, doi: 10.1111/j.1151-2916.1972.tb13424.x.
- [20] G. Sergi, S. W. Yu, and C. L. Page, "Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious

- materials exposed to a saline environment,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 44, no. 158, pp. 63–69, Mar. 1992, doi: 10.1680/mac.1992.44.158.63.
- [21] P. Cady and R. Weyers, “Chloride Penetration and the Deterioration of Concrete Bridge Decks,” *Cem. Concr. Aggregates*, vol. 5, pp. 81–87, 1983.
- [22] I. Janotka, M. Bačuvčík, and P. Paulík, “Low carbonation of concrete found on 100-year-old bridges,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 8, no. December 2017, pp. 97–115, 2018, doi: 10.1016/j.cscm.2017.12.006.
- [23] STN EN 206+A2: 2021, *Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda*.
- [24] Slovenská správa ciest, “TP 003: Prognózovanie vplyvu porúch na zaťažiteľnosť mostov a stanovenie zostatkovej životnosti mostov. Slovenská správa ciest,” Bratislava, 2002. [Online]. Available: https://www.ssc.sk/files/documents/technicke-predpisy/tp/tp_003.pdf.
- [25] STN EN 14629, *Výrobky a systémy na ochranu a opravu betónových konštrukcií. Skúšobné metódy. Stanovenie obsahu chloridov v zatvrdnutom betóne*.
- [26] STN EN 196-2, *Metódy skúšania cementu. Časť 2. Chemický rozbor cementu*.
- [27] N. Metropolis, “The beginning of the Monte Carlo method,” *Los Alamos Sci.*, pp. 125–130, Jun. 1987, [Online]. Available: <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-88-9067>.
- [28] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, “Equation of State Calculations by Fast Computing Machines,” *J. Chem. Phys.*, vol. 21, no. 6, pp. 1087–1092, 1953, doi: 10.1063/1.1699114.
- [29] International Federation for Structural Concrete Task Group 5.6, *Bulletin No. 34: Model Code for Service Life Design*. 2006.

8 Zoznam vybraných publikovaných prác autora

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [I] **GAŠPÁREK, Jakub** - HÚLEK, Lukáš - PAULÍK, Peter. Case study of carbonation of 100 years old concrete covered by a thin cement render In: Proceedings of the 2021 session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. Lausanne: The Fédération internationale du béton = International Federation for Structural Concrete, 2021, s. 152-159. ISBN 978-2-940643-11-0. ISSN 2617-4820. https://phdsymp2020.sciencesconf.org/data/book_phdsymp2020_2021.pdf.

Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- [III] HÚLEK, Lukáš - BAČUVČÍK, Michal - **GAŠPÁREK, Jakub**. Old cement-based render as the cause of extremely low carbonation of 100-year bridge concrete. DOI: 10.1088/1757-899X/867/1/012011 In: 12th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD. Students and Young Scientists. Bristol: Institute of Physics. IOP Publishing, 2020, s. 1-8 [online].

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [IIII] HÚLEK, Lukáš - BAČUVČÍK, Michal - JANOTKA, Ivan - **GAŠPÁREK, Jakub** - PAULÍK, Peter. Effective protection of concrete against carbonation by a protective render coating In: Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues. Michigan: American Concrete Institute, 2022, s. 181-200. ISBN 978-1-64195-184-5.

Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- [IV] **GAŠPÁREK, Jakub**. Praktické použitie časticovej simulácie pri predikcii kontaminácie betónu chlóridmi In: Juniorstav 2023: sborník príspevků. 25. mezinárodní doktorská konference stavebního inženýrství. Brno: ECON publishing, 2023, s. 200-208 [online]. ISBN 978-80-86433-80-6. https://juniorstav.fce.vutbr.cz/wp-content/uploads/sites/22/files/Sbornik_Juniorstav_2023.pdf.
- [V] **GAŠPÁREK, Jakub** - HÚLEK, Lukáš. Pravdepodobnostná predikcia kontaminácie betónu simuláciou zohľadňujúcou problém pohyblivých hraníc In: Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 32nd Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. Bratislava: Spektrum STU, 2022, s. 424-431 [CD-ROM]. ISBN 978-80-227-5251-0.

Odborné práce v ostatných zahraničných časopisoch

HAVLÍČEK, Peter - PAULÍK, Peter - **GÁŠPÁREK, Jakub**. Diagnostika a příprava rekonstrukcie bývalého železničného tunela pri Ožďanoch In: Beton - technologie, konstrukce, sanace. Praha: Beton TKS, 2020, Roč. 20, č. 3, s. 34-39 [tlačaná forma]. ISSN 1213-3116.

Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

GÁŠPÁREK, Jakub - PAULÍK, Peter - HAVLÍČEK, Peter. Predbežná diagnostika a návrh konceptu rekonstrukcie mostných objektov na bývalej železničnej trati Piešťany - Vrbové In: Inžinierske stavby: vedecko-odborný časopis stavebných inžinierov a stavebných technikov. Bratislava: Vydavateľstvo Inžinierske stavby, 2020, Roč. 68, č. 5, s. 44-48 [tlačaná forma]. ISSN 1335-0846.