



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Polinių pamatų armatūros korozijos rizikos vertinimas
chemiškai aktyvių gruntinių vandenų sąlygomis**

Baigiamasis magistro projektas

Tadas Guliakas

Projekto autorius

Prof. Vitoldas Vaitkevičius

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Polinių pamatų armatūros korozijos rizikos vertinimas chemiškai aktyvių gruntinių vandenų sąlygomis

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Tadas Guliakas

Projekto autorius

Prof. Vitoldas Vaitkevičius

Vadovas

Doc. Gediminas Stelmokaitis

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Tadas Guliakas

Polinių pamatų armatūros korozijos rizikos vertinimas chemiškai aktyvių gruntinių vandenų sąlygomis

Akademinių sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Tadas Guliakas

Patvirtinta elektroniniu būdu



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: 6211EX008 Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija	
Baigiamojo projekto tema (tematika, lietuvių k.): Polinių pamatų armatūros korozijos rizikos vertinimas chemiškai aktyvių gruntinių vandenų sąlygomis	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: Nr. V25-09-35 (2025-12-01)	
(lietuvių k.): Polinių pamatų armatūros korozijos rizikos vertinimas chemiškai aktyvių gruntinių vandenų sąlygomis	
(anglų k.): Corrosion Risk Assessment of Reinforced Pile Foundations Under Chemically Active Groundwater Conditions	
Pradiniai duomenys darbui:	
Kita papildoma su užduotimi susijusi informacija (pagal poreikį):	
Atlikti:	Baigiamojo projekto dalys:
☒	Įvadas
☒	Literatūros apžvalga
☒	Metodologija
☒	Eksperimentiniai tyrimai
☒	Analitiniai tyrimai
☐	Skaitiniai tyrimai
☐	Ekonominė dalis
☒	Išvados
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo suderinimas su baigiamojo darbo vadovu:	
☒	Leidžiama
☐	Draudžiama
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo sąlygos (jei leidžiama), laikantis Universitete nustatytos GDI etiško naudojimo tvarkos:	
Generatyvinis dirbtinis intelektas (GDI) naudojamas etiškai, skaidriai ir atsakingai, vadovaujantis Generatyvinio dirbtinio intelekto etiško naudojimo KTU studijų procese politika.	
Konsultacijų laikas (su vadovu ir/ar konsultantu suderintas kas savaitinis konsultacijų laikas, kuris įvedamas į AIS, nurodant studento vidinį vidko kodą):	
Vadovas:	Dr. Vitoldas Vaitkevičius
(indėlis 100 %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Konsultantas:	
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Socialinis partneris:	
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Tadas Guliakas
	<i>vardas, pavardė</i>
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Guliakas, Tadas. Polinių pamatų armatūros korozijos rizikos vertinimas chemiškai aktyvių gruntinių vandenų sąlygomis. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05)

Reikšminiai žodžiai: Polis, armatūros korozija, chemiškai aktyvus vanduo.

Kaunas, 2026. 52 p.

Santrauka

Magistrantūros studijų baigiamojo darbo tikslas – pasitelkiant neardomaisiais bei ardomaisiais tyrimų metodais nustatyti skirtingų betoninių priedų efektyvumą, kai gelžbetoninės konstrukcijos yra veikiamos chloridų kupinos aplinkos.

Magistro baigiamasis darbas išskirstytas į tris dalis: liteartūros analizė, numatomų tyrimų metodologija bei esperimentų rezultatai su išvadomis. Literatūros analizės dalyje apžvelgiami skirtingi gelžbetoninių gaminių korozijos rizikų bei greičio nustatymo būdai, skirtingų chemiškai aktyvių terpių įtaka gelžbetoninėms konstrukcijoms. Tyrimų metodologijos dalyje aprašomi darbo eigoje numatomi tyrimai, bandymai, jų eiga, bei kokiomis priemonėmis bei principais bus atliekami eksperimentai. Eksperimentų rezultatai aprašomi paskutinėje dalyje, kur nustatyta, jog organinis priedas požeminėms gelžbetoninėms konstrukcijoms, veikiamoms chloridų, yra neefktyvus priedas, dėl kurio mažėja gaminio ilgaamžiškumas. Tyrimai taip pat parodė kristalinio hidroizoliacinio priedo efektyvumą druskingoje, vandeningoje terpėse.

Baigiamojo darbo apimtis – 12 lentelių, 26 paveikslai, 40 literatūros šaltinių.

Guliakas, Tadas. Corrosion Risk Assessment of Reinforced Pile Foundations Under Chemically Active Groundwater Conditions. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. Dr. Vitoldas Vaitkevičius; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05)

Key words: Corrosion, Reinforced Pile, Chemically Active Groundwater.

Kaunas, 2025. 52 p.

Summary

The objective of this Master's thesis is to determine the effectiveness of different concrete admixtures in reinforced concrete structures exposed to a chloride-rich environment, utilizing both non-destructive and destructive testing methods.

The Master's thesis is divided into three parts: a literature review, the methodology for the planned research, and the experimental results with conclusions. The literature review section examines various methods for determining the risk and rate of corrosion in reinforced concrete elements, as well as the influence of different chemically active environments on reinforced concrete structures. The research methodology section describes the tests and experiments planned during the course of the work, their procedures, and the instruments and principles by which the experiments will be conducted. The experimental results are described in the final section, where it was determined that the organic admixture is an ineffective additive for underground reinforced concrete structures exposed to chlorides. The research also demonstrated the effectiveness of the crystalline waterproofing admixture in saline and aqueous environments.

The master's thesis consists of 12 tables, 26 figures, and 40 literature sources.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Poliniai pamatai.....	12
1.1. Bendroji informacija.....	12
1.2. Gelžbetoninių polių laikomosios galios vertinimas	12
1.3. Mikropoliai.....	12
1.4. Atsargos klasės ir jų klasifikacija	12
2. Literatūros analizė.....	14
2.1. Betono irimo mechanizmai agresyvioje aplinkoje	14
2.2. Mechaninių savybių vertinimas.....	15
2.2.1. Gniuždomasis stipris	15
2.3. Atsparumo vandens ir jonų skverbimuisi vertinimas	17
2.4. Chloridų difuzijos tyrimai	18
2.5. Elektrocheminiai korozijos vertinimo metodai	20
2.6. Mikrostruktūros analizės metodai	23
2.6.1. Vizualinė analizė (Plyšiai ir paviršiaus pažaidos).....	23
2.6.2. Skenuojanti elektroninė mikroskopija (SEM) ir gyvsidabrio intruzijos porozimetrija (GIP).....	24
2.7. Eksploatavimo trukmės prognozavimo modeliai	25
2.8. Ilgaamžiškumo didinimo strategijos ir jų efektyvumas.....	26
2.9. Literatūros analizės išvados.....	28
3. Eksperimentinių bandymų metodologija	29
3.1. Tyrime naudotos medžiagos.....	29
3.1.1. Betonas	29
3.1.2. Armatūra.....	29
3.1.3. Kristalinis priedas.....	29
3.1.4. Organikos priedas.....	29
3.1.5. Plastiklis	30
3.2. Bandymo terpės	30
3.3. Bandiniai.....	31
3.4. Masės nuostoliai	33
4. Eksperimentinių bandymų rezultatai.....	35
4.1. Faktiniai bandinių duomenys	35
4.2. Gniuždomojo ir lenkiamojo stiprio rezultatai.....	36
4.3. Dirbtinis plyšio formavimas	37
4.4. Potenciometriniai matavimai.....	37
4.4.1. Matavimams naudojamas aparatas	38
4.4.2. Vandens ir kitų veiksnių įtaka potenciometriniam matavimams.....	39
4.4.3. Potenciometrinių matavimų duomenys	40
4.4.3.1. Baziniai matavimai.....	40
4.4.3.2. Patikslinti matavimai, įvertinus įvairias paklaidas	42
4.5. Vizualinės betono ir armatūros pažaidos po bandymo.....	44
4.6. Kristalų formavimasis ir efektyvumas.....	45
4.7. Masės nuostolių rezultatai	46
Išvados	47
Literatūros sąrašas	48

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Gamtinio grunto ir gruntinio vandens cheminio agresyvumo ribinių rodiklių vertės pagal aplinkos poveikių klases	13
2 lentelė. Vandens įmirkis betoniniuose bandiniuose su skirtingais hidroizoliaciniais priedais	17
3 lentelė. Armatūros korozijos tikimybės nustatymas pagal potenciometrinių matavimų duomenis	20
4 lentelė. Bandinių tipai ir jų sudėtys	31
5 lentelė. Bandinių žymėjimas	32
6 lentelė. Prizmelių charakteristikos	32
7 lentelė. Faktiniai bandinių duomenys	35
8 lentelė. Prizmelių charakteristikos	36
9 lentelė. Cilindrinių bandinių lenkiamasis stipris ir atsivėrusio plyšio plotis	37
10 lentelė. Bandinių potenciometrinių matavimų rezultatai, skirtinguose bandymo ciklo etapuose	40
11 lentelė. Patikslinti bandinių potencialų matavimų duomenys	43
12 lentelė. Bandinių masės nuostoliai	46

Paveikslų sąrašas

1 pav. Skirtingų tipų CO ₂ esančio vandenyje, kontakte su betonu [7].....	14
2 pav. Bandinių be hidroizoliacinio priedo ir su 1,5% priedo gniuždomieji stipriai, po skirtingų džiovavimo-drėkinimo ciklų [3].....	16
3 pav. Neapdorotos medžio drožlės	17
4 pav. Chloridų difuzijos pasiskirstymo hipotezė, taikoma vamzdiniam gelžbetoniniam poliui [2] 19	19
5 pav. Chloridų koncentracijos palyginimas tarp analitinių rezultatų ir eksperimentinių duomenų, kai plyšio plotis $wcr = 60\mu m$ [2]	19
6 pav. Potenciometrinių matavimų reikšmės priklausomybės nuo laiko grafikas, skirtingose zonose. (a) polis A; (b) polis B [1]	22
7 pav. Konduktometrinių matavimų parametro R_1 kitimas CEM I, III ir IV tipo skiediniuose, veikiant: 15 % Na ₂ SO ₄ tirpalu (a); ir distiliuotu vandeniu (b) [11]	23
8 pav. Rezultatai gauti per skenuojanti elektroninį mikroskopą bandinių su 1,5% hidroizoliacinio priedo ir be jo [3]	24
9 pav. a) 3D geometrinis modelis, b) tinkleliu padengtas 2D modelis 10 cm skersmens, 5 cm aukščio [6]	26
10 pav. Organikos granulės naudotos bandymuose	30
11 pav. Pirmojoje terpėje laikomi bandiniai (kairėje) ir antrojoje terpėje laikomi bandiniai (dešinėje)	31
12 pav. Betoninės prizmelės, paruoštos lenkimo ir gniuždymo bandymams	33
13 pav. Prieš bandymą atlikti bandinių masės matavimai (kairėje) ir bandymams paruošti gaminiai, prieš panardinant į druskos tirpalą ir pradedant bandymą (dešinėje)	33
14 pav. Gelžbetoniniai bandiniai, išimti iš PVC formų	35
15 pav. Lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio nustatymui naudotas aparatas „Toni Technik“.....	36
16 pav. II-BET bandinio plyšys, prieš panardinimą į druskos terpę	37
17 pav. Potenciometrinių matavimų procesas.....	38
18 pav. Potenciometrinių matavimų matuoklis „Elcometer 331HM“	39
19 pav. Skirtingos potencialo matavimo vietos ant bandinių 1-B+S (viršuje) ir 2-B+S (apačioje) .	40
20 pav. Vandens terpėje laikomų bandinių potencialų rezultatai (netikslinti).....	41
21 pav. Druskinėje terpėje laikomų bandinių potencialo rezultatai (netikslinti)	42
22 pav. Vandens terpėje laikomų bandinių potencialo rezultatai (tikslinti).....	43
23 pav. Druskinėje terpėje laikomų bandinių potencialo rezultatai (tikslinti).....	44
24 pav. Armatūros ir betono kontakto vieta (bandiniai I-B+S, I-B+S+O)	44
25 pav. Bandiniuose I-B+S+O (apačioje) ir II-B+S (viršuje) susidarę plyšius uždariantys kristalai	45
26 pav. Nuvalyti bandiniai, po 14 dienų šaldymo ir šildymo ciklų	46

Ivadas

Šiuolaikiniame statybos sektoriuje konstrukcijų pagrindams plačiai naudojami gelžbetoniniai poliai bei mikropoliai. Pagrindinis šių pamatų ilgaamžiškumą mažinantis rodiklis yra chemiškai aktyvūs gruntai bei gruntiniai vandenys. Norint prailginti gelžbetoninių pamatų, veikiamų gruntinių vandenų, eksploatacijos laiką, gaminant betono mišinį parenkami skirtingi cemento tipai, kurie suteikia galutiniam gaminiui atsparumą skirtingose poveikių klasėse. Gelžbetoniniams poliais plačiai naudojama XA betono klasė, kuriai pasiekti naudojamas sulfatams atsparus cementas, kartu su XC betono klase, kuri apsaugo betoną nuo CO₂ keliamos korozijos. Tuo tarpu chloridais veikiamų antžeminių gelžbetoninių konstrukcijų atsparumui didinti naudojamas XD klasės betonas. Tačiau polinių pamatų, veikiamų agresyvios aplinkos, sudarytos iš chloridų, atsparumui didinti metodai nėra plačiai paplitę. Tyrimas yra itin naujas, kadangi per pastaruosius 10 metų panašių tyrimų buvo atlikta ir publikuota tik keletas.

Darbo tikslas:

Šio darbo tikslas – atlikti kompleksinį eksperimentinį tyrimą, siekiant įvertinti ir palyginti kristalinio hidroizoliacinio priedo bei organinio priedo efektyvumą, didinant gelžbetoninių mikropolių atsparumą chloridų sukeltai korozijai.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinę literatūrą, apimančią gelžbetonio irimo mechanizmus agresyvioje aplinkoje, korozijos rizikos vertinimo metodikas ir ilgaamžiškumo didinimo galimybes, naudojant specialius priedus;
2. Suformuoti eksperimentinę programą, pagaminant keturių tipų gelžbetoninių mikropolių bandinius: kontrolinius (be priedų), su kristaliniu hidroizoliaciniu priedu („Sika WT-200P“), su organika bei su hidroizoliaciniu ir organikos priedais;
3. Pagamintus bandinius veikti dvejomis skirtingomis terpėmis – etalonine, vandenine terpe ir agresyvia (3 % NaCl druskos tirpalu), imituojant chemiškai aktyvaus gruntinio vandens poveikį;
4. Eksperimento eigoje neardomaisiais metodais stebėti ir fiksuoti korozijos procesą, periodiškai atlikti potenciometrinius matavimus, fiksuojant potencialų pokyčius;
5. Išanalizuoti gautus eksperimentinius duomenis, palyginti skirtingų priedų poveikį korozijos iniciacijos laikui bei greičiui ir įvertinti korozijos rizikos lygį kiekvienu atveju;
6. Remiantis gautais rezultatais, suformuluoti išvadas apie tiriamų priedų tinkamumą ir efektyvumą kaip prevencinės priemonės, skirtos apsaugoti gelžbetoninius mikropolius nuo chloridų sukeltos korozijos.

1. Poliniai pamatai

1.1. Bendroji informacija

Poliniai pamatai yra giliųjų pamatų tipas, skirtas perduoti pastatų ir inžinerinių statinių apkrovas į giliau esančius, stipresnius ir mažiau deformuojamus grunto sluoksnius. Jie projektuojami tuomet, kai viršutiniai grunto sluoksniai yra silpni, nepasižymi pakankama laikomąja galia sekliųjų pamatų įrengimui, arba norint į pamatą perduoti didelius lenkimo momentus bei skersines jėgas nuo statinio. Poliniai pamatai yra būtini siekiant išvengti neleistinų konstrukcijos sėdimų, užtikrinti pastato stabilumą statant ant šlaitų, vandenyje ar seismiškai aktyviose zonose. Jų projektavimas ir skaičiavimas Lietuvoje yra reglamentuojamas pagrindinių geotechnikos standartų, tokių kaip LST EN 1997-1 [13] ir statybos techninio reglamento STR 2.05.04:2003 „Pamatų ir pagrindų projektavimas“ [14]. Šie dokumentai apibrėžia laikomosios galios ir pamato sėdimo skaičiavimo principus, užtikrinančius pamatų patikimumą ir ilgaamžiškumą.

Poliniai pamatai yra klasifikuojami pagal kelis pagrindinius kriterijus: įrengimo būdą, medžiagą ir apkrovos perdavimo mechanizmą. Pagal įrengimo būdą skiriami kaltiniai poliai, kurie yra gamykloje pagaminti elementai, įkalami ar įvibruojami į gruntą, ir gręžtiniai poliai, kurie formuojami statybvietyje, grunte išgręžus tuštymę ir ją užpildžius armatūra bei betonu. Pagal medžiagą poliai dažniausiai būna gelžbetoniniai, plieniniai arba mediniai.

1.2. Gelžbetoninių polių laikomosios galios vertinimas

Pagal LST EN 1997-1 [13] reikalavimus, bendra charakteristinė polio laikomoji galia $R_{c,k}$ yra sudaryta iš dviejų pagrindinių komponentų: pamato pado laikomosios galios $R_{b,k}$ ir šoninės trinties laikomosios galios $R_{s,k}$. Abiejų laikomosios galios komponentų skaičiavimas skiriasi priklausomai nuo grunto tipo. Biriuose gruntuose, tokiuose kaip smėlis ar žvyras, pado laikomoji galia priklauso nuo grunto tankio ir jo vidinės trinties kampo, o šoninė trintis – nuo horizontaliojo įtempio, veikiančio polio šoną, ir trinties koeficiento tarp polio medžiagos ir grunto. Rišliuose gruntuose, pavyzdžiui, molyje ar dulkėje, pado laikomajai galiai apskaičiuoti dažniausiai naudojamas kerpamasis stipris c_u , o pamato šoninės trinties laikomąją galią įvertinti pasitelkiamas grunto kūginis stipris q_c .

1.3. Mikropoliai

Mikropoliai yra specialus gręžtinių polių tipas, pasižymintis mažu skersmeniu, paprastai nuo 100 iki 300 mm. Jų projektavimas ir įrengimas reglamentuojamas standarte LST EN 14199 [15], o dėl savo nedidelių matmenų ir universalios įrengimo technologijos, mikropoliai yra ypač efektyvūs sprendžiant sudėtingas geotechnines problemas. Jie plačiausiai naudojami esamų pastatų pamatams stiprinti, ypač kai darbai vykdomi ankštose erdvėse, pavyzdžiui, pastatų rūsiuose, kur negalima naudoti didelės statybinės technikos. Taip pat jie efektyviai taikomi šlaitų ir iškasų stabilizavimui, tunelių ir kitų požeminių konstrukcijų tvirtinimui. Mikropoliai taip pat gali būti sudedami į polių grupes, kadangi molinguose ir dulkinguose gruntuose mikropoliai puikiai gali atlaikyti ašines jėgas. Dažniausiai ši konstrukcija yra centriškai armuojama plieniniu armatūros strypu arba vamzdžiu, norint, jog pamatas geriau atlaikytų tempimo ar glemžimo apkrovas.

1.4. Atsargos klasės ir jų klasifikacija

Gelžbetoninių konstrukcijų ilgaamžiškumui užtikrinti, betonas projektuojamas atsižvelgiant į aplinkos poveikio sąlygas, kuriose jis bus eksploatuojamas. Pagal standartą LST EN 206 [16], šios sąlygos yra suskirstytos į poveikio klases, kurios apibrėžia specifines agresijos rūšis ir nustato

atitinkamus reikalavimus betonui. Kiekvienai klasei keliami ribiniai reikalavimai, tokie kaip maksimalus vandens ir rišiklių santykis, minimali stiprio klasė ir privalomų komponentų naudojimas.

- XC klasė – apsaugo armatūrą nuo korozijos, kurią sukelia CO₂ poveikis, mažinantis betono pH. Rizika didėja esant kintamam drėgniui;
- XD klasė – taikoma konstrukcijoms, kurias veikia chloridai iš barstomų druskų ar pramoninės taršos;
- XS klasė – naudojama konstrukcijose, kurios eksploatuojamos jūrinėmis sąlygomis;
- XF klasė – apsaugo patį betoną nuo vidinio irimo, kurį sukelia užšalancio vandens plėtimasis porose;
- XA klasė – apsaugo betoną nuo irimo, kurį sukelia cheminės medžiagos grunte ar vandenyje, tokios kaip sulfatai, amonis, magnis ir pan.

Poliniams pamatams yra visada taikoma XC2 klasė, kuri naudojama nuolatos drėgnoje aplinkoje, o esant agresyviai gruntui ar gruntiniam vandeniui taip pat taikoma XA klasė.

1 lentelė. Gamtinio grunto ir gruntinio vandens cheminio agresyvumo ribinių rodiklių vertės pagal aplinkos poveikių klases

Cheminė charakteristika	Pamatinis bandymo metodas	XA1	XA2	XA3
Gruntinis vanduo				
SO ₄ ²⁻ , mg/l	EN 196-2	≥ 200 ir ≤ 600	> 600 ir ≤ 3 000	> 3 000 ir ≤ 6 000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 ir ≥ 5,5	< 5,5 ir ≥ 4,5	< 4,5 ir ≥ 4
Agresyvusis CO ₂ , mg/l	EN 13577	≥ 15 ir ≤ 40	> 40 ir ≤ 100	> 100 persotintas
NH ₄ ⁺ , mg/l	ISO 7150-1	≥ 15 ir ≤ 30	> 30 ir ≤ 60	> 60 ir ≤ 100
Mg ²⁺ , mg/l	EN ISO 7980	≥ 300 ir ≤ 1 000	> 1 000 ir ≤ 3 000	> 3 000 persotintas
Gruntas				
SO ₄ ²⁻ , mg/kg ^a (bendras)	EN 196-2 ^b	≥ 2 000 ir ≤ 3 000 ^c	> 3 000 ^c ir ≤ 12 000	> 12 000 ir ≤ 24 000
Rūgštys pagal Baumaną Gully, mg/kg	prEN 16502	>200	Beveik nepasitaiko	
a. Molingas gruntas, kurio pralaidumas mažesnis kaip 10⁻⁵ m/s, gali būti perkeltas į žemesnę klasę b. Nurodytu bandymo metodu SO₄²⁻ ekstrahuojamas druskos rūgštimi; kaip alternatyvų metodą galima taikyti ekstrahavimą vandeniu, jeigu betono naudojimo vietoje yra tokios patirties. c. 3 000 mg/kg ribą galima sumažinti iki 2 000 mg/kg, jei sulfato jonų kaupimosi betone rizika atsiranda tik dėl cikliškai pasikartojančio išdžiūvimo ir sudrėkimo arba dėl kapiliarinio įsiurbimo.				

2. Literatūros analizė

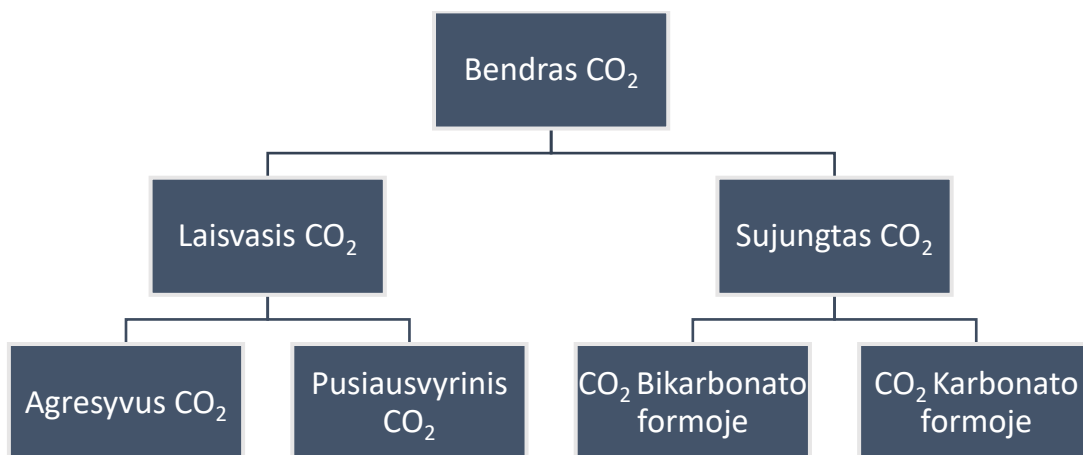
2.1. Betono irimo mechanizmai agresyvioje aplinkoje

Norint tinkamai įvertinti gelžbetoninių konstrukcijų korozijos riziką, pirmiausia būtina suprasti pagrindinius cheminius irimo mechanizmus, veikiančius betoną, kai jis yra kontakte su gruntu ir gruntiniu vandeniu. Grunto ir vandens agresyvumo apžvalgoje [7] detaliai aprašomi pagrindiniai agresyvūs komponentai ir jų poveikis bei pateikiama, kaip šis agresyvumas klasifikuojamas pagal tarptautinius standartus.

Agresyvumo komponentai ir irimo mechanizmai

Šiame tyrime [7] išskiriami keli pagrindiniai cheminiai procesai, dėl kurių gali būti pažeistos požeminės konstrukcijos:

- Sulfatų ataka: Tai vienas pavojingiausių procesų, kurio metu sulfatų jonai (SO_4^{2-}) reaguoja su cemento hidratacijos produktais ir formuoja didesnio tūrio kristalinius junginius, tokius kaip antrinis etringitas. Šių kristalų plėtimasis sukelia vidinius įtempius, dėl kurių betonas plečiasi, atsiranda mikroplyšių ir galiausiai suyra. Poveikio agresyvumas priklauso nuo sulfato katijono: amonio sulfatas laikomas pačiu agresyviausiu, po jo seka magnio sulfatas, kuris yra žymiai pavojingesnis nei natrio ar kalio sulfatai.
- Rūgščių ataka (dėl žemo pH): Rūgštus vanduo ($\text{pH} < 7$) tiesiogiai tirpina cemento akmenį, ardydamas pagrindinį rišamąjį komponentą – kalcio hidrosilikatus. Dėl to betonas praranda stiprumą ir vientisumą. Nuolat tekančio vandens yra pavojingiausias, nes nuolat atnauja rūgšties koncentraciją prie betono paviršiaus.
- Magnio ataka: Magnio jonai (Mg^{2+}) pakeičia kalcio jonus pagrindiniame betono rišiklyje. Proceso metu susidaro silpnas, rišamųjų savybių neturintis magnio hidrosilikatas ir poringas brucitas, dėl kurių betonas praranda savo stiprumą ir vientisumą.
- Agresyvus anglies dioksidas: Vandenyje ištirpęs CO_2 formuoja anglies rūgštį, kuri, panašiai kaip ir kitos rūgštys, tirpina ir išplauna kalcio hidroksidą iš betono, taip mažindama jo šarmingumą ir atsparumą.



1 pav. Skirtingų tipų CO₂ esančio vandenyje, kontakte su betonu [7]

Minimalūs reikalavimai betonui

Atsižvelgiant į nustatytą aplinkos agresyvumo klasę (pagal cheminių medžiagų koncentracijas), europiniai standartai nurodo konkrečius minimalius reikalavimus betono sudėčiai, siekiant užtikrinti jo ilgaamžiškumą. Svarbiausi reikalavimai yra:

- Maksimalus vandens ir cemento (v/c) santykis.
- Minimalus stipris gniuždant (f_{ck}).
- Minimalus cemento kiekis.

Esant stipriai agresyviai aplinkai, standartai rekomenduoja naudoti betoną, kurio v/c santykis neviršytų 0,45, o minimalus stipris būtų bent 40 MPa. Šie reikalavimai yra būtini norint sukurti tankią ir mažai pralaidžią betono mikrostruktūrą, kuri apsunkintų agresyvių jonų skverbimąsi.

2.2. Mechaninių savybių vertinimas

2.2.1. Gniuždomasis stipris

Stiprio gniuždant bandymai yra vienas iš pagrindinių metodų, naudojamų įvertinti betono kokybę ir jo mechaninių savybių pokyčius, veikiant įvairiems aplinkos veiksniams ar naudojant specialius priedus. Analizuotuose literatūros šaltiniuose šis metodas taikytas skirtingiems tikslams: pradinei betono kokybei patvirtinti, priedų įtakai įvertinti bei medžiagos degradacijai po agresyvaus poveikio nustatyti.

Betono sudėties ir v/c santykio įtaka stipriui

Kaip ir tikėtasi, stipris gniuždant tiesiogiai priklauso nuo betono sudėties, ypač nuo vandens ir cemento (v/c) santykio. Tyrime „Apsauginio sluoksnio, v/c santykio ir plyšio pločio įtakos potenciometriniams matavimams“ [8] atlikti bandymai su standartiniais cilindriniais bandiniais parodė aiškią priklausomybę: betono su v/c santykiu 0,7 stipris siekė ~25 MPa, su v/c 0,55 – ~35 MPa, o su v/c 0,35 pasiekė ~48 MPa. Šie rezultatai patvirtina fundamentalų principą, kad mažesnis v/c santykis lemia tankesnę betono struktūrą ir didesnį stiprį.

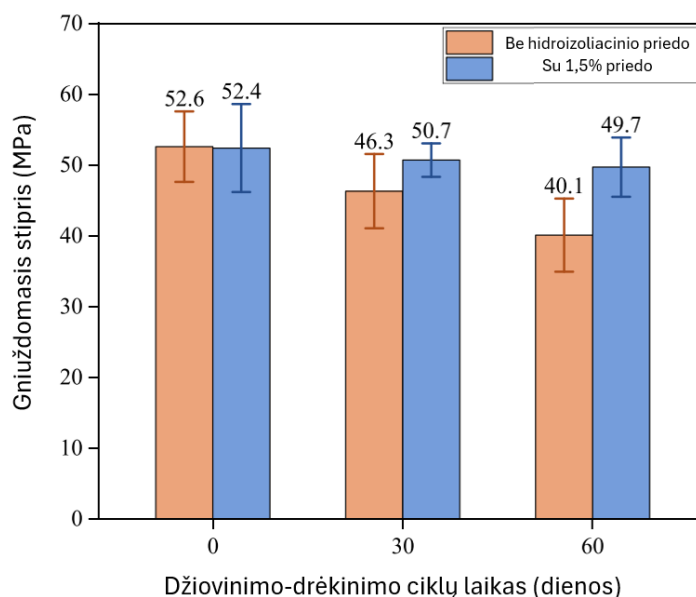
Priedų poveikis stipriui gniuždant

Keletas tyrimų analizavo, kaip įvairūs priedai veikia betono stiprį. „Kristalinės hidroizoliacijos poveikis kapiliariniam poringumui“ [9] tyrime, lyginant skirtingus priedus cilindrinuose bandiniuose, nustatyta, kad kristalinės hidroizoliacijos priedas padidino betono stiprį 16 % (nuo 41,55 MPa iki 47,52 MPa), palyginti su kontroliniu betonu. Tačiau efektyviausias buvo silicio dulkių priedas, padidinęs stiprį net 28 % (iki 56,65 MPa). Tuo tarpu ant paviršiaus užtepta kristalinė danga stipriui reikšmingos įtakos neturėjo. Šie rezultatai rodo, kad vidiniai priedai gali ne tik pagerinti ilgaamžiškumo savybes, bet ir padidinti betono mechaninį atsparumą.

Gniuždomojo stiprio pokyčiai veikiant agresyviai aplinkai

Gniuždomojo stiprio matavimai yra svarbūs vertinant medžiagos degradaciją. „Kristalinės hidroizoliacijos savaiminis gijimas“ [3] atliktame tyrime su 150 mm kubais buvo nustatyta, kad po 60 dienų agresyvių drėkinimo-džiovinimo ciklų druskos tirpale, kontrolinio betono stipris sumažėjo

23,8 % (nuo 52,6 MPa iki 40,1 MPa). Tačiau betono su 1,5 % kristaliniu priedu stipris tomis pačiomis sąlygomis sumažėjo tik 5,1 % (nuo 52,4 MPa iki 49,7 MPa), kas įrodo priedo gebėjimą efektyviai apsaugoti betono mechanines savybes nuo degradacijos.



2 pav. Bandinių be hidroizoliacinio priedo ir su 1,5% priedo gniuždomieji stipriai, po skirtingų džiovinimo-drėkinimo ciklų [3]

Panašias išvadas parodė ir „Sulfatų atakos poveikio mikropolių skiediniams“ [11] tyrimas, kuriame buvo tirtas cementinių skiedinių (be užpildų) atsparumas sulfatų atakai. Jų bandymai su 40x40x160 mm prizmėmis parodė, kad po 28 dienų buvimo sulfatų tirpale, įprasto portlandcemenčio (CEM I) skiedinys prarado ~15 % stiprio, o skiediniai su pelenų (CEM IV) ir šlako (CEM III) priedais prarado atitinkamai tik ~4 % ir ~10 % stiprio. Tai patvirtina, kad tam tikri priedai, šiuo atveju pucolaniniai, didina betono atsparumą cheminiam poveikiui.

Nestandartinių medžiagų panaudojimas

„Lengvojo betono su medžio drožlėmis stiprio“ [10] tyrime stipris gniuždant buvo pagrindinis rodiklis vertinant galimybę naudoti medžio drožles vietoje skaldos. Nustatyta, kad pakeitus skaldą neapdorotomis drožlėmis, betono stipris sumažėjo ~75 %, tačiau specialiai apdorotų drožlių, padengtų cementiniu skiediniu, stipris, palyginti su neapdorotų drožlių betonu, padidėjo 45 %. Nors gautas stipris ~18 MPa yra per mažas laikančiosioms konstrukcijoms, jis atitinka reikalavimus, keliamus nelaikantiems mūro blokeliams.



3 pav. Neapdorotos medžio drožlės

2.3. Atsparumo vandens ir jonų skverbimuisi vertinimas

Betono atsparumas vandens poveikiui yra vienas svarbiausių ilgaamžiškumo rodiklių, nes vanduo yra pagrindinė terpė, per kurią į konstrukcijos vidų patenka agresyvūs jonai, tokie kaip chloridai ir sulfatai. Šiam atsparumui įvertinti dažniausiai naudojami vandens įmirkio ir vandens skverbimosi, veikiant slėgiui bandymai, kurie leidžia spręsti apie betono kapiliarinio poringumo lygį.

Vandens įmirkis

Vandens įmirkio bandymas parodo, kokį vandens kiekį (procentais nuo masės) betonas gali sugerti per tam tikrą laiką. Šis rodiklis tiesiogiai priklauso nuo atvirų porų tūrio betone. Tyrimė [9], išbandant 100 mm skersmens ir 200 mm aukščio cilindrinis gaminius, gauti netikėti rezultatai – tikėtasi, jog kristalinis hidroizoliacinis priedas sumažins vandens įmirkį, tačiau rezultatai parodė priešingą tendenciją (žr. 2 lentelę).

2 lentelė. Vandens įmirkis betoniniuose bandiniuose su skirtingais hidroizoliaciniais priedais

	Betonas be priedų	Betonas su kristalinės hidroizoliacijos priedu	Betonas su silicio dulkių priedu	Betonas su kristalinės hidroizoliacijos danga, nušlifuotas	Betonas su kristalinės hidroizoliacijos danga nenušlifuotas
Vandens įmirkis	5,96 %	6,14 %	4,99 %	5,36 %	5,32 %
Įmirkio pokytis nuo paprasto betono, %	-	+3,0 %	-16,0 %	-10,1 %	-10,74 %

Tyrimė [9] keliama hipotezė, kad kristalinis priedas galėjo pakeisti porų struktūrą arba pasižymėti higroskopinėmis savybėmis (savybe pritraukti vandenį), taip padidindamas bendrą vandens absorbciją. Visiškai kitokią situaciją parodė kitas tyrimas [10] su lengvuju betonu, kuriame neapdorotos medžio drožlės lėmė itin didelį vandens įmirkį – 11,64 %. Tačiau apdorojus drožles

cementiniu skiediniu su emulsikliu, įmirkis sumažėjo beveik penkis kartus – iki 2,48 %. Šis pavyzdys iliustruoja, kad poringumo mažinimas yra esminis veiksnys siekiant sumažinti vandens įmirkį.

Vandens skverbimasis veikiant slėgiui

Šis bandymas dar tiksliau parodo betono atsparumą vandeniui, matuojant, kaip giliai vanduo prasiskverbia į bandinio vidų veikiant pastoviam 30 kPa slėgiui. Rezultatai matuojami kaip sudrėkusio ploto procentas bandinio lūžio paviršiuje. „Savaime užsigydančio betono (su kristaliniu ir bakteriniu priedu)“ tyrime [4] gauti duomenys patvirtino vandens įmirkio bandymo tendencijas:

- Kontroliniame betone vanduo prasiskverbė per 57,5 % ploto.
- Betone su kristalinės hidroizoliacijos priedu vanduo prasiskverbė per 63,8 % ploto, rodydamas prastesnį rezultatą nei kontrolinis betonas.
- Betonas su silicio dulkių priedu vėl pasirodė geriausiai – vanduo prasiskverbė tik per 51,9 % ploto.

Ant paviršiaus užtepta kristalinė danga visiškai sustabdė garų pašalinimą ir lėmė 100 % sudrėkimą, tačiau nušlifavus dangos paviršių, rezultatas pagerėjo ir tapo panašus į kontrolinio betono.

2.4. Chloridų difuzijos tyrimai

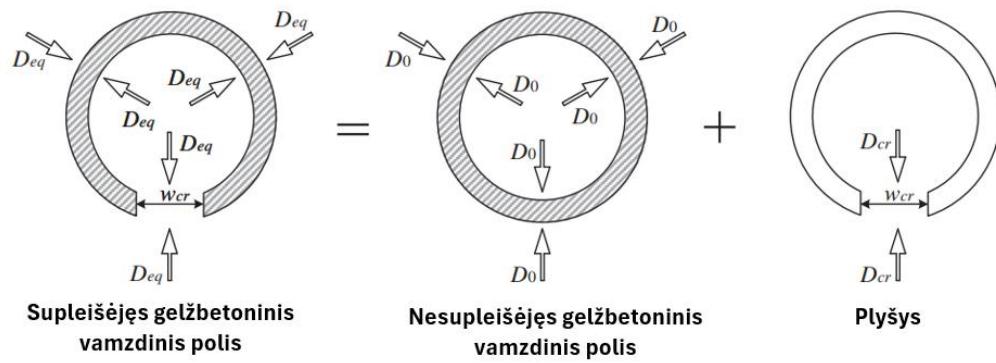
Chloridų difuzijos tyrimai yra esminis metodas, siekiant kiekybiškai įvertinti betono atsparumą chloridų jonų skverbimuisi – pagrindinei armatūros korozijos priežastčiai jūrinėje ar chemiškai aktyvioje aplinkoje. Analizuotuose šaltiniuose šis procesas buvo vertinamas tiek eksperimentiškai, tiek taikant analitinius modelius.

Eksperimentinis difuzijos vertinimas

Tyrime [3] aprašytas eksperimentinis chloridų skverbimosi vertinimas yra pagrįstas vienmačiu difuzijos bandymu. Jo metu cemento tešlos pavyzdžiai, kurių penkios kraštinės yra izoliuotos, panardinami į 3,5 % NaCl tirpalą 60 dienų. Po šio laikotarpio pavyzdžiai sluoksnis po sluoksnio susmulkinami, o chloridų koncentracija kiekviename sluoksnyje nustatoma cheminės titracijos metodu. Šie duomenys leidžia apskaičiuoti chloridų difuzijos koeficientą D , kuris yra pagrindinis betono atsparumo rodiklis. Atlikti tyrimai parodė, kad optimaliausia kristalinio priedo dozė yra 1,5 % rišiklio masės, kuri sumažina chloridų difuzijos koeficientą maždaug 20 %, palyginti su betonu be priedų.

Analitinis difuzijos modeliavimas

„Įtrūkusių vamzdinių polių eksploatavimo trukmės prognozavimas“ tyrime [2] pateiktas išplėtotas analitinis modelis, skirtas prognozuoti chloridų skverbimąsi įtrūkusiųose cilindrinuose poliuose. Modelis yra pagrįstas antruoju Ficko difuzijos dėsniu, tačiau yra pritaikytas ne plokščiam paviršiui, o cilindrinei geometrijai, kur vyksta radialinė difuzija. Lygties sprendimui naudojamos Besselio funkcijos – specialios matematinės funkcijos, būtinos sprendžiant difuzijos procesus cilindrinėse sistemose.



4 pav. Chloridų difuzijos pasiskirstymo hipotezė, taikoma vamzdiniam gelžbetoniniam poliui [2]

Pagrindinė šio modelio naujovė – ekvivalentinio difuzijos koeficiento D_{eq} įvedimas, kuris apjungia chloridų skverbimąsi per nepažeistą betoną ir per patį plyšį:

$$D_{eq} = D_0 + \frac{w_{cr}(D_{cr}-D_0)}{\pi(a+b)} \quad (2.4.1)$$

čia:

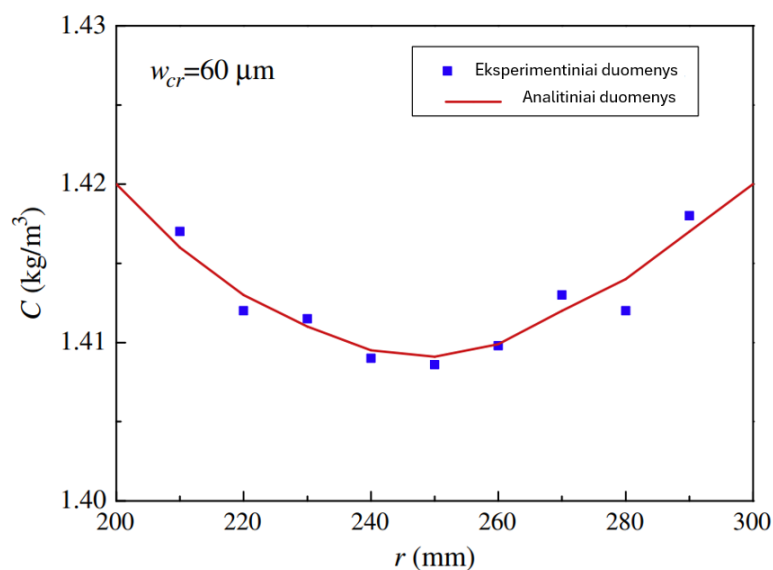
D_0 – difuzijos koeficientas per nepažeistą betoną, kuris apskaičiuojamas pagal vandens ir cemento santykį;

D_{cr} – difuzijos koeficientas pačiame plyšyje, apskaičiuojamas pagal plyšio plotį;

w_{cr} – plyšio plotis (μm);

a ir b – vidinis ir išorinis polio spinduliai.

Modelis taip pat įvertina ribinę chloridų koncentraciją C_{th} – kritinę koncentraciją prie armatūros paviršiaus, kurią pasiekus prasideda korozija. Nors ši vertė gali varijuoti, skaičiavimams autoriai priėmė $1,2 \text{ kg/m}^3$ vertę. Šio modelio prognozės buvo patvirtintos eksperimentiniais duomenimis, kurie parodė gerą atitikimą. Modeliavimas atskleidė, kad plyšio pločio padidinimas nuo $0 \mu\text{m}$ iki $300 \mu\text{m}$ gali padidinti chloridų koncentraciją prie armatūros paviršiaus nuo 45% iki 118% , priklausomai nuo apsauginio sluoksnio storio, taip drastiškai sutrumpinant konstrukcijos eksploatavimo trukmę.



5 pav. Chloridų koncentracijos palyginimas tarp analitinių rezultatų ir eksperimentinių duomenų, kai plyšio plotis $w_{cr} = 60 \mu\text{m}$ [2]

2.5. Elektrocheminiai korozijos vertinimo metodai

Elektrocheminiai metodai yra pagrindiniai neardomosios diagnostikos įrankiai, leidžiantys įvertinti korozijos procesus gelžbetoninėse konstrukcijose. Analizuotuose šaltiniuose plačiausiai taikyti du metodai: potenciometriniai matavimai, skirtas korozijos rizikai nustatyti, ir konduktometriniai matavimai, skirti korozijos greičiui ir mikrostruktūros pokyčiams matuoti.

Potenciometriniai matavimai

Potenciometriniai matavimai yra plačiai taikomas neardomasis metodas, padedantis nustatyti armatūros korozijos rizikos tikimybę gelžbetoninėse konstrukcijose. Metodo esmė – matuojamas potencialų skirtumas tarp armatūros ir etaloninio elektrodo, o gautos vertės lyginamos su standartizuotomis ribomis, dažniausiai apibrėžtomis ASTM C876 [26] standarte (žr. 3 lentelę).

3 lentelė. Armatūros korozijos tikimybės nustatymas pagal potenciometrinių matavimų duomenis

Potencialas, mV	Armatūros korozijos tikimybė
$E_{cor} > -200 \text{ mV}$	90% tikimybė, jog korozija nevyksta.
$-350 \text{ mV} > E_{cor} > -200 \text{ mV}$	Korozijos rizika neaiški.
$-350 \text{ mV} > E_{cor}$	Daugiau nei 90% tikimybė, jog korozija vyksta.

Nors šis metodas yra plačiai naudojamas, tyrimuose „Povandeniniai potenciometriniai matavimai“ [5] „Karbonizacijos sukeltos korozijos modeliavimas“ [6] pabrėžiama, kad potenciometrinių matavimų rezultatus reikia interpretuoti su atsarga, ypač nestandartinėmis sąlygomis. Atlikti tyrimai atskleidė, kad šių matavimų rodmenis stipriai veikia ne tik korozijos procesas, bet ir pati aplinka bei betono savybės.

Aplinkos sąlygų įtaka potenciometriniams matavimams

Vienas iš esminių veiksnių, iškreipiančių potenciometrinius matavimus, yra drėgmės kiekis betone. Tyrime [5] buvo nustatyta, kad vos tik bandinys panardinamas į vandenį, jo potencialo reikšmė staigiai nukrenta į labai neigiamą sritį. Pavyzdžiui, identiškų bandinių potencialas sausoje aplinkoje svyravo ties -400 mV riba, o panardinus juos į vandenį, potencialas iškart nukrito iki -650 ar -700 mV . Šis ~60 % mažesnis rodmuo nereiškia didesnio korozijos greičio, o yra matavimo sąlygų nulemtas reiškinys, kurį sukelia sumažėjusi betono elektrinė varža ir ribotas deguonies prieinamumas. Panašiai, ciklinio drėkinimo-džiovinimo aplinkoje buvo stebimi didžiausi potencialo svyravimai, siekiantys 200–250 mV vieno ciklo metu, o tai dar kartą patvirtina drėgmės įtaką. Dėl šių priežasčių tyrime daroma išvada, kad standartinės ribinės vertės yra netinkamos povandeninėms konstrukcijoms vertinti.

Karbonizacijos įtaka potenciometriniams matavimams

Tyrime [6] nustatyta, kad standartiniai potenciometrinių matavimų kriterijai taip pat yra nepatikimi, vertinant karbonizacijos sukeltą koroziją. Jų eksperimentai parodė, kad net tada, kai karbonizacijos frontas jau buvo pasiekęs ir aplenkęs armatūrą (kas teoriškai reiškia prasidėjusią koroziją), potenciometrinių matavimų rodmenys dažnai vis dar buvo „pasyvioje“ arba „neaiškioje“ zonoje (pvz., $> -350 \text{ mV}$). To priežastis yra, kad karbonizacijos procesas užpildo betono poras ir padidina jo elektrinę varžą, tokiu būdu neparodant tikrojo korozijos potencialo duomenų. Tyrime siūloma

korozijos pradžią nustatyti ne pagal absoliučias vertes, o pagal staigų, bent 150 mV potencialo kritimą, palyginti su pradine būseną.

Plyšių, v/c santykio ir apsauginio sluoksnio įtaka

Tyrimas [8] kiekybiškai įvertino, kaip potencialų reikšmės veikia betono savybės ir defektai. Nustatyta, kad didėjant plyšio pločiui, potencialų reikšmės nuosekliai krenta į neigiamą pusę. Pavyzdžiui, esant 1,5 mm pločio plyšiui, potenciometrinių matavimų reikšmė buvo 34–42 % labiau neigiama nei neįtrūkusiam betone. Taip pat didesnis v/c santykis (prastesnės kokybės betonas) lėmė didesnius neigiamus potencialus: betone su v/c santykiu 0,70, esant 1,0 mm plyšiui, potencialas siekė apie -430 mV, o betone su v/c santykiu 0,35 – tik apie -145 mV. Storesnis apsauginis sluoksnis (60 mm, lyginant su 30 mm) pagerino rodmenis, tačiau atsiradus plyšiui, jo teigiamas poveikis sumažėjo. Remiantis šiais duomenimis, tyrime buvo sukurta empirinė formulė, leidžianti prognozuoti potencialo reikšmę, atsižvelgiant į visus šiuos veiksnius:

$$HCP_t = A_{w/c} \cdot A_c \cdot HCP_{ref} \quad (2.5.1)$$

čia:

HCP_t – prognozuojama bendra potenciometrinių matavimų reikšmė;

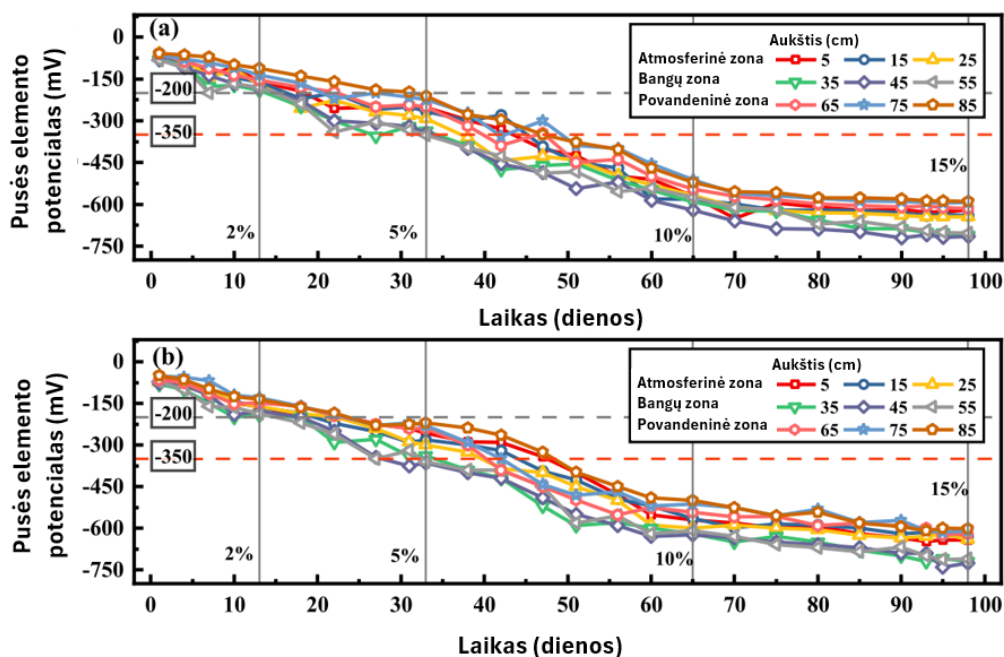
$A_{w/c}$ – vandens ir cemento santykio pataisos koeficientas;

A_c – apsauginio sluoksnio pataisos koeficientas;

HCP_t – potenciometrinių matavimų bazinė reikšmė, priklausanti nuo plyšio pločio, kai v/c santykis 0,55 ir apsauginis sluoksnis 30 cm.

Bendros tendencijos

Nepaisant matavimo metodo sudėtingumo, „Neardomojo jūrinių polių korozijos stebėjimas“ [1] tyrimas parodė aiškią tendenciją: agresyviausioje, bangų įtakos zonoje, potenciometrinių matavimų reikšmės buvo labiausiai neigiamos. Bandymas parodė, jog korozijos rizikos neaiškumo lygis (-200 mV) buvo pasiektas per 13–33 minutes, o po 33 minučių potencialas viršijo -350 mV ribą, indikuodamas daugiau nei 90 % korozijos tikimybę. Tai patvirtina, kad potenciometrinis matavimas, nors ir turintis apribojimų, yra naudingas įrankis nustatant labiausiai pažeidžiamas konstrukcijos zonas.



6 pav. Potenciometrinų matavimų reikšmės priklausomybės nuo laiko grafikas, skirtingose zonose. (a) polis A; (b) polis B [1]

Konduktometriniai matavimai

Konduktometriniai matavimai yra efektyvus ir jautrus korozijos vertinimo metodas. Tyrimo [1] metu gelžbetoninio elemento armatūra yra veikiamą plačiu kintamos srovės dažnių diapazonu. Tai leidžia atskirti betono elektrines savybes nuo korozijos reakcijos plieno paviršiuje, taip įvertinant ne tik korozijos tikimybę, bet ir jos greitį bei mikrostruktūros pokyčius.

Korozijos greičio ir zonų vertinimas

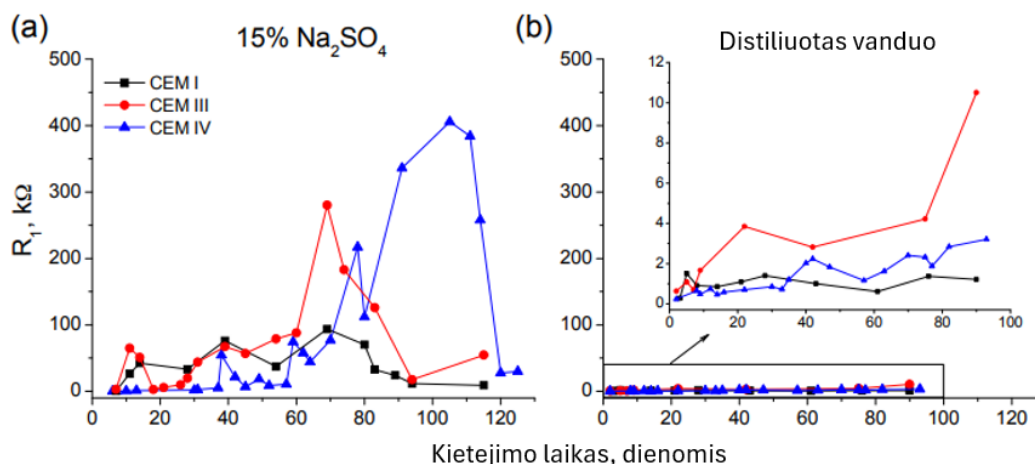
Tyrimo [1] taikytas konduktometrinų matavimų metodas, norint kiekybiškai įvertinti korozijos greitį skirtingose polio zonose. Tyrimai parodė, jog labiausiai korozijos paveikta buvo bangų įtakos zona, kurioje nustatyta mažiausia krūvio pernešimo varža R_{ct} , indikuojanti didžiausią korozijos greitį. Tačiau laikui bėgant, korozijos sparta greitėjo visose polio zonose beveik vienodai, o tai rodo, kad pažeida plinta po visą elementą. Rezultatai taip pat patvirtino, jog korozija prasidėjo nuo pat tyrimo pradžios, net prieš atsirandant matomiems plyšiams.

Mikrostruktūros pažeidos stebėjimas

Tyrimo [11] konduktometrinų matavimų metodas naudojamas cementinių skiedinių mikrostruktūros pokyčiams stebėti veikiant sulfatų atakai. Buvo nustatyta, kad šis metodas yra itin jautrus metodas, galintis užfiksuoti dviejų stadijų pažeidos mechanizmą. Iš pradžių, dėl etringito formavimosi porose, medžiagos elektrinė varža didėja, kas rodo mikrostruktūros tankėjimą, tačiau vėliau, kai dėl vidinio slėgio atsiranda mikroįtrūkimų, varža pradeda staigiai mažėti.

- CEM I (portlandcemenčio) skiediniuose varžos mažėjimas prasidėjo anksčiausiai, maždaug po 70 dienų, rodydamas greitą struktūros irimą.
- CEM III (šlako cemento) skiediniuose mažėjimas taip pat prasidėjo apie 70 dieną, tačiau buvo lėtesnis.

- CEM IV (pelenų cemento) skiediniai pasirodė esantys atspariausi – jų varža augo ilgiausiai (iki 110 dienos), o vėlesnis mažėjimas buvo nežymus. Tai rodo, kad pelenų cementas yra atspariausias ilgalaikiai sulfatų atakai, o konduktometriniai matavimai yra efektyviausias metodas šiam atsparumui įvertinti.



7 pav. Konduktometrinių matavimų parametro R_1 kitimas CEM I, III ir IV tipo skiediniuose, veikiant: 15 % Na_2SO_4 tirpalu (a); ir distiliuotu vandeniu (b) [11]

2.6. Mikrostruktūros analizės metodai

Mikrostruktūros analizė leidžia tiesiogiai įvertinti betono vidinės struktūros pokyčius, atsirandančius dėl agresyvių aplinkos veiksnių ar specialių priedų poveikio. Ji apima tiek vizualiai matomų pažeidimų, tokių kaip plyšiai ir paviršiaus irimas, fiksavimą, tiek gilesnius tyrimus, atskleidžiančius porų struktūros ir kristalų formavimosi ypatumus.

2.6.1. Vizualinė analizė (Plyšiai ir paviršiaus pažeidos)

Plyšių atsiradimas ir plitimas

Plyšiai yra vienas akivaizdžiausių betono degradacijos požymių. Tyrime [1] naudodami skaitmeninį plyšių matavimo aparatą, nustatė, kad plyšių pločio didėjimas ir naujų plyšių atsiradimas yra beveik tiesiškai priklausomas nuo korozijos lygio. Proceso eiga yra nuosekli:

- Pirmiausia, ankstyvose korozijos stadijose, povandeninėje zonoje atsiranda mikroplyšiai.
- Didėjant korozijos lygiui, šie mikroplyšiai jungiasi tarpusavyje, formuodami didesnius įtrūkius išilgai elemento.
- Galiausiai, labiausiai pažeidžiamoje – bangų įtakos zonoje – atsiranda plačiausi ir ilgiausi plyšiai.

Paviršiaus pažeidos

Betono paviršiaus pažeidos, pasireiškiančios kaip atsilupimas ar trupėjimas, atsiranda dėl vidinių deformacijų. Armatūrai koroduojant, susidarančių rūdžių tūris yra kelis kartus didesnis už pradinį plieno tūrį. Šis tūrio padidėjimas sukelia tempimo įtempius aplinkiniame betone, kurie galiausiai suardo paviršinį sluoksnį. Tyrime [1] nustatyta, kad paviršiaus pažeidimų kiekis yra netolygus: bangų

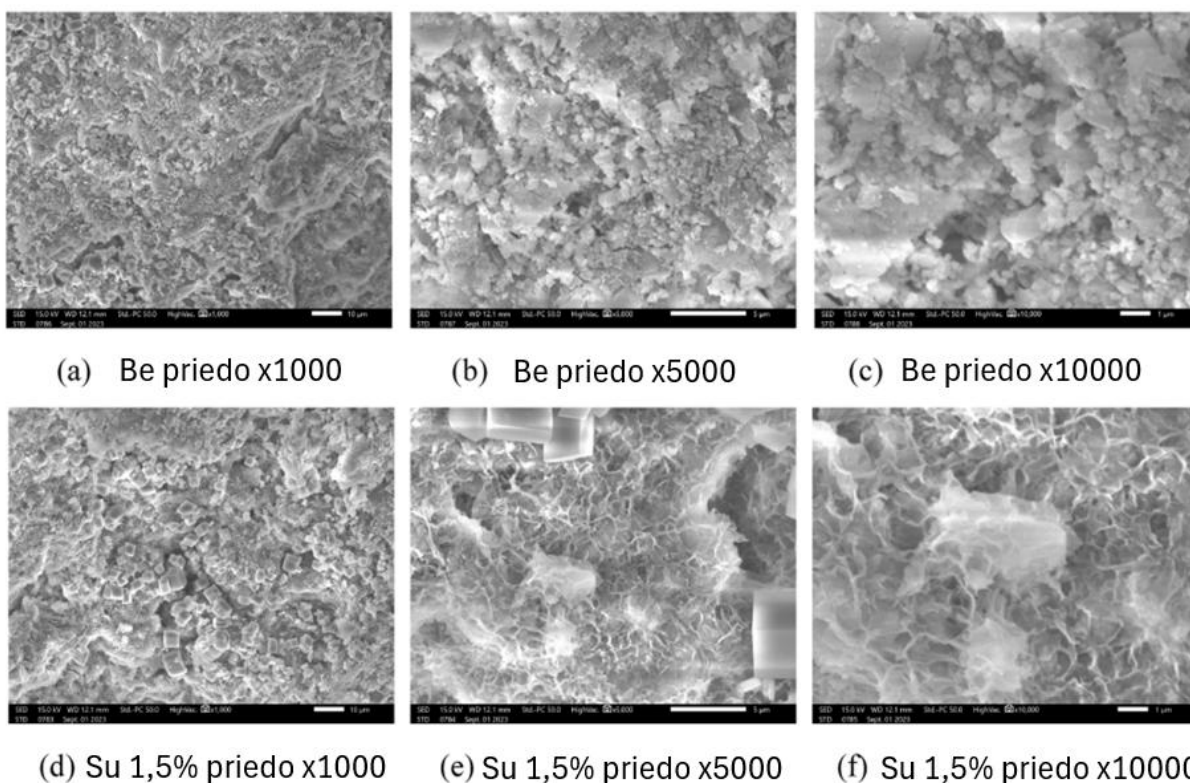
įtakos zonoje jis buvo 35 % didesnis nei atmosferos zonoje ir 20 % didesnis nei povandeninėje zonoje. Tai dar kartą patvirtina, kad būtent kintamo drėkinimo zona yra pati agresyviausia.

2.6.2. Skenuojanti elektroninė mikroskopija (SEM) ir gyvsidabrio intruzijos porozimetrija (GIP)

Šie pažangūs laboratoriniai metodai leidžia kiekybiškai įvertinti betono vidų, jo struktūrą. Skenuojanti elektroninė mikroskopija (SEM) buvo plačiai naudojama keliuose tyrimuose [3] [9], siekiant vizualizuoti kristalinių ir bakterinių priedų poveikį. SEM analizė parodė, kad:

- Kristaliniai priedai, aktyvuoti vandens, formuoja tankų, į voratinklį panašų kristalų tinklą, kuris užpildo betono poras ir kapiliarus, taip sukurdami tankesnę ir mažiau pralaidžią mikrostruktūrą, palyginti su akivaizdžiai porėtu betonu be priedų.
- Bakteriniai priedai taip pat užpildo plyšius, tačiau jų produktai (daugiausiai kalcio karbonatas) skiriasi nuo kristalinių priedų produktų (brucito ir etringito). Nustatyta, kad kristalinio priedo suformuotas gilesnis ir tankesnis plyšio užpildymas lemia efektyvesnę apsaugą nuo korozijos.

Gyvsidabrio intruzijos porozimetrija (GIP) buvo naudojama kiekybiniam poringumo įvertinimui. Tyrime [3] nustatyta, kad po 60 agresyvių ciklų, kontrolinio betono poringumas išaugo iki 28,89 %, o betono su kristaliniu priedu – tik iki 19,84 %. Svarbiausia, kad priedas ženkliai sumažino didelių, „kenksmingų“ (>50 nm) porų, kurios yra pagrindinis agresyvių jonų transportavimo kelias, turį. Kitame tyrime [11], naudodami GIP, taip pat patvirtinta, kad cementiniai skiediniai su šlako ir pelenų priedais pasižymi tankesne ir smulkesnių porų struktūra nei įprastas portlandcemenčio skiedinys, kas paaiškina jų didesnę atsparumą sulfatų atakai.



8 pav. Rezultatai gauti per skenuojanti elektroninę mikroskopą bandinių su 1,5% hidroizoliacinio priedo ir be jo [3]

2.7. Eksploatavimo trukmės prognozavimo modeliai

Eksploatavimo trukmės prognozavimo modeliai yra esminiai įrankiai, leidžiantys įvertinti būsimą konstrukcijos būklę ir planuoti jos priežiūrą. Analizuotuose šaltiniuose buvo taikomi du pagrindiniai prognozavimo metodų tipai: tikimybiniai modeliai, pagrįsti eksperimentiniais duomenimis, ir sudėtingi skaitmeniniai modeliai, imituojantys fizikinius bei cheminius procesus.

Tikimybiniai modeliai

Tikimybiniai modeliai, tokie kaip Veibulo (angl. Weibull) skirstinys, yra naudojami norint nustatyti konstrukcijos gedimo tikimybę ir prognozuoti jos eksploatavimo trukmę, remiantis surinktais eksperimentiniais duomenimis. Tyrime [1] taikytas modelis, analizuojant laiko priklausomybę nuo tokių parametrų kaip paviršiaus deformacija ir potenciometrinių matavimų potencialas.

Teorijos pagrindas yra patikimumo funkcija $R(t)$, kuri parodo tikimybę, kad konstrukcija sėkmingai funkcionuos ilgiau nei tam tikrą laiką t :

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^m \right] \quad (2.7.1)$$

čia:

t – medžiagos eksploatavimo trukmė;

m – formos parametras, apibrėžiantis pažaidos intensyvumą laikui bėgant. Jei $m > 1$, pažaidos rizika didėja konstrukcijai senstant;

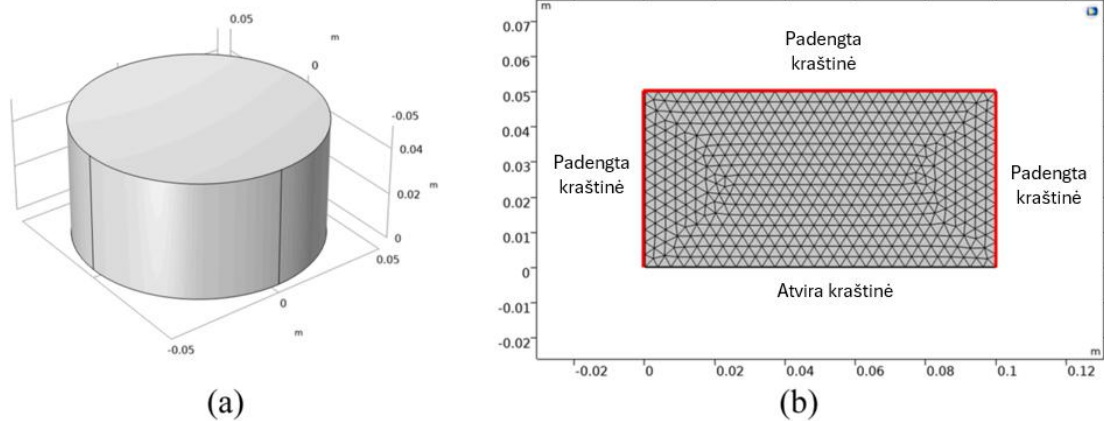
θ – mastelio parametras, kuris nurodo laiką, per kurį tikimasi, kad bus pažeista 63,2% komponentų.

Atlikus analizę, buvo apskaičiuotas laikas, per kurį pažaidos tikimybė viršija 50 %. Remiantis potenciometriniais matavimais ir deformacijų duomenimis, abiejų bandinių prognozuojama eksploatavimo trukmė buvo labai panaši ir svyravo nuo 28 iki 30,6 dienų. Tačiau prognozė, pagrįsta konduktometrinių matavimų duomenimis, buvo žymiai ilgesnė (64,8 ir 87,3 dienos). Tyrime padaryta išvada, jog dėl dirbtinai pagreitinotos korozijos konduktometrinių matavimų duomenys buvo pernelyg nepastovūs, todėl šis metodas nėra patikimas ilgalaikiam prognozavimui, kai naudojami pagreitinoti bandymai, o potencialų ir deformacijų duomenys yra stabilesni.

Baigtinių elementų analizė

Baigtinių elementų metodas yra daug sudėtingesnis, tačiau ir galingesnis prognozavimo įrankis, leidžiantis imituoti pačius fizikinius ir cheminius procesus.

Tyrime [6] buvo naudojama „COMSOL Multiphysics“ programinė įranga, siekiant sumodeliuoti CO₂ dujų difuziją ir cheminę reakciją betone, tiriant karbonizacijos sukeltą koroziją. Sukurtas 100 mm skersmens ir 50 mm aukščio cilindro modelis sėkmingai imitavo karbonizacijos greitį ir parodė, kad prognozuojamas korozijos pradžios laikas, remiantis modeliu, labai gerai atitiko eksperimentinius duomenis (paklaida ~17 %), priešingai nei supaprastinti empiriniai metodai, kurių paklaida siekė 36–45 %.



9 pav. a) 3D geometrinis modelis, b) tinkleliu padengtas 2D modelis 10 cm skersmens, 5 cm aukščio [6]

Kitame tyrime [12] buvo sukurtas sudėtingesnis, „Daugelio jonų reaktyvios korozijos modelis“. Šis modelis vienoje sistemoje įvertina vienalaikį chloridų, sulfatų ir karbonizacijos poveikį, imituodamas 500 mm skersmens gelžbetoninį polį. Modelis yra pagrįstas gyliu, t. y., jis atsižvelgia į skirtingas aplinkos sąlygas įvairiose polio zonose (atmosferinėje, purslų ir pan.). Modelio prognozės buvo patvirtintos lyginant jas su realių, iki 24 metų eksploatuotų konstrukcijų duomenimis, ir parodė labai gerą atitikimą. Šis modelis leido ne tik nustatyti kritiškiausią zoną (purslų), bet ir kiekybiškai įvertinti, kaip įvairūs projektiniai sprendimai prailgina polio eksploatavimo trukmę.

2.8. Ilgaamžiškumo didinimo strategijos ir jų efektyvumas

Analizuotuose literatūros šaltiniuose buvo nagrinėjamos įvairios strategijos, skirtos padidinti gelžbetoninių konstrukcijų ilgaamžiškumą ir atsparumą agresyviai aplinkai. Šias strategijas galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes: specialių priedų naudojimą betone ir projektinių sprendimų optimizavimą.

Savaime užsigydantys ir kiti specialūs priedai

Specialūs priedai yra vienas iš moderniausių būdų pagerinti betono savybes. Jų efektyvumas priklauso nuo priedo tipo, aplinkos sąlygų ir pažeidos pobūdžio.

I. Kristaliniai hidroizoliaciniai priedai

Šie priedai veikia formuodami netirpius kristalus, kurie užkemša betono poras ir mikroplyšius. Tyrimas [3] parodė, kad 1,5 % kristalinio priedo dozė sumažino chloridų difuzijos koeficientą 20 % ir išsaugojo betono stiprį gniuždant po agresyvių ciklų (stiprio praradimas tik 5,1 %, palyginti su 23,8 % be priedo). Tačiau kitame tyrime [9] gauti prieštaringi rezultatai, nurodantys, kad kristalinis priedas padidino vandens įmirkį ir skverbimąsi. Pastarajame tyrime [9] nustatyta, kad nors kristalinis priedas ir ne visada geriausiai stabdo chloridų skverbimąsi, jis yra vienintelis iš tirtų priedų, kuris efektyviai apsaugojo armatūrą nuo korozijos siauruose (100 μm) plyšiuose, ypač esant palankioms sąlygoms užsigydyti.

II. Bakterijų pagrindo priedai

Šie priedai naudoja bakterijas kalcio karbonatui gaminti ir taip užpildyti plyšius. Tyrimas [9] nustatė, kad bakterinis priedas, esant palankioms sąlygoms, pasižymėjo išpučiančiu gebėjimu stabdyti

chloridų skverbimąsi siauruose plyšiuose (sumažino 68 %). Tačiau, nepaisant gero vizualinio plyšių užpildymo, šis priedas neapsaugojo armatūros nuo korozijos.

III. Pucolaniniai priedai (šlakas ir pelenai)

Tyrimas [11] įrodė, kad cementiniai skiediniai su šlako (CEM III) ir pelenų (CEM IV) priedais yra žymiai atsparesni sulfatų atakai nei įprastas portlandcementis (CEM I). Pelenų cemento skiedinys prarado tik 4 % stiprio, palyginti su 15 % portlandcementinio bandinio stiprio praradimu.

Projektiniai sprendimai

Be specialių priedų, ilgaaamžiškumą galima ženkliai padidinti optimizuojant pačios konstrukcijos ir jos komponentų parametrus.

I. Betono sudėtis ir poringumas

Tai yra pats svarbiausias veiksnys. „Daugelio jonų korozijos modeliavimas polyje“ [12] tyrime sukurtas skaitmeninis modeliavimas parodė, kad naudojant mažo poringumo, didelio naudingumo betoną, polio eksploataavimo trukmę galima prailginti net iki 80 %, palyginti su standartiniu betonu. Mažesnis v/c santykis taip pat tiesiogiai lemia mažesnę korozijos riziką, ką patvirtino ir kito tyrimo [8] potenciometriniai matavimai.

II. Armatūros skersmuo

Tai yra dažnai nepakankamai įvertinamas, bet labai efektyvus metodas. Tyrime [12] nustatyta, kad kiekvienas 4 mm armatūros skersmens padidinimas prailgina eksploataavimo trukmę 15–20 %. Pakeitus 16 mm strypus į 28 mm, eksploataavimo trukmė gali pailgėti net 55 %, nes didesnis strypas turi didesnę „atsargos“ plotą, kol bus pasiekta kritinė korozijos pažaidos riba.

III. Betono apsauginio sluoksnio storis

Storesnis apsauginis sluoksnis yra efektyvus būdas atitolinti korozijos pradžią. Tyrime [12] nustatyta, kad kiekvienas 10 mm papildomo sluoksnio storio padidina eksploataavimo trukmę 8–10 %. Kitas tyrimas [8] taip pat patvirtino, kad pavyzdžiuose su 60 mm sluoksniu korozijos potencialas buvo žymiai mažesnis nei su 30 mm sluoksniu, tačiau pabrėžė, kad atsiradus plyšiui, šio sluoksnio efektyvumas sumažėja.

2.9. Literatūros analizės išvados

Kritinės zonos ir veiksniai

Tyrimai [1] [12] parodė, kad agresyviausia ir didžiausią riziką kelianti polio dalis yra purslų arba potvynių-atoslūgių zona, kurioje kintantis drėgmės lygis ir deguonies prieinamumas sukuria idealias sąlygas korozijai. Tuo tarpu kitas tyrimas [8] kiekybiškai patvirtino, kad didėjantis plyšio plotis, aukštas vandens ir cemento santykis bei mažas apsauginio sluoksnio storis yra pagrindiniai veiksniai, dramatiškai didinantys korozijos riziką.

Vertinimo metodų apribojimai

Nors potenciometrinių matavimų metodas yra plačiai naudojamas korozijos rizikai vertinti, jo standartinė interpretacija yra nepatikima ir klaidinanti specifinėmis sąlygomis.. Tyrimai [5] [6] įrodė, kad tiek visiško panardinimo (dėl sumažėjusios varžos), tiek karbonizacijos (dėl padidėjusios varžos) atveju standartinės potencialų ribos yra netinkamos. Daug patikimesnis korozijos pradžios indikatorius yra staigus potencialo kritimas. Konduktometrinių matavimų metodas yra daug pažangesnis metodas, leidžiantis kiekybiškai įvertinti korozijos greitį ir mikrostruktūros pokyčius, tačiau jo rezultatai gali būti nepastovūs taikant pagreitintus bandymus [1].

Ilgamžiškumo didinimo strategijos

Efektyviausia strategija ilgamžiškumui užtikrinti yra integruotas projektinis požiūris, apimantis mažo poringumo betoną (pvz., HPC), didesnio skersmens armatūrą ir pakankamą apsauginį sluoksnį [12]. Specialūs priedai, tokie kaip pucolanai [11] ar kristalinės medžiagos [3] [4], gali ženkliai padidinti betono atsparumą cheminėms atakoms.

Kristalinių priedų poveikis poringumui

Nors vieni tyrimai [3], remdamiesi GIP analize, rodo, kad kristaliniai priedai mažina betono poringumą, kiti tyrimai [4], remdamiesi vandens įmirkio testais, gavo priešingus rezultatus – poringumo padidėjimą. Tai rodo, kad šių medžiagų poveikis yra sudėtingas ir reikalauja tolesnių tyrimų.

Skverbimosi stabdymas lyginant su korozijos prevencija

Tyrimas [4] aiškiai parodė, kad priedas, kuris efektyviai stabdo chloridų skverbimąsi (bakterinis), nebūtinai apsaugo armatūrą nuo korozijos. Tai įrodo, kad vien tik atsparumo vandens ar jonų skverbimuisi vertinimo nepakanka – būtina tiesiogiai tirti patį korozijos procesą.

Šio tyrimo tikslas ir pagrindimas

Atsižvelgiant į literatūroje nustatytus prieštaravimus ir poreikį atlikti kompleksinius tyrimus, šio darbo pagrindinis tikslas – atlikti visapusišką eksperimentinį tyrimą, siekiant įvertinti ir palyginti kristalinio hidroizoliacinio priedo efektyvumą apsaugant gelžbetoninius polius nuo korozijos, imituojant chemiškai aktyvaus gruntinio vandens sąlygas. Bus taikomas kompleksinis metodas, apimantis ne tik mechaninių savybių ir atsparumo vandens skverbimuisi vertinimą, bet ir tiesioginį korozijos proceso stebėjimą potenciometrinių matavimų metodu, siekiant nustatyti, ar priedas yra veiksmingas ne tik mažinant pralaidumą, bet ir realiai apsaugant armatūrą nuo korozijos.

3. Eksperimentinių bandymų metodologija

3.1. Tyrime naudotos medžiagos

3.1.1. Betonas

Visiems eksperimentinės dalies bandiniams gaminti buvo pasirinktas standartizuotas, gamykloje paruoštas cementinis sausas betonavimo mišinys „Briko C25“. Šis produktas parinktas siekiant užtikrinti maksimalų mišinio komponentų vienodumą ir pastovumą visuose bandiniuose, taip sumažinant galimas paklaidas, atsirandančias maišant betoną laboratorijos sąlygomis.

Pagal gamintojo techninę specifikaciją, mišinys atitinka C20/25 stiprio klasę, kai yra paruošiamas laikantis nurodytų proporcijų. Ši klasė, pagal standarto LST EN 206 [16] reikalavimus, nurodo, kad būdingasis cilindrinis stipris gniuždant po 28 parų turi būti ne mažesnis kaip 20 MPa, o būdingasis kubinis stipris – ne mažesnis kaip 25 MPa.

3.1.2. Armatūra

Visi betoniniai bandiniai buvo armuojami vienu centre išdėstytu 10 mm skersmens rifliuotu armatūros strypu. Panaudotas plienas atitiko B500B stiprio klasę pagal standarto LST EN 10080 [17] nuostatas. Rifliuotas strypo paviršius buvo pasirinktas siekiant užtikrinti gerą mechaninį sukibimą tarp plieno ir sukietėjusio betono. Vieno centrinio strypo naudojimas leido sukurti aiškia ir lengvai išmatuojamą elektrocheminę sistemą, kurioje korozijos procesai yra koncentruoti ir nekomplikuojami kelių arti esančių strypų tarpusavio sąveikos, taip užtikrinant tikslesnius ir lengviau interpretuojamus tyrimo rezultatus.

3.1.3. Kristalinis priedas

Dalis bandinių buvo formuojami į sudėtį pridedant kristalinio hidroizoliacinio priedo „Sika WT-200P“. Remiantis gamintojo nurodymais, priedo kiekis 1 m³ betono – 3,5 kg. Priedo veikimo principas yra pagrįstas aktyvių cheminių medžiagų reakcija su drėgme ir cemento hidratacijos produktais betono kapiliarinėje sistemoje. Šios reakcijos metu formuojasi netirpūs kristalai, kurie užauga betono porose bei kapiliaruose, taip juos užblokuodami. Šis priedas taip pat leidžia betonui savaime „užgydyti“ mikroplyšius iki 0,4 mm pločio, kadangi, patekus vandeniui, kristalizacijos procesas plyšyje aktyvuojasi iš naujo.

3.1.4. Organikos priedas

Eksperimentiniuose gelžbetoniniuose mikropoliuose, siekiant ištirti alternatyvių ir tvarių medžiagų panaudojimo galimybes, buvo naudotas specialiai sukurtas organinis priedas, kurios pagrindą sudaro granuliuotas užpildas, pagamintas iš įvairių rūšių medienos pjuvenų. Siekiant užtikrinti granuliuotą stabilumą ir pagerinti jų sukibimą su cementu, pjuvenos buvo surištos naudojant skalūninių pelenų rišiklį. Paruoštos organikos granulės buvo maišomos su standartiniu portlandcemenčiu CEM II/A-LL, laikantis masės santykio 10:5 (dvi dalys organikos vienai daliai cemento).



10 pav. Organikos granulės naudotos bandymuose

3.1.5. Plastiklis

Siekiant pagerinti visų betono mišinių technologines savybes ir užtikrinti jų apdirbamumą, visuose eksperimentiniuose bandiniuose buvo naudotas betono plastiklis. Šiam tikslui pasirinktas produktas „Sika Plastiment BV-12“, kuris yra vandenį redukuojantis / plastifikuojantis priedas, atitinkanti standarto LST EN 934-2 [18] reikalavimus. Pagrindinė šio plastifikuojančio priedo funkcija – padidinti šviežio betono mišinio plastiškumą ir slankumą, leidžiant sumažinti vandens kiekį, tačiau nesumažinant galutinio produkto stiprumo ir ilgaamžiškumo savybių. Vienodo plastifikatoriaus naudojimas visuose bandiniuose leido užtikrinti, kad mišinių apdirbamumo skirtumai būtų minimalūs, taip sudarant sąlygas objektyviai palyginti kitų, tyrime analizuojamų, komponentų įtaką.

3.2. Bandymo terpės

Pasibaigus 28 parų standartiniam kietėjimo laikotarpiui, paruošti bandiniai buvo perkelti į dvi skirtingas poveikio terpes, siekiant įvertinti ir palyginti jų elgseną neutraliomis bei agresyviomis sąlygomis.

Pirmoji terpė buvo vanduo. Ši aplinka leido stebėti normalų betono savybių vystymąsi ir veikė kaip kontrolinis pagrindas, su kuriuo buvo lyginami agresyvios aplinkos paveiktų bandinių rezultatai.

Antroji, agresyvi terpė, buvo 3 % masės natrio chlorido (NaCl) druskos tirpalas, paruoštas 19,4 litro vandens ištirpinant 0,6 kg druskos. Ši koncentracija pasirinkta siekiant imituoti chloridais prisotintą aplinką, būdingą jūrinėms konstrukcijoms, ir paspartinti korozijos procesus. Tokios pagreitinto bandymo sąlygos leidžia per trumpesnę laboratorinę laikotarpį įvertinti tiriamų medžiagų atsparumą chloridų sukeltai degradacijai.



11 pav. Pirmojoje terpėje laikomi bandiniai (kairėje) ir antrojoje terpėje laikomi bandiniai (dešinėje)

3.3. Bandiniai

Baigiamojo darbo eksperimentinei daliai buvo numatyti 75 mm skersmens ~450 mm aukščio gelžbetoniniai cilindrai. Mikropolius atitinkantys gaminiai buvo keturių skirtingų tipų – betoniniai, betoniniai su hidroizoliaciniu priedu, betoniniai su organika ir betoniniai bandiniai su hidroizoliaciniu ir organikos priedu. Bandinių sudėtys pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. Bandinių tipai ir jų sudėtys

Bandinio tipas	Sudėtis
Betoninis bandinys	1. 520 g. vandens, 2. 1 ml plastiklio, 3. 3,32 kg C25 betono mišinio.
Betoninis bandinys su hidroizoliaciniu priedu „Sika WT-200P“	1. 520 g. vandens, 2. 1 ml plastiklio, 3. 3,32 kg C25 betono mišinio, 4. 14 g. hidroizoliacinio priedo.
Betoninis bandinys su organikos priedu	1. 620 g. vandens, 2. 1 ml plastiklio, 3. 3,00 kg C25 betono mišinio, 4. 0,35 kg organinio užpildo.
Betoninis bandinys su organika ir hidroizoliaciniu priedu „Sika WT-200P“	1. 620 g. vandens, 2. 1 ml plastiklio, 3. 3,00 kg C25 betono mišinio, 4. 0,35 kg organinio užpildo, 5. 14 g. hidroizoliacinio priedo.

Betono mišiniai buvo formuojami naudojant 75 mm skersmens 450 mm aukščio PVC vamzdžius. Formuojant bandinius taip pat buvo naudojamas vienas 10 mm skersmens rifliuotos armatūros strypas, kuris montuojamas centriškai bandinio atžvilgiu. Kadangi bandiniai buvo laikomi skirtingose terpėse, kiekvienam bandiniui buvo priskirtas žymuo (žr. 5 lentelę).

5 lentelė. Bandinių žymėjimas

Bandinio žymuo	Bandinio sudėtis, laikymo terpė
1-BET	Gelžbetoninis bandinys, vandens terpė.
2-BET	Gelžbetoninis bandinys, druskinė terpė.
1-B+S	Gelžbetoninis bandinys su hidroizoliacija, vandens terpė.
2-B+S	Gelžbetoninis bandinys su hidroizoliacija, druskinė terpė.
1-B+O	Gelžbetoninis bandinys su organika, vandens terpė.
2-B+O	Gelžbetoninis bandinys su organika, druskinė terpė.
1-B+S+O	Gelžbetoninis bandinys su hidroizoliacija ir organika, vandens terpė.
2-B+S+O	Gelžbetoninis bandinys su hidroizoliacija ir organika, druskinė terpė.

Taip pat kiekvienam skirtingam betono mišiniui buvo formuojamos dvi prizmelės, lenkiamajam ir gniuždomajam stipriui matuoti. Prizmelių išmatavimai, svoris ir tankis pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Prizmelių charakteristikos

Bandinio žymuo	Aukštis, mm	Plotis, mm	Ilgis, mm	Tūris, dm³	Svoris, kg	Tanks, kg/m³
1-BET	34,61	40	160	0,222	0,495	2234,72
2-BET	34,1	40	160	0,218	0,488	2236,07
1-B+S	30,35	40	160	0,194	0,449	2311,57
2-B+S	32,54	40	160	0,208	0,476	2285,65
1-B+O	40,16	40	160	0,257	0,510	1984,25
2-B+O	39,33	40	160	0,252	0,493	1958,59
1-B+O+S	37,71	40	160	0,241	0,503	2084,16
2-B+O+S	38,75	40	160	0,248	0,520	2096,77



12 pav. Betoninės prizmelės, paruoštos lenkimo ir gniuždymo bandymams

3.4. Masės nuostoliai

Siekiant įvertinti betono degradaciją ir paviršiaus irimą, buvo atlikti masės nuostolių matavimai. Šiam bandymui buvo sukurtos pagreitinotos eksploatacinės sąlygos, kurios imituoja realų polinių pamatų, esančių įšalo zonoje, darbą, juos veikiant chloridais prisotintai aplinkai. Tyrimo metu bandiniai buvo dalinai panardinti į 3 % NaCl druskos tirpalą, taip atkartojant nuolatinį pamatų, esančių kontakto zonos su chloridais prisotintu gruntu, ar purslų, poveikį.



13 pav. Prieš bandymą atlikti bandinių masės matavimai (kairėje) ir bandymams paruošti gaminiai, prieš panardinant į druskos tirpalą ir pradedant bandymą (dešinėje)

Paruošti bandiniai buvo dvi savaites laikomi specialioje klimatinėje kameroje, kurioje buvo vykdomi agresyvūs šalčio ir atitirpimo ciklai: 24 valandas palaikant +20 °C temperatūrą, o kitas 24 valandas – –20 °C. Toks ciklas atitinka pačią griežčiausią XF4 poveikio klasę pagal LST EN 206 standartą,

kurios metu betono porose esantis druskingas vanduo užšąla, o besiplečiantis ledas sukelia vidinius įtempius ir progresuojantį paviršiaus irimą - pleišėjimą, sluoksniavimąsi. Masės nuostoliai buvo apskaičiuoti kaip masės skirtumas tarp pradinės bandinio masės, išmatuotos prieš pradedant bandymą, ir galutinės masės, kuri buvo apskaičiuota iš pradinės masės atimant visų atskilusių bandinio paviršiaus dalelių masę. Gautas rezultatas yra tiesioginis kiekybinis rodiklis, parodantis tiriamos betono sudėties atsparumą kombinuotam ir itin žalingam chloridų bei šalčio poveikiui.

4. Eksperimentinių bandymų rezultatai

4.1. Faktiniai bandinių duomenys

Nors bandiniai buvo formuojami 450 mm aukščio PVC vamzdžiuose, tačiau dėl betono susitraukimo kietėjant, faktinis bandinių aukštis buvo mažesnis (žr. 7 lentelę).

7 lentelė. Faktiniai bandinių duomenys

Bandinio žymuo	Skersmuo, mm	Aukštis, mm	Tūris, m ³	Svoris, kg	Tankis, kg/m ³
1-BET	75	450	0,199	4,232	2128,73
2-BET		460	0,203	4,275	2103,61
1-B+S		425	0,188	3,915	2085,12
2-B+S		420	0,186	3,850	2074,91
1-B+O		455	0,201	4,051	2015,29
2-B+O		460	0,203	4,046	1990,93
1-B+S+O		465	0,205	3,999	1946,64
2-B+S+O		440	0,194	3,854	1982,65



14 pav. Gelžbetoniniai bandiniai, išimti iš PVC formų

4.2. Gniuždomojo ir lenkiamojo stiprio rezultatai

Betoninių prizmelių gniuždomasis ir lenkiamasis stipris buvo tikrinamas po 28 dienų nuo gamybos. Gniuždomasis stipris nustatytas remiantis LST EN 12390-4 [19] standartu, lenkiamasis stipris nustatytas remiantis LST EN 12390-5 [20]. Pirmiausia buvo testuojamas bandinių lenkiamasis stipris, o toliau gniuždomasis stipris, naudojant abi perlenktos prizmelės dalis. Tiek gniuždomojo, tiek lenkiamojo stiprio nustatymui buvo naudojamas hidraulinis presas „Toni Technik“. Rezultatai pateikiami 8 lentelėje.

8 lentelė. Prizmelių charakteristikos

Bandinio žymuo	Lenkiamasis stipris, MPa	Gniuždomasis stipris (1), MPa	Gniuždomasis stipris (2), MPa	Gniuždomasis stipris (vidurkis), MPa
1-BET	2,32	38,44	36,36	37,4
2-BET	1,52	27,37	23,27	25,32
1-B+S	1,9	28,35	29,53	28,94
2-B+S	1,98	31,7	29,6	30,65
1-B+O	1,49	26,27	24,5	25,39
2-B+O	1,57	23,82	26,56	25,19
1-B+S+O	1,71	26,85	27,71	27,28
2-B+S+O	1,78	29,25	26,66	27,96



15 pav. Lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio nustatymui naudotas aparatas „Toni Technik“

4.3. Dirbtinis plyšio formavimas

Norint patikrinti betono ir jo priedų efektyvumą prieš chloridų sukeliama koroziją, prieš panardinant bandinius į skirtingas terpes, jie buvo lenkiami, iki kol atsivers plyšys.



16 pav. II-BET bandinio plyšys, prieš panardinimą į druskos terpę

Kadangi plyšys buvo reikalingas tik tam, kad patikrinti korozijos spartą, bei hidroizoliacinių priedų efektyvumą, plyšio plotis lenkimo metu nebuvo kontroliuojamas, ir elementas buvo lenkiamas iki takumo ribos. Cilindriniuose bandiniuose atsiradęs plyšys varijavo nuo 0,1 mm iki 1,5 mm (žr. 9 lentelę).

9 lentelė. Cilindrinių bandinių lenkiamasis stipris ir atsivėrusio plyšio plotis

Bandinio žymuo	1-BET	2-BET	1-B+S	2-B+S	1-B+O	2-B+O	1-B+S+O	2-B+S+O
Lenkiamasis stipris, MPa	7,7	7,5	12,9	10,9	8,4	6,2	9	9,4
Atsivėręs plyšys, mm	~1,00	~0,20	~0,30	~0,10	~0,25	~1,5	~0,1	~0,15

4.4. Potenciometriniai matavimai

Potenciometrinių matavimų metodas yra vienas iš plačiausiai taikomų neardomųjų bandymų metodų, skirtas nustatyti gelžbetoninėje konstrukcijoje esančios armatūros korozijos rizikos tikimybę. Šis metodas neparodo korozijos greičio, o tik indikuoja, ar sąlygos plieno paviršiuje yra palankios aktyviai korozijai vykti. Pirmiausia, sukuriamas elektrinis kontaktas su tiriamuoju armatūros strypu,

esančiu betono viduje. Tuomet ant drėgno betono paviršiaus pastatomas etaloninis elektrodas, kuris pasižymi labai stabiliu ir žinomu elektriniu potencialu. Armatūros strypas, veikiantis kaip vienas elektrodas, ir etaloninis elektrodas, veikiantis kaip antrasis elektrodas, yra prijungiami prie didelės varžos voltmetro, kuris ir išmatuoja potencialų skirtumą milivoltais. Kartojant matavimus skirtinguose betono paviršiaus taškuose, galima sudaryti potencialų žemėlapi, kuris vizualiai parodo labiausiai pažeidžiamas konstrukcijos vietas. Šie matavimai, ant kiekvieno bandinio, buvo atlikti penkiose skirtingose vietose, kurios tarp bandymų išliko ten pat.



17 pav. Potenciometrinų matavimų procesas

4.4.1. Matavimams naudojamas aparatas

Eksperimento metu armatūros korozijos rizikai stebėti ir vertinti buvo naudojamas daugiafunkcis gelžbetonio konstrukcijų analizatorius „Elcometer 331HM“. Pagrindinė šiame darbe taikyta prietaiso funkcija – potenciometriniai matavimai. Matavimams buvo naudojamas vario-vario sulfato etaloninis elektrodas, prijungtas prie prietaiso. Prietaisas iš karto pateikia skaitmeninę potencialo vertę milivoltais ir, remiantis integruotomis Amerikos standarto ASTM C876 [26] ribinėmis vertėmis, gali grafiškai atvaizduoti korozijos rizikos lygį, kas leidžia greitai ir patogiai įvertinti esamą būklę bei fiksuoti jos pokyčius laikui bėgant. Be potencialų matavimų, šis universalus prietaisas taip pat suteikia galimybę atlikti betono elektrinės varžos matavimus bei nustatyti armatūros padėtį ir apsauginio sluoksnio storį.



18 pav. Potenciometrinų matavimų matuoklis „Elcometer 331HM“

4.4.2. Vandens ir kitų veiksnių įtaka potenciometrinams matavimams

Vertinant potenciometrinų matavimų rezultatus, būtina atsižvelgti į tai, kad matuojama vertė yra ne tik tiesioginis korozijos proceso atspindys, bet ir kompleksinis rezultatas, kurį stipriai veikia betono būklė ir matavimo sąlygos. Iš visų veiksnių, vandens kiekis betono porose turi didžiausią ir esminę įtaką, kurią patvirtina ir atlikta literatūros analizė [5].

Pagrindinis vandens poveikio mechanizmas yra susijęs su betono elektrinės varžos pasikeitimu. Sausas betonas pasižymi didele elektrine varža, todėl jis veikia kaip izoliatorius, kuris susilpnina elektrocheminį signalą, keliaujantį nuo armatūros iki paviršiuje esančio elektrodo. Dėl šios priežasties sausame betone matuojamos potencialo vertės dažnai būna klaidingos. Priešingai, vandeniui prisotinto betono varža sumažėja, jis tampa geru elektros laidininku, todėl korozijos srovių sukuriamas potencialas yra užfiksuojamas daug tiksliau.

Antras svarbus vandens poveikio aspektas – ribotas deguonies prieinamumas. Visiškai vandeniui prisotintame betone deguonies difuzija iki armatūros paviršiaus yra labai lėta. Deguonis yra būtinas korozijos reakcijai vykti, todėl jo trūkumas gali sulėtinti patį korozijos greitį. Deguonies trūkumas taip pat sukelia koncentracijos poliarizaciją – reiškinį, kuris dirbtinai pastumia matuojamą potencialą į dar labiau neigiamą pusę.

Be šių pagrindinių paklaidų, taip pat būtina atsižvelgti ir į galimas matavimo paklaidas. Šiame darbe naudotas prietaisas „Elcometer 331HM“ rodė sisteminę instrumentinę paklaidą – maždaug -150 mV nulinio taško poslinkį. Taip pat egzistuoja ir atsitiktinės paklaidos, susijusios su matavimo procesu: netolygus paviršiaus sudrėkinimas, prastas elektros kontaktas ar temperatūros svyravimai.

Atsižvelgiant į vandens įtaką, sisteminę prietaiso paklaidą ir galimus atsitiktinius netikslumus, akivaizdu, kad absoliučių potenciometrinų matavimų verčių lyginimas su standartinėmis ASTM C876 ribomis gali būti klaidinantis. Dėl šių priežasčių šiame darbe buvo pasirinktas moksliskai patikimesnis duomenų interpretavimo būdas – santykinio potencialo pokyčio vertinimas, kai rezultatai yra lyginami su nustatyta bazine verte, o ne su fiksuotomis standartinėmis ribomis. Toks metodas leidžia sumažinti sisteminių paklaidų įtaką ir objektyviau palyginti skirtingų bandinių elgseną laike.

4.4.3. Potenciometrinį matavimų duomenys

Potenciometrinį matavimų bandymų ciklas truko 132 paras, per šį ciklą bandiniai buvo matuoti 6 kartus. Prieš matavimus, atliktus praėjus 97 paroms nuo bandymo pradžios, bandiniai buvo išdžiovinti ir tie cilindrai, kurie buvo laikomi vandenyje, toliau laikomi sausai, o likusieji dar dviem matavimams buvo laikomi toje pačioje 3% NaCl tirpalo terpėje.

4.4.3.1. Baziniai matavimai

Pirminiai duomenys, prieš įvertinant galimas paklaidas, parodė akivaizdų potencialo šuolį, per pirmas dvi savaites, o toliau rezultatai stabilizavosi. Nuo pirmo matavimo jau visi elementai buvo arba neaiškos rizikos zonoje arba jau 90% tikimybė, jog korozijos procesas prasidėjęs. 10 lentelėje pateikiami potenciometrinį matavimų rezultatai, vieno bandinio vidurkiai apskaičiuoti iš 5 skirtingų vieno cilindro matavimo vietų.

10 lentelė. Bandinių potenciometrinį matavimų rezultatai, skirtinguose bandymo ciklo etapuose

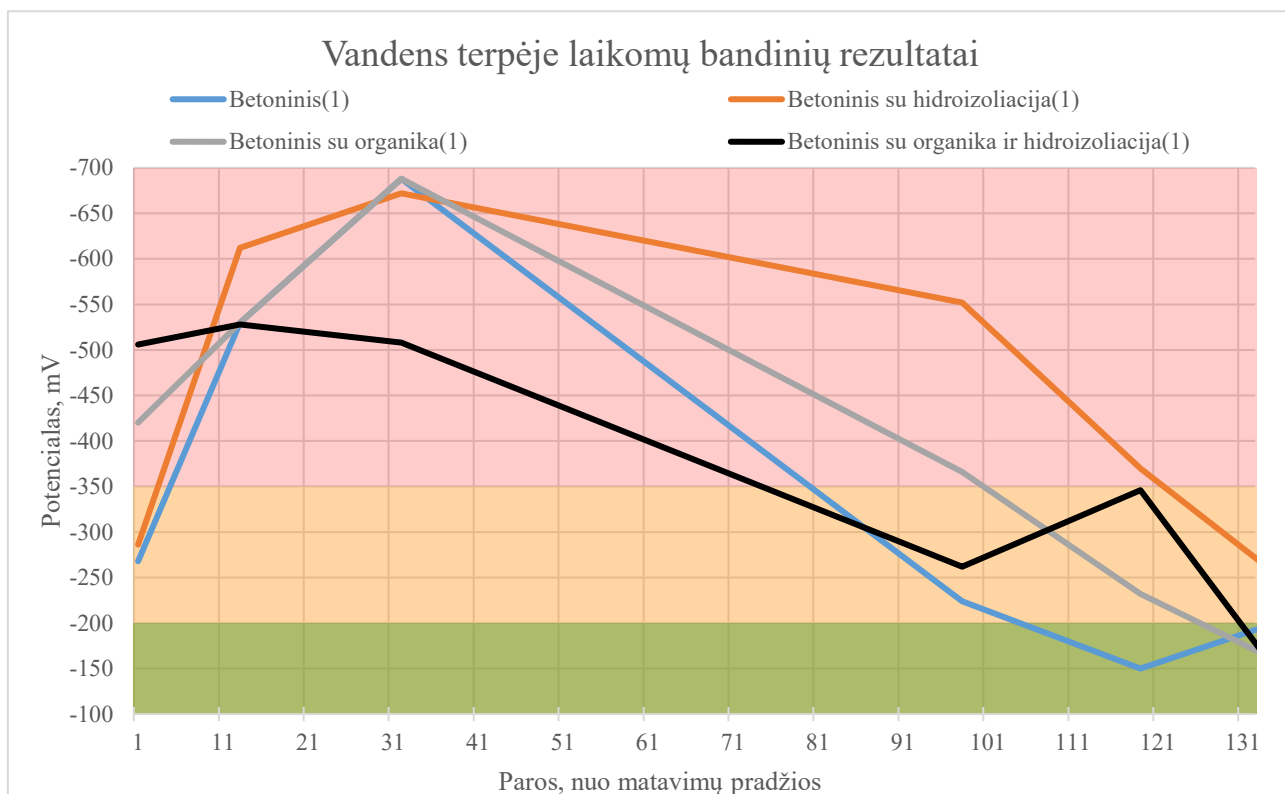
Bandinio žymuo	Matavimai - 1 para, mV	Matavimai – 12 para, mV	Matavimai – 31 para, mV	Matavimai – 97 para, mV	Matavimai – 118 para, mV	Matavimai – 132 para, mV
1-BET	-268	-530	-688	-224	-150	-194
2-BET	-482	-530	-776	-328	-536	-272
1-B+S	-286	-612	-672	-552	-370	-268
2-B+S	-288	-668	-804	-628	-548	-372
1-B+O	-420	-530	-688	-366	-232	-168
2-B+O	-460	-700	-752	-622	-600	-478
1-B+S+O	-506	-528	-508	-262	-346	-172
2-B+S+O	-444	-632	-726	-500	-608	-258



19 pav. Skirtingos potencialo matavimo vietos ant bandinių 1-B+S (viršuje) ir 2-B+S (apačioje)

Vertinant pirmosios terpės bandinius, iki jų išdžiovinimo, potenciometrinį matavimų duomenys beveik kiekvieno matavimo metu rodė 90 % tikimybę, jog korozija yra prasidėjusi, tačiau išdžiovinus

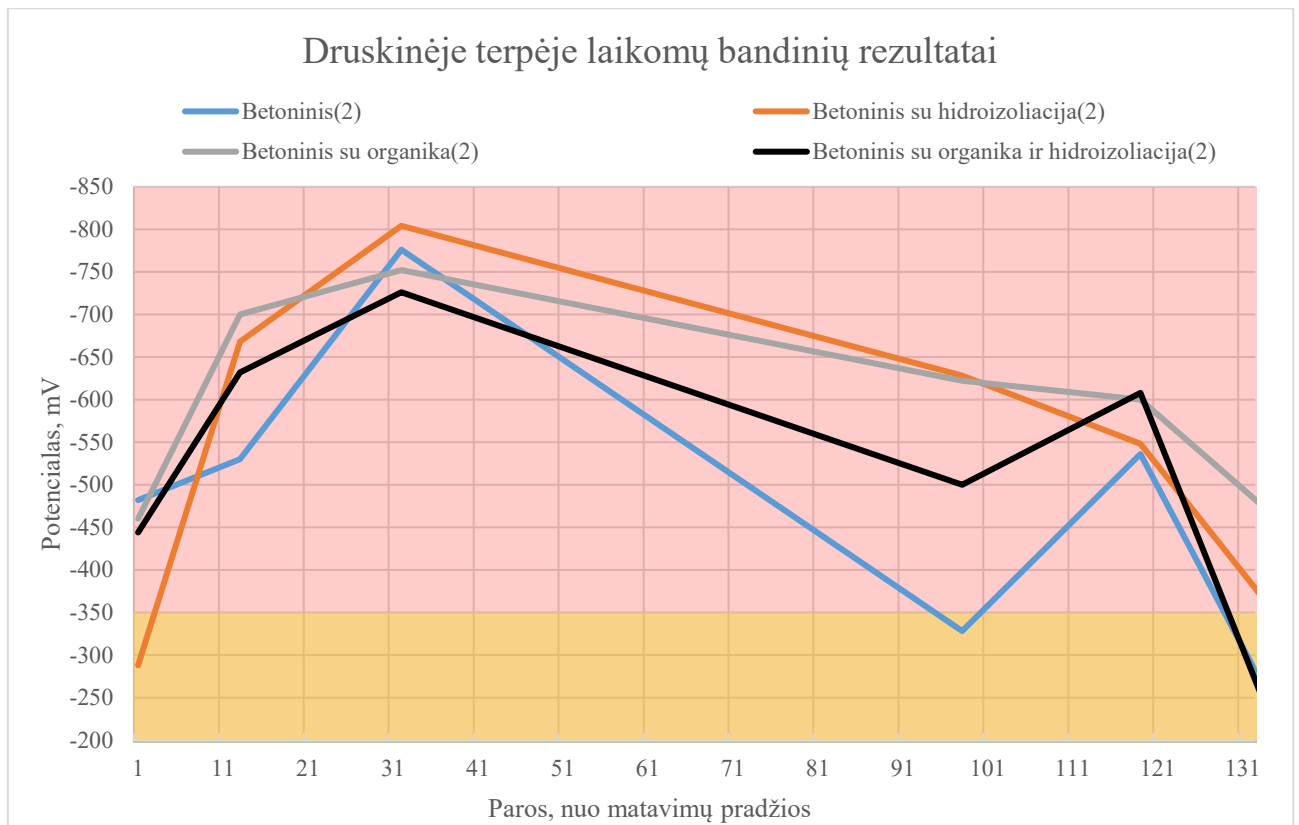
bandinius, gauti skaičiai realiau atspindėjo rezultatą. Visų bandinių, apart cilindro su organikos ir hidroizoliaciniu priedu, potencialo reikšmės, džiovinant, sumažėjo. Tai įvyko dėl dviejų pagrindinių priežasčių – išgaravus vandeniui iš betono porų, padidėjo jo elektrinė varža, todėl prietaisas nebefiksavo tikrojo elektrocheminio potencialo, o tik jo nuslopintą signalą ir išdžiūvus betonui, prie armatūros paviršiaus pateko daugiau deguonies, kuris laikinai pažeistas apsauginio sluoksnio vietas, taip sumažindamas bendrą korozijos rizikos lygį.



20 pav. Vandens terpėje laikomų bandinių potencialų rezultatai (netikslinti)

Tuo tarpu druskinėje terpėje laikomi bandiniai, iki išdžiovinimo, visi bandiniai iškart rodė 90% korozijos rizikos tikimybę. Taip yra, kadangi ištirpusi druska ženkliai padidino betono porose esančio vandens elektrinį laidumą, todėl užfiksuoti duomenys buvo šiek tiek didesni, nei turėjo faktiškai būti. Remiantis teoriniais duomenimis, didelė chlorido jonų koncentracija druskos tirpale turėjo greitai prasiskverbti į betono poras ir agresyviai suardyti apsauginį pasyvųjį sluoksnį ant armatūros paviršiaus, taip iškart inicijuodama aktyvų korozijos procesą, tačiau vėliau bandinius perpjovus plyšio vietoje, korozijos ant armatūros nebuvo pastebėta.

Remiantis rezultatais taip pat pastebimas antrinis potencialų šuolis 118 paros, nuo bandymų pradžios, matavimuose. Šis padidėjimas įvyko dėl antrinio bandinių drėkinimo, kuris buvo daromas tarp tos dienos ir praėjusių matavimų. Antrinis cilindro drėkinimas puikiai parodė jau prieš tai minėtą teoriją, jog išgaravus vandeniui iš betono porų, jo elektrinė varža didėja, o potenciometriniai matavimai rezultatai artėja prie nulio.



21 pav. Druskinėje terpėje laikomų bandinių potencialo rezultatai (netikslinti)

4.4.3.2. Patikslinti matavimai, įvertinus įvairias paklaidas

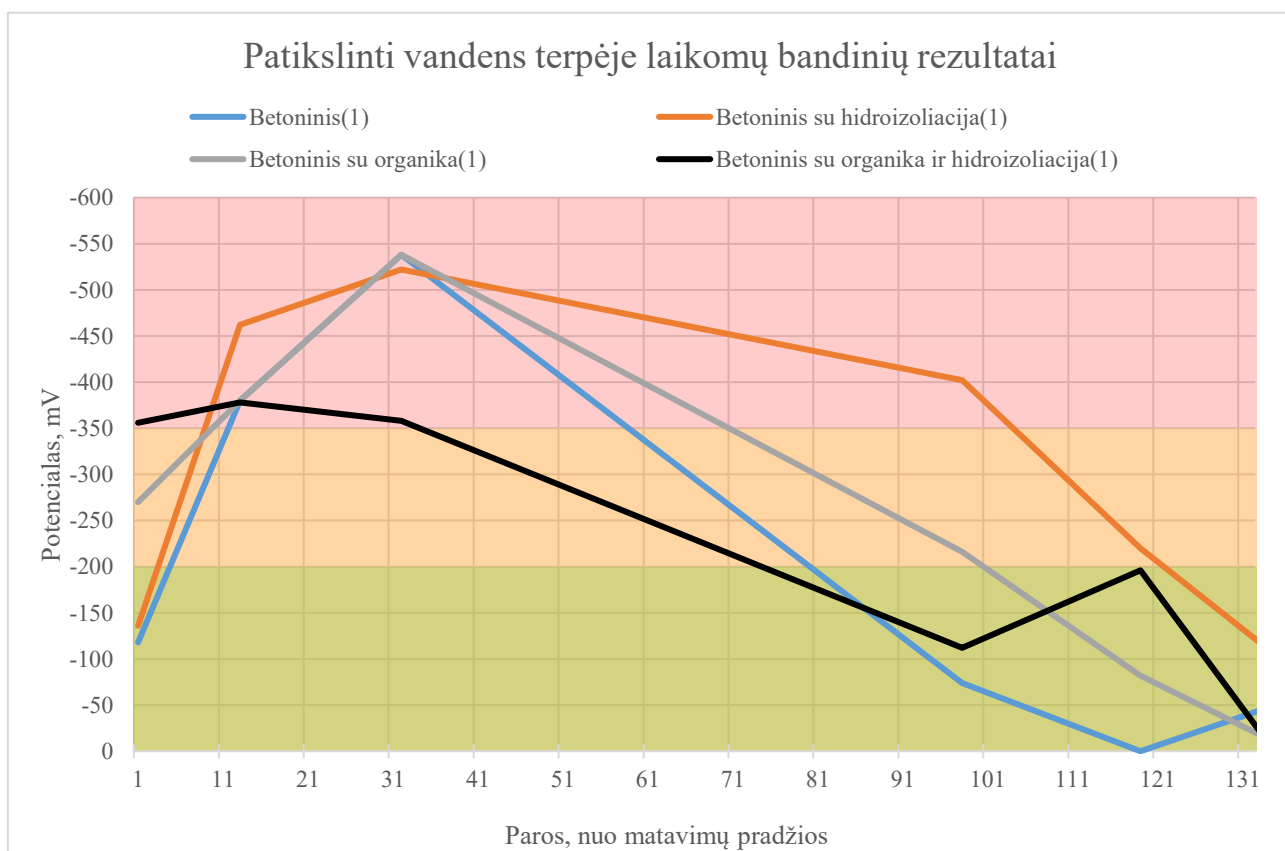
Patikslintiems matavimams buvo atsižvelgta į veiksnius, kurie iškreipė potencialo vertes ir apsunkino jų interpretaciją. Atsižvelgiant į nustatytą sisteminę prietaiso paklaidą ir mokslinėje literatūroje [5] [6] plačiai aprašytą aplinkos drėgmės bei betono varžos įtaką, buvo nuspręsta netaikyti tiesioginio rezultatų vertinimo pagal absoliučias ASTM C876 standarto ribas. Vietoj to, buvo pasirinktas patikimesnis santykinės analizės metodas, pagrįstas potencialo pokyčio skaičiavimu nuo nustatytos bazinės vertės.

Remiantis analizuota literatūra, ką tik sukietėjusio, nepažeisto ir agresyvioje aplinkoje nebuvusio gelžbetoninio bandinio potenciometriniais matavimais apskaičiuoto potencialo vertė turėtų svyruoti nuo -50 mV iki -200 mV, matuojant vario-vario sulfato elektrodu. Kaip bazinis atskaitos taškas $E_{bazinis}$ buvo pasirinktas -150 mV. Pagal ASTM C876 [26] standartą ši vertė atitinka labai mažą korozijos rizikos ir simbolizuoja stabilią, pasyvią armatūros būseną, kuri turėtų būti būdinga naujam, nepažeistam betonui. Taip pat atsižvelgiant į pirminį bandinių matavimą, parinktas $E_{bazinis}$ yra logiškas atskaitos taškas. Visi tolimesni eksperimento matavimų rezultatai buvo perskaičiuoti į potencialo kritimo ΔE vertes, atimant bazinę vertę iš kiekvieno išmatuoto rodmenio pagal formulę $\Delta E = E_{išmatuotas} - E_{bazinis}$. Toks duomenų normalizavimas leidžia objektyviai palyginti skirtingų bandinių elgseną laikui bėgant, o korozijos aktyvumas vertinamas pagal ΔE dydį, kur reikšmingas neigiamas pokytis indikuoja stabilios korozijos pradžią.

11 lentelė. Patikslinti bandinių potencialų matavimų duomenys

Bandinio žymuo	ΔE matavimai – 1 para, mV	ΔE matavimai – 12 para, mV	ΔE matavimai – 31 para, mV	ΔE matavimai – 97 para, mV	ΔE matavimai – 118 para, mV	ΔE matavimai – 132 para, mV
1-BET	-118	-380	-538	-74	0	-44
2-BET	-332	-380	-626	-178	-386	-122
1-B+S	-136	-462	-522	-402	-220	-118
2-B+S	-138	-518	-654	-478	-398	-222
1-B+O	-270	-380	-538	-216	-82	-18
2-B+O	-310	-550	-602	-472	-450	-328
1-B+S+O	-356	-378	-358	-112	-196	-22
2-B+S+O	-294	-482	-576	-350	-458	-108

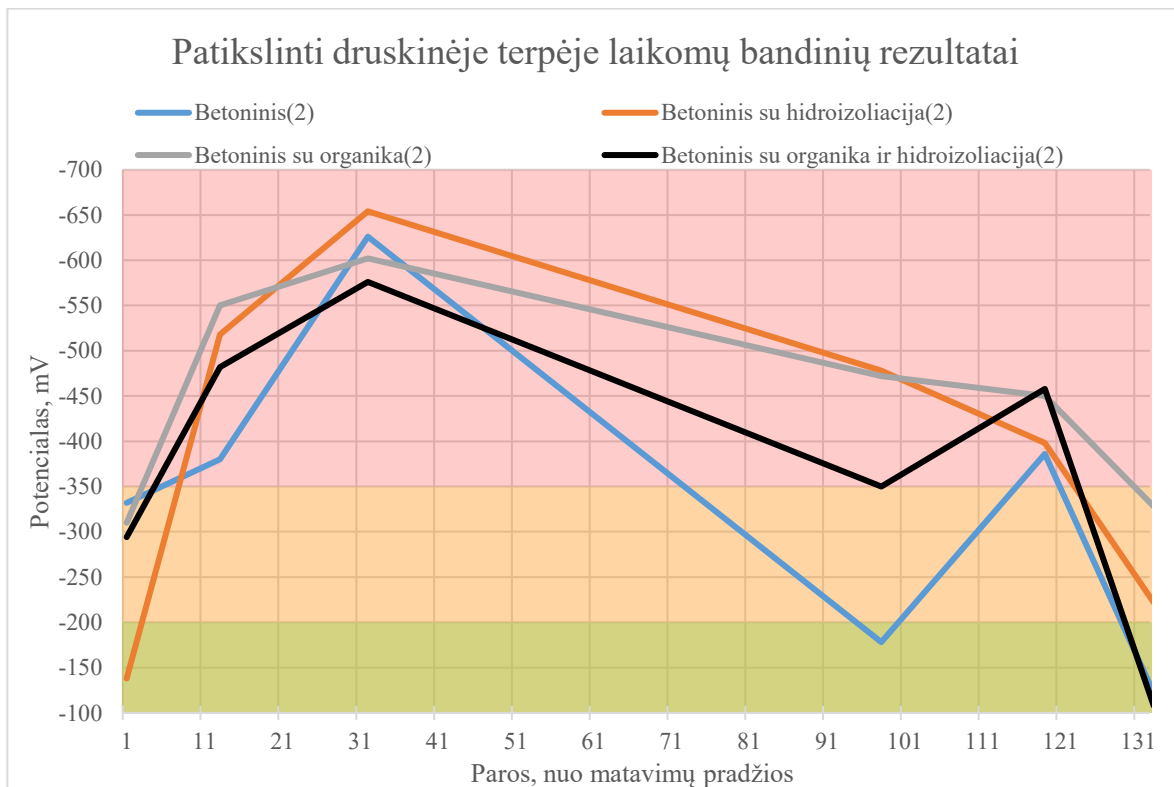
Įvertinant patikslintus duomenis, potenciometrinį matavimų duomenys, iki išdžiovinimo, tiksliau nurodo korozijos lygio tikimybės pasikeitimą bandiniuose. Tarp matavimų, atliktų 1 parą nuo bandymų pradžios ir 31 parą, potencialo šuolis svyruoja nuo 268 iki 420 mV, neįvertinant bandinio su hidroizoliaciniu priedu ir organika. Remiantis šiais duomenimis galima nustatyti, jog riba, kurioje korozijos tikimybė viršija 90 % prasidėjo jau nuo antrojo matavimo. Šie rezultatai taip pat parodo, jog organikos ir hidroizoliacinio priedo bendras naudojimas vandens terpėje puikiai sustabdė potencialo mažėjimą.



22 pav. Vandens terpėje laikomų bandinių potencialo rezultatai (tikslinti)

Kita vertus, druskinėje terpėje, iki išdžiovinimo, rezultatai pasiskirstę labai įvairiai. Gelžbetoninio bandinio, be priedų, didžiausias šuolis įvyko tarp 2 ir 3 matavimų – 250 mV, tuo tarpu kitų bandinių

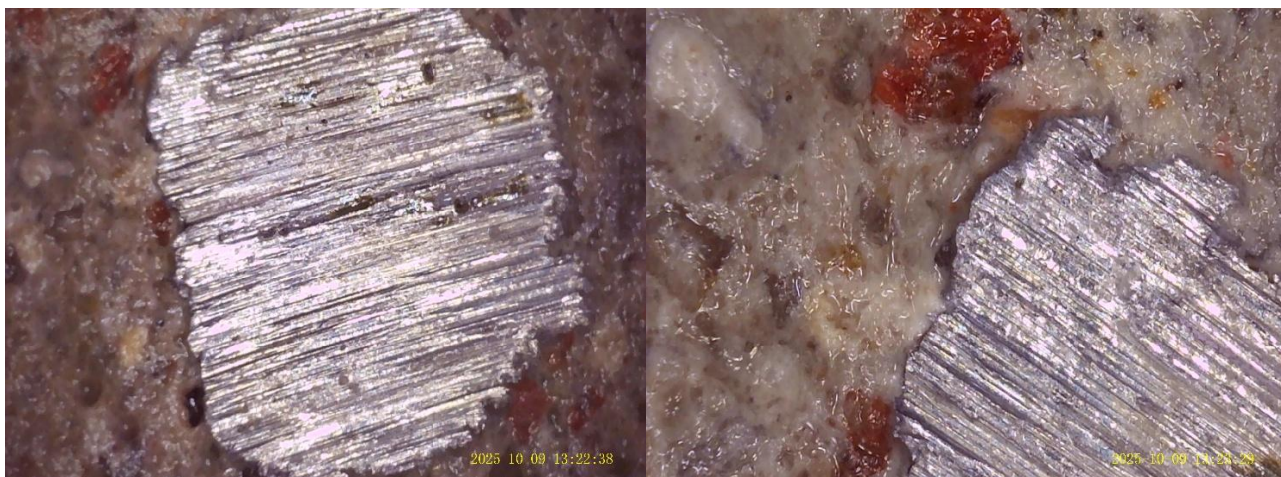
potencialo šuolis įvyko iškart po pirmojo bandymo, šuolio reikšmė svyravo nuo 180 iki 380 mV, tačiau stabilizavosi tęsiant bandymą. Remiantis šiais duomenimis galima teigti, jog hidroizoliaciniai ir organikos priedai betone, pradinėje stadijoje, pakeičia betono mikrostruktūrą taip, kad vanduo, ar kiti skysčiai, lengviau prasiskverbia per betono poras, tačiau vėliau puikiai sulaiko įsiskverbusį vandenį, taip mažinant korozijos rizikos tikimybę.



23 pav. Druskinėje terpėje laikomų bandinių potencialo rezultatai (tikslinti)

4.5. Vizualinės betono ir armatūros pažaidos po bandymo

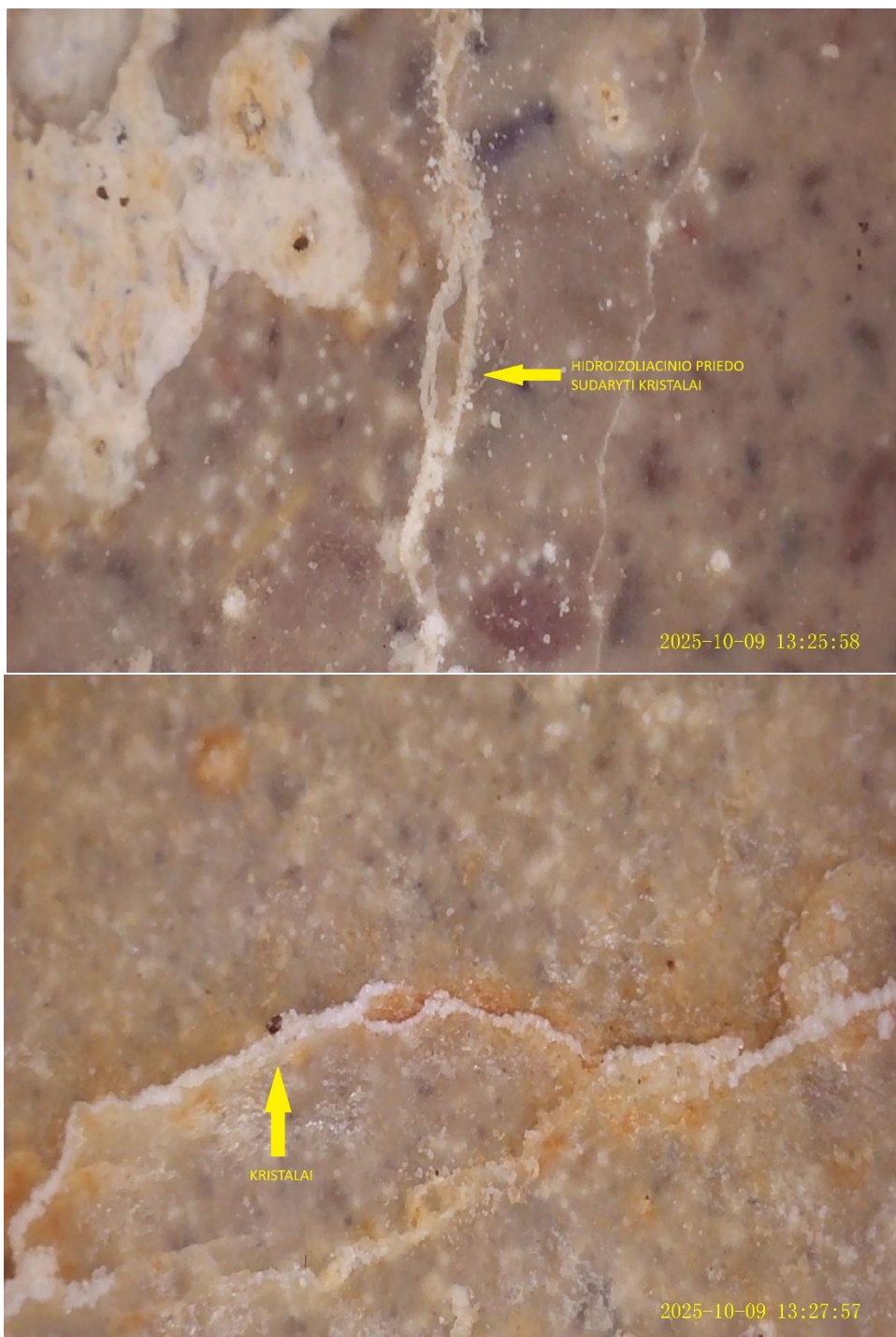
Atlikus visus potenciometrinius matavimus dalis bandinių buvo supjaustyti, o nuo kitų cilindų buvo ardomas betonas, iki armatūros, norint vizualiai įvertinti armatūros korozijos lygį. Supjaustyti buvo bandiniai I-B+S, I-B+S+O, II-B+S ir II-B+S+O. Nei viename iš supjaustytų bandinių nebuvo pastebėtas korozijos poveikis ant armatūros.



24 pav. Armatūros ir betono kontakto vieta (bandiniai I-B+S, I-B+S+O)

4.6. Kristalų formavimasis ir efektyvumas

Bandinių vizualinė analizė buvo svarbi tiriant bandinius I-B+S, I-B+S+O, II-B+S ir II-B+S+O, kurių sudėtyje buvo naudotas kristalinis hidroizoliacinis priedas „Sika WT-200 P“. Priedo kiekis, remiantis gamintojo rekomendacijomis, sudarė ~2,0 % viso rišiklio (cemento) masės. Priedo aktyvacijos metu betono porose ir mikroplyšiuose pradeda augti netirpios, adatos arba voratinklio formos kristalinės struktūros. Šie naujai susidarę kristalai fiziškai uždaro anksčiau buvusias tuštumas ir kapiliarus. Šie kristalai yra sudėtingi cheminiai junginiai, kurių pagrindą sudaro kalcis, silicis ir deguonis, o ne tiesiog išsikristalizavusi druska.



25 pav. Bandiniuose I-B+S+O (apačioje) ir II-B+S (viršuje) susidarę plyšius uždarantys kristalai

Šis porų užpildymo ir užsandarinimo mechanizmas yra pagrindinė priežastis, kodėl kristaliniai priedai sumažina betono vandens pralaidumą ir ženkliai sulėtina agresyvių jonų, tokių kaip chloridai, skverbimąsi link armatūros. Be to, šis procesas yra atsinaujinantis: atsiradus naujam mikroplyšiui ir į jį patekus vandeniui, kristalizacijos reakcija gali aktyvuotis iš naujo, suteikdama betonui ribotas savaiminio užsigydymo savybes.

4.7. Masės nuostolių rezultatai

Masės nuostolių bandymas truko 14 parų, per kurias buvo cikliškai šildomi ir šaldomi bandiniai, dalinai užmerkti į 3 % druskos tirpalą. 12 lentelėje pateiktos bandinių masės prieš ir po bandymo, bei masės nuostoliai išreikšti procentais.

12 lentelė. Bandinių masės nuostoliai

Bandinio žymuo	Pradinė bandinio masė, g	Atskilusių detalių masė, g	Galutinė bandinio masė, g	Masės nuostoliai, %
1-B+S	1386,53	25,66	1360,87	1,85
1-B+O	1278,04	78,73	1199,31	6,16
2-BET	1383,55	27,27	1356,28	1,97
2-B+O	1325,42	24,83	1300,59	1,87

Analizuojant gautus bandymų rezultatus, visi bandiniai pasirodė panašiai, apart gaminio su organikos priedu. Hidroizoliacinis priedas, lyginant su bandiniu be priedu, pasirodė tik ~0,1 % geriau, todėl jo įtaka, tokiomis sąlygomis, neturėtų būti vertinama, tačiau žvelgiant į gaminio su organika masės nuostolius, galima teigti, jog tokios sudėties gelžbetoninės požeminės konstrukcijos nėra ilgalaikiška opcija.



26 pav. Nuvalyti bandiniai, po 14 dienų šaldymo ir šildymo ciklų

Išvados

1. Visi priedai ir betono sudėtys sėkmingai apsaugojo armatūrą nuo vizualiai matomos korozijos. Išardžius bandinius po eksperimento, korozijos ant armatūros paviršiaus nebuvo pastebėta. Tai rodo, kad per tyrimo laikotarpį, nepaisant agresyvių sąlygų, nei viename bandinyje nebuvo pasiektas korozijos pažaidos etapas, o C20/25 klasės betonas, su pakankamu apsauginiu sluoksniu, suteikė efektyvią apsaugą.
2. Potenciometriniai matavimai atspindėjo ne koroziją, o padidėjusią korozijos riziką. Nors fizinės korozijos nebuvo, matavimai parodė ženklų potencialo kritimą bandiniuose, laikytuose NaCl tirpale. Tai reiškia, kad metodas parodė pasyviojo sluoksnio pažeidžiamumo padidėjimą dėl chloridų jonų skverbimosi į betono poras. Neigiamos potencialo vertės indikuoja, kad buvo sudarytos termodinaminės sąlygos korozijai prasidėti, nors praktiškai ji dar nebuvo spėjusi išsivystyti.
3. Kristalinis hidroizoliacinis priedas „Sika WT-200 P“ efektyviausiai sumažino korozijos riziką. Nors visi bandiniai apsaugojo armatūrą, bandinys 2-B+S agresyvioje terpėje demonstravo mažiausią potencialo kritimą ΔE , lyginant su bandiniu 2-BET. Tai rodo, kad kristalinis priedas sukūrė tankesnę betono mikrostruktūrą, kuri efektyviausiai sulėtino chloridų jonų skverbimąsi iki armatūros paviršiaus ir taip labiausiai sumažino korozijos riziką.
4. Organinis priedas ženkliai padidino korozijos riziką. Bandinys 2-B+O agresyvioje terpėje parodė patį didžiausią potencialo kritimą ΔE , indikuojantį aukščiausią korozijos riziką. Nors vizualios korozijos nebuvo, išmatuotos potencialo vertės leidžia daryti prielaidą, kad šio priedo naudojimas sukūrė chemiškai agresyvesnę aplinką prie armatūros, kuri, ilgiau eksploatuojant, galėtų lemti žymiai greitesnę degradaciją, lyginant su įprastu betonu.
5. Potencialo pokyčio kriterijus yra tinkamas korozijos rizikos laipsniui vertinti. Eksperimentas patvirtino, kad potenciometriniai matavimai yra jautrūs ne tik pačiai korozijai, bet ir jos rizikos pokyčiams. Potencialo pokyčio ΔE analizė, net ir nesant vizualios korozijos, leido aiškiai suskirstyti bandinius pagal jų atsparumą ir objektyviai įvertinti skirtingų priedų efektyvumą mažinant korozijos riziką.
6. Didžiausias masės nuostolis užfiksuotas bandinyje su organika 1-B+O, kuris, laikytas neutralioje vandens terpėje, patyrė 6,16 % masės nuostolį. Tai rodo, kad šis priedas yra chemiškai nestabilus ir linkęs irti net ir be agresyvaus chloridų ar šalčio poveikio, taip pažeisdama betono matricos vientisumą. Likusių bandinių masės nuostoliai svyravo nuo 1,85 % iki 1,97 %, šis skirtumas statistiškai nereikšmingas, todėl galima teigti, kad tirtomis šalčio ir druskų poveikio sąlygomis hidroizoliacinis priedas neturėjo matuojamo poveikio fiziniam betono paviršiaus irimui.

Literatūros sąrašas

1. ZHUANG, N., et al. Nondestructive Monitoring of Corrosion Status of Marine Pile Foundation: Experiment and Application Concept *Ocean Engineering*, 2025, vol. 340. pp. 122-272. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801825019560> ISSN 0029-8018. DOI 10.1016/j.oceaneng.2025.122272.
2. SHAO, W. and LI, J. Service Life Prediction of Cracked RC Pipe Piles Exposed to Marine Environments *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 64. pp. 301–307. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814004115> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.094.
3. REN, D., et al. Investigation on the Mechanism of Self-Healing Effect of Cementitious Capillary Crystalline Waterproofing Material on Concrete and Enhancement of its Resistance to Chloride Erosion *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 430. pp. 136-416. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824015575> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2024.136416.
4. CAPPELLESSO, V.G., et al. Self-Healing Concrete with a Bacteria-Based Or Crystalline Admixture as Healing Agent to Prevent Chloride Ingress and Corrosion in a Marine Environment *Developments in the Built Environment*, 2024, vol. 19. pp. 100-486. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165924001674> ISSN 2666-1659. DOI 10.1016/j.dibe.2024.100486.
5. HUSSAIN, R.R. Underwater Half-Cell Corrosion Potential Bench Mark Measurements of Corroding Steel in Concrete Influenced by a Variety of Material Science and Environmental Engineering Variables *Measurement*, 2011, vol. 44, no. 1. pp. 274–280. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224110002630> ISSN 0263-2241. DOI 10.1016/j.measurement.2010.10.002.
6. BANAR, R., et al. Experimental and Numerical Simulation of Carbonation-Induced Corrosion in Reinforced Concretes *Case Studies in Construction Materials*, 2025, vol. 22. pp. e04464. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509525002621> ISSN 2214-5095. DOI 10.1016/j.cscm.2025.e04464.
7. VENKATA RAGHAVA RAO, G., et al. Aggressiveness of Soils and Water in Contact with Buried Concrete Structures *Materials Today: Proceedings*, 2023. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323040701> ISSN 2214-7853. DOI 10.1016/j.matpr.2023.07.200.
8. KIM, Y.Y., KIM, J.M., BANG, J. and KWON, S. Effect of Cover Depth, W/C Ratio, and Crack Width on Half Cell Potential in Cracked Concrete Exposed to Salt Sprayed Condition *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 54. pp. 636–645. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814000336> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.009.
9. CAPPELLESSO, V.G., DOS SANTOS PETRY, N., DAL MOLIN, D.C.C. and MASUERO, A.B. Use of Crystalline Waterproofing to Reduce Capillary Porosity in Concrete *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2016, vol. 1, no. 1. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85042494704&doi=10.1007%2fs41024->

016-0012-7&partnerID=40&md5=8db25b70fd0c52a443bb037f319fe330 Scopus. DOI
10.1007/s41024-016-0012-7.

10. ALRUBAIE, M.A.A., WTAIFE, S., ALSAFY, Z.H.J. and KHALID, N.H.A. Compressive Strength of Light-Weight Concrete Material made from Treated Wood Waste as a Coarse Aggregate *BioResources*, 2023, vol. 18, no. 1. pp. 111–130. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85149132101&doi=10.15376%2fbiores.18.1.111-130&partnerID=40&md5=441cedffbc00f3f3d2447c7c67ebeeefc> Scopus. DOI
10.15376/biores.18.1.111-130.

11. ORTEGA ÁLVAREZ, J.M., et al. Microstructural Effects of Sulphate Attack in Sustainable Grouts for Micropiles *Materials*, 2016, vol. 9, no. 11 Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/11/905> ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma9110905.

12. ANNAMALAISAMY SANNASIRAJ, R.D., et al. A Fully Coupled Depth-Dependent Corrosion Model for Reinforced Concrete Piles Under Marine Environmental Conditions *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 472. pp. 140795. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825009432> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2025.140795.

13. LST EN 1997-1 „Eurokodas 7. Geotechninis Projektavimas. 1 Dalis. Bendrosios Taisyklės“. , 2004 ISBN LST EN 1997-1.

14. STR 2.05.04:2003 „Pamatų Ir Pagrindų Projektavimas“. , 2003

15. LST EN 14199 „Specialiųjų Geotechnikos Darbų Atlikimas. Mažieji Poliai“. , 2015

16. LST EN 206:2013 „Betonas. Specifikacija, Eksploatacinės Savybės, Gamyba Ir Atitiktis“. , 2013

17. LST EN 10080 „Armatūrinis Plienai. Suvirinamasis Armatūrinis Plienai. Bendrieji Dalykai“. , 2005

18. LST EN 934-2 „Betono, Statybinio Ir Injekcinio Skiedinio Įmaišiniai Priedai. 2 Dalis. Betono Įmaišiniai Priedai. Apibrėžtys, Reikalavimai, Atitiktis, Ženklinimas Ir Etiketavimas“. , 2009

19. LST EN 12390-4 „Sukietėjusio Betono Bandymai. 4 Dalis. Gniuždymo Stipris. Bandymo Mašinų Techniniai Reikalavimai“. , 2025

20. LST EN 12390-5 „Sukietėjusio Betono Bandymai. 5 Dalis. Bandinių Lenkimo Stipris“. , 2019

21. APOSTOLOPOULOS, C.A., DEMIS, S. and PAPADAKIS, V.G. Chloride-Induced Corrosion of Steel Reinforcement - Mechanical Performance and Pit Depth Analysis *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 38. pp. 139–146. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84866512013&doi=10.1016%2fj.conbuildmat.2012.07.087&partnerID=40&md5=0de1885d53c31dc3ec0208a17a3d65ec> Scopus. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.087.

22. APOSTOLOPOULOS, C.A., KOULOURIS, K.F. and APOSTOLOPOULOS, A.C. Correlation of Surface Cracks of Concrete due to Corrosion and Bond Strength (between Steel Bar and Concrete)

Advances in Civil Engineering, 2019, vol. 2019. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85062345365&doi=10.1155%2f2019%2f3438743&partnerID=40&md5=2036ea86867e48cf34d89edf3f1be2f5> Scopus. DOI 10.1155/2019/3438743.

23. AFSHAR, A., et al. Corrosion Resistance Evaluation of Rebars with various Primers and Coatings in Concrete Modified with Different Additives *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 262. pp. 120034. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820320390> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.120034.

24. LI, G., et al. Activated Chemicals of Cementitious Capillary Crystalline Waterproofing Materials and their Self-Healing Behaviour *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 200. pp. 36–45. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818330733> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.093.

25. ALMASHAKBEH, Y., SALEH, E. and AL-AKHRAS, N. Evaluation of Half-Cell Potential Measurements for Reinforced Concrete Corrosion *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 7. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85137303671&doi=10.3390%2fcoatings12070975&partnerID=40&md5=1e52c19bb1629a09cde1e797771f88c1> Scopus. DOI 10.3390/coatings12070975.

26. ASTM, C. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, 2015

27. CAPPELLESSO, V., et al. A Review of the Efficiency of Self-Healing Concrete Technologies for Durable and Sustainable Concrete Under Realistic Conditions *International Materials Reviews*, 2023, vol. 68, no. 5. pp. 556–603. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85146524703&doi=10.1080%2f09506608.2022.2145747&partnerID=40&md5=e020a82216b28365ed163fe7bb89915d> Scopus. DOI 10.1080/09506608.2022.2145747.

28. DE BELIE, N., VAN BELLEGHEM, B., ERŞAN, Y.C. and VAN TITTELBOOM, K. *Durability of Self-Healing Concrete*. , 2019 Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85096108063&doi=10.1051%2fmateconf%2f201928901003&partnerID=40&md5=8d47ac75ee870016958054d12aca0081> Scopus. DOI 10.1051/mateconf/201928901003.

29. SHEN, X., et al. Numerical Study of Carbonation and its Effect on Chloride Binding in Concrete *Cement and Concrete Composites*, 2019, vol. 104. pp. 103402. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946518309788> ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2019.103402.

30. SANTHANAM, M. and OTIENO, M. Marine Concrete Structures M.G. ALEXANDER ed., Woodhead Publishing, 2016 5 - *Deterioration of Concrete in the Marine Environment*, pp. 137–149. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081000816000052> ISBN 9780081009055. DOI 10.1016/B978-0-08-100081-6.00005-2.

31. IKUMI, T. and SEGURA, I. Numerical Assessment of External Sulfate Attack in Concrete Structures. A Review *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 121. pp. 91–105. Available from:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461831264X> ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2019.04.010.

32. SUN, D., et al. Deformation Behaviour of Concrete Materials Under the Sulfate Attack *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 210. pp. 232–241. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819305318> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.050.

33. SUN, D., et al. Degradation of Concrete in Marine Environment Under Coupled Chloride and Sulfate Attack: A Numerical and Experimental Study *Case Studies in Construction Materials*, 2022, vol. 17. pp. e01218. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522003503> ISSN 2214-5095. DOI 10.1016/j.cscm.2022.e01218.

34. MUHAMMAD, N.Z., et al. Waterproof Performance of Concrete: A Critical Review on Implemented Approaches *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 101. pp. 80–90. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84945208437&doi=10.1016%2fj.conbuildmat.2015.10.048&partnerID=40&md5=a3c54265c4551580937300fb38da8847> Scopus. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.048.

35. ABED, J.M. and KHALEEL, B.A. Effect of Wood Waste as a Partial Replacement of Cement, Fine and Coarse Aggregate on Physical and Mechanical Properties of Concrete Blocks Units *International Journal of Integrated Engineering*, 2019, vol. 11, no. 8. pp. 229–239. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078096271&doi=10.30880%2fijie.2019.11.08.023&partnerID=40&md5=76259ee9db908004c604fac00a239854> Scopus. DOI 10.30880/ijie.2019.11.08.023.

36. DIAS, S., et al. Physical, Mechanical, and Durability Properties of Concrete Containing Wood Chips and Sawdust: An Experimental Approach *Buildings*, 2022, vol. 12, no. 8. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85138007705&doi=10.3390%2fbuildings12081277&partnerID=40&md5=0049f148f2d10fb972c0a78aaef1f4c6> Scopus. DOI 10.3390/buildings12081277.

37. HU, J.Y., ZHANG, S.S., CHEN, E. and LI, W.G. A Review on Corrosion Detection and Protection of Existing Reinforced Concrete (RC) Structures *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 325. pp. 126718. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822004081> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.126718.

38. LI, G., et al. Activated Chemicals of Cementitious Capillary Crystalline Waterproofing Materials and their Self-Healing Behaviour *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 200. pp. 36–45. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818330733> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.093.

39. KHAN, M.B.E., SHEN, L. and DIAS-DA-COSTA, D. Self-Healing Behaviour of Bio-Concrete in Submerged and Tidal Marine Environments *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 277. pp. 122332. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821000921> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122332.

40. CHEN, F., BAJI, H. and LI, C. A Comparative Study on Factors Affecting Time to Cover Cracking as a Service Life Indicator *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 163. pp. 681–694. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817325254> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.120.