



**Kauno technologijos universitetas**  
Statybos ir architektūros fakultetas

# **Atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas taikant skirtingas metodikas**

Baigiamasis magistro studijų projektas

---

**Aurimas Budrikas**  
Projekto autorius

**Doc. dr. Algirdas Augonis**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas taikant skirtingas metodikas**

Baigiamasis magistro studijų projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Aurimas Budrikas**

Projekto autorius

**Doc. dr. Algirdas Augonis**

Vadovas

**Prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Aurimas Budrikas

## **Atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas taikant skirtingas metodikas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Aurimo Budriko, baigiamasis projektas tema „Atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas taikant skirtingas metodikas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Budrikas Aurimas. Atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas taikant skirtingas metodikas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Algirdas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: Savaiminis atsinaujinimas, priedai, bakterijos, kristalinis priedas, hidratacija, vandens pralaidumas.

Kaunas, 2020. 54 p.

### **Santrauka**

Magistro baigiamajame darbe išanalizuotas ir tirtas savaimė atsinaujinantis betonas taikant skirtingas metodikas. Baigiamojo darbo sudėtis susideda iš teorinės ir eksperimentinės dalies. Teorinėje dalyje išanalizuotos atsinaujinančio betono metodikos, veikimo principai bei reikalingos sąlygos. Taip pat išnagrinėtos betono konstrukcijų pleišėjimo priežastys, plyšių poveikis betono konstrukcijoms bei savaimė atsinaujinančio betono pritaikomumas. Aptarti metodai atsinaujinančio betono efektyvumui nustatyti. Eksperimentinėje dalyje tiriamas savaimė atsinaujinantis betonas modifikuotas mineraliniais priedais. Nustatyta priedų įtaka betono mišinio ir sukietėjusio betono bandiniams. Atlikti tyrimai sudarant nestandartinius plyšius bandiniuose. Nustatytas plyšiu užsitaisymo efektyvumas taikant vandens pralaidumo ir vandens absorbcijos bandymus. Pateikiami plyšių atsinaujinimo rezultatai ir suformuluotos išvados.

Budrikas Aurimas. Evaluation of the efficiency of Self-healing Concrete Using Different Methodologies. Master's Final Degree/ supervisor dr. Algirdas Augonis; faculty of civil engineering and architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Self-healing, additives, bacteria, crystalline additives, hydration, water permeability.

Kaunas, 2020. 54.

### **Summary**

In this Master's final work self-healing concrete was analyzed and tested by using different methodologies. The final work consists of theoretical and experimental parts. In theoretical part analysed methodology and operation principles of self-healing concrete and conditions that are necessary for it. The causes of cracking of concrete structures, impact of cracks on concrete structures and the applicability of self-healing concrete were analysed as well. Methods to determine the efficiency of self-healing concrete were discussed. The experimental part investigates self-healing concrete modified with mineral additives. The influence of additives on concrete mixture and hardened concrete samples was determined. The tests were carried out by creating non-standard cracks in samples. The effectiveness of crack sealing was determined by using water permeability and water absorption tests. Results of crack recurrence and conclusions are presented.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>13</b>
1.1. Betoną veikiantys poveikiai ir problematika .....	13
1.2. Plyšių atsiradimo priežastys .....	13
1.3. Savaime atsinaujinančio betono strategija, mechanizmai, reikalingos sąlygos .....	14
1.4. Autogeninis atsinaujinimas .....	15
1.4.1. Autogeninio atsinaujinimo patobulinimas.....	17
1.5. Autonominis atsinaujinimas .....	17
1.5.1. Atsinaujinimas pagrįstas bakterijomis.....	17
1.5.2. Vandens pralaidumas panaudojant bakterijas .....	19
1.5.3. Mechaninis stipris panaudojant bakterijas.....	20
1.5.4. Biobetono privalumai ir trūkumai .....	21
1.5.5. Atsinaujinimas pagrįstas mineraliniais priedais .....	21
1.5.6. Betonų su mineraliniu priedu atsinaujinimas .....	22
1.5.7. Įprasto ir su kristaliniu priedu betonų palyginimas įvairiose aplinkos sąlygose .....	22
1.5.8. Betono su mineraliniu priedu atsinaujinimo sąlygos.....	23
1.5.9. Atsinaujinimo mechanizmai, sąlygos ir efektyvumas .....	24
1.5.10. Atsinaujinimo mechanizmų pritaikomumas.....	24
1.6. Savaime atsinaujinančių medžiagų vertinimas.....	25
1.7. Plyšių formavimo metodai .....	25
1.7.1. Plyšio formavimas lenkimo metodu.....	25
1.7.2. Plyšio formavimas skėlimo metodu .....	26
1.8. Atsinaujinimo sąlygos .....	26
1.8.1. Vandens pralaidumo metodas.....	27
<b>2. Naudotos medžiagos ir tyrimų metodika .....</b>	<b>28</b>
2.1. Betono sudėty ir gamyba .....	28
2.1.1. Betono su kristaliniu priedu sudėtis ir gamyba .....	28
2.1.2. Betono su magnio oksido priedu sudėtis ir gamyba.....	30
2.2. Lygaus plyšio sudarymo metodika .....	30
2.3. Bandinių su lygių plyšiu atsinaujinimo efektyvumo tikrinimo metodika .....	31
2.4. Betono su magnio oksido priedu bandinių paruošimas.....	33
2.4.1. Plyšių sudarymo metodika bandinį skeliant.....	33
2.4.2. Plyšių sudarymo metodika bandinį lenkiant.....	34
2.5. Plyšių matavimas.....	35
2.6. Tyrimo metodikos .....	36
2.6.1. Vandens pralaidumo bandymas.....	36
2.6.2. Vandens absorbcijos bandymas.....	37
<b>3. Eksperimento rezultatai.....</b>	<b>39</b>
3.1. Betono su kristaliniu priedu tyrimų rezultatai taikant lygaus plyšio metodiką .....	39
3.1.1. Betono mišinio slankumo nustatymas .....	39
3.1.2. Betono tankio nustatymas.....	39
3.1.3. Betono gniuždomojo stiprio nustatymas .....	39

3.1.4. Bandinių su kristalinių priedu atsinaujinimo rezultatai .....	40
3.2. Betono su magnio oksido priedu tyrimų rezultatai taikant plyšio metodiką skeliant.....	41
3.2.1. Plyšių sudarymo rezultatai .....	41
3.2.2. Bandinių su magnio oksido priedu atsinaujinimo rezultatai .....	43
3.3. Betono su magnio oksido priedu tyrimų rezultatai taikant plyšio metodiką lenkiant .....	45
<b>Išvados .....</b>	<b>52</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>53</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>55</b>
1 priedas. Bandinių su kristaliniu priedu atsinaujinimo rezultatai .....	55
2 priedas. Diskinių bandinių plyšių pločių rezultatai .....	55
3 priedas. Diskinių bandinių vandens pralaidumo rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje ...	56
4 priedas. Diskinių bandinių vandens pralaidumo rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje ...	57
5 priedas. Kontrolinių bandinių be plyšio vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje .....	58
6 priedas. Kontroliniu bandinių su plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje .....	59
7 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje .....	60
8 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje .....	61
9 priedas. Kontrolinių bandinių be plyšio vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	62
10 priedas. Kontrolinių bandinių su plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	63
11 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	64
12 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	65
13 priedas. Kontrolinių bandinių be plyšio vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje .....	66
14 priedas. Kontrolinių bandinių su plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje .....	67
15 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje .....	68
16 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje .....	69
17 priedas. Vandens absorbcijos rezultatai ir atsinaujinimo efektyvumas po 28 ir 90 dienų išlaikymo vandenyje .....	70
18 priedas. Infiltracijos aukščio rezultatai ir atsinaujinimo efektyvumas po 28 ir 90 dienų išlaikymo vandenyje.....	70

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Konstrukcijų pleišėjimo priežastys [20] .....	14
2 lentelė. Bakterijų tipai ir jų gniuždymo stiprio rezultatai [9] .....	20
3 lentelė. Išsiplečiantys ir kristaliniai priedai pateikti literatūroje [11] .....	22
4 lentelė. Plyšių užsitaisymo efektyvumas įvairiose sąlygose [6] .....	23
5 lentelė. Atsinaujinimo mechanizmų sąlygos [11] .....	24
6 lentelė. Gelžbetoninių konstrukcijų tarnavimo sąlygos priklausomai nuo atsinaujinančio mechanizmo [11] .....	24
7 lentelė. Atsinaujinimo efektyvumo tikrinimo metodai [13] .....	25
8 lentelė. Pirma ir antra betonų sudėtys 1m <sup>3</sup> .....	28
9 lentelė. Trečia ir ketvirta betonų sudėtys 1m <sup>3</sup> .....	30
10 lentelė. Pirmos ir antros betono mišinių slankumo klasės .....	39
11 lentelė. Betono geometrija ir nustatytas betono tankis po 28 dienų .....	39
12 lentelė. Betono geometrija ir nustatytas gniuždomasis betono stipris po 28 dienų .....	40
13 lentelė. Bandinių su kristaliniu priedu atsinaujinimo efektyvumo vidurkio rezultatai po 120 dienų išlaikymo vandenyje .....	41
14 lentelė. Vandens pralaidumo duomenys ir rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje .....	42
15 lentelė. Vidurkio reikšmė ir standartinis nuokrypis 0 dienų išlaikymo vandenyje .....	43
16 lentelė. Vidurkio reikšmė ir standartinis nuokrypis po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	44
17 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	44
18 lentelė. Vidurkio reikšmė ir standartinis nuokrypis po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje .....	45
19 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje .....	45
20 lentelė. Bandinių matavimas numatytu laiku .....	45
21 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	49
22 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje .....	49
23 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	50
24 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje .....	51



## Paveikslų sąrašas

1 pav. Savaimė atsinaujinančio betono įtaka eksploatacijos laikotarpiui [11] .....	11
2 pav. Savaimė atsinaujinančio betono mechanizmai [11] .....	15
3 pav. Autogeninio atsinaujinimo procesas išskiriant kalcio karbonatą [2] .....	16
4 pav. A) kalcio karbonato formavimasis, b) fizinis užsikimšimas nuo dalelių, c) cemento dalelių hidratacija, d) cemento matricos pabrinkimas dėl vandens įsigėrusio į cemento pastą [19].....	16
5 pav. Kalcio karbonato formavimasis ant ląstelės sienelės [9] .....	18
6 pav. a) Paprastas mikrokapsulių būdas: i) plyšio susiformavimas matricoje, ii) atsinaujinančios medžiagos išleidimo procesas, iii) plyšio užgydymo procesas; b) plyšusios kapsulės vaizdas pro ESM [9] .....	19
7 pav. Plyšio užsitaisymo procesas per SEM: a) kontrolinio betono plyšys, b) biobetono plyšys, c)kontrolinio betono plyšys po 100 dienų, d) biobetono plyšys po 100 dienų [10] .....	20
8 pav. Plyšio formavimas lenkimo metodu .....	26
9 pav. Plyšio formavimas skėlimo metodu [5] .....	26
10 pav. Bandinių atsinaujinimo sąlygos [4] .....	27
11 pav. Atsinaujinimo patikrinimas vandens pralaidumo metodu [4].....	27
12 pav. Betono gamybai naudotos medžiagos .....	29
13 pav. Betono gamybos metu naudota maišyklė .....	29
14 pav. Plyšio sudarymas nestandartiniu metodu.....	31
15 pav. Plyšio sudarymas nestandartiniu metodu.....	31
16 pav. Plyšio sudarymas nestandartiniu metodu.....	31
17 pav. Faktinio vandens pralaidumo matavimas per 5 minutes.....	32
18 pav. Bandinių užmerkimas į vonią atsinaujinimo reakcijai.....	32
19 pav. Cilindrinų bandinių supjovimo metodika .....	33
20 pav. Plyšių atvėrimas hidrauliniu presu skėlimo metodu .....	34
21 pav. Plyšių atvėrimas hidrauliniu presu lenkimo metodu.....	35
22 pav. Skaitmeninė nuotrauka gauta plyšio matavimo prietaisu .....	35
23 pav. Diskinių bandinių paruošimas vandens pralaidumo bandymui .....	36
24 pav. Vandens pralaidumo bandymas .....	36
25 pav. Kontrolinių ir su magnio oksido priedu diskinių bandinių užmerkimas .....	37
26 pav. Prizminių bandinių paruošimas .....	37
27 pav. Vandens absorbcijos bandymas .....	38
28 pav. Kontrolinių ir su MgO priedu prizminių bandinių užmerkimas .....	38
29 pav. Betono gniuždomojo stiprio nustatymas po 28 parų .....	39
30 pav. Matuojamas faktinis vandens pralaidumas per 5 minutes .....	40
31 pav. Bandinių su kristaliniu priedu atsinaujinimo efektyvumo rezultatai po 120 dienų .....	40
32 pav. Plyšių matavimo metodika.....	41
33 pav. Diskinių bandinių plyšių pločių rezultatai .....	41
34 pav. Vizualus atsinaujinančio produkto išsiskyrimas plyšyje .....	43
35 pav. Diskinių bandinių atsinaujinimo efektyvumo rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje. 44	
36 pav. Diskinių bandinių atsinaujinimo rezultatai po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje .....	45
37 pav. Kontrolinių bandinių vandens absorbcijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje .....	46
38 pav. Bandinių su MgO priedu vandens absorbcijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje . 46	
39 pav. Kontrolinių bandinių vandens absorbcijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	47
40 pav. Bandinių su MgO priedu vandens absorbcijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje 47	

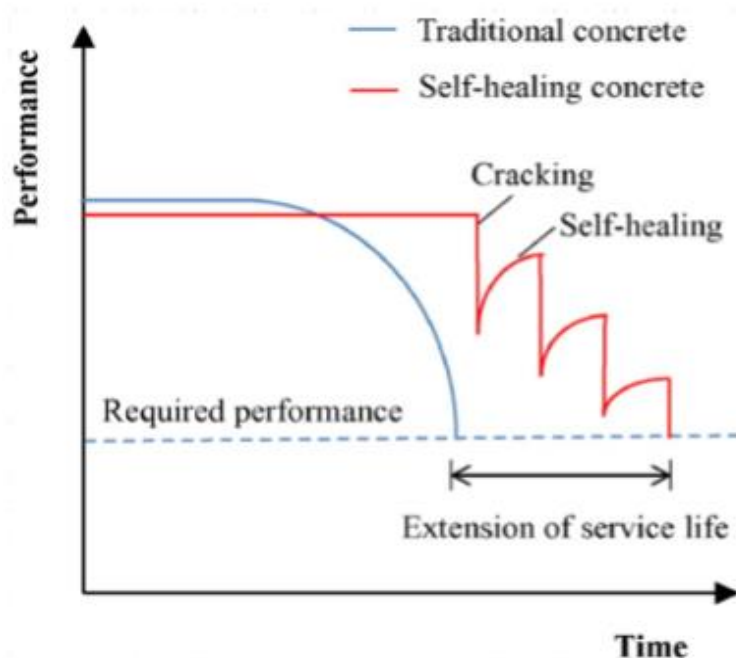
41 pav. Kontrolinių bandinių vandens absorbcijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje .....	48
42 pav. Bandinių su MgO priedu vandens absorbcijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje	48
43 pav. Vandens absorbcijos atsinaujinimo rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje .....	49
44 pav. Vandens absorbcijos atsinaujinimo rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje .....	49
45 pav. Infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje.....	50
46 pav. Infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje.....	51

## Įvadas

Daugelyje pasaulio šalių, o taip pat ir Lietuvoje didelis dėmesys skiriamas konstrukcijų ilgaamžiškumui. Viena plačiausiai infrastruktūroje šiuo metu naudojamų medžiagų yra betonas. Tačiau ši medžiaga taip pat turi didelį polinkį reaguoti su įvairiais ją veikiančiais procesais, todėl dažnas atvejis, kai konstrukcija susiduria su plyšių grėsme. Šis veiksnys stipriai įtakoja konstrukcijos ilgaamžikumo parametrus, kadangi susiformavę plyšiai sudaro galimybę iš aplinkos patekti vandeniui ir taip pradėti armatūros korozijos bei kitus betoną ardančius procesus.

Kitavertus augant šiuolaikinėms tendencijoms stipriai atsižvelgiama į gamtinių žaliavų sunaudojimą bei aplinkos tausojimą. Betono gamyba pasižymi dideliu energijos sunaudojimu ir anglies dioksido kiekio išskyrimu. Šiuolaikinės betoninės konstrukcijos suyra anksčiau laiko dėl susiformavusių plyšių jos eksploataavimo metu. Susiformavę plyšiai kelia rimtą grėsmę betono stiprumui ir ilgaamžiškumui. Betono ilgaamžiškumas gali viršyti 50 metų ir net ilgesnį laikotarpį, tačiau prasiskverbęs vanduo bei kitos agresyvios medžiagos, tokios kaip chloridai, sulfatai, karbonatai ne tik sukelia tokius reiškinius kaip armatūros korozija, bet ir silpnina betono patvarumą. Visa tai priveda prie dažno konstrukcijų remonto ir didelio kiekio žaliavų sunaudojimo.

Vienas iš būdų kaip išspręsti šią dilemą tai naujų konstrukcijų sukūrimas, kurios būtų ilgaamžiškesnės. Siekiant betoną padaryti atsparesnį, racionalu panaudoti specialius kristilinius priedus ar bakterijas, kurios sąveikoje su vandeniu išskiria kalcio karbonato nuosėdas ir taip užtaiso konstrukcijoje atsivėrusį plyšį, prailgindamos konstrukcijos ilgaamžiskumą bei patvarumą.



1 pav. Savaimė atsinaujinančio betono įtaka eksploatacijos laikotarpiui [11]

Pagrindinis šio tyrimo tikslas yra eksperimentiškai ištirti savaimė atsinaujinančio betono atsikūrimą su mineraliniais priedais, patikrinti naują atsikūrimo metodiką suformuojant plyšį bandinyje nauja plyšio formavimo metodika.

## **Darbo tikslas**

Sukurti savaime atsinaujinančio betono efektyvumą įvertinant patobulintą metodiką, kuri leidžia bandyti vienodo pločio plyšius visame bandinio skerspjūvyje. Ištirti ir įvertinti savaime atsinaujinančio betono su mineraliniais priedais atsinaujinimo efektyvumą taikant skirtingas plyšio sudarymo metodikas.

## **Darbo uždaviniai**

Atlikti literatūros analizę apie savaime atsinaujinantį betoną. Nustatyti betono su mineraliniais priedais įtaką betono savybėms, bei panaudojimą.

Suformuoti betono bandinius su kristaliniais priedais ir nustatyti šių priedų įtaką, betono mišinio ir sukietėjusio betono savybes, t.y., slankumas, betono tankis, gniuždymo stiprio kinetika.

Eksperimentikai nustatyti savaime atsinaujinančio betono su mineraliniais priedais plyšių užsitaisymo efektyvumą. Ištirti užsitaisymo efektyvumą panaudojant specialų plyšio suformavimo metodą.

Nustatyti užsitaisiusio plyšio atsparumą vandens pralaidumo, vandens absorbcijos bandymams.

## **Temos aktualumas**

Šiuo metu pasaulyje vis didesnio susidomėjimo sulaukia specialiais priedais modifikuotas betonai, kuris atsivėrus plyšiams sąveikoje su vandeniu savaime juos užtaiso, taip sustabdydamas visus galimus korozijos procesus ir užtikrindamas ilgesnį konstrukcijos eksploatavimo laikotarpį. Ši tema turi didelį susidomėjimą, kadangi šiuo metu dar nėra sukurtų standartų norint įvertinti tokio betono atsinaujinimą.

## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1. Betoną veikiančys poveikiai ir problematika

Išrastas daugiau nei prieš 2000 metų betonas vis dar išliko viena iš dažniausiai naudojamų statybinių medžiagų. Tai tvirtina, jog ši medžiaga yra tvirta, pigi, lengvai pagaminama ir prižiūrima. Tačiau betonas yra jautri medžiaga įtrūkimams. Įtrūkimai betone yra vienas iš didžiausių neigiamų poveikių, kurie nulemia tokius konstrukcijos parametrus kaip patvarumas ir ilgaamžiškumas, kadangi iš aplinkos patekusi drėgmė bei oras pradeda armatūros korozijos bei kitus betoną ardančius procesus. Ši dilema nulėmė didelį mokslininkų susidomėjimą kaip padaryti betoną atsparesnį nuo jį veikiančių poveikių. Vienas iš būdų tai betono konstrukcijoje atsiradusių plyšių užsigydymas. Todėl šiuo metu pasaulyje sparčiai atliekami tyrimai tiriant savaime atsinaujinantį betoną, kuris geba atnaujinti eksploataavimo metu konstrukcijoje atsiradusius plyšius.

### 1.2. Plyšių atsiradimo priežastys

Dažnas atvejis, kai betono konstrukcija suyra ne todėl, kad jos stipris yra per mažas, o dėl netinkamo konstrukcijos eksploataavimo ir per mažo konstrukcijos atsparumo poveikiams. Pagrindinė priežastis, dėl kurios konstrukcija tampa nebeapatvari, tai plyšių atsiradimas. Plyšiai konstrukcijose gali atsirasti dėl kelių priežasčių - plyšių atsiradimas dėl jų veikiančio mechaninio ar aplinkos poveikio.

Be makro plyšių, mikro plyšiai normaliam betonui yra praktiškai neišvengiami. Tuo atveju, kai mikro plyšiai suformuoja vientisą tinklą, betonas taps laidus, o armatūros strypus gali veikti aplinkos oras. Šiuo atveju vientisas plyšys veikia kaip kaip paprastas agresyvių medžiagų patekimo į betoną kelias, taip jos ardo betoną ir sukelia armatūros strypų koroziją, todėl betonas tampa pažeidžiamesnis.

Techniškai kalbant, betonas gali sėkmingai viršyti 50 metų, ar net ilgesnį, tarnavimo laiką nepaisant to, kad jį veikia keli ardančiosios procesai, pvz. cheminių medžiagų įsiskverbimas, užšalimo-atsilimo ciklas, karbonizacija ir kt. Tačiau įtrūkimų buvimas sukelia rimtesnes problemas ir silpnina betono patvarumą. Šiuo atveju siekiant sulaikyti tolimesnį plyšių atsivėrimą, konstrukcijos yra armuojamos.

Mechaninės apkrovos konstrukcijoje sukelia įtempius, kurie viršydami galimas deformacijas ar įtempius sukelia konstrukcijos pleišėjimą. Betonas jautriausias pleišėjimui ankstyvuojamuoju periodu, kai jis itin neatsparus tempimui. Pakartotinai apkraunant konstrukciją ilgą laiko tarpą gali pasireikšti konstrukcijos nuovargis ir valknumas, kurie gali paveikti deformacijų vystymąsi ar įtempių sumažėjimą.

Taip pat dažna plyšių atsivėrimo priežastis vyksta dėl aplinkos poveikio. Pagrindinės priežastys tai betono matricoje esančių medžiagų tūrinis susitraukimas ar išsiplėtimas. Vidinis išsiplėtimas vyksta dėl cheminių medžiagų patekimo į betoną sąveikos su jame esančiais užpildais ar porose esančio vandens užšalimo. Tūrinis sumažėjimas pasireiškia dėl drėgmės, temperatūros, cheminių reakcijų pokyčio.

Plyšių atsivėrimas galimas ne tik nuo eksploatacijos procesų, bet ir technologinių, kurie sukelia konstrukcijos netobulumus. Išsamesnės plyšių atsivėrimo priežastys pateikiamos 1 lentelėje.

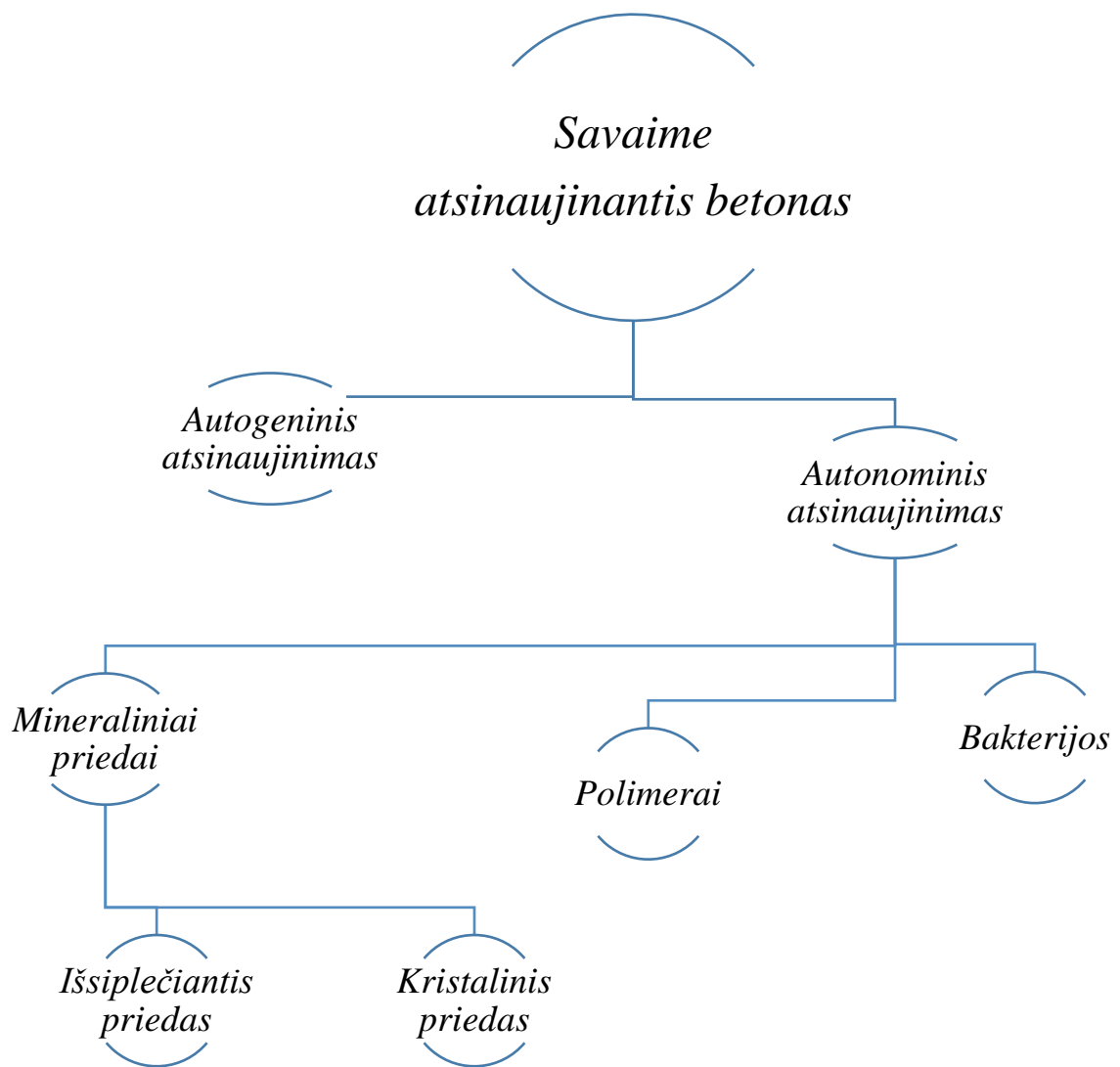
1 lentelė. Konstrukcijų pleišėjimo priežastys [20]

Pleišėjimo priežastis	Procesas
<b>Technologinis procesas</b>	
Susitraukimo	netinkamas mišinio vandens ir cemento santykis netinkama gamybos technologija, priežiūra
Temperatūros	cemento egzoterminė reakcija temperatūrinės deformacijos
Apkrovų	elemento išankstinis apspaudimas surenkamų konstrukcijų montavimo, sandėliavimo, gamybos metu padarytos klaidos
<b>Eksploatacinis procesas</b>	
Sėdimo	nevienodas pagrindų nuosėdis esant skirtingiems gruntams po pagrindu ar pasikeitusios hidrologinės sąlygos, skitingos statinio apkrovos
Apkrovų	perkrovos atsiradus papildomoms naujoms apkrovoms ar pasikeitus skaičiuojamajai konstrukcijos schemai armatūros išankstinio įtempimo nuostoliai, betono susitraukimas ir valkšnumas projektavimo klaidos
Temperatūros	aplinkos sezoninės ir paros temperatūros bei drėgmės pokyčiai nenumatytos ar neveikiančios temperatūrinės siūlės
Korozijos	armatūros, inkarinių detalių korozija, nenumatyta ar neįrengta hidroizoliacija, netinkamas apsauginis betono sluoksnis

### 1.3. Savaimė atsinaujinančio betono strategija, mechanizmai, reikalingos sąlygos

Savaime atsinaujinančios medžiagos veikia analogiškai biologiniams kūnams ir yra sukurtos taip, kad gebėtų atstatyti medžiagos savybes ir funkcijas, pasitelkiant vidinius medžiagos išteklius. Jos remiasi trijų pakopų keliu, kuris atsiranda po medžiagos pažeidimo: aktyvavimas, atsikūrimo medžiagos perdavimas į pažeistą sritį ir cheminis atstatymas. Analogiška metodika matoma ir savaime atsinaujinančiame betone. Betono plyšys suaktyvina autogeninį ar autonominį mechanizmą ir užgydo betone atsiradusį plyšį. Todėl medžiagos pažeidimas yra būtinas norint pradėti medžiagos atsinaujinimo procesą.

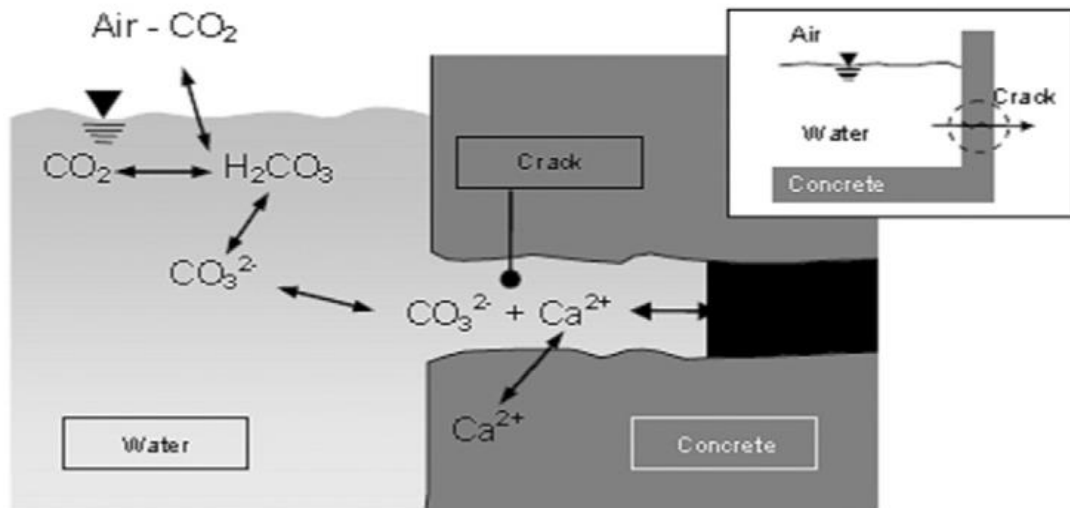
Nagrinėjant mokslinius straipsnius padaryta išsami apžvalga apie savaime atsinaujinantį betoną. Pagal pateiktą medžiagą savaime atsinaujinantis betonas išskirtas į dvi grupes: autogeninis ir autonominis atsinaujinimas. Autogeninis atsinaujinimas pagrįstas tolimesne cemento hidratacija. Autonominis atsinaujinimas pagrįstas betono modifikavimu priedais. Autonominiam betono atsinaujinimui būdinga mineralinių priedų, polimerinių medžiagų arba bakterijų reakcija betono matricoje. Mineraliniai priedai dar skirstomi į išsiplėčiančiomis medžiagomis ar kristaliniu priedu modifikuotus betonus.



2 pav. Savaime atsinaujinančio betono mechanizmai [11]

#### 1.4. Autogeninis atsinaujinimas

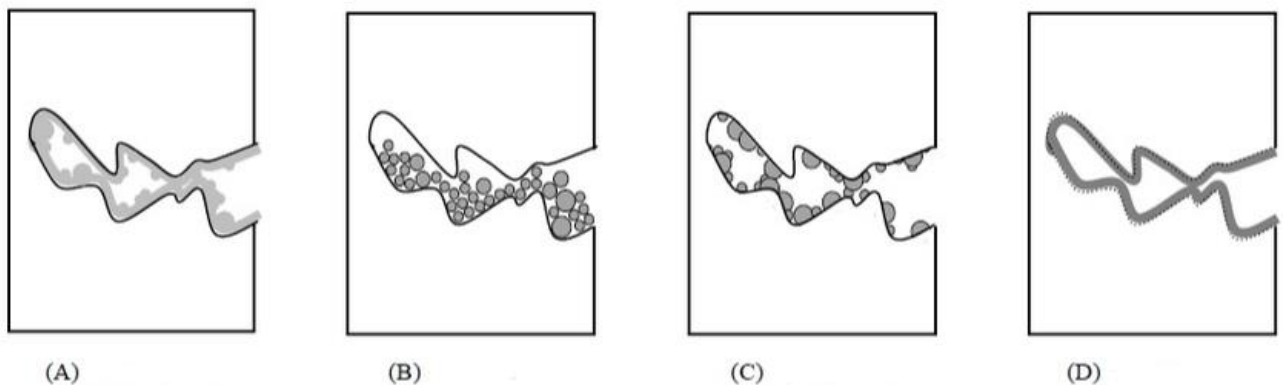
Jau nuo seno žinoma, kad betonas tokia medžiaga, turinti savybę savaime užtaisyti plyšius. Tačiau šis mechanizmas nėra itin patikimas dėl savo veikimo principo suvokimo. Autogeniniui atsikūrimo efektyvumui didelę įtaką daro aplinkos poveikis: vanduo, temperatūra, mišinio sudėtis. Pagrindinis procesas, dėl kurio vyksta šis atsinaujinimo principas yra  $Ca^{+2}$  jonų reakcija su aplinkoje esančiais karbonato jonais, kurio metu susidaro kalcio karbonatas  $CaCO_3$ , kuris vėliau nusėda ant plyšio paviršiaus. Analizuojant mokslinius straipsnius rasta, kad autogeninio atsinaujinimo sėkmė priklauso nuo įtrūkimo pločio, vandens prieinamumo ir plyšio užsitraukimo. Mažesni plyšiai turi geresnes galimybes užsitraukti. Aplinkos vandens buvimas padeda sausoms cemento dalelėms suformuoti hidratacijos produktą ir užsandarina plyšius.



3 pav. Autogeninio atsinaujinimo procesas išskiriant kalcio karbonatą [2]

Atlikti autogeninio betono atsinaujinimo tyrimai parodė, kad plyšio pločio ertmė laikui bėgant sumažėjo dėl kelių procesų. Keturi mechanizmai, kurie yra suskirstyti į tris priežastis, dėl kurių betone vyksta autogeninis atsinaujinimas tai [2]:

- Dėl vandens trūkumo sumaišymo metu nesureagavusių cemento dalelių besitęsiantis drėkinimas, dėl kurio jos užpildo įtrūkimo ertmę. Tai antras svarbus indėlis į atsikūrimo mechanizmą, kuris yra labiau pastebimas nepasenusiame betone.
- Kalcio jonai ( $\text{Ca}^{2+}$ ) reaguoja su aplinkos karbonato jonais ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Jiems ištirpus susidaro kalcio karbonatas ( $\text{CaCO}_3$ ), kuris tada nusėda ant įtrūkimo paviršių. Manoma, kad išsamiai ištirtas mechanizmas yra svarbiausias indėlis į autogeninį atsikūrimą. Sudėtinga betono matricos, jungčių ir ištirpusių jonų sąveika pavaizduota 4 pav.
- Fizinis užsikimšimas nuo paviršiaus atitrūkusiomis arba aplinkos vandens atneštomis smulkiosiomis dalelėmis.
- Cemento matricos pabrinkimas šalia įtrūkimo viršūnės dėl vandens įsigėrusio į sudrėkusią cemento pasta.



4 pav. A) kalcio karbonato formavimasis, b) fizinis užsikimšimas nuo dalelių, c) cemento dalelių hidratacija, d) cemento matricos pabrinkimas dėl vandens įsigėrusio į cemento pastą [19]



### 1.4.1. Autogeninio atsinaujinimo patobulinimas

Autogeninis atsinaujinimas betone vyksta tik nedidelio pločio plyšiuose, iki 200 pikometrų, esant sąveikai su vandeniu. Siekiant, kad šis metodas būtų efektyvesnis, praktikoje panaudotos įvairios strategijos siekiant apriboti plyšio atsivėrimą ar išgauti efektyvesnį plyšio užsigydymą. Nagrinėtuose moksliniuose straipsniuose rasta keliatas pavyzdžių, kurie apima autogeninio atsinaujinimo patobulinimą [2]:

- plyšio pločio ribojimas, įterpiant į betoną pluoštus taip paverčiant jį: pluoštu armuotu betonu. Vienas sėkmingas pavyzdys yra inžinerinė cementinė kompozitinė medžiaga. Ji pasižymi dideliu lankstumu, tuo pačiu užtikrinant, kad įtrūkimų plotis išliktų apie 50  $\mu\text{m}$ .;
- plyšio angos užvėrimas, panaudojant atmintį turinčius forminius lydinius arba susitraukiančias polimerines gyslas
- papildomas vandens tiekimas panaudojant itin vandenį sugeriančius polimerus arba vandens kapsules
- medžiagų, tokių kaip natrio monofluorofosfatas ar mikrobu, pridėjimas, skirtas paskatinti kristalizaciją, kalcio karbonato susidarymą arba hidrataciją.

Taigi, dėl šių priežasčių autogeninis atsinaujinimas išliko nepatikimas. Tai siejama su tuo, kad betonas yra labai įvairus dėl savo sudedamųjų dalių sudėties. Tam tikros sudėtys gali paskatinti atsinaujinimą, tuo tarpu kitos kelti klausimų. Kadangi nuolatinis vandens būvimas yra būtina sąlyga vykti autogeniniam atsinaujinimui, mažai tikėtina, kad atsinaujinimas vyks betone, kurio sąveika su vandeniu yra ribota.

## 1.5. Autonominis atsinaujinimas

### 1.5.1. Atsinaujinimas pagrįstas bakterijomis

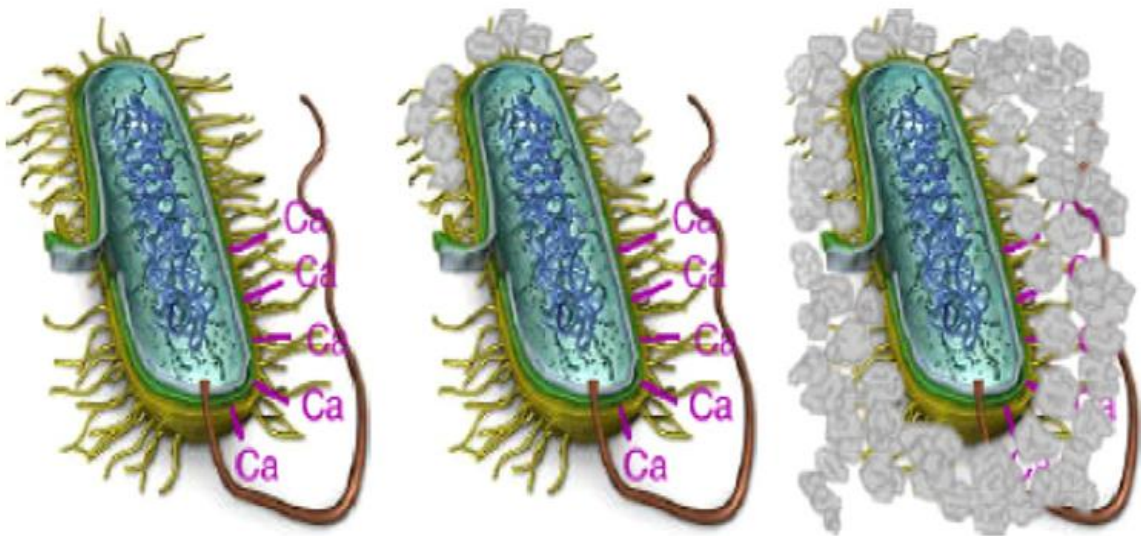
Vienas iš didžiausių atradimų savaime atsinaujinančių medžiagų srityje tai bakterijų panaudojimas. Šis atsinaujinimo metodas laikomas efektyviausiu, nes gali užgydyti plyšius, kurie didesni nei 0,8 mm. Bakterinis atsinaujinimas yra pagrįstas maišymo metu betono mišinyje panaudojus kapsulėse esančias bakterijas arba tiesiogiai jas dedant su maistine medžiaga kalcio laktatu. Ruošiant betono mišinį, dalis stambaus užpildo yra pakeičiama bakterijomis impregnuotomis kapsulėmis (pūsto molio ar perlito). Kadangi betono terpėje esti šarminė aplinka, biobetonui naudojami *Bacillus* genties atstovai, atsparūs šarminei aplinkai ir sporose gyvuojantys iki 200 metų. Siekiant bakterijų ilgesnio gyvybingumo, gamybos metu kapsulėse patalpinamos bakterijų maistinės medžiagos kalcio laktatas. Pagrindinis principas biobetone, kuris sukelia plyšio užsigydymą tai kalcio karbonato išsiskyrimas.

Nagrinėtuose moksliniuose straipsniuose rasta, kad kalcio karbonato išsiskyrimas yra pagrįstas pagrindiniu fermentinės karbamido hidrolizės mechanizmu. Naudojamos bakterijos - *Bacillus sphaericus* - gamina fermentą ureazę, kuris katalizuoja karbamido hidrolizę į amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) ir karbonato jonus  $\text{CO}_3^{2-}$ . Karbamidą savyje hidrolizuoja bakterijos, gaminančios karbamato rūgštį ir amoniaką. Po to karbamatą hidrolizuoja į amoniaką ir anglies rūgštį, kuri sudaro naują ištirpusios neorganinės anglies pusiausvyrą ir padidina betono matricos pH [10].

- $(\text{CONH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_2\text{COOH} + \text{NH}_3$
- $\text{NH}_2\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3$
- $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
- $\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$
- $2\text{NH}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{NH}_4^+ + 2\text{OH}^-$
- $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + 2\text{NH}_4^+$

Karbonato anijonai,  $[\text{CO}_3^{2-}]$  reaguoja su kalcio katijonais  $[\text{Ca}^{2+}]$ , esančiais betono matricijoje. Katijonai lygtyje prisitraukia neigiamo krūvio bakterijų ląstelių sienelė ir susidaro Ca karbonatai. Jie užpildo betoninės konstrukcijos įtrūkimą [10].

- $\text{Ca}^{2+} + \text{Ląstelė} \leftrightarrow \text{Ląstelė} - \text{Ca}^{2+}$
- $\text{Ląstelė} - \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow \text{Ląstelė} - \text{CaCO}_3$



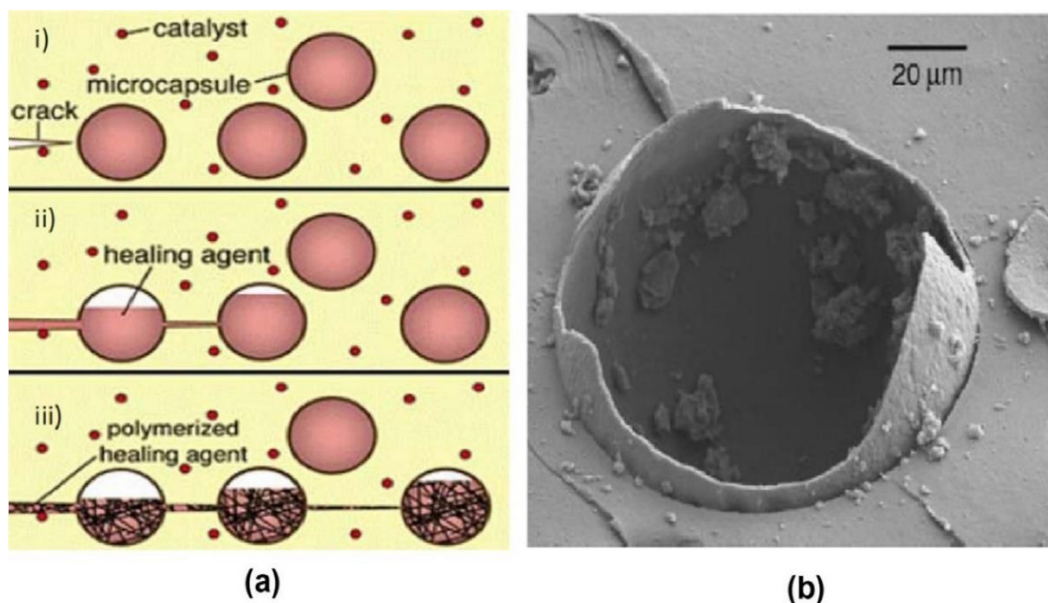
5 pav. Kalcio karbonato formavimasis ant ląstelės sienelės [9]

Nors šis atsinaujinimo metodas pasitvirtino, tačiau cheminės reakcijos mechanizmas gali sukelti šalutinį poveikį dėl suformuotų dviejų amonio jonų kiekvienam suformuotam karbonato jonui. Be to, karbamido hidrolizės metu susidariusios amonio molekulės gali sukelti betono pažeidimo dėl druskų rizikos, arba pažeidimo rizika gali atsirasti šiam amoniakui virtus azoto rūgštimi dėl nitrifikuojančių bakterijų veiklos, todėl mokslininkai panaudojo kitokį bakterijų kalcito skatinimo mechanizmą. Bakterijos metaboliškai paverčia maistines medžiagas druska ir keičia šalia jų esančią mikro cheminę aplinką, kad galėtų išskirti kalcitą.

Taigi betono struktūroje esančios bakterijos esti miego būsenoje iki plyšio atsivėrimo. Veriantis plyšiams yra pažeidžiamas bakterijose impregnuotas užpildas, todėl atsivėręs plyšys sukuria tiesioginį kelią vandens ir deguonies patekimui. Susiaktyvavusios bakterijos naudodamos deguonį bei impregnuotas maistines medžiagas išskiria anglies dioksidą ir didelį kiekį kalcio karbonato  $\text{CaCO}_3$ , užpildydamos atsivėrusį plyšį bei blokuodamos tolimesnį vandens ir deguonies prasiskverbimą į konstrukciją.

Parindiniai veiksniai lemiantys bakterijų paskatinto  $\text{CaCO}_3$  išsiskyrimo atsiradimą yra [2]:

- tirpalo pH,
- kalcio jonų  $[\text{Ca}^{2+}]$  buvimas
- karbonato pusiausvyra tirpale, kuri nustatoma pagal ištirpusio neorganinio anglies koncentraciją tirpale, kuri apima chemines anglies dioksido atmainas  $[\text{CO}_2]$ , anglies rūgštį  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ , bikarbonato anijoną  $[\text{HCO}_3^-]$  ir karbonato anijoną  $[\text{CO}_3^{2-}]$ .



6 pav. a) Paprastas mikrokapsulių būdas: i) plyšio susiformavimas matricoje, ii) atsinaujinančios medžiagos išleidimo procesas, iii) plyšio užgydymo procesas; b) plyšusios kapsulės vaizdas pro ESM [9]

Betono struktūroje esant didelei šarminiai aplinkai, naudojamos tokioms sąlygoms atsparios bakterijos [3]:

- Bacillus pasteurizing
- Bacillus sparsicus
- Bacillus coli
- Eschericia coli
- Bacillus cohnii
- Bacillus balodurans
- Bacillus pseudofirmus

### 1.5.2. Vandens pralaidumas panaudojant bakterijas

Agresyvių medžiagų, kurios sukelia betono irimą esant slėgio gradientui, įsiskverbimą lemia pralaidumas, kuris todėl yra laikomas pagrindine savybe nusakančia betono ilgaamžiškumą. Pralaidumas priklauso nuo cementinių medžiagų porų tinklo savybių, porėtumo, vingiuotumo, mikroįtrūkimais. Šie parametrai kartu su kitais, priklauso nuo vandens/cemento (V/C) santykio, dalelių dydžio, sukietėjusių cementinių medžiagų amžiaus. Pagal nagrinėtus straipsnius rasta, kad kalcio karbonato nusėdimas betone lėmė betono mėginių vandens absorbcijos ir pralaidumo sumažėjimą. Tyrimai parodė, kad Pasteurii bakterijų įmaišymas į betoną sumažino betono porėtumą

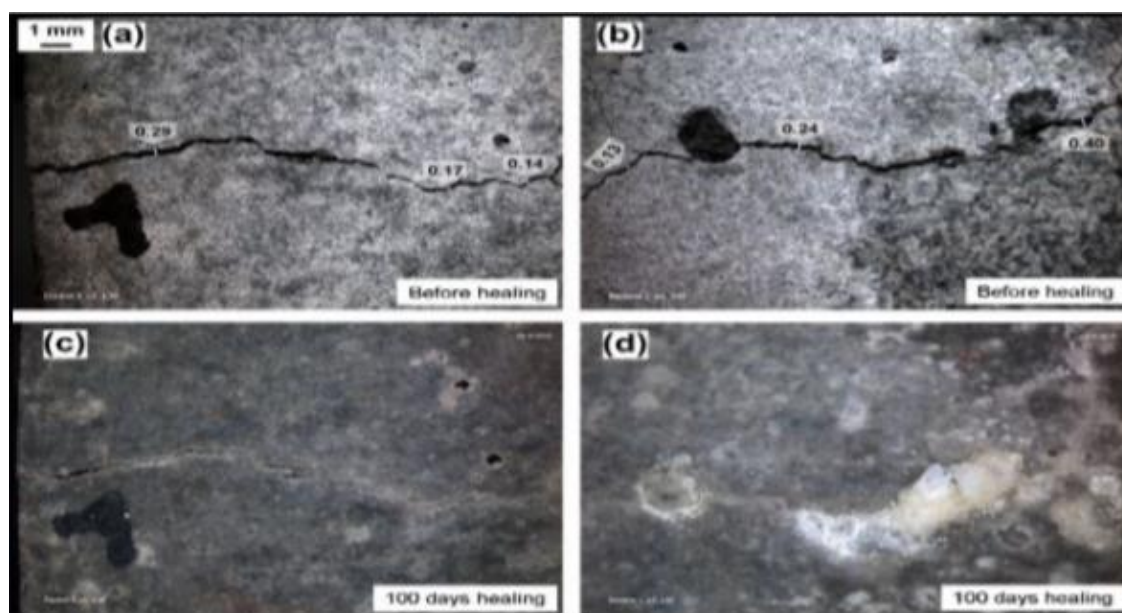
ir pralaidumą. Nustatyta, kad vandens absorbcija sumažėjo keturis kartus, kai bakterijų koncentracija betone yra  $10^5$  ląst./ ml. Kubeliai, išlieti įmaišius *Bacillus Megaterium* bakterijas ir jų maistinių medžiagų, dėl mikrobinio kalcito išskyrimo sugėrė tris kartus mažiau vandens nei įprasto betono bandiniai [9].

### 1.5.3. Mechaninis stipris panaudojant bakterijas

Analizuojant mokslinius straipsnius rasti eksperimentiniai tyrimai nusakantys, kad panaudojant tam tikros rūšies bakterijas, bakterinis betonas turėjo daug geresnius gniuždomojo stiprio atsparumo rezultatus. Tam tikros rūšies bakterijų ir stiprio pokyčio rezultatai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Bakterijų tipai ir jų gniuždymo stiprio rezultatai [9]

Bakterijų tipas	Rezultatai	Bakterijų koncentracija
Bacillus sp. CT-5	Gniuždymo stipris 40 proc. didesnis už kontrolinio betono	$5 \times 10^7$ ląst./mm <sup>3</sup>
Bacillus megaterium	Didžiausias stiprumo padidėjimas (50 MPa) aukščiausios markės betonui buvo 24 %	$30 \times 10^5$ ksv/ml
Bacillus subtilis	Gniuždymo stiprio padidėjimas 12 %, palyginus su kontroliniais betono mėginiais, kuriuose panaudoti nedidelės masės užpildai	$2,8 \times 10^8$ ląst./ml
Bacillus aerius	Bakterinio betono gniuždomojo stiprio padidėjimas 11,8 % lyginant su kontroliniu mėginiu	$10^5$ ląst./ml
Sporosarcina pasteurii	Gniuždymo stipris padidėjo 35 proc. Lyginant su kontroliniu betonu	$10^5$ ląst./ml
AKKR5	Gniuždomojo stiprio padidėjimas 10 %, lyginant su kontroliniu betonu	$10^5$ ląst./ml
Shewanella rūšys	Cementinio skiedinio gniuždymo stiprio padidėjimas 25 % lyginant su kontroliniu skiediniu	100 000 ląst./ ml



7 pav. Plyšio užsitaisymo procesas per SEM: a) kontrolinio betono plyšys, b) biobetonu plyšys, c) kontrolinio betono plyšys po 100 dienų, d) biobetonu plyšys po 100 dienų [10]

#### 1.5.4. Biobetono privalumai ir trūkumai

Privalumai [3]:

- savaiminis plyšių užsitašymas
- padidėjęs gniuždomasis ir lenkiamasis stipris lyginant su įprastu betonu
- padidėjęs atsparumas šaldymo – šildymo poveikiams
- mažesnis vandens pralaidumas
- dėl plyšių užsitašymo mažina plieno koroziją ir pagerina gelžbetoninių konstrukcijų patvarumą
- bacillus bakterijos nekenksmingos žmogui, todėl galima veiksmingai naudoti

Trūkumai [3]:

- biobetono kaina yra dvigubai didesnė nei įprasto betono
- bakterijų augimas nėra itin geras visose atmosferos terpėse
- molio granulės turinčios atsinaujinančią medžiagą sudaro 20% betono tūrio ir gali tapti betono šlyties ar pažeidimo zona.
- bakterinio betono projektavimui nėra sukurtų standartų
- brangūs kalcio nuosėdų tyrimai

#### 1.5.5. Atsinaujinimas pagrįstas mineraliniais priedais

Savaiminis atsinaujinimas cementinėse medžiagose gali būti išreikštas vykstant reakcijoms su mineraliniais priedais. Mineraliniai priedai į betoną dedami jo maišymo metu. Atsiradus betono plyšiui, nesureagavę mineralai pristatomi ant plyšio paviršiaus ir patekus vandeniui įvyksta reakcija. Ši reakcija išskiria produktą, kuris užtaiso atsivėrusį plyšį.

Mineraliniai priedai pagal savaiminį atsinaujinimą išskirti į dvi grupes: plyšių užsitašymas panaudojus išsiplėčiančias medžiagas arba kristalinį priedą.

Mineraliniai priedai kaip savaime atsinaujinanti medžiaga turi keleta privalumų. Kai kurie mineralai greitai reaguoja su vandeniu, dėl ko plyšio užsigydymo reakcija vyksta labai intensyviai. Be to, dėl išsiplėtimo pobūdžio mineralai gali pagerinti plyšio užsitašymo efektyvumą. Tačiau yra kelias trūkumus panaudojant mineralines medžiagas betone kaip savaime atsinaujinančias medžiagas. Kadangi gamybos metu mineraliniai priedai į betono mišinį dedami tiesiogiai be jokios apsaugos, tai maišymo metu jie sureaguoja su mišinyje esančiu vandeniu ir kitais produktais. Šiuo atveju priedai yra sureagavę. Taigi maišymo metu sureagavę priedai pradeda plėstis, o tai gali sukelti vidinių betono defektų. Taigi norint išgauti efektyvų ir naudingą šios medžiagos veikimą, mineraliniai priedai privalo būti kapsuliuojami.

3 lentelė. Išsiplečiantys ir kristaliniai priedai pateikti literatūroje [11]

Kategorija	Medžiagos
Išsiplečiantis priedas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalcio sulfoaluminatas</li> <li>• Negesintos kalkės</li> <li>• Anhidritas</li> <li>• Sujungtos išsiplečiančios medžiagos</li> <li>• Bentonitas</li> <li>• MgO ir CaO</li> <li>• Silicio dioksido mišiniai</li> <li>• Natrio aluminosilikato hidroksidas</li> <li>• Montmorilonito molis</li> </ul>
Kristalinis priedas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Įvairūs karbonatai</li> <li>• Talko milteliai</li> <li>• Natrio silikatas</li> </ul>

### 1.5.6. Betonų su mineraliniu priedu atsinaujinimas

Mineraliniai priedai yra žinomi kaip medžiagos turinčios gebėjimus plėstis vykstant hidratacijos ir karbonizacijos procesams ir dažnai naudojamos norint pagerinti autogeninio atsinaujinimo procesą. Pagrindinis produktas išgautas hidratuojant magnio ir kalcio oksidams yra brusitas. Brusitas – oksidų klasės mineralas, magnio hidroksidas. Vykstant šių mineralų hidratacijos procesui sukuriamas produktas turintis atsinaujinančių medžiagų savybes [1].

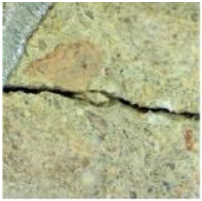
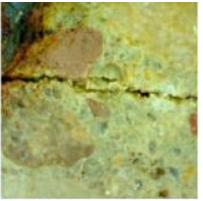
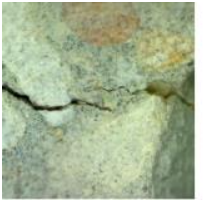
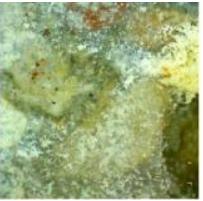



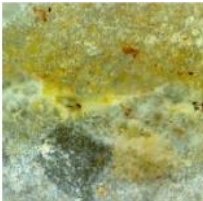
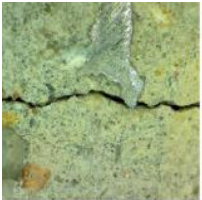
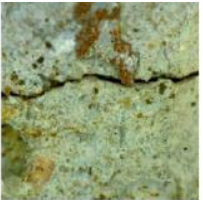



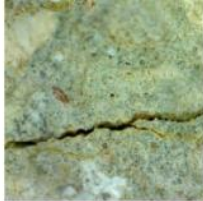

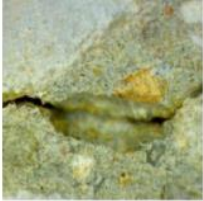
- $CaO + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2OH^- \rightarrow Ca(OH)_2$
- $MgO + H_2O \rightarrow Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2$

### 1.5.7. Įprasto ir su kristaliniu priedu betonų palyginimas įvairiose aplinkos sąlygose

Išnagrinėjus literatūroje pateiktus tyrimų rezultatus įvairiose terpėse matome, kad savaime atsinaujinančio betono su mineraliniu (kristaliniu) priedu užsitaisymui būtina sąveika su vandeniu. Kristalinis priedas geba katalizuoti minėtą atsinaujinimo produktą ir yra efektyvesnis dėl savo hidrofiliškumo. Priedas taip pat geba iš atmosferos absorbuoti drėgmę tokiu būdu nereikšmingas atsinaujinimas vyksta ir sąveikoje su oru. Betono bandiniai su kristaliniu priedu visiškai užsitaisė vandens panardintoje ir dalinai drėgnose sąlygose ir atsinaujinimas nebuvo veiksmingas drėgmės kameroje bei oro aplinkose. Kristalinio priedo pagalba siekiama pagaminti daugiau atsinaujinančio produkto ir vykstant hidratacijai užtaisyti plyšius bei atstatyti mechanines savybes. Bandymo rezultatai pateikti 4 lentelėje.

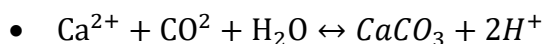


4 lentelė. Plyšių užsitaisymo efektyvumas įvairiose sąlygose [6]

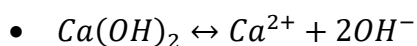
		Kontroliniai bandiniai		Bandiniai su kristaliniu priedu	
		Prieš atsinaujinimą	Po atsinaujinimo	Prieš atsinaujinimą	Po atsinaujinimo
Poveikis	Panardinimas vandenyje				
		Plyšio užsitaisymas ~75%		Plyšio užsitaisymas ~100%	
	Susisiekimas su vandeniu				
		Plyšio užsitaisymas ~60%		Plyšio užsitaisymas ~100%	
	Drėgmės kamera				
		Plyšio užsitaisymas ~0%		Plyšio užsitaisymas ~0%	
	Oro poveikis				
		Plyšio užsitaisymas ~0%		Plyšio užsitaisymas ~0%	

### 1.5.8. Betono su mineraliniu priedu atsinaujinimo sąlygos

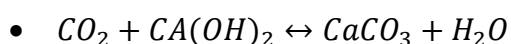
Kalcio jonų reakcija su aplinkoje esančių vandeniu ir anglies dvideginiu suformuoja bendrą produktą kalcio karbonatą [17].



Kalcio hidroksidas plyšio sritys plote sąveikoje su vandeniu išsilygina ir suformuoja kalcio jonų nuosėdas ant plyšio paviršiaus [17].



Ant betono paviršiaus esančio plyšio kalcio karbonatas susidaro dėl reakcijos su anglies dioksidu esančiu betono matricės dėl esančio portlandcemento [17].



### 1.5.9. Atsinaujinimo mechanizmai, sąlygos ir efektyvumas

Pagal mokslinių straipsnių pateiktą medžiagą išanalizuoti anksčiau aptarti atsinaujinančio betono mechanizmai, reikalingos sąlygos ir užsitaismo efektyvumas. Apibendrinta medžiaga pateikta 5 lentelėje.

5 lentelė. Atsinaujinimo mechanizmų sąlygos [11]

Atsinaujinimo mechanizmas	Plyšio sąveika su vandeniu	CO <sup>3</sup> jonų būvimas plyšyje	Plyšio pločio galimas užtaisyimas	Atsinaujinančių medžiagų tiekimo būdas į plyšį
Autogeninis atsinaujinimas	Sąveika su vandeniu turėtų būti nuolatinė	Nebūtina, tačiau CO <sup>3</sup> jonai palengvina gijimą	Plyšiai iki 50µm gali būti užtaisyti	-
Atsinaujinimas pagrįstas mineraliniu priedu	Sąveika su vandeniu turėtų būti nuolatinė	Nebūtina	Plyšiai iki 200µm gali būti užtaisyti	Mineralinės medžiagos gali būti dedamos tiesiogiai į betoną arba kapsuliuojamos
Atsinaujinimas pagrįstas bakterijomis	Sąveika su vandeniu turėtų būti nuolatinė	Taip. CO <sup>3</sup> jonai turi būti prieinami	Plyšiai iki 450µm gali būti užtaisyti	Bakterijos gali būti dedamos tiesiogiai į betoną arba kapsuliuojamos
Atsinaujinimas pagrįstas klijuojančiomis medžiagomis	Priklausomai nuo medžiagų tipo. Daugumoje atveju	Nebūtina	Gali užtaisyti didelius plyšius, priklausomai nuo išskiriamų medžiagų kiekio	Medžiagą būtina tiekti į plyšį kapsuliuavimo metodiką arba tiekiant vamzdeliais

### 1.5.10. Atsinaujinimo mechanizmų pritaikomumas

6 lentelė. Gelžbetoninių konstrukcijų tarnavimo sąlygos priklausomai nuo atsinaujinančio mechanizmo [11]

Statiniai	Autogeninis atsinaujinimas	Atsinaujinimas pagrįstas mineraliniu priedu	Atsinaujinimas pagrįstas bakterijomis	Atsinaujinimas pagrįstas klijuojančiomis medžiagomis
Betoninės konstrukcijos mirkstančios vandenyje	Rekomenduojamas	Rekomenduojamas	Rekomenduojamas	Sunkiai
Betoninės konstrukcijos esančios po žeme	Rekomenduojamas	Rekomenduojamas	Rekomenduojamas	Vandeninguose vietovėse beveik netaikomas
Betoninės konstrukcijos esančios lauke	Reikia tiekti papildomą vandenį	Reikia tiekti papildomą vandenį	Reikia tiekti papildomą vandenį	Rekomenduojamas
Viduje esantys betoniniai elementai	Sunkiai	Sunkiai	Sunkiai	Rekomenduojamas



## 1.6. Savaimė atsinaujinančių medžiagų vertinimas

Tiriant savaimė atsinaujinančius mechanizmus pagrindinis tikslas nustatyti šių mechanizmų poveikį tiriamoms medžiagoms. Kaip žinome iš nagrinėtos literatūros, kad savaimė atsinaujinančioms medžiagoms būdingas įvairus tiriamų medžiagų, tokių kaip betonas, mechaninių ir fizikinių savybių pakitimas. Pagal analizuotus straipsnius rasta daugybė būdų šių savybių nustatymams.

7 lentelė. Atsinaujinimo efektyvumo tikrinimo metodai [13]

Vertinimo kategorija	Metodas
Mikroskopija	<ul style="list-style-type: none"><li>• Optinė mikroskopija</li><li>• Skanuojanti mikroskopija</li></ul>
Spinduliavimas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rentgenografija</li><li>• Tomografija</li><li>• Skaitmeninė vaizdo koreliacija</li></ul>
Spektroskopija	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rentgeno spindulių difrakcijos analizė</li><li>• Rentgeno spektroskopija</li><li>• Infraraudonųjų spindulių spektroskopija</li></ul>
Pernešimo savybės	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vandens pralaidumas</li><li>• Oro pralaidumas</li><li>• Pasiurbimas</li><li>• Chloridų difuzija</li><li>• Osmosinis spaudimas</li></ul>
Mechaniniai bandymai	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gniuždymo bandymas</li><li>• Lenkimo bandymas</li><li>• Tempimo bandymas</li><li>• Horizontalių deformacijų bandymas</li><li>• Smūginis apkrovimas</li></ul>
Ne mechaniniai bandymai	<ul style="list-style-type: none"><li>• Garso sklaidimas</li><li>• Virpesių dažnio tyrimas</li></ul>

## 1.7. Plyšių formavimo metodai

Siekiant nustatyti metodo efektyvumą, bandinyje mechaniniu būdu suformuojami plyšiai. Priklausomai nuo analizuojamo atsinaujinimo metodo, dažniausiai naudojami lenkimo ir skėlimo būdu plyšių formavimo metodai.

### 1.7.1. Plyšio formavimas lenkimo metodu

Prieš apkraunt bandinį skersine apkrova, bandinyje ties tempimo zona yra padaroma įpjova. Prieš apkraunant bandinį, ties suformuota įpjova prikljuojamas deformacijas matuojantis detektorius. Bandinys yra dedamas atrėmus jo galus į atramas. Ties bandinio viduriu viršutinėje jo plokštumoje įtvirtinama metaline plokštelė centriškai nuo atramų ir atliekamas bandinio lenkimas, iki tol, kol pasiekiamas reikimas plyšio plotis.



8 pav. Plyšio formavimas lenkimo metodu

### 1.7.2. Plyšio formavimas skėlimo metodu

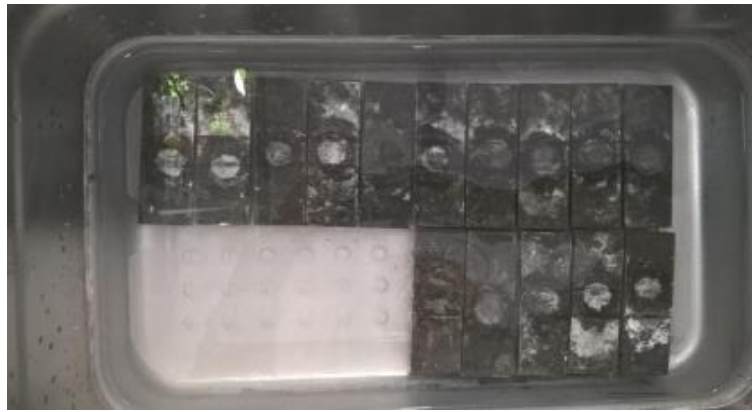
Plyšio formavimas skėlimo metodu vyksta suformuotą bandinį horizontaliai įstačius tarp hidraulinio presu plokščių ir jį apkrovus. Skeliant bandinį išilgai, plyšio plotis yra kontroliuojamas deformacijų daviklio pagalba. Šiuo metodu suformuotas plyšys nėra tolygus, tačiau daviklio pagalba galima gauti gerus rezultatus ir suformuoti plyšį 0-0,3 mm ribose.



9 pav. Plyšio formavimas skėlimo metodu [5]

## 1.8. Atsinaujinimo sąlygos

Vienas svarbiausių dalykų norint užtikrinti savaime atsinaujinančio betono efektyvumą, tai jo nuolatinė sąveika su vandeniu. Perskeltas bandinys patalpinamas į vandens pripildytą vonią taip, kad nepertraukiamai galėtų vykti reakcija. Vandens temperatūra turėtų būti apie 20°C. Bandiniai išimami iš vonios septynių dienų intervaluose ir tikrinamas jų vandens pralaidumas vandens pralaidumo metodu.



10 pav. Bandinių atsinaujinimo sąlygos [4]

### 1.8.1. Vandens pralaidumo metodas

Vandens pralaidumas yra viena iš svarbiausių savybių betoninėse konstrukcijose, kadangi iš esmės jis yra pradininkas visų korozijos procesų. Nustatant savaime atsinaujinančio betono efektyvumą šiuo metu praktikoje naudojamas vandens pralaidumo metodas. Perskeltas bandinys viršutinėje ir šoninėse plokštumose užtaisomas silikonu, o apatinė paliekama natūrali, taip sukuriant galimą vandens pratekėjimą paveikus vandens slėgiu per pritaisytą vamzdį.



11 pav. Atsinaujinimo patikrinimas vandens pralaidumo metodu [4]

Atsinaujinimo efektyvumo nustatomas pagal formulę: [6,16]

$$Užsigydymo laipsnis = 1 - \frac{\text{Galutinis pratekėjimas}}{\text{Pradinis pratekėjimas}}$$

## 2. Naudotos medžiagos ir tyrimų metodika

### 2.1. Betono sudėtys ir gamyba

Eksperimento metu tiriant savaime atsinaujinantį betoną sumaišytas dviejų sudėčių betonas. Pirmoji ir antroji betono sudėtis tai betonas su kristaliniu priedu ir polipropilininėmis fibromis bei kontrolinis tiriamajam palyginimui. Kaip rišamoji medžiaga panaudotas portlandcementis CEM I 42,5N. Betono gamybai panaudotas stambus ir smulkus užpildai. Smulkusis užpildas (smėlis), kurio frakcija 0/4, 0 mm – mažiausias užpildo matmuo, 4 mm – didžiausias užpildo matmuo. Stambusis užpildas (žvyras), kurio frakcija 4/16, 4 mm – mažiausias užpildo matmuo, 16 mm – didžiausias užpildo matmuo. Didesnio efektyvumo siekimui buvo panaudotas superplastiklis „Sika ViscoCrete D-187“ – skystos konsistencijos priedas, naudojamas betono gamybos metu, siekiant gauti mažesnę betono mišinio V/C santykį bei padidinti mišinio plastiškumą. Siekiant modifikuoti betoną panaudotas kristalinis priedas „Sika WT-200 P“. Tai kristalinis priedas sukurtas panaudoti kuriant vandeniui nepralaidžius ar savaiminio atsinaujinimo savybių turinčius betonus. Kristalizacijos reakcijai vykti ir atnaujinimo funkciją vykdyti būtina sąveika su vandeniu. Priedas sukurtas siekiant pagaminti aukštos kokybės vandeniui nepralaidžius betonus. „Sika WT-200 P“ sudarytas iš specialių cementų, amino alkoholių ir tam tikrų užpildų. Šios aktyvios medžiagos suformuoja netirpią medžiagą betono matricoje esančiose porose ir kapiliarinėse struktūrose, taip neleisdamos vandeniui ar kitiems skysčiams įsiskverbti į betono vidų. Kristalinė struktūra susiformuoja ir užpildo kapiliarines poras, smulkius mikroįtrūkius. Dingus drėgmei reakcija nebevyksta, atsinaujina, kai sistema vėl gauna drėgmės.

#### 2.1.1. Betono su kristaliniu priedu sudėtis ir gamyba

8 lentelė. Pirmą ir antrą betonų sudėtys  $1m^3$

Medžiagos	Sudėtis Nr. 1	Sudėtis Nr. 2
Cementas CEM I 42,5 N, kg	350	350
Vanduo, kg	157,5	157,5
V/C	0,45	0,45
Smėlis 0/4, kg	890	890
Žvirgždas 4/16, kg	990	990
Superplastiklis Sika ViscoCrete, kg	2,45 (0,7% nuo cemento masės)	2,45 (0,7% nuo cemento masės)
Kristalinis priedas Sika WT200P, kg	-	3,50, (1,00% nuo cemento masės)
Polipropilininės fibros, kg	0,6	0,6

Superplastiklių ir kristalinių priedų kiekis apskaičiuotas nuo naudojamos cemento masės.



12 pav. Betono gamybai naudotos medžiagos

Betono mišinio ruošimo seka:

- 30 sekundžių maišomas smėlis, žvyras ir 1/3 vandens;
- 1 minutės pauzė;
- Supilamas cementas ir maišoma 30 sekundžių;
- Supilamas likęs vanduo;
- Maišant po truputi supilamas superplastiklis;
- Supilamas kristalinis priedas ir maišoma 30 sekundžių.



13 pav. Betono gamybos metu naudota maišyklė



### 2.1.2. Betono su magnio oksido priedu sudėtis ir gamyba

Sekanti betono sudėtis pagaminta su išsiplečiančiais mineraliniais priedais. Betono gamybai panaudoti trijų rūšių išsiplečiantys mineralai, t.y magnio oksidas, bentonitas ir hidraulinės gesintos kalkės. Sudėčiai naudotas MgO, kuris buvo 93,18% grynumo, montmorilonito molis daugiausiai turejo 54,2% SiO<sub>2</sub> ir 18,4% Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ir galutinė mineralinė medžiaga hidraulinės negesintos kalkės, kurių kiekis buvo 93,9%. Šiai sudėčiai kaip užpildai panaudota dolomito skalda. Šis betonas buvo pagamintas tyrimuose dalyvavusių kitų šalių laboratorijų pagal pateiktą sudėtį:

9 lentelė. Trečia ir ketvirta betonų sudėtys 1m<sup>3</sup>

Medžiagos	Sudėtis Nr. 3	Sudėtis Nr. 4
Cementas CEM I 42,5 N, kg	360	315
Vanduo, kg	180	198
Smėlis 0/4, kg	930	980
Dolomito atsijos 4/8, kg	530	910
Dolomito atsijos 8/16, kg	365	-
Plieninės fibros	40	40
Superplastiklis Sika ViscoCrete, kg	3ltr/m <sup>3</sup>	3-3,2ltr/m <sup>3</sup>
Hidraulinės gesintos kalkės	-	18
MgO	-	18
Bentonitas	-	9

Betono mišinio ruošimo seka:

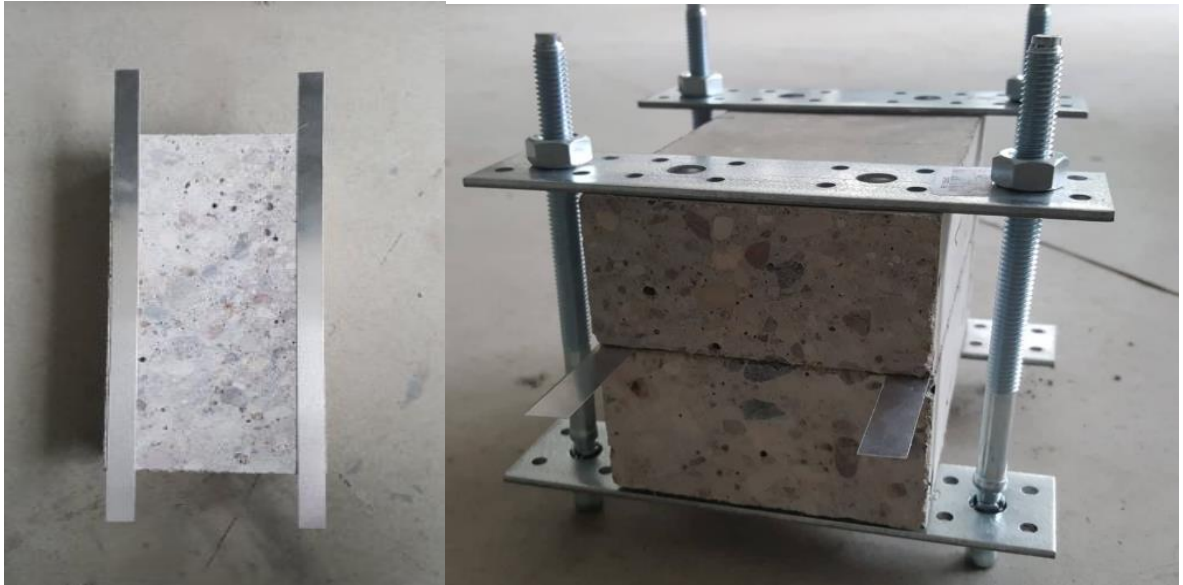
- 3 minutes maišomi mineralai sausomis sąlygomis;
- Supilama 70% vandens ir maišoma 3 minutes;
- Supilamas superplastiklis ir 25% vandens ir maišoma 2 minutes;
- Supilamas likęs vanduo ir maišoma 2 minutes.

### 2.2. Lygaus plyšio sudarymo metodika

Eksperimento metu tiriant savaime atsinaujinantį betona su kristaliniais priedais tirtas naujas plyšio sudarymo metodas. Kadangi praktikoje jau atliktas įprastas lenkimo ar skėlimo metodu sudaryto plyšio užsigydymo eksperimentas, tačiau šiuo metodu užtikriname, kad plyšys bus tolygus ir vienodas per visą bandinio ilgį. Plyšys sudarytas dirbtinai panaudojant 0,2 mm storio plokšteles, pagal kurias teoriškai turėtų susidaryti tolygus vienodo pločio plyšys artimas galimam jo atsinaujinimui.



14 pav. Plyšio sudarymas nestandartiniu metodu



15 pav. Plyšio sudarymas nestandartiniu metodu



16 pav. Plyšio sudarymas nestandartiniu metodu

### 2.3. Bandinių su lygių plyšiu atsinaujinimo efektyvumo tikrinimo metodika

Eksperimento metu suformuoti aštuoni bandiniai. Viso bandinio plyšys užhermetizuojamas silikonu apart viršutinės plokštumos, kurioje sandariai prikljuojamas vamzdis. Prieš pradėdant atsinaujinimo bandymą, patikrinamas faktinis vandens pralaidumas pro bandinį per 5 minutes.



17 pav. Faktinio vandens pralaidumo matavimas per 5 minutes

Patikrinus vandens pralaidumą, bandiniai patalpinami vandens vonioje, kur sąveikoje su vandeniu vyks užsigydymo procesas. Vėliau periodiškai kas septynias dienas tikrinamas vandens pralaidumas ir paskaičiuojamas užsigydymo efektyvumas.



18 pav. Bandinių užmerkimas į vonią atsinaujinimo reakcijai



## 2.4. Betono su magnio oksido priedu bandinių paruošimas

Antrojo eksperimento metu tiriant betoną su magnio oksidu bandiniai buvo suformuoti kitų universitetų laboratorijų ir pristatyti juos tirti. Gauti aštuoni cilindriniai bandiniai, kurių matmenys  $\varnothing 100 \times 200 \text{ mm}$  ir dvylika sijų, kurių matmenys  $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ . Keturi cilindrai ir šešios sijos pagamintos be priedo kontroliniam palyginimui. Prieš pradėdant savaiminio atsinaujinimo tyrimą, visi bandiniai patalpinti drėgmės kameroje  $20^\circ\text{C}$ , esant  $95 \pm 5\%$  santykinei oro drėgmei arba panardinant į vandenį.

Pagal pateiktą metodiką, gauti trys diskai  $100 \text{ mm}$  pločio ir  $50 \text{ mm}$  aukščio iš kiekvieno cilindro. Sumoje gauta dvylika bandinių kontroliniam palyginimui ir dvylika su magnio oksido priedu.



19 pav. Cilindrinų bandinių supjovimo metodika

Norint išgauti vientisą plyšį, bandiniuose padarytos įpjovos, taip sukuriant įtempių koncentratorių. Diskiniuose bandiniuose įpjautos įpjovos  $3 \text{ mm}$  gylio per visą bandinio ilgį, priklausomai nuo disko pločio. Prizminiuose bandiniuose įpjovos gylis  $10 \text{ mm}$ .

### 2.4.1. Plyšių sudarymo metodika bandinių skeliant

Diskiniuose bandiniuose, kurių matmenys  $\varnothing 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  įpjautos įpjovos per bandinio centrą,  $3 \text{ mm}$  gylio, simetriškai abiejuose bandinio pusėse. Norint išvengti didesnių bandinių pažeidimų, bandiniai apskunami lipnia juosta. Plyšiai atveriami hidrauliniu presu skėlimo metodu. Bandiniai apkraunami  $0.7 \mu\text{m/s}$  greičiu, iki tol, kol bandinio abiejuose pusėse atsivers  $0,3 \text{ mm}$  plyšys. Pagal faktą, šiuo metu nukrovus apkrovą, liekamasis plyšio plotis išliko  $0,2 \text{ mm}$ . Kitu atveju bandinio plyšys matuojamas šešiuose bandinio vietose ir skaičiuojamas vidurkis, kuris turi tenkinti  $0,2 \pm 0,05 \text{ mm}$  plyšio plotį. Su šiais bandiniais atliktas vandens pralaidumo tyrimas.



20 pav. Plyšių atvėrimas hidrauliniu presu skėlimo metodu

#### **2.4.2. Plyšių sudarymo metodika bandinį lenkiant**

Plyšių atvėrimas prizminiuose bandiniuose atliktas trijų taškų lenkimo metodu. Sumoje dvylika bandinių, kurių matmenys 100x100x500 mm paruošiami dieną prieš plyšių atvėrimą, t.y. ištraukiami iš drėgmės kameros ir padaromos įpjovos. Pagal metodiką plyšiai atverti šešiuose bandiniuose su magnio oksido priedu ir trijuose kontroliniuose, be priedo. Su šiais bandiniais atliktas vandens absorbcijos tyrimas.

Plyšių atvėrimui naudojamas trijų taškų lenkimo metodas hidrauliniu presu. Tarpatramis tarp atraminių taškų lygus 30 centimetrų. Bandiniai apkraunami 0.7  $\mu\text{m/s}$  greičiu kol sijoje atsivėrusio plyšio plotis bus lygus 0,3 mm. Plyšio pločio reguliavimui naudoti poslinkio davikliai, kurie fiksuoja elemento vidurio taško įlinkio reikšmę. Programinės įrangos pagala nukrovus bandinį plyšio plotis išliko 0,2 mm.



21 pav. Plyšių atvėrimas hidrauliniu presu lenkimo metodu

## 2.5. Plyšių matavimas

Norint užtikrinti, kad bandiniuose išgautas tinkamo pločio plyšys, panaudotas plyšio matavimo prietaisas. Išmatavus plyšio pločius, diskinių ir prizminių bandinių reikšmės tenkino 0,2 milimetro nustatytas ribas.



22 pav. Skaitmeninė nuotrauka gauta plyšio matavimo prietaisu

## 2.6. Tyrimo metodikos

### 2.6.1. Vandens pralaidumo bandymas

Pasiruošimas:

Prieš atliekant vandens pralaidumo bandymą, bandiniai 24 valandoms patalpinti džiuoti laboratorinėmis sąlygomis arba džiovinami 24 valandas 40° temperatūroje. Laboratorijoje turi būti tinkama santykinė oro drėgmė, leidžianti tinkamai išdžiūti bandiniams.

Viršutinėje diskinių bandinių plokštumoje priklijuoti ne mažesnio nei 200 mm aukščio PVC vamzdžiai atsparia vandeniui arba silikonine medžiaga.



23 pav. Diskinių bandinių paruošimas vandens pralaidumo bandymui

Vandens pralaidumo testas atliekamas į bandinius pripilant 1,5 litro vandens. Pirmąją minutę rezultatai nėra fiksuojami dėl galimos paklaidos, kurią sukelia oro burbulai pasišalindami iš plyšio. Vėliau atstatomas 1,5 litro vandens kiekis vamzdyje ir skaičiuojamas tik visiškai stabilus vandens srautas tekantis pro plyšį. Pasiekus stabilų vandens pratekėjimą, matuojami pratekėjimo rezultatai dviem etapais. Pirmasis – vandens kiekio pratekėjimas per 20 minučių. Antrasis – vandens likutis po 30 minučių nuo bandymo pradžios.



24 pav. Vandens pralaidumo bandymas

Bandymo rezultatai matuojami vandens pratekėjimu litrais per minutę. Atlikus bandymą, bandiniai užmerkiami vonioje tolimesniai užsigydymo reakcijai. Kontroliniai ir bandiniai su magnio oksido



priedu užmerkami atskirose talpyklose, vertikaloje padėtyje. Tolimesnėje eigoje šis bandymas atliekamas po 28 ir 90 dienų.



25 pav. Kontrolinių ir su magnio oksido priedu diskinių bandinių užmerkimas

### 2.6.2. Vandens absorbcijos bandymas

Pasiruošimas:

Visi bandiniai mažiausiai 14 dienų paliekami džiovinimo kameroje, 40° temperatūroje, kol bus pasiektas pastovus prizminių bandinių svoris. Bandiniai taip pat gali būti palikti džiuoti 14 dienų laboratorinėmis sąlygomis, jei pasiekiamas pastovus svoris, kuris per dvi valandas nukrenta mažiau nei 0,2%. Vėliau bandiniai vienai dienai paliekami aplinkoje, kur esti 20°C ir 60% santykinė oro drėgmė. Norint išvengti dulkių patekimo į plyšį ir jų pažeidimo, prizmės sudedamos ant tarpinių plyšių orientuojant į apačią.

Prieš atliekant vandens absorbcijos bandymą, prizmių dugnas padengiamas hidroizoliacine medžiaga centriškai paliekant 14 mm juostą plyšio vietoje. Taip pat bandinių šonai hidroizoliuojami perimetru ne mažiau 30 mm nuo atverto plyšio plokštumos. Pasveriamas ir užrašomas kiekvieno sauso bandinio svoris.



26 pav. Prizminių bandinių paruošimas

Atliekant vandens absorbcijos bandymą prizminiai bandiniai talpyklose sudedami taip, kad vanduo bandinį apsemtų vienodu lygiu. Vandens lygis talpykloje neturi viršyti daugiau kaip 5 mm paveikus bandinio plyšį. Bandymo metu matuojamas bandinių svoris po 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, 196, 225, 256, 476, 1448 minučių.



27 pav. Vandens absorbcijos bandymas

Bandymas atliekamas 24 valandų eigoje. Vėliau bandiniai užmerkiami vonioje vykti užsigydymo reakcijai. Kartotinis bandymas atliekamas po 28 ir 90 dienų.



28 pav. Kontrolinių ir su MgO priedu prizminių bandinių užmerkimas

### 3. Eksperimento rezultatai

#### 3.1. Betono su kristaliniu priedu tyrimų rezultatai taikant lygaus plyšio metodiką

Pirmojo eksperimento metu, prieš pradėdant tyrimus su kristaliniu priedu modifikuotu betonu buvo nustatyti betono mišinio bei sukietėjusio betono parametrai, tokie kaip betono slankumas, betono tankis, gniuždomasis stipris.

##### 3.1.1. Betono mišinio slankumo nustatymas

Eksperimento metu nustatytas visų sudėčių betono slankumas ir pateikta betono slankumo klasė.

10 lentelė. Pirmos ir antros betono mišinių slankumo klasės

Betono mišinys	Slankumas, mm	Slankumo klasė
Sudėtis Nr. 1	134	S3
Sudėtis Nr. 2	141	S3

- Pirmoji sudėtis – betonas be kristalinio priedo ir polipropileninių fibrų skirtas kontroliniam palyginimui.
- Antroji sudėtis – betonas su kristaliniu priedu Sika WT200P ir polipropileninėmis fibromis.

##### 3.1.2. Betono tankio nustatymas

Po 28 parų išmatuojamas bandinių svoris. Taip pat išmatavus bandinių matmenis apskaičiuojamas tiriamojo betono tankis.

11 lentelė. Betono geometrija ir nustatytas betono tankis po 28 dienų

Sudėtis Nr.	Matmenys, mm	Svoris, kg	Tankis, kg/m <sup>3</sup>
1	100,02x99,97x101,11	2,41	2385
2	99,97x101,32x99,83	2,45	2391

##### 3.1.3. Betono gniuždomojo stiprio nustatymas

Betono stiprio nustatymui buvo pagamintas pirmos sudėties betono kubelis, kurio matmenys 100x100x100 mm ir gniuždomas po 28 parų.



29 pav. Betono gniuždomojo stiprio nustatymas po 28 parų

12 lentelė. Betono geometrija ir nustatytas gniuždomasis betono stipris po 28 dienų

Bandinio Nr.	Gniuždomasis stipris, MPa
1	56,5
2	68,1

### 3.1.4. Bandinių su kristalinių priedu atsinaujinimo rezultatai

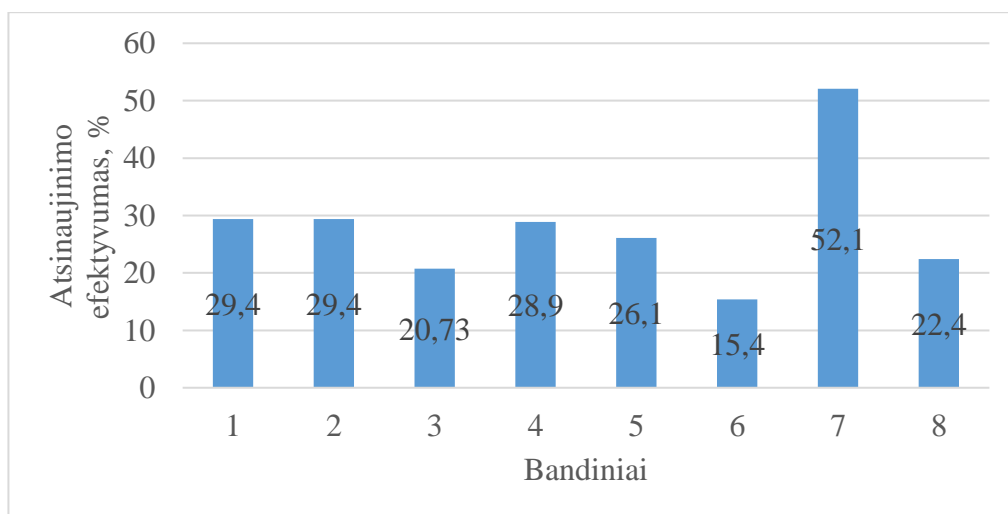
Pagrindinis tyrimo tikslas tiriant betoną su kristaliniu priedu, tai patikrinti jo užsigydymo efektyvumą. Šis bandymas atliekamas naudojant vandens pralaidumo metodą. Pirmieji matavimai atlikti 7 dienų perioduose. Kadangi stebint rezultatus jie netenkino, tai matavimai atlikti po 90 dienų.



30 pav. Matuojamas faktinis vandens pralaidumas per 5 minutes

Atlikus eksperimentinę dalį patikrinamas bandinių atsinaujinimo efektyvumas pagal formulę:

$$\text{Atsinaujinimo efektyvumas} = \left(1 - \frac{\text{Galutinis pratekėjimas}}{\text{Pradinis pratekėjimas}}\right) \cdot 100$$



31 pav. Bandinių su kristaliniu priedu atsinaujinimo efektyvumo rezultatai po 120 dienų



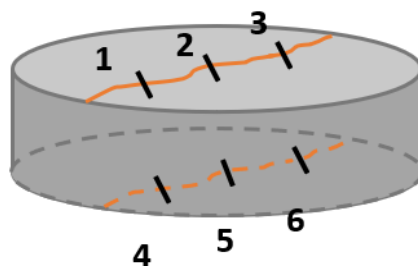
13 lentelė. Bandinių su kristaliniu priedu atsinaujinimo efektyvumo vidurkio rezultatai po 120 dienų išlaikymo vandenyje

Bandiniai	H
Atsinaujinimo efektyvumo vidurkis, %	28,1
Standartinis nuokrypis	10,9
Laikas	120 d.

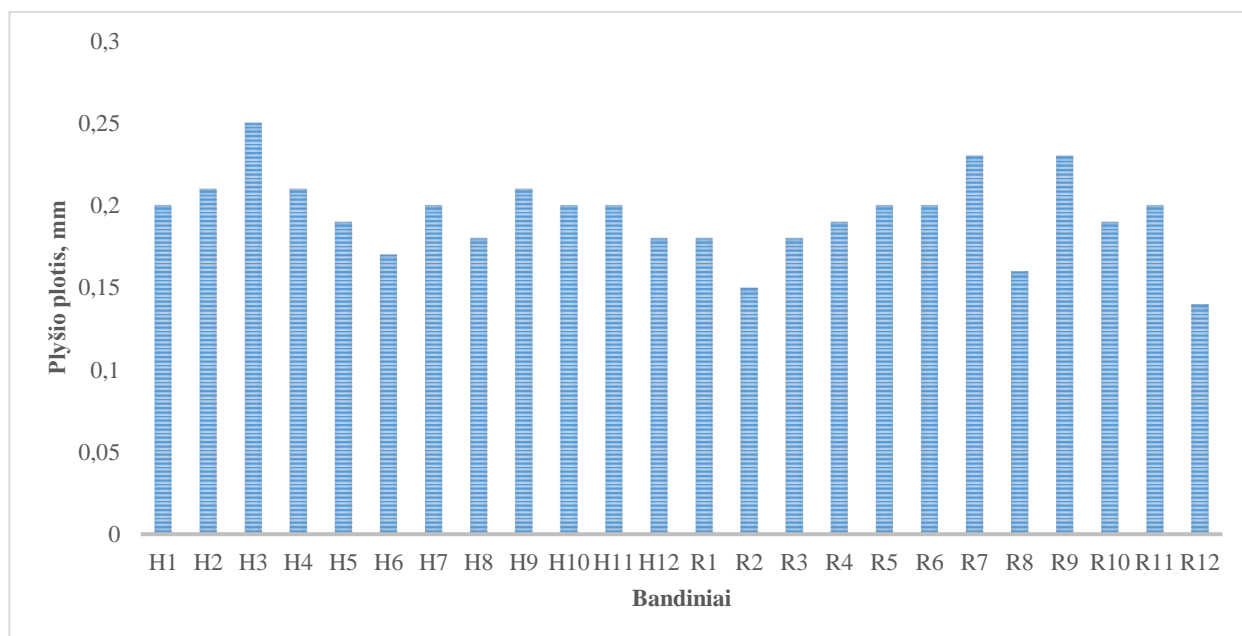
### 3.2. Betono su magnio oksido priedu tyrimų rezultatai taikant plyšio metodiką skeliant

#### 3.2.1. Plyšių sudarymo rezultatai

Antrojo eksperimento metu, betono su magnio oksido priedu diskiniuose bandiniuose atvertų plyšių plotis išmatuotas pagal pateiktą metodiką. Plyšiai matuojami 6 vietose kaip pateikta 32. pav ir išvedamas plyšio pločio vidurkis.



32 pav. Plyšių matavimo metodika



33 pav. Diskinių bandinių plyšių pločių rezultatai

Pagal pateiktus lentelės rezultatus, plyšių pločių vidurkis neviršija 0,3 mm, todėl visi bandiniai tinkami naudoti tyrimams.

Paruošus visus bandinius tyrimams atliekamas faktinis vandens pralaidumo bandymas.

14 lentelė. Vandens pralaidumo duomenys ir rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje

Bandinys	Bandinio Nr.	Vamzdžio Ø, mm	Matavimo diena				0	
			$\Delta H$	$\Delta T$	$\Delta W$	WF	Likutis po 30 min	Prabėgo po 20 min
			(mm)	(min)	(ltr)	(Lt/min)	Litrai	Litrai
R1	1	103,6	78,9	30	0,665	0,022	0,835	0,508
R2	2	-	-	-	-	-	-	-
R3	3	103,6	47,0	30	0,397	0,013	1,104	0,286
R4	4	103,6	62,9	30	0,530	0,018	0,970	0,389
R5	5	103,6	64,0	30	0,539	0,018	0,961	0,305
R6	6	103,6	122,0	30	1,028	0,034	0,472	0,822
R7	7	103,6	112,1	30	0,945	0,032	0,555	0,423
R8	8	103,6	80,5	30	0,678	0,023	0,822	0,382
R9	9	103,6	106,5	30	0,897	0,030	0,603	0,713
R10	10	103,6	53,2	30	0,449	0,015	1,052	0,241
R11	11	103,6	114,3	30	0,964	0,032	0,537	0,754
R12	12	103,6	96,5	30	0,813	0,027	0,687	0,064
H1	1	103,6	66,7	30	0,562	0,019	0,938	0,420
H2	2	103,6	143,7	30	1,212	0,040	0,289	0,968
H3	3	103,6	53,7	30	0,453	0,015	1,048	0,740
H4	4	103,6	89,6	30	0,755	0,025	0,745	0,505
H5	5	103,6	80,3	30	0,677	0,023	0,824	0,521
H6	6	103,6	38,8	30	0,327	0,011	1,173	0,229
H7	7	103,6	74,5	30	0,628	0,021	0,872	0,469
H8	8	103,6	110,5	30	0,932	0,031	0,569	0,378
H9	9	103,6	94,1	30	0,794	0,026	0,707	0,616
H10	10	103,6	117,4	30	0,990	0,033	0,511	0,803
H11	11	103,6	106,4	30	0,897	0,030	0,604	0,698
H12	12	103,6	93,8	30	0,790	0,026	0,710	0,511

R1-R12 – bandiniai be magnio oksido priedo

H1-H12 – bandiniai su magnio oksido priedu

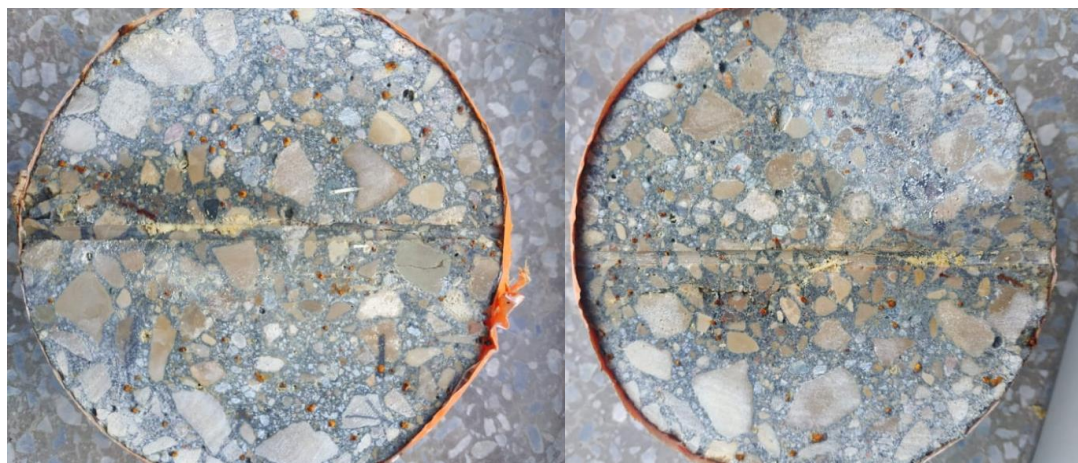
$\Delta H$  – vandens lygio sumažėjimas vamdyje per 30 minučių (mm);

$\Delta T$  – laikas, per kurį matuojamas vandens pratekėjimas (30min);

$\Delta W$  – vandens kiekio pratekėjimas per 30 minučių (ltr);

WF – vandens kiekio pratekėjimas per minutę (ltr/min)

Po 28 dienų ir 3 mėnesių diskiniai bandiniai ištraukiami iš vandens talpyklos bei paruošiami pakartotiniams vandens pralaidumo bandymams. Vizualiai pastebimas atsinaujinančios medžiagos išskyrimas, todėl galima teigti, kad atsinaujinimo reakcija veiksminga.



34 pav. Vizualus atsinaujinančio produkto išsiskyrimas plyšyje

Atlikus eksperimentinę dalį apskaičiuojamas ir palyginamas kontrolinių bandinių ir su magnio oksido priedu plyšių užsitaisymas. Apskaičiuojamas vandens pralaidumas per bandinį (litr/min), nustatomos vidutinės reikšmės, standartinis nuokrypis bei apskaičiuojamas atsinaujinimo efektyvumas procentais.

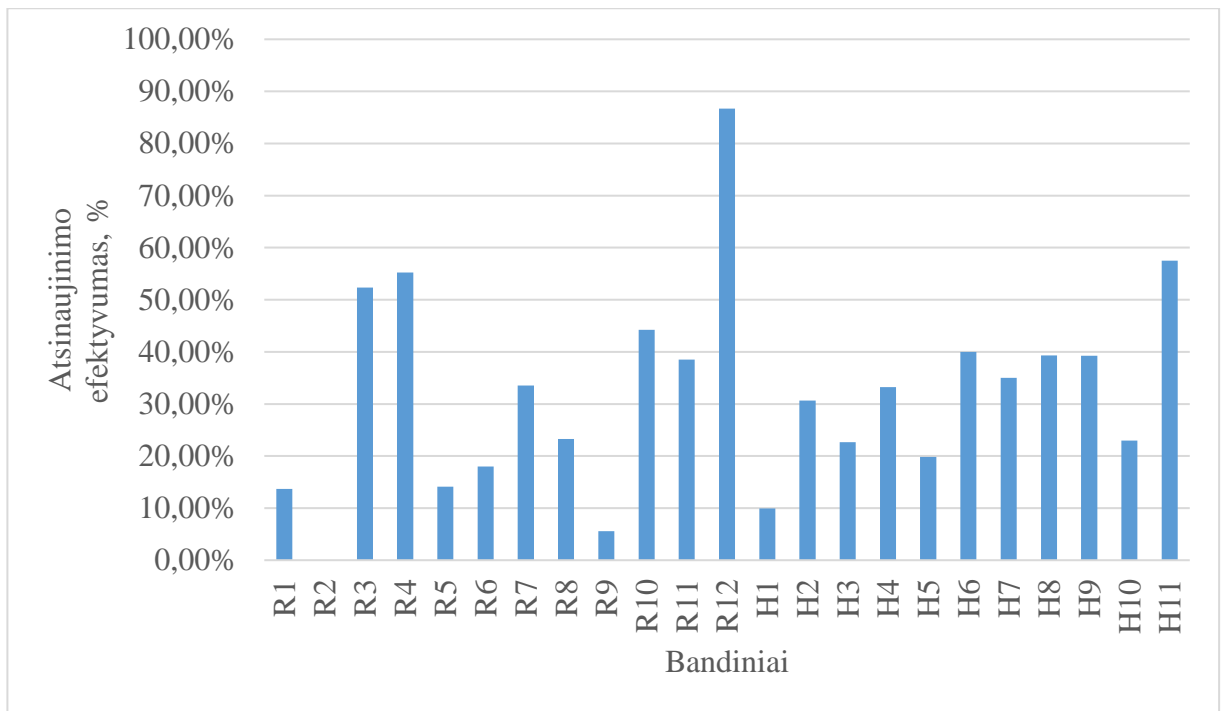
### 3.2.2. Bandinių su magnio oksido priedu atsinaujinimo rezultatai

15 lentelė. Vidurkio reikšmė ir standartinis nuokrypis 0 dienų išlaikius vandenyje

Bandiniai	R	H
Vidutinis vandens pralaidumas, (litr/min)	0,024	0,025
Standartinis nuokrypis	0,007	0,008

Nustatomas vandens pralaidumo vidurkis ir standartinis nuokrypis po 28 dienų vykusio atsinaujinimo. Rezultatai lyginami su gautais prieš atliekant bandymą ir nustatomas betono atsinaujinimo efektyvumas pagal formulę:

$$\text{Atsinaujinimo efektyvumas} = \left(1 - \frac{\text{Galutinis pratekėjimas}}{\text{Pradinis pratekėjimas}}\right) \cdot 100$$



35 pav. Diskinių bandinių atsinaujinimo efektyvumo rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje

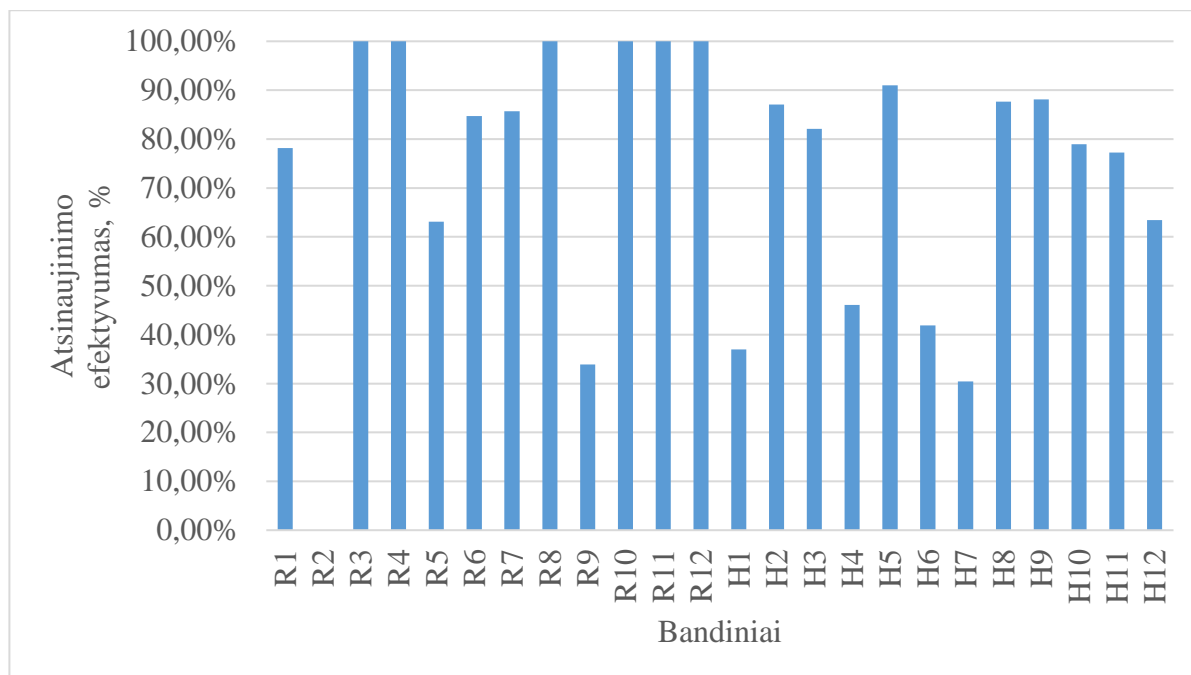
16 lentelė. Vidurkio reikšmė ir standartinis nuokrypis po 28 dienų išlaikymo vandenyje

Bandiniai	R	H
Vidutinis vandens pralaidumas, (ltr/min)	0,016	0,018
Standartinis nuokrypis	0,008	0,006

17 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 28 dienų išlaikymo vandenyje

Bandiniai	R	H
Atsinaujinimo efektyvumo vidurkis, %	33,5	28,8
Laikas	28 d.	

Nustatomas vandens pralaidumo vidurkis ir standartinis nuokrypis po 3 mėnesių vykusio atsinaujinimo. Rezultatai lyginami su gautais prieš atliekant bandymą ir nustatomas betono atsinaujinimo efektyvumas.



36 pav. Diskinių bandinių atsinaujinimo rezultatai po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje

18 lentelė. Vidurkio reikšmė ir standartinis nuokrypis po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje

Bandiniai	R	H
Vidutinis vandens pralaidumas, (ltr/min)	0,004	0,007
Standartinis nuokrypis	0,006	0,004

19 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje

Bandiniai	R	H
Atsinaujinimo efektyvumo vidurkis, %	84,4	71,2
Laikas	3 mėn.	

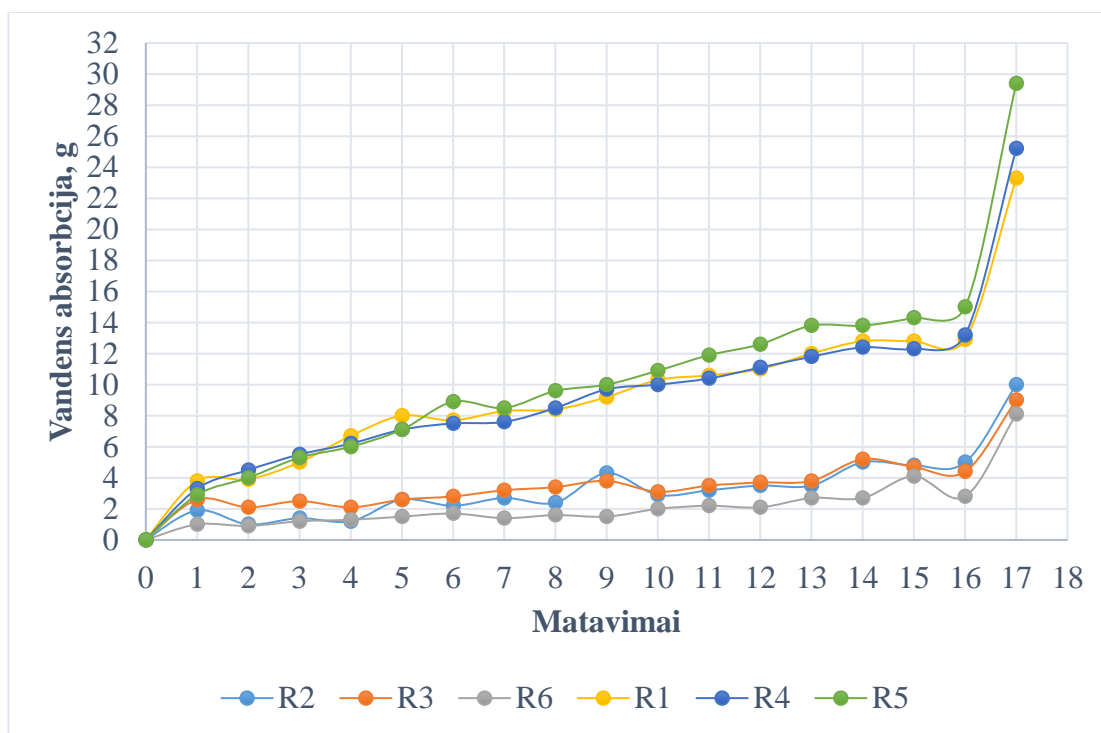
### 3.3. Betono su magnio oksido priedu tyrimų rezultatai taikant plyšio metodiką lenkiant

Trečiasis eksperimentas atliktas su tos pačios sudėties betonu modifikuotu magnio oksido priedu. Tirti prizminiai bandiniai su kuriais atliktas vandens absorbcijos bandymas ir apskaičiuotas infiltracijos aukštis. Prieš užmerkiant bandinius į vonią vykti atsinaujinimo reakcijai, atliekamas vandens absorbcijos bandymas. Bandymo metu bandiniai laikomi apsemti vandens pripildytoje talpykloje pagal metodikoje nurodytą aukštį ir matuojami numatytu laiku, kurie pateikti 19 lent.

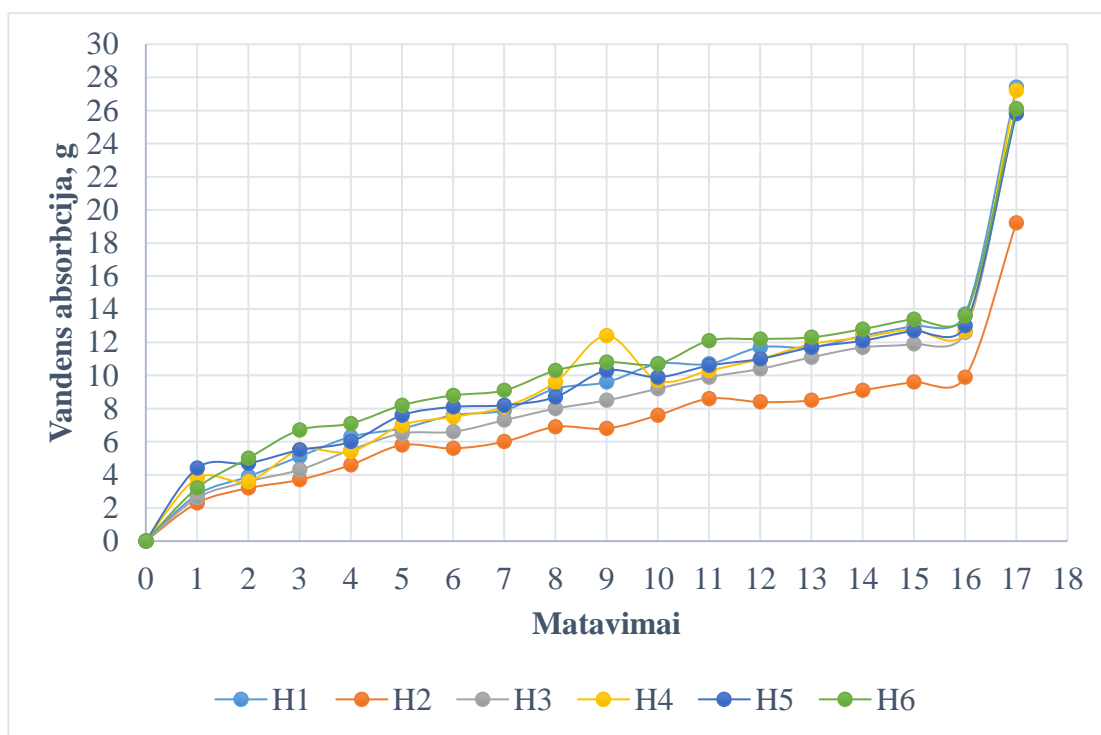
20 lentelė. Bandinių matavimas numatytu laiku

Bandymas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Laikas, min	0	4	9	16	25	36	49	64	81	100	121	144	169	196	225	256	1448

Bandymo metu matuota kontrolinių ir su MgO priedu bandinių masė pagal numatytą laiką. Grafike išreikšti bandiniai R2, R3, R6 – kontroliniai bandiniai be plyšio ir R1, R4, R5 – kontroliniai bandiniai su plyšiu (37 pav.). Vandens absorbcijos matavimų reikšmės pateiktos darbo prieduose.

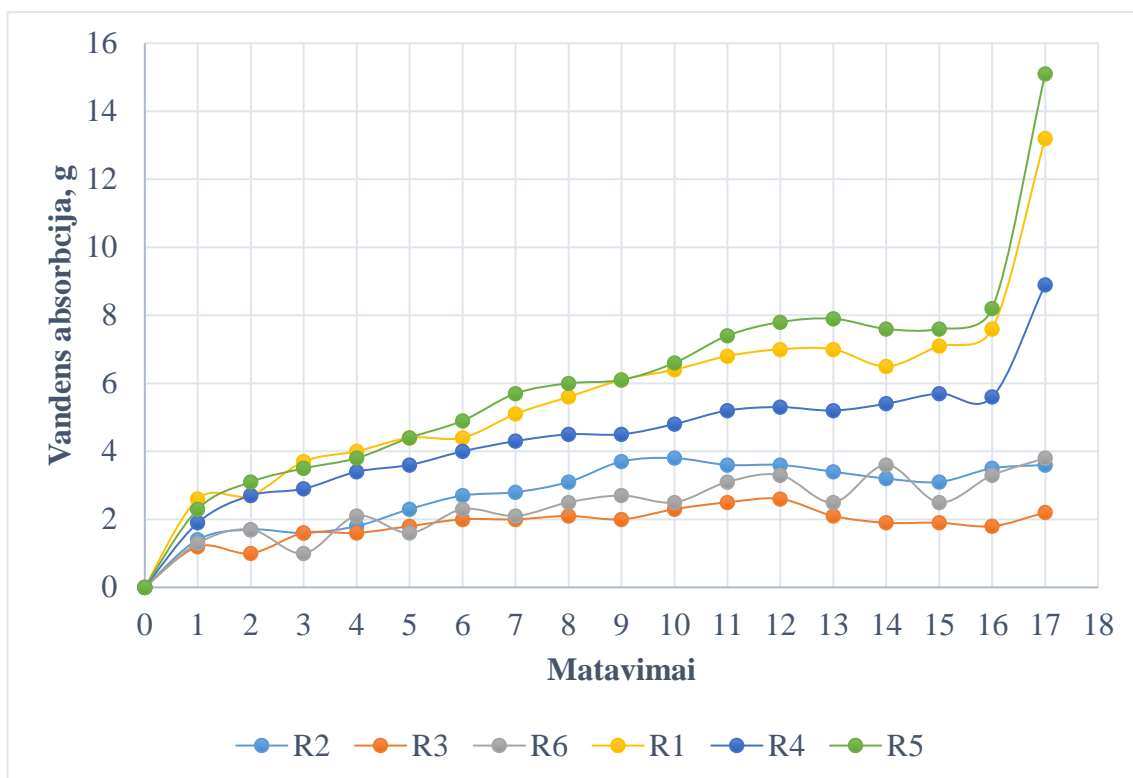


37 pav. Kontrolinių bandinių vandens absorbcijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje  
 Analogiškai atliktas bandymas su bandiniai, kurie sudėtyje turėjo MgO priedą. Bandiniai H1, H2, H3, H4, H5, H6 – bandiniai su MgO priedu ir plyšiais (38 pav.).

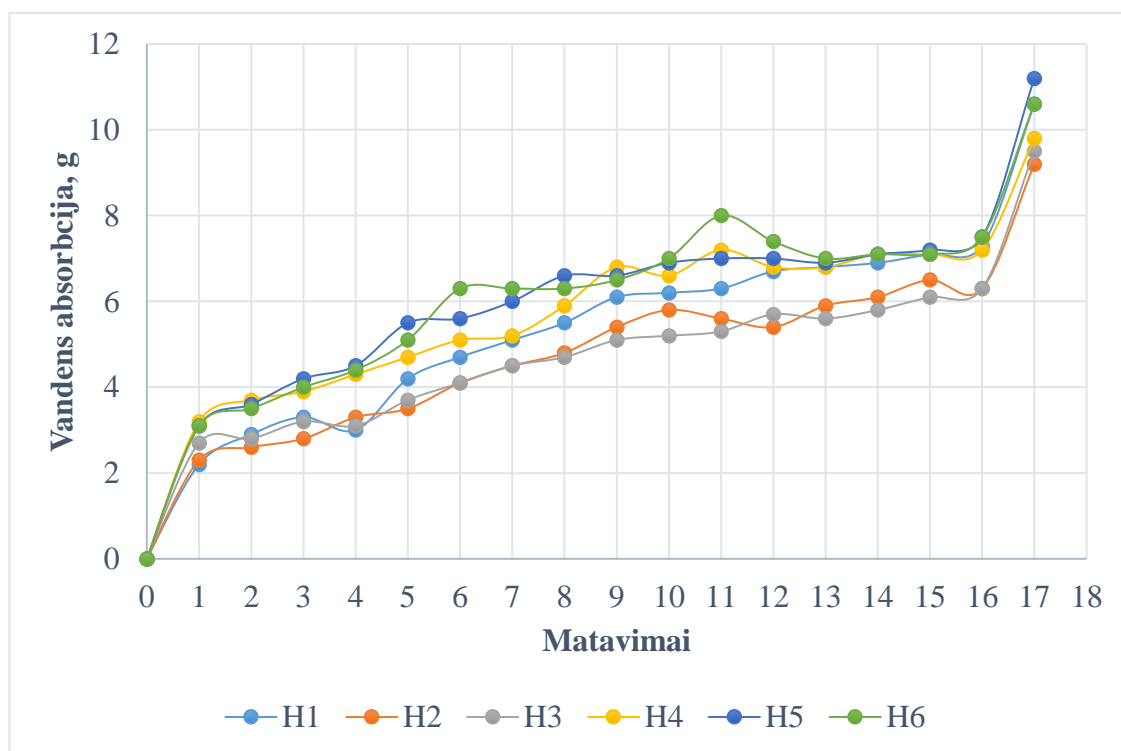


38 pav. Bandinių su MgO priedu vandens absorbcijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje

Vandens absorbcijos eksperimentas pakartojamas po 28 dienų vykusio atsinaujinimo.

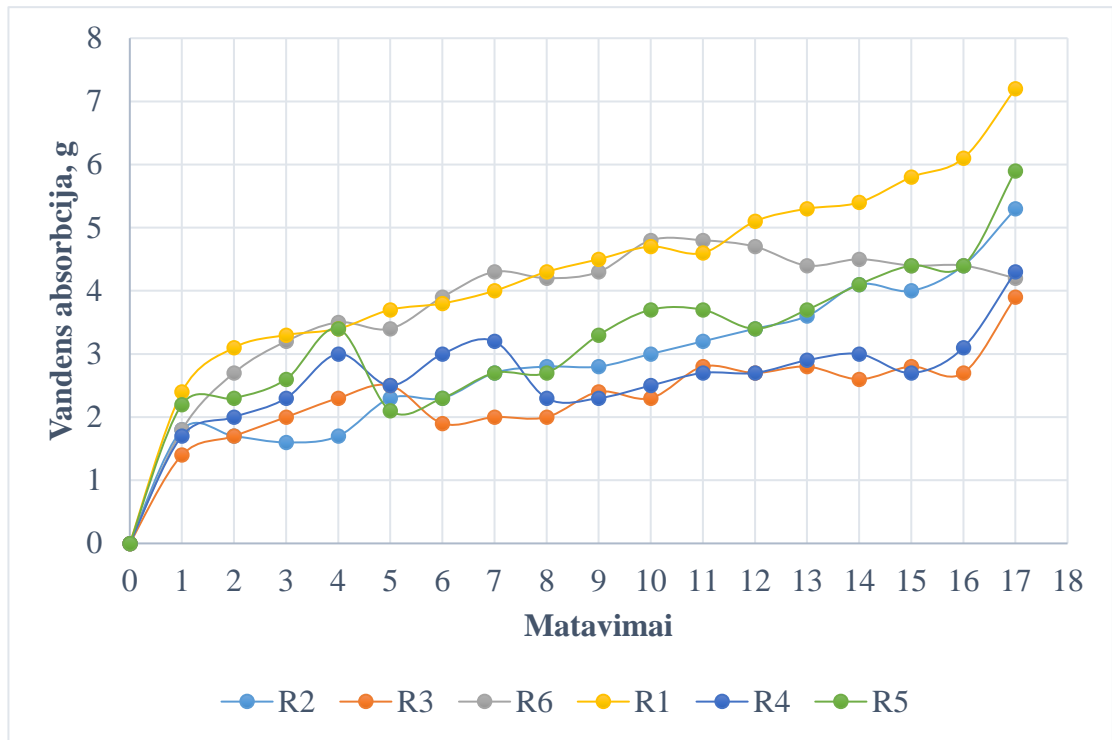


39 pav. Kontrolinių bandinių vandens absorbcijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje

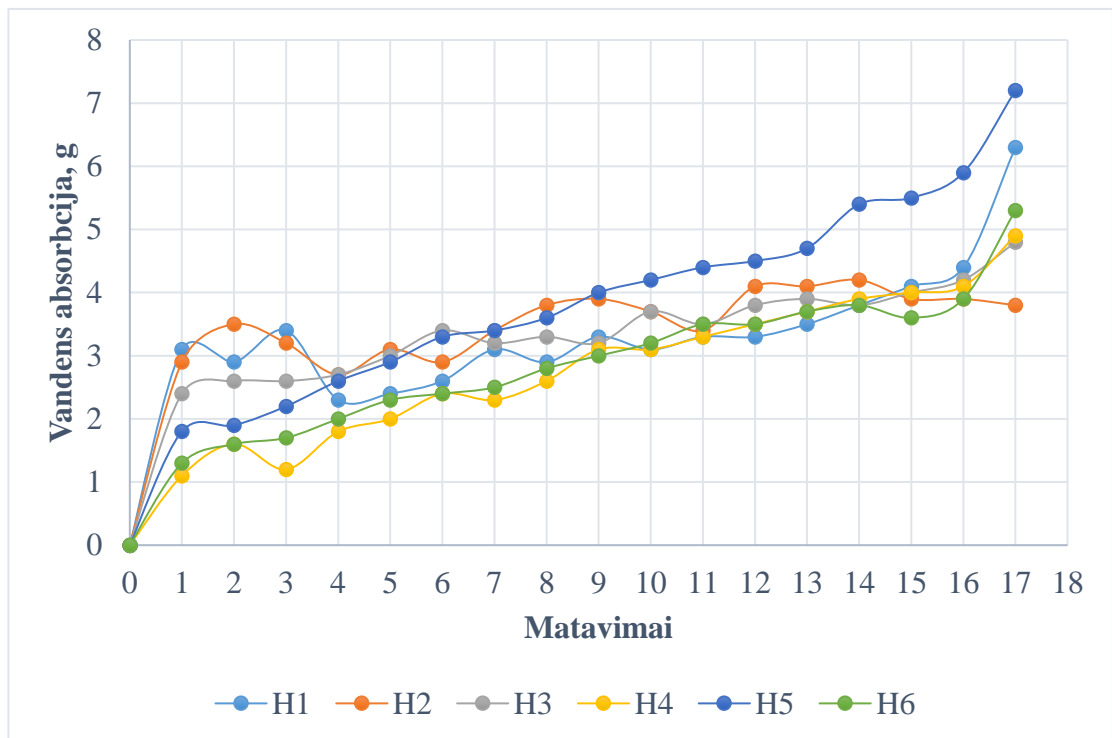


40 pav. Bandinių su MgO priedu vandens absorbcijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje

Vandens absorbcijos eksperimentas pakartojamas po 90 dienų.



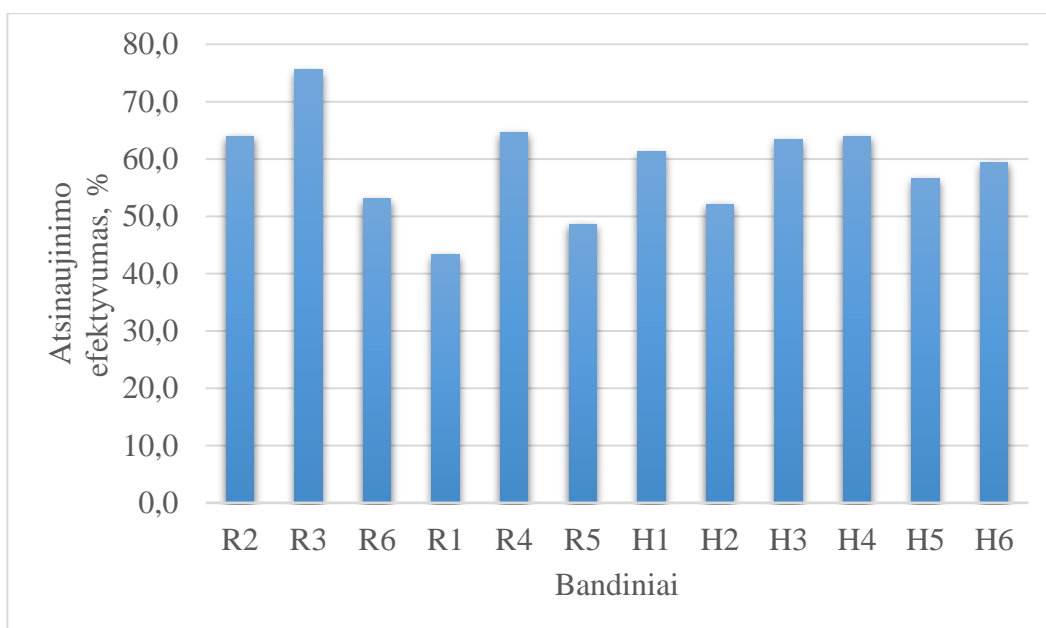
41 pav. Kontrolinių bandinių vandens absorbcijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje



42 pav. Bandinių su MgO priedu vandens absorbcijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje

Atlikus eksperimentinę dalį apskaičiuojamas bandinio atsinaujinimo efektyvumas procentais po 28 ir 90 dienų. Rezultatai palyginami vandens absorbcijos skirtumu prieš ir po atsinaujinimo ir nustatomas atsinaujinimo efektyvumo vidurkis.

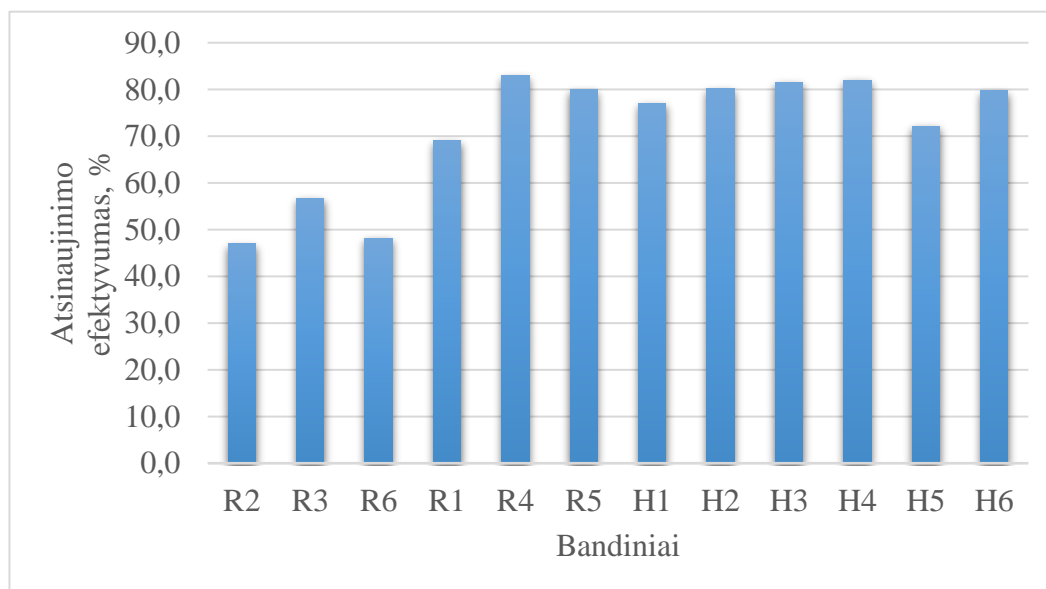




43 pav. Vandens absorbcijos atsinaujinimo rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje

21 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkių reikšmės po 28 dienų išlaikymo vandenyje

Bandiniai	R	H
Atsinaujinimo efektyvumo vidurkis, %	58,2	59,5
Laikas	28 d.	



44 pav. Vandens absorbcijos atsinaujinimo rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje

22 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkių reikšmės po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje

Bandiniai	R	H
Atsinaujinimo efektyvumo vidurkis, %	64,0	78,8
Laikas	3 mėn.	

Kadangi žinoma, kad vykstant hidratacijos procesui bandinys tankėja, apskaičiuojame vandens infiltracijos aukštį pagal formulę:

$$\text{Infiltracija (mm)} = \left( \frac{\text{Vandens infiltracija}_2 - \text{Vandens infiltracija}_1}{0,000998 \cdot 1400} \right)$$

Vandens infiltracija<sub>2</sub> – vandens infiltracijos aukštis į bandinį atlikus matavimą po 1448 minučių, kai bandinys buvo išlaikytas vandenyje 28 ar 90 dienų (mm).

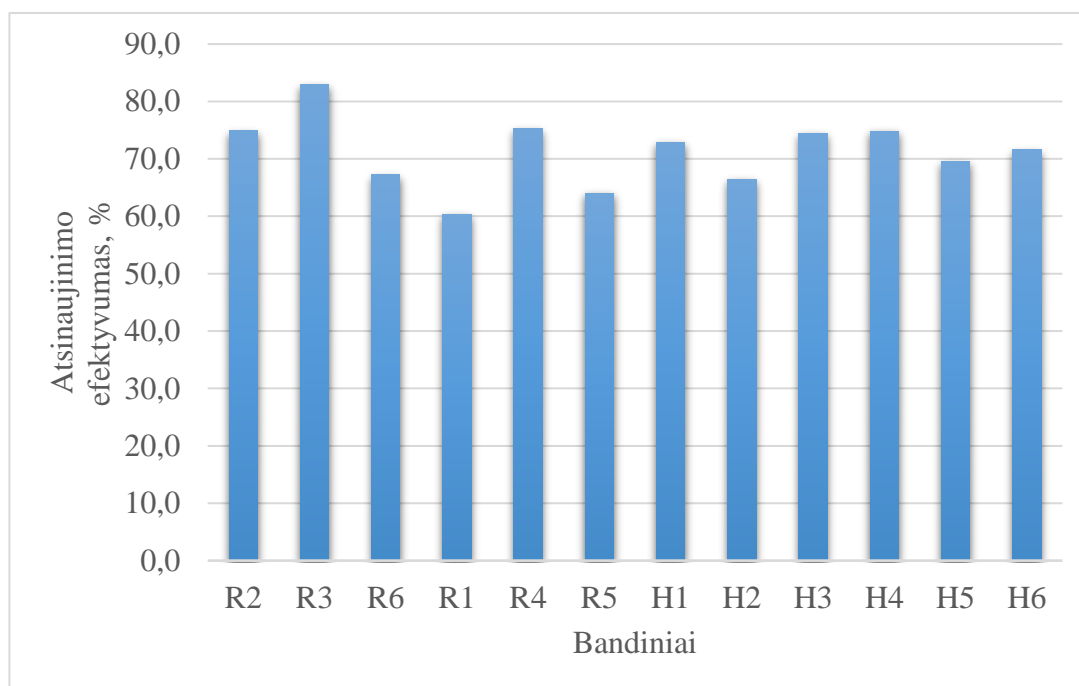
Vandens infiltracija<sub>1</sub> – vandens infiltracijos aukštis į bandinį atlikus matavimą po 1448 minučių, kai bandinys buvo išlaikytas vandenyje 0 dienų (mm).

1400 – nepadengtas hidroizoliacija plyšio vietoje bandinio plotas (mm<sup>2</sup>).

0,000998 – vandens tankis (gr/mm<sup>3</sup>)

Vandens infiltracijos aukščio reikšmės pateiktos darbo prieduose.

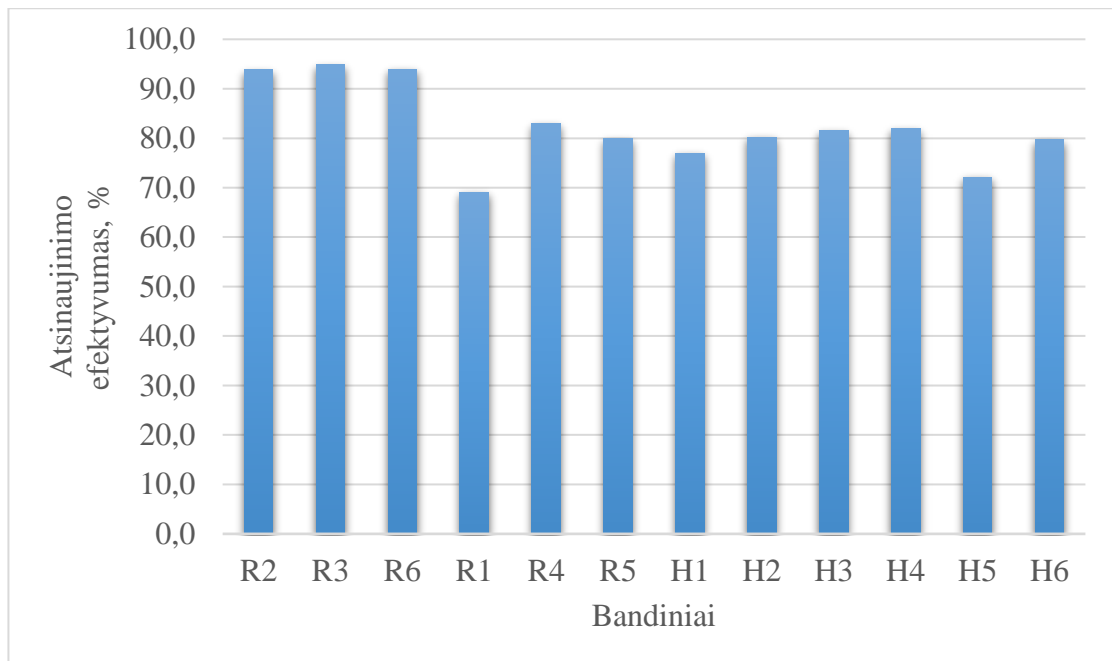
Apskaičiuojamas infiltracijos aukščio sumažėjimas procentais po 28 ir 90 dienų ir nustatomas atsinaujinimo efektyvumo vidurkis.



45 pav. Infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje

23 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 28 dienų išlaikymo vandenyje

Bandiniai	R	H
Atsinaujinimo efektyvumo vidurkis, %	70,8	71,6
Laikas	28 d.	



46 pav. Infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje

24 lentelė. Bandinių atsinaujinimo efektyvumo vidurkio reikšmės po 3 mėnesių išlaikymo vandenyje

Bandiniai	R	H
Atsinaujinimo efektyvumo vidurkis, %	70,8	71,6
Laikas	3 mėn.	

## Išvados

1. Atlikus betono su kristaliniu priedu eksperimentus nustatytos betono mišinio bei sukietėjusio betono savybės. Nustatytas kontrolinio ir su kristaliniu priedu betono mišinio slankumas atitiko S3 klasę, apskaičiuotas kontrolinio betono tankis  $2385\text{kg/m}^3$ , betono su kristaliniu priedu  $2391\text{kg/m}^3$  gniužomasis stipris po 28 parų kontrolinio betono 56,5 MPa, betono su priedu 68,1 MPa.
2. Nustatytas betono su kristaliniu priedu lygių plyšių užsigydymo efektyvumas. Tirti bandiniai su 0,2mm pločio nestandartiniais plyšiais po 120 dienų vandens pralaidumą vidutiniškai sumažino 28,1%. Rezultatai parodė, kad ši metodika nėra tinkama, tačiau ją galima tobulinti mažinant plyšio plotį.
3. Tiriant betoną su MgO priedu nustatytas kontrolinių bandinių ir su priedu plyšių užsigydymo efektyvumas. Taikant vandens pralaidumo bandymą su sudarytais plyšiais skeliant, po 28 dienų, kontrolinių bandinių atsinaujinimo vidurkio reikšmė siekė - 33,5%, bandinių su priedu – 28,8%. Po 3 mėnesius vykusio atsinaujinimo kontrolinių bandinių vidurkio reikšmė – 84,4%, bandinių su priedu – 71,2%.
4. Atlikus vandens absorbcijos bandymus su MgO priedu modifikuotais prizminiais bandiniais taikant plyšio metodiką lenkiant nustatyta plyšių atsinaujinimo vidurkio reikšmė po 28 dienų vykusio atsinaujinimo kontroliniams bandiniams siekė – 58,2%, bandiniams su priedu – 59,5%. Po 3 mėnesius vykusio atsinaujinimo kontrolinių bandinių vidurkio atsinaujinimo reikšmė kontroliniuose bandiniuose – 64,0%, bandiniuose su priedu – 78,8%.
5. Pagal gautus duomenis apskaičiuotas infiltracijos aukštis po 28 dienų atsinaujinimo kontroliniuose bandiniuose vidutiniškai sumažėjo – 70,8%, bandiniuose su priedu – 71,6%. Po 3 mėnesius vykusio atsinaujinimo infiltracijos aukštis kontroliniuose bandiniuose vidutiniškai sumažėjo – 85,8%, bandiniuose su priedu – 78,8%.

## Literatūros sąrašas

1. T.S. QURESI.; A. KANELLOPOULOS.; A. AI-TABBAA. Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system or self-healing concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2016, vol. 121, pp. 629-643. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.030
2. Senot SANGADJI. Can self-healing mechanism helps concrete structures sustainable. *Procedia engineering* [interaktyvus]. 2017, pp. 238-249. Prieiga per: doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.331
3. B.R.GAUTUM. Bacteria Based Self Healing Concrete – A Bacterial Approach. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)* [interaktyvus]. 2018, pp. 57-61. ISSN 2319-1813
4. J HARRIS.; Y. ZHOU.; J CALARIA-HOLLEY.; K PAINE. Autogenous Self-Healing Fibre Cement
5. A.R. SULEIMAN.; M.L. NEHDI. Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. *Cement and Concrete Research* [interaktyvus]. 2018, vol. 111, pp. 197-208. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.009
6. M. ROIG-FLORES.; S. MOSCATO.; P. SERNA.; L. FERRERA. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2015, vol. 86, pp. 1-11. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091
7. S.S. LUCAS.; M. Von TAPAVICZA.; A.M. SCHMIDT.; J. BERTLING.; A. NELLESEN. Study of quantification methods in self-ealing concrete ceramics, polymers and concrete:A route towards standartization. *Journal of Inteligent Material Systems and Structures* [interaktyvus]. 2016, vol. 27(19), pp. 2577-2598. Prieiga per: doi: 10.1177/1045389x16641205
8. H. MA.; S. QIAN.; Z. ZHANG. Effect of self healing on water permeability and mechanical property of Medium-Early-Strength Engineered Cementitious Composites. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2014, vol. 68, pp. 92-101. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.065
9. K. VIJAY.; M. MURMU.; S.V. DEO. Bacteria based self healing concrete – A review. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, vol. 152, pp. 1008-1014. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040
10. C. KARTHIK.; R.M.RAO.P. Properties of Bacterial-based Self healing Concrete – A review. *International Journal of ChemTech Research*. 2016, vol. 9(2), pp. 182-188. ISSN: 0974-4290
11. H. HUANG.; G. YE.; C. QIAN.; E. SCHLANGEN. Self-healing cementitious materials: Materials, methods and service conditions. *Materials and Design* [interaktyvus]. 2016, vol. 92, pp. 499-511. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.091

12. H. MIHASHI.; T. NISHIWAKI. Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art-Report. Journal of Advanced Concrete Technology [interaktyvus]. 2012, vol. 10, pp. 170-184. ISSN: 1347-3913
13. N.Z. MUHAMMAD.; A. SHAFAGHAT.; A. KEYVANFAR.; M.Z.A. MAJID ir others. Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete:A review. Construction and Building Materials [interaktyvus]. 2016, vol. 112, pp. 1123-1132. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.017
14. A. MISHRA.; R. GUPTA. Self-healing Concrete: A Sustainable Concrete Solution. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET) [interaktyvus]. 2018, vol. 6. ISSN: 2321-9653
15. B. PARK.; Y.C. CHOI. Self-healing capability of cementitious materials wit cristalline admixture and super absorbent polymers (SAP). Construction and Building Materials [interaktyvus]. 2018, vol. 189, pp. 1054-1066. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.061
16. M.R. FLORES.; F. PIRRITANO.; P. SERNA.; L. FERRARA. Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. Construction and Building Materials [interaktyvus]. 2016, vol. 114, pp. 447-457. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.196
17. T. C.S. REDDY.; A. RAVITHEJA. Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments. Ain Shams Engineering Journal [interaktyvus]. 2019, vol. 10, pp. 23-32. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.asej.2018.01.005
18. T. WAICHING.; K. OMID.; C. HONGZHI. Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review. Construction nad Bulding Materials [interaktyvus]. 2015, vol. 81, pp. 233-247. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.054
19. A. TALAIEKHOZAN.; A. KEYVANFER.; A. SHAFAGHAT and others. A Review of Self-healing Concrete Reserch Development. Journal of Environmental Treatment Techniques [interaktyvus]. 2014, vol. 2(1), pp. 1-11. ISSN: 2309-1185
20. JOKŪBAITIS V.; ŠAUČIUVĖNAS G. Statinių konstrukcijų techninės būklės vertinimas. 2012, Technika. Vilniaus Gedimino technikos universitetasVilnius. Prieiga per: doi:10.3846/1302-S

## Priedai

### 1 priedas. Bandinių su kristaliniu priedu atsinaujinimo rezultatai

Bandinio Nr.	Laikas, min	Pro bandinį prabėgęs vandens kiekis ltr/d.					Atsinaujinimo efektyvumas %
		0	7	14	21	120	
1	5	1,036	1,068	0,994	0,934	0,632	29,4
2		1,09	1,086	1,096	1,059	0,772	29,4
3		1,042	1,164	1,073	0,978	0,826	20,7
4		1,642	1,529	1,609	1,536	1,167	28,9
5		1,496	1,553	1,454	1,398	1,105	26,1
6		2,254	2,302	2,268	2,196	1,907	15,4
7		2,2	2,187	1,909	1,747	1,055	52,1
8		1,948	2,092	1,929	1,844	1,511	22,4

### 2 priedas. Diskinių bandinių plyšių pločių rezultatai

Bandinys	Matavimų vietos abiejose bandinio pusėse						Vidurkis
	1	2	3	4	5	6	
H1	0,08	0,20	0,20	0,10	0,30	0,30	0,20
H2	0,15	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30	0,21
H3	0,30	0,30	0,30	0,20	0,20	0,20	0,25
H4	0,24	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21
H5	0,20	0,25	0,10	0,10	0,30	0,20	0,19
H6	0,10	0,13	0,10	0,20	0,20	0,30	0,17
H7	0,10	0,20	0,20	0,20	0,30	0,20	0,20
H8	0,20	0,20	0,10	0,15	0,20	0,20	0,18
H9	0,10	0,20	0,30	0,15	0,20	0,30	0,21
H10	0,10	0,20	0,30	0,10	0,30	0,20	0,20
H11	0,20	0,20	0,10	0,20	0,30	0,20	0,20
H12	0,20	0,20	0,10	0,30	0,20	0,10	0,18
R1	0,10	0,20	0,15	0,12	0,30	0,20	0,18
R2	0,10	0,20	0,10	0,15	0,20	0,15	0,15
R3	0,20	0,20	0,15	0,20	0,20	0,10	0,18
R4	0,20	0,20	0,16	0,20	0,22	0,16	0,19

### 3 priedas. Diskinių bandinių vandens pralaidumo rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje

Matavimo diena									28
Bandinys	Bandinio Nr.	Vamzdžio Ø, mm	ΔH	ΔT	ΔW	WF	Atsinaujinimo efektyvumas	Vandens Likutis po 30 min	Prabėgo vandens po 20 min
			(mm)	(min)	(Lt)	(Lt/min)		Litrai	Litrai
R1	1	103,6	68,1	30	0,574	0,019	13,67%	0,926	0,556
R2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
R3	3	103,6	22,4	30	0,189	0,006	52,32%	1,311	0,255
R4	4	103,6	28,1	30	0,237	0,008	55,26%	1,263	0,159
R5	5	103,6	55,0	30	0,463	0,015	14,10%	1,037	0,476
R6	6	103,6	100,1	30	0,843	0,028	17,97%	0,657	0,755
R7	7	103,6	74,5	30	0,628	0,021	33,54%	0,872	0,472
R8	8	103,6	61,7	30	0,520	0,017	23,30%	0,980	0,533
R9	9	103,6	100,5	30	0,847	0,028	5,57%	0,653	0,673
R10	10	103,6	29,7	30	0,250	0,008	44,26%	1,250	0,878
R11	11	103,6	70,3	30	0,592	0,020	38,54%	0,908	0,434
R12	12	103,6	12,8	30	0,108	0,004	86,71%	1,392	0,083
H1	1	103,6	60,1	30	0,506	0,017	9,93%	0,994	0,367
H2	2	103,6	99,7	30	0,840	0,028	30,64%	0,660	0,606
H3	3	103,6	41,5	30	0,350	0,012	22,65%	1,150	0,402
H4	4	103,6	59,8	30	0,504	0,017	33,25%	0,996	0,384
H5	5	103,6	64,3	30	0,542	0,018	19,86%	0,958	0,418
H6	6	103,6	23,3	30	0,196	0,007	40,02%	1,304	0,256
H7	7	103,6	48,4	30	0,408	0,014	35,04%	1,092	0,314
H8	8	103,6	67,1	30	0,565	0,019	39,33%	0,935	0,432
H9	9	103,6	57,2	30	0,482	0,016	39,23%	1,018	0,351
H10	10	103,6	90,4	30	0,762	0,025	22,98%	0,738	0,599
H11	11	103,6	45,2	30	0,381	0,013	57,50%	1,119	0,418
H12	12	103,6	65,9	30	0,555	0,019	29,75%	0,945	0,545



#### 4 priedas. Diskinių bandinių vandens pralaidumo rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje

Matavimo diena									90
Bandinys	Bandinio Nr.	Vamzdžio Ø, mm	ΔH	ΔT	ΔW	WF	Atsinaujinimo efektyvumas	Vandens Likutis po 30 min	Prabėgo vandens po 20 min
			(mm)	(min)	(Lt)	(Lt/min)		Litrai	Litrai
R1	1	103,6	17,2	30	0,145	0,005	78,19%	1,355	0,099
R2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
R3	3	103,6	0,0	30	0,000	0,000	100,00%	1,500	1,500
R4	4	103,6	0,0	30	0,000	0,000	100,00%	1,500	1,500
R5	5	103,6	23,6	30	0,199	0,007	63,08%	1,301	0,421
R6	6	103,6	18,6	30	0,157	0,005	84,72%	1,343	0,121
R7	7	103,6	16,0	30	0,135	0,005	85,71%	1,365	0,094
R8	8	103,6	0,0	30	0,000	0,000	100,00%	1,500	1,500
R9	9	103,6	70,4	30	0,593	0,020	33,89%	0,907	0,434
R10	10	103,6	0,0	30	0,000	0,000	100,00%	1,500	1,500
R11	11	103,6	0,0	30	0,000	0,000	100,00%	1,500	1,500
R12	12	103,6	0,0	30	0,000	0,000	100,00%	1,500	1,500
H1	1	103,6	42,0	30	0,354	0,012	36,99%	1,146	0,142
H2	2	103,6	18,6	30	0,157	0,005	87,04%	1,343	0,095
H3	3	103,6	9,6	30	0,081	0,003	82,10%	1,419	0,045
H4	4	103,6	48,3	30	0,407	0,014	46,09%	1,093	0,316
H5	5	103,6	7,2	30	0,061	0,002	90,98%	1,439	0,033
H6	6	103,6	22,6	30	0,190	0,006	41,86%	1,310	0,102
H7	7	103,6	51,9	30	0,437	0,015	30,43%	1,063	0,341
H8	8	103,6	13,6	30	0,115	0,004	87,65%	1,385	0,059
H9	9	103,6	11,2	30	0,094	0,003	88,15%	1,406	0,065
H10	10	103,6	24,7	30	0,208	0,007	78,98%	1,292	0,152
H11	11	103,6	24,2	30	0,204	0,007	77,24%	1,296	0,145
H12	12	103,6	34,3	30	0,289	0,010	63,42%	1,211	0,544

**5 priedas. Kontrolinių bandinių be plyšio vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje**

Kontroliniai bandiniai - be plyšio					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			R2	R3	R6	R2	R3	R6
		R2	R3	R6						
0	0	11797,8	11907,6	11812,4	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11799,7	11910,2	11813,4	1,36	1,86	0,72	1,9	2,6	1,0
2	4	11798,8	11909,7	11813,3	0,72	1,50	0,64	1,0	2,1	0,9
3	9	11799,2	11910,1	11813,6	1,00	1,79	0,86	1,4	2,5	1,2
4	16	11799,0	11909,7	11813,7	0,86	1,50	0,93	1,2	2,1	1,3
5	25	11800,4	11910,2	11813,9	1,86	1,86	1,07	2,6	2,6	1,5
6	36	11800,0	11910,4	11814,1	1,57	2,00	1,22	2,2	2,8	1,7
7	49	11800,5	11910,8	11813,8	1,93	2,29	1,00	2,7	3,2	1,4
8	64	11800,2	11911,0	11814,0	1,72	2,43	1,15	2,4	3,4	1,6
9	81	11802,1	11911,4	11813,9	3,08	2,72	1,07	4,3	3,8	1,5
10	100	11800,7	11910,7	11814,4	2,08	2,22	1,43	2,9	3,1	2,0
11	121	11801,0	11911,1	11814,6	2,29	2,51	1,57	3,2	3,5	2,2
12	144	11801,3	11911,3	11814,5	2,51	2,65	1,50	3,5	3,7	2,1
13	169	11801,3	11911,4	11815,1	2,51	2,72	1,93	3,5	3,8	2,7
14	196	11802,8	11912,8	11815,1	3,58	3,72	1,93	5,0	5,2	2,7
15	225	11802,6	11912,3	11816,5	3,44	3,36	2,93	4,8	4,7	4,1
16	256	11802,8	11912,0	11815,2	3,58	3,15	2,00	5,0	4,4	2,8
17	1448	11807,8	11916,6	11820,5	7,16	6,44	5,80	10,0	9,0	8,1

**6 priedas. Kontroliniu bandinių su plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje**

Kontroliniai bandiniai - su plyšiu					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			R1	R4	R5	R1	R4	R5
		R1	R4	R5						
0	0	11748,4	11867,2	11532,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11752,2	11870,5	11535,4	2,72	2,36	2,08	3,8	3,3	2,9
2	4	11752,3	11871,7	11536,5	2,79	3,22	2,86	3,9	4,5	4,0
3	9	11753,4	11872,7	11537,8	3,58	3,94	3,79	5,0	5,5	5,3
4	16	11755,1	11873,4	11538,5	4,80	4,44	4,29	6,7	6,2	6,0
5	25	11756,4	11874,3	11539,6	5,73	5,08	5,08	8,0	7,1	7,1
6	36	11756,1	11874,7	11541,4	5,51	5,37	6,37	7,7	7,5	8,9
7	49	11756,7	11874,8	11541,0	5,94	5,44	6,08	8,3	7,6	8,5
8	64	11756,8	11875,7	11542,1	6,01	6,08	6,87	8,4	8,5	9,6
9	81	11757,6	11876,9	11542,5	6,58	6,94	7,16	9,2	9,7	10,0
10	100	11758,7	11877,2	11543,4	7,37	7,16	7,80	10,3	10,0	10,9
11	121	11759,0	11877,6	11544,4	7,59	7,44	8,52	10,6	10,4	11,9
12	144	11759,4	11878,3	11545,1	7,87	7,94	9,02	11,0	11,1	12,6
13	169	11760,4	11879,0	11546,3	8,59	8,45	9,88	12,0	11,8	13,8
14	196	11761,2	11879,6	11546,3	9,16	8,87	9,88	12,8	12,4	13,8
15	225	11761,2	11879,5	11546,8	9,16	8,80	10,23	12,8	12,3	14,3
16	256	11761,3	11880,4	11547,5	9,23	9,45	10,74	12,9	13,2	15,0
17	1448	11771,7	11892,4	11561,9	16,68	18,04	21,04	23,3	25,2	29,4

**7 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje**

Bandiniai su MgO priedu - su plyšiu					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			H1	H2	H3	H1	H2	H3
		H1	H2	H3						
0	0	10968,7	10910,3	10961,9	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	10971,5	10912,6	10964,5	2,00	1,65	1,86	2,8	2,3	2,6
2	4	10972,6	10913,5	10965,5	2,79	2,29	2,58	3,9	3,2	3,6
3	9	10973,8	10914,0	10966,2	3,65	2,65	3,08	5,1	3,7	4,3
4	16	10975,0	10914,9	10967,4	4,51	3,29	3,94	6,3	4,6	5,5
5	25	10975,5	10916,1	10968,4	4,87	4,15	4,65	6,8	5,8	6,5
6	36	10976,3	10915,9	10968,5	5,44	4,01	4,72	7,6	5,6	6,6
7	49	10976,6	10916,3	10969,2	5,65	4,29	5,22	7,9	6,0	7,3
8	64	10977,9	10917,2	10969,9	6,58	4,94	5,73	9,2	6,9	8,0
9	81	10978,3	10917,1	10970,4	6,87	4,87	6,08	9,6	6,8	8,5
10	100	10979,4	10917,9	10971,1	7,66	5,44	6,58	10,7	7,6	9,2
11	121	10979,4	10918,9	10971,8	7,66	6,16	7,09	10,7	8,6	9,9
12	144	10980,4	10918,7	10972,3	8,37	6,01	7,44	11,7	8,4	10,4
13	169	10980,4	10918,8	10973,0	8,37	6,08	7,94	11,7	8,5	11,1
14	196	10981,1	10919,4	10973,6	8,87	6,51	8,37	12,4	9,1	11,7
15	225	10981,7	10919,9	10973,8	9,30	6,87	8,52	13,0	9,6	11,9
16	256	10982,4	10920,2	10974,5	9,81	7,09	9,02	13,7	9,9	12,6
17	1448	10996,1	10929,5	10987,9	19,61	13,74	18,61	27,4	19,2	26,0

**8 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 0 dienų išlaikymo vandenyje**

Bandiniai su MgO priedu - su plyšiu					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			H4	H5	H6	H4	H5	H6
		H4	H5	H6						
0	0	11043,4	10932,1	10802,7	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11047,2	10936,5	10805,9	2,72	3,15	2,29	3,8	4,4	3,2
2	4	11047,0	10936,8	10807,7	2,58	3,36	3,58	3,6	4,7	5,0
3	9	11048,9	10937,6	10809,4	3,94	3,94	4,80	5,5	5,5	6,7
4	16	11048,8	10938,1	10809,8	3,86	4,29	5,08	5,4	6,0	7,1
5	25	11050,4	10939,7	10810,9	5,01	5,44	5,87	7,0	7,6	8,2
6	36	11050,9	10940,2	10811,5	5,37	5,80	6,30	7,5	8,1	8,8
7	49	11051,5	10940,3	10811,8	5,80	5,87	6,51	8,1	8,2	9,1
8	64	11053,0	10940,8	10813,0	6,87	6,23	7,37	9,6	8,7	10,3
9	81	11055,8	10942,4	10813,5	8,87	7,37	7,73	12,4	10,3	10,8
10	100	11053,1	10942,0	10813,4	6,94	7,09	7,66	9,7	9,9	10,7
11	121	11053,7	10942,7	10814,8	7,37	7,59	8,66	10,3	10,6	12,1
12	144	11054,4	10943,1	10814,9	7,87	7,87	8,73	11,0	11,0	12,2
13	169	11055,3	10943,8	10815,0	8,52	8,37	8,80	11,9	11,7	12,3
14	196	11055,7	10944,2	10815,5	8,80	8,66	9,16	12,3	12,1	12,8
15	225	11056,2	10944,8	10816,1	9,16	9,09	9,59	12,8	12,7	13,4
16	256	11056,1	10945,1	10816,3	9,09	9,30	9,73	12,7	13,0	13,6
17	1448	11070,6	10957,9	10828,8	19,47	18,47	18,68	27,2	25,8	26,1

**9 priedas. Kontrolinių bandinių be plyšio vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje**

Kontroliniai bandiniai - be plyšio					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			R2	R3	R6	R2	R3	R6
		R2	R3	R6						
0	0	11877,6	11984,2	11850,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11879,0	11985,4	11851,8	0,70	0,60	0,65	1,4	1,2	1,3
2	4	11879,3	11985,2	11852,2	0,85	0,50	0,85	1,7	1,0	1,7
3	9	11879,2	11985,8	11851,5	0,80	0,80	0,50	1,6	1,6	1,0
4	16	11879,4	11985,8	11852,6	0,90	0,80	1,05	1,8	1,6	2,1
5	25	11879,9	11986,0	11852,1	1,15	0,90	0,80	2,3	1,8	1,6
6	36	11880,3	11986,2	11852,8	1,35	1,00	1,15	2,7	2,0	2,3
7	49	11880,4	11986,2	11852,6	1,40	1,00	1,05	2,8	2,0	2,1
8	64	11880,7	11986,3	11853,0	1,55	1,05	1,25	3,1	2,1	2,5
9	81	11881,3	11986,2	11853,2	1,85	1,00	1,35	3,7	2,0	2,7
10	100	11881,4	11986,5	11853,0	1,90	1,15	1,25	3,8	2,3	2,5
11	121	11881,2	11986,7	11853,6	1,80	1,25	1,55	3,6	2,5	3,1
12	144	11881,2	11986,8	11853,8	1,80	1,30	1,65	3,6	2,6	3,3
13	169	11881,0	11986,3	11853,0	1,70	1,05	1,25	3,4	2,1	2,5
14	196	11880,8	11986,1	11854,1	1,60	0,95	1,80	3,2	1,9	3,6
15	225	11880,7	11986,1	11853,0	1,55	0,95	1,25	3,1	1,9	2,5
16	256	11881,1	11986,0	11853,8	1,75	0,90	1,65	3,5	1,8	3,3
17	1448	11881,2	11986,4	11854,3	1,80	1,10	1,90	3,6	2,2	3,8

**10 priedas. Kontrolinių bandinių su plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje**

Kontroliniai bandiniai - su plyšiu					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			R1	R4	R5	R1	R4	R5
		R1	R4	R5						
0	0	11819,6	11950,8	11615,4	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11822,2	11952,7	11617,7	1,30	0,95	1,15	2,6	1,9	2,3
2	4	11822,3	11953,5	11618,5	1,35	1,35	1,55	2,7	2,7	3,1
3	9	11823,3	11953,7	11618,9	1,85	1,45	1,75	3,7	2,9	3,5
4	16	11823,6	11954,2	11619,2	2,00	1,70	1,90	4,0	3,4	3,8
5	25	11824,0	11954,4	11619,8	2,20	1,80	2,20	4,4	3,6	4,4
6	36	11824,0	11954,8	11620,3	2,20	2,00	2,45	4,4	4,0	4,9
7	49	11824,7	11955,1	11621,1	2,56	2,15	2,86	5,1	4,3	5,7
8	64	11825,2	11955,3	11621,4	2,81	2,25	3,01	5,6	4,5	6,0
9	81	11825,7	11955,3	11621,5	3,06	2,25	3,06	6,1	4,5	6,1
10	100	11826,0	11955,6	11622,0	3,21	2,40	3,31	6,4	4,8	6,6
11	121	11826,4	11956,0	11622,8	3,41	2,61	3,71	6,8	5,2	7,4
12	144	11826,6	11956,1	11623,2	3,51	2,66	3,91	7,0	5,3	7,8
13	169	11826,6	11956,0	11623,3	3,51	2,61	3,96	7,0	5,2	7,9
14	196	11826,1	11956,2	11623,0	3,26	2,71	3,81	6,5	5,4	7,6
15	225	11826,7	11956,5	11623,0	3,56	2,86	3,81	7,1	5,7	7,6
16	256	11827,2	11956,4	11623,6	3,81	2,81	4,11	7,6	5,6	8,2
17	1448	11832,8	11959,7	11630,5	6,61	4,46	7,57	13,2	8,9	15,1

**11 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje**

Bandiniai su MgO priedu - su plyšiu					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			H1	H2	H3	H1	H2	H3
		H1	H2	H3						
0	0	11052,1	10946,2	11028,6	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11054,3	10948,5	11031,3	1,10	1,15	1,35	2,2	2,3	2,7
2	4	11055,0	10948,8	11031,4	1,45	1,30	1,40	2,9	2,6	2,8
3	9	11055,4	10949,0	11031,8	1,65	1,40	1,60	3,3	2,8	3,2
4	16	11055,1	10949,5	11031,7	1,50	1,65	1,55	3,0	3,3	3,1
5	25	11056,3	10949,7	11032,3	2,10	1,75	1,85	4,2	3,5	3,7
6	36	11056,8	10950,3	11032,7	2,35	2,05	2,05	4,7	4,1	4,1
7	49	11057,2	10950,7	11033,1	2,56	2,25	2,25	5,1	4,5	4,5
8	64	11057,6	10951,0	11033,3	2,76	2,40	2,35	5,5	4,8	4,7
9	81	11058,2	10951,6	11033,7	3,06	2,71	2,56	6,1	5,4	5,1
10	100	11058,3	10952,0	11033,8	3,11	2,91	2,61	6,2	5,8	5,2
11	121	11058,4	10951,8	11033,9	3,16	2,81	2,66	6,3	5,6	5,3
12	144	11058,8	10951,6	11034,3	3,36	2,71	2,86	6,7	5,4	5,7
13	169	11058,9	10952,1	11034,2	3,41	2,96	2,81	6,8	5,9	5,6
14	196	11059,0	10952,3	11034,4	3,46	3,06	2,91	6,9	6,1	5,8
15	225	11059,2	10952,7	11034,7	3,56	3,26	3,06	7,1	6,5	6,1
16	256	11059,4	10952,5	11034,9	3,66	3,16	3,16	7,3	6,3	6,3
17	1448	11062,7	10955,4	11038,1	5,31	4,61	4,76	10,6	9,2	9,5



**12 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 28 dienų išlaikymo vandenyje**

Bandiniai su MgO priedu - su plyšiu					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			H4	H5	H6	H4	H5	H6
		H4	H5	H6						
0	0	11124,2	11003,6	10875,6	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11127,4	11006,7	10878,7	1,60	1,55	1,55	3,2	3,1	3,1
2	4	11127,9	11007,2	10879,1	1,85	1,80	1,75	3,7	3,6	3,5
3	9	11128,1	11007,8	10879,6	1,95	2,10	2,00	3,9	4,2	4,0
4	16	11128,5	11008,1	10880,0	2,15	2,25	2,20	4,3	4,5	4,4
5	25	11128,9	11009,1	10880,7	2,35	2,76	2,56	4,7	5,5	5,1
6	36	11129,3	11009,2	10881,9	2,56	2,81	3,16	5,1	5,6	6,3
7	49	11129,4	11009,6	10881,9	2,61	3,01	3,16	5,2	6,0	6,3
8	64	11130,1	11010,2	10881,9	2,96	3,31	3,16	5,9	6,6	6,3
9	81	11131,0	11010,2	10882,1	3,41	3,31	3,26	6,8	6,6	6,5
10	100	11130,8	11010,5	10882,6	3,31	3,46	3,51	6,6	6,9	7,0
11	121	11131,4	11010,6	10883,6	3,61	3,51	4,01	7,2	7,0	8,0
12	144	11131,0	11010,6	10883,0	3,41	3,51	3,71	6,8	7,0	7,4
13	169	11131,0	11010,5	10882,6	3,41	3,46	3,51	6,8	6,9	7,0
14	196	11131,3	11010,7	10882,7	3,56	3,56	3,56	7,1	7,1	7,1
15	225	11131,3	11010,8	10882,7	3,56	3,61	3,56	7,1	7,2	7,1
16	256	11131,4	11011,1	10883,1	3,61	3,76	3,76	7,2	7,5	7,5
17	1448	11134,0	11014,8	10886,2	4,91	5,61	5,31	9,8	11,2	10,6

**13 priedas. Kontrolinių bandinių be plyšio vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje**

Kontroliniai bandiniai - be plyšio					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			R2	R3	R6	R2	R3	R6
		R2	R3	R6						
0	0	11950,1	12058,8	11917,1	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11951,9	12060,2	11918,9	0,15	0,12	0,15	1,8	1,4	1,8
2	4	11951,8	12060,5	11919,8	0,14	0,14	0,23	1,7	1,7	2,7
3	9	11951,7	12060,8	11920,3	0,13	0,17	0,27	1,6	2,0	3,2
4	16	11951,8	12061,1	11920,6	0,14	0,19	0,29	1,7	2,3	3,5
5	25	11952,4	12061,3	11920,5	0,19	0,21	0,29	2,3	2,5	3,4
6	36	11952,4	12060,7	11921,0	0,19	0,16	0,33	2,3	1,9	3,9
7	49	11952,8	12060,8	11921,4	0,23	0,17	0,36	2,7	2,0	4,3
8	64	11952,9	12060,8	11921,3	0,23	0,17	0,35	2,8	2,0	4,2
9	81	11952,9	12061,2	11921,4	0,23	0,20	0,36	2,8	2,4	4,3
10	100	11953,1	12061,1	11921,9	0,25	0,19	0,40	3,0	2,3	4,8
11	121	11953,3	12061,6	11921,9	0,27	0,23	0,40	3,2	2,8	4,8
12	144	11953,5	12061,5	11921,8	0,29	0,23	0,39	3,4	2,7	4,7
13	169	11953,7	12061,6	11921,5	0,30	0,23	0,37	3,6	2,8	4,4
14	196	11954,2	12061,4	11921,6	0,34	0,22	0,38	4,1	2,6	4,5
15	225	11954,1	12061,6	11921,5	0,34	0,23	0,37	4,0	2,8	4,4
16	256	11954,5	12061,5	11921,5	0,37	0,23	0,37	4,4	2,7	4,4
17	1448	11955,4	12062,7	11921,3	0,44	0,33	0,35	5,3	3,9	4,2

**14 priedas. Kontrolinių bandinių su plyšiu vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje**

Kontroliniai bandiniai - su plyšiu					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			R1	R4	R5	R1	R4	R5
		R1	R4	R5						
0	0	11876,1	12015,6	11695,1	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11878,5	12017,3	11697,3	1,72	1,22	1,57	2,4	1,7	2,2
2	4	11879,2	12017,6	11697,4	2,22	1,43	1,65	3,1	2,0	2,3
3	9	11879,4	12017,9	11697,7	2,36	1,65	1,86	3,3	2,3	2,6
4	16	11879,5	12018,6	11698,5	2,43	2,15	2,43	3,4	3,0	3,4
5	25	11879,8	12018,1	11697,2	2,65	1,79	1,50	3,7	2,5	2,1
6	36	11879,9	12018,6	11697,4	2,72	2,15	1,65	3,8	3,0	2,3
7	49	11880,1	12018,8	11697,8	2,86	2,29	1,93	4,0	3,2	2,7
8	64	11880,4	12017,9	11697,8	3,08	1,65	1,93	4,3	2,3	2,7
9	81	11880,6	12017,9	11698,4	3,22	1,65	2,36	4,5	2,3	3,3
10	100	11880,8	12018,1	11698,8	3,36	1,79	2,65	4,7	2,5	3,7
11	121	11880,7	12018,3	11698,8	3,29	1,93	2,65	4,6	2,7	3,7
12	144	11881,2	12018,3	11698,5	3,65	1,93	2,43	5,1	2,7	3,4
13	169	11881,4	12018,5	11698,8	3,79	2,08	2,65	5,3	2,9	3,7
14	196	11881,5	12018,6	11699,2	3,86	2,15	2,93	5,4	3,0	4,1
15	225	11881,9	12018,3	11699,5	4,15	1,93	3,15	5,8	2,7	4,4
16	256	11882,2	12018,7	11699,5	4,37	2,22	3,15	6,1	3,1	4,4
17	1448	11883,3	12019,9	11701,0	5,15	3,08	4,22	7,2	4,3	5,9

**15 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšių vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje**

Bandiniai su MgO priedu - su plyšiu					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			H1	H2	H3	H1	H2	H3
		H1	H2	H3						
0	0	11127,5	11006,6	11094,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11130,6	11009,5	11096,4	2,22	2,08	1,72	3,1	2,9	2,4
2	4	11130,4	11010,1	11096,6	2,08	2,51	1,86	2,9	3,5	2,6
3	9	11130,9	11009,8	11096,6	2,43	2,29	1,86	3,4	3,2	2,6
4	16	11129,8	11009,3	11096,7	1,65	1,93	1,93	2,3	2,7	2,7
5	25	11129,9	11009,7	11097,0	1,72	2,22	2,15	2,4	3,1	3,0
6	36	11130,1	11009,5	11097,4	1,86	2,08	2,43	2,6	2,9	3,4
7	49	11130,6	11010,0	11097,2	2,22	2,43	2,29	3,1	3,4	3,2
8	64	11130,4	11010,4	11097,3	2,08	2,72	2,36	2,9	3,8	3,3
9	81	11130,8	11010,5	11097,2	2,36	2,79	2,29	3,3	3,9	3,2
10	100	11130,6	11010,3	11097,7	2,22	2,65	2,65	3,1	3,7	3,7
11	121	11130,8	11010,0	11097,5	2,36	2,43	2,51	3,3	3,4	3,5
12	144	11130,8	11010,7	11097,8	2,36	2,93	2,72	3,3	4,1	3,8
13	169	11131,0	11010,7	11097,9	2,51	2,93	2,79	3,5	4,1	3,9
14	196	11131,3	11010,8	11097,8	2,72	3,01	2,72	3,8	4,2	3,8
15	225	11131,6	11010,5	11098,0	2,93	2,79	2,86	4,1	3,9	4,0
16	256	11131,9	11010,5	11098,2	3,15	2,79	3,01	4,4	3,9	4,2
17	1448	11133,8	11010,4	11098,8	4,51	2,72	3,44	6,3	3,8	4,8

**16 priedas. Bandinių su MgO priedu ir plyšių vandens absorbcijos ir infiltracijos rezultatai po 90 dienų išlaikymo vandenyje**

Bandiniai su MgO priedu - su plyšiu					Vandens infiltracija, mm			Vandens absorbcija, g		
Bandymo Nr.	Laikas, min	Bandinių masė, g			H4	H5	H6	H4	H5	H6
		H4	H5	H6						
0	0	11189,6	11068,1	10931,2	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
1	1	11190,7	11069,9	10932,5	0,79	1,29	0,93	1,1	1,8	1,3
2	4	11191,2	11070,0	10932,8	1,15	1,36	1,15	1,6	1,9	1,6
3	9	11190,8	11070,3	10932,9	0,86	1,57	1,22	1,2	2,2	1,7
4	16	11191,4	11070,7	10933,2	1,29	1,86	1,43	1,8	2,6	2,0
5	25	11191,6	11071,0	10933,5	1,43	2,08	1,65	2,0	2,9	2,3
6	36	11192,0	11071,4	10933,6	1,72	2,36	1,72	2,4	3,3	2,4
7	49	11191,9	11071,5	10933,7	1,65	2,43	1,79	2,3	3,4	2,5
8	64	11192,2	11071,7	10934,0	1,86	2,58	2,00	2,6	3,6	2,8
9	81	11192,7	11072,1	10934,2	2,22	2,86	2,15	3,1	4,0	3,0
10	100	11192,7	11072,3	10934,4	2,22	3,01	2,29	3,1	4,2	3,2
11	121	11192,9	11072,5	10934,7	2,36	3,15	2,51	3,3	4,4	3,5
12	144	11193,1	11072,6	10934,7	2,51	3,22	2,51	3,5	4,5	3,5
13	169	11193,3	11072,8	10934,9	2,65	3,36	2,65	3,7	4,7	3,7
14	196	11193,5	11073,5	10935,0	2,79	3,86	2,72	3,9	5,4	3,8
15	225	11193,6	11073,6	10934,8	2,86	3,94	2,58	4,0	5,5	3,6
16	256	11193,7	11074,0	10935,1	2,93	4,22	2,79	4,1	5,9	3,9
17	1448	11194,5	11075,3	10936,5	3,51	5,15	3,79	4,9	7,2	5,3

**17 priedas. Vandens absorbcijos rezultatai ir atsinaujinimo efektyvumas po 28 ir 90 dienų išlaikymo vandenyje**

Bandinys	Vandens absorbcija, g				
	0 dieną	Po 28 dienų	Po 90 dienų	Atsinaujinimas po 28 dienų, %	Atsinaujinimas po 3 mėnesių, %
R2	10,0	3,6	5,3	64,0	47,0
R3	9,0	2,2	3,9	75,6	56,7
R6	8,1	3,8	4,2	53,1	48,1
R1	23,3	13,2	7,2	43,3	69,1
R4	25,2	8,9	4,3	64,7	82,9
R5	29,4	15,1	5,9	48,6	79,9
H1	27,4	10,6	6,3	61,3	77,0
H2	19,2	9,2	3,8	52,1	80,2
H3	26,0	9,5	4,8	63,5	81,5
H4	27,2	9,8	4,9	64,0	82,0
H5	25,8	11,2	7,2	56,6	72,1
H6	26,1	10,6	5,3	59,4	79,7

**18 priedas. Infiltracijos aukščio rezultatai ir atsinaujinimo efektyvumas po 28 ir 90 dienų išlaikymo vandenyje**

Bandinys	Vandens infiltracija, mm				
	0 dieną	Po 28 dienų	Po 90 dienų	Atsinaujinimas po 28 dienų, %	Atsinaujinimas po 3 mėnesių, %
R2	7,16	1,80	0,44	74,9	93,9
R3	6,44	1,10	0,33	82,9	94,9
R6	5,80	1,90	0,35	67,2	94,0
R1	16,68	6,61	5,15	60,4	69,1
R4	18,04	4,46	3,08	75,3	82,9
R5	21,04	7,57	4,22	64,0	79,9
H1	19,61	5,31	4,51	72,9	77,0
H2	13,74	4,61	2,72	66,4	80,2
H3	18,61	4,76	3,44	74,4	81,5
H4	19,47	4,91	3,51	74,8	82,0
H5	18,47	5,61	5,15	69,6	72,1
H6	18,68	5,31	3,79	71,6	79,7