



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Vandeniui nelaidžių betonų ilgaamžiškumo tyrimai
Baigiamasis magistro studijų projektas

Simas Lembartas
Projekto autorius

Doc. dr. Audrius Grinys
Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Vandeniui nelaidžių betonų ilgaamžiškumo tyrimai

Baigiamasis magistro studijų projektas
Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Simas Lembartas
Projekto autorius

Doc. dr. Audrius Grinys
Vadovas

Doc. dr. Algirdas Augonis
Recenzentas / Recenzentė

Kauans, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Simas Lembartas

Vandeniui nelaidžių betonų ilgaamžiškumo tyrimai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Simo Lembarto, baigiamasis projektas tema „Vandeniui nelaidžių betonų tyrimai“ 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)

Simas Lembartas. „Vandeniui nelaidžių betonų ilgaamžiškumo tyrimai.“ Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Audrius Grinys; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: vandeniui nelaidus betonas, ilgaamžiškumas, savaime atsinaujinantis betonas.

Kaunas, 2019. 48 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame darbe tiriamas vandeniui nelaidaus betono ilgaamžiškumas. Teorinėje dalyje aptariamas neigiamas vandens poveikis betoninei konstrukcijai, jo kilmė ir veikimo mechanizmas. Apžvelgiami būdai betoną padaryti vandeniui nelaidžiu, taip padarant jį ilgaamžišku. Aptariamas savaiminio betono atsinaujinimo principas ir tipai, analizuojamas savaiminį betono atsinaujinimą sukeliančio kristalinio priedo poveikis betono ilgaamžiškumui. Kadangi Europoje nėra standartizuotos bandymų metodikos, skirtos savaiminio betono atsinaujinimo efektyvumui įvertinti, darbe aptariami mokslinėje literatūroje rasti metodai skirti šiam rodikliui įvertinti.

Eksperimentinėje dalyje tiriamas vandens bei šaldymo-šildymo ciklą veikiamo betono ilgaamžiškumas. Tiriamas savaiminį atsinaujinimą sukeliančio kristalinio priedo, orą įtraukiančio priedo bei išorinės hidroizolacijos panaudojimas siekiant betoną padaryti atspariu vandens poveikiui, taip padarant jį ilgaamžišku. Pateikiami tūrinio, kapilirinio šaldymo bandymo rezultatai, taip pat pateikiami savaiminio betono atsinaujinimo tyrimų – vandens pralaidumo bei įgeriamumo bandymų rezultatai, pateikiamos išvados.

Lembartas Simas. "Durability investigation of waterproof concrete". Master's Final Degree Project. Supervisor dr. Audrius Grinys; Kaunas University of Technology.

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

Keywords: watertight concrete, durability, self-healing concrete

Kaunas. 48 p.

Summary

Master's final degree project investigates durability of waterproof concrete. The theoretical part review the negative effect of water in concrete structure, its origin and mechanism of action. In this part the ways of making concrete waterproof and durable are discussed. The principle and types of self-healing concrete are discussed and the effect of crystalline additive for the durability of concrete is analyzed. As there is no standart for test methodology in Europe for assessing the efficiency of self-healing concrete, the methods which are discussed in the scientific literature are reviewed in this work.

The experimental part investigates the durability of concrete which is exposed to water and freeze-thaw cycling. The use of a material for making self-healing concrete - crystalline additive, air-entraining additive and external waterproofing membrane to make the concrete waterproof and thus durable is being investigated. The results of the volumetric, capillary refrigeration are given, as well as the results of the tests for evaluation of self-healing concrete efficiency (water permeability and absorbtion).

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas	10
1. Literatūros analizė	11
1.1. Vandens poveikis – korozija.....	11
1.2. Bentonitinio molio membranų sistema.....	14
1.3. “White box”	15
1.4. Savaimė atsinaujinantis betonas	17
1.5. Autonominis savaiminis atsinaujinimas	18
1.6. Betonas su kristaliniu priedu.....	19
1.7. Savaiminio atsinaujinimo bandymų metodai.....	21
2. Naudotos medžiagos ir tyrimų metodika	24
2.1. Naudotos medžiagos ir betono sudėtis	24
2.2. Tyrimų metodika	25
2.2.1. Vandens pralaidumo bandymas	25
2.2.2. Kapiliarinio pasiurbimo bandymas	27
2.2.3. Kapiliarinio šaldymo tyrimas.....	28
2.2.4. Tūrinio šaldymo tyrimas.....	29
3. Rezultatai ir išvados	30
3.1. Betono slankumas	30
3.2. Betono tankis	30
3.3. Tūrinis šaldymas	31
3.4. Kapilairinis šaldymas	36
3.5. Kapiliarinis pasiurbimas	37
3.6. Vandens pralaidumo bandymas	45
Išvados	46
Literatūros sąrašas	48

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Plyšių tipai	13
2 lentelė. Bandinių sudėtis 1 m ³ betono.....	24
3 lentelė. Bandinių sudėtis 1 m ³ betono.....	24
4 lentelė. Bandinių slankumo parametrai.	30
5 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė.	31
6 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė.	32
7 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė	34
8 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (kontroliniai bandiniai nr. 1 ir 2)	37
9 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (kontroliniai bandiniai nr. 3 ir 4)	38
10 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (bandiniai su kristaliniu priedu nr. 1 ir 2)	39
11 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (bandiniai su kristaliniu priedu nr. 3 ir 4)	40
12 lentelė. B Bandymo rezultatų suvestinė (kontroliniai bandiniai nr. 1 ir 2).....	41
13 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (kontroliniai bandiniai nr. 3 ir 4)	42
14 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (bandiniai su kristaliniu priedu nr. 1 ir 2)	43
15 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (bandiniai su kristaliniu priedu nr. 3 ir 4)	44
16 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė	45
17 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė	45
18 lentelė. Bandymo po 30 dienų rezultatų suvestinė	45

Paveikslų sąrašas

1 pav. Cementinio akmens stiprio priklausomybė nuo CaO kiekio. Kalcio hidroksidas betono paviršiuje	11
2 pav. Sulfatinė korozija, jos mechanizmas	12
3 pav. Vandeniui nelaidžios betoninės konstrukcijos gamybos būdai	14
5 pav. “White box” sistemos principas.....	15
6 pav. a) Neracionaliai suprojektuota konstrukcija; b) Racionaliai suprojektuota konstrukcija.	15
8 pav. Deformacinių siūlių įrengimo principas	16
9 pav. a) Blogai parinkti užpildai, matomas vandens prasiskverbimas; b) Tinkamai parinkti užpildai.....	16
10 pav. Autogeninio atsinaujinimo principas	17
11 pav. Savaimė atsinaujinamo betono rūšys.....	18
12 pav. Kapsulių efektyvumo priklausomybė nuo PH.....	18
13 pav. Betono struktūros mikroskopinis vaizdas. a) susiformavę išsibarstę kristalai, b) pilnai susiformavęs kristalas, c) tankiai susiformavę kristalai, d), e) tankiai galutinai susiformavę kristalai, e) pilnai susiformavę kristalai, dengiantys betoną.....	20
14 pav. Vizualūs plyšių pokyčiai prieš ir po kontakto su vandeniu betone su kristaliniu priedu... ..	21
15 pav. Mikroskopinė plyšių analizė.....	22
16 pav. XRAY ir SEM metodų rezultatai.....	22
17 pav. Dujų laidumo bandymo schema.....	22
18 pav. Plyšio matavimas	23
19 pav. Dujų laidumo bandymo principas. Bandymo kamera	23
20 pav. Plyšio formavimas.....	25
21 pav. a) prietaisas, skirtas plyšio matavimui; b) plyšio matavimas	25
22 pav. Bandymams paruošti bandiniai	26
23 pav. Vandens pralaidumo bandymas	26
24 pav. Bandiniai vandenyje	27
25 pav. Paruoštas bandinys	27
26 pav. Bandymas	28
27 pav. Kapiliarinio šaldymo bandymo principas.....	28
28 pav. Bandinys, padengtas teptine hidroizoliacija	29
29 pav. Bandiniai 3 % NaCl tirpale.....	29
30 pav. Bandinių tankių diagrama.....	30
31 pav. Bandinių gniuždomųjų stiprių diagrama	32
32 pav. Bandinių stiprių po 150 šaldymo ciklų diagrama	33
33 pav. Bandiniai po 150 šaldymo ciklų.....	33
34 pav. Bandinių stiprių po 300 šaldymo ciklų diagrama	34
35 pav. Bandiniai po 300 šaldymo ciklų	35
36 pav. Tūrinio šaldymo tyrimo rezultatų suvestinė diagrama	35
37 pav. Bandiniai po kapiliarinio šaldymo bandymo.....	36
38 pav. Kontrolinių bandinių nr. 1 ir nr. 2 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas	37
39 pav. Kontrolinių bandinių nr. 3 ir nr. 4 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas	38
40 pav. Bandinių su kristaliniu priedu nr. 1 ir nr. 2 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas	39

41 pav. Bandinių su kristaliniu priedu nr. 3 ir nr. 4s laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas	40
42 pav. Kontrolinių bandinių nr. 1 ir nr. 2 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas	41
43 pav. Kontrolinių bandinių nr. 3 ir nr. 4 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas	42
44 pav. Bandinių su kristaliniu priedu nr. 1 ir nr. 2 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas	43
45 pav. Bandinių su kristaliniu priedu nr. 3 ir nr. 4s laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas	44

Įvadas

Priešlaikinis betono nusidėvėjimas, vykstantis dėl pleišėjimo yra viena pagrindinių betoninių konstrukcijų ilgaamžiškumą mažinančių problemų. Per plyšius į betoną patekęs vanduo gali sukelti rūgštinę, magnezitinę bei sulfatinę korozijas, išplauti tirpius cementinio akmens junginius taip sugadindamas betoninę konstrukciją. Taip pat vanduo, patekęs į plyšius viekiant neigiamai temperatūrai plečiasi ~ 10 %, todėl atsiranda rizika, kad dėl papildomo slėgio atsiradę vidiniai įtempimai betone gali viršyti ribinius, taip suardydami betono konstrukciją.

Siekiant išvengti šių problemų, betoną reikia pagaminti vandeniui nelaidų – suprojektuoti vandeniui nelaidaus betono sudėtį arba padengti konstrukciją nuo vandens apsaugančia medžiaga – hidroizoliacija. Siekiant pagaminti ilgaamžiškesnį vandeniui nelaidžios sudėties betoną, galima naudoti inovatyvų savaiminį betono atsinaujinimą sukeliančius priedus, kurie esant kontaktui su vandeniu užsandarina betoninėje konstrukcijoje atsiradusius plyšius. Šie priedai sukelia autonominį bei paspartina autogeninį plyšių užsisandaravimo procesus, taip prailgindami betoninės konstrukcijos eksploatacinį laikotarpį.

Darbo tikslas

Ekspperimentiškai ištirti vandeniui nelaidaus betono ilgaamžiškumo parametrus – nustatyti įprasto bei vandeniui nelaidaus betono su kristaliniu priedu mechaninių savybių pokytį betonui nepalankioje aplinkoje, jį palyginti. Ištirti, kokią įtaką vandeniui nelaidžiam betonui daro kristalinis priedas.

Uždaviniai

1. Išanalizuoti mokslinę tyrimų literatūrą atsižvelgiant į pagrindinius tematikos aspektus.
2. Ekspperimentiškai nustatyti įprastos sudėties betono bei vandeniui nelaidaus betono ilgaamžiškumo parametrus, bandinius veikiant šalčiu vandenyje bei 3% NaCl tirpale, juos palyginti su įprastos sudėties betonu.
3. Ekspperimentiškai ištirti kristalinio priedo įtaką vandeniui nelaidaus betono ilgaamžiškumui.

Darbo aktualumas

Lietuvoje neišvengiamai tenka projektuoti betonines konstrukcijas, kurios savo eksploataavimo laikotarpiu yra veikiamos vandens ir šaldymo – šildymo ciklų. Siekiant jas padaryti kuo ilgaamžiškesnes, reikia surinkti kuo daugiau duomenų bei ekspperimentiškai patikrinti šiuolaikiškų vandeniui nelaidaus betono priedų įtaką betono ilgaamžiškumui.

Praktinė vertė

Šiame darbe buvo siekiama ekspperimentiškai nustatyti vandeniui nelaidaus betono priedų įtaką jo mechaninių savybių ilgaamžiškumui. Taip pat analizuoti savaiminį betono atsinaujinimą sukeliančio kristalinio priedo įtaką vandeniui nelaidaus betono ilgaamžiškumui. Išanalizuoti tyrimo rezultatai leidžia plačiau įvertinti vandeniui nelaidžių betonų panaudojimo galimybes.

1. Literatūros analizė

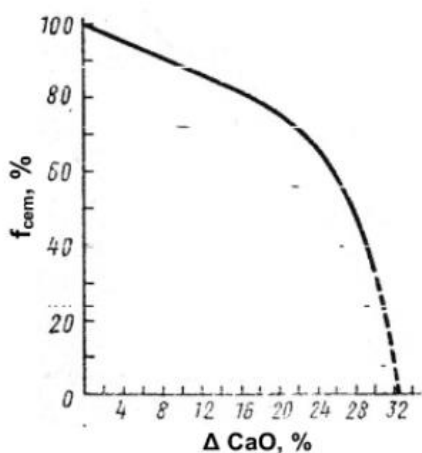
1.1. Vandens poveikis – korozija

Betonų, kurių rišamoji medžiaga cementas, korozija skirstoma į tokius tipus:

- Tirpių junginių išplovimas,
- korozija, sukelta vandens su cheminėmis medžiagomis – rūgštinė bei magnezitinė korozijos,
- sulfatinė korozija.

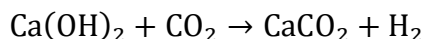
Šios korozijos nevyksta be vandens.

Pirmojo tipo korozija pasireiškia veikiant betoną tekančiu vandeniu. Vykstant vandens filtracijai per betoną, tirpūs cementinio akmens komponentai išplaunami. Tirpiausias hidratacijos produktas – kalcio hidroksidas. Įvykus karbonizacijos procesui kalcio hidroksidas pastebimas betono paviršiuje baltų apnašų pavidalu. Sumažėjus kalcio hidroksido koncentracijai, cementinio akmens skystojoje terpėje vyksta tolimesnis betono tirpimas bei cemento mineralų hidrolizė, o toliau – kalcio hidroksidų skilimas, kuris sukelia betono stiprumo mažėjimą. Išplovus daugiau nei 33 % CaO, cementis akmuo suyra visiškai.

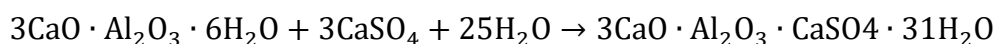


1 pav. Cementinio akmens stiprio priklausomybė nuo CaO kiekio. Kalcio hidroksidas betono paviršiuje

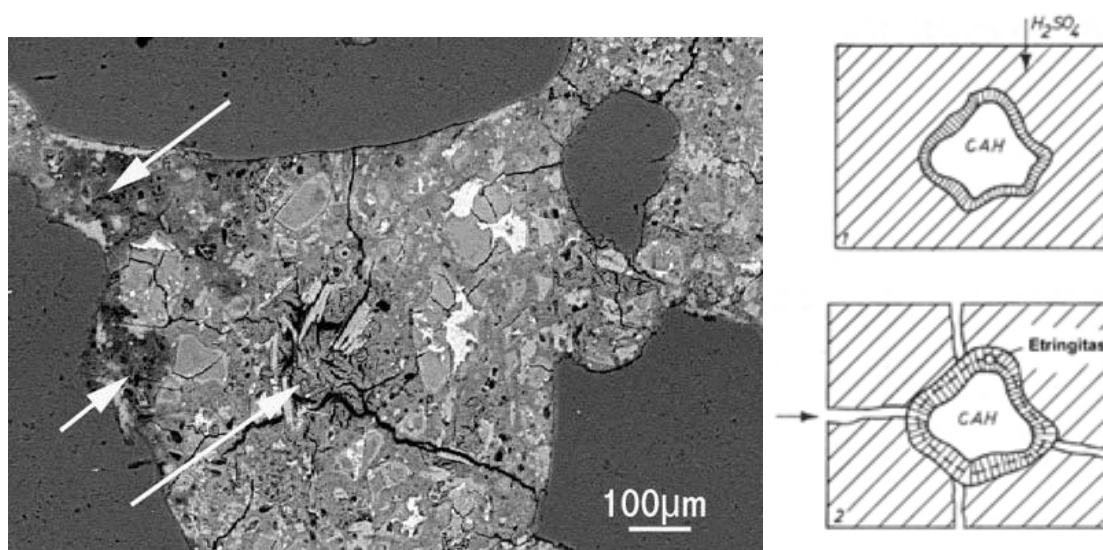
Iki tam tikros ribos šis korozijos tipas priklauso nuo tekančio vandens greičio. Esant per dideliame vandens tekėjimo greičiui kalcio hidroksidas ištirpti nespėja. Vandenyje esant CO₂ arba CaHCO₃ vyksta kalcio hidroksido karbonizacija, kuri mažina šios korozijos intensyvumą:



Sulfatinė korozija vyksta cementinį akmenį veikiant sulfatams, kurie reaguoja su Ca(OH)₂ ir C₃A. Vykstant reakcijai susidaro gipsas ir kalcio hidrosulfoaluminatas, kurio trisulfatė forma vadinama etringitu:

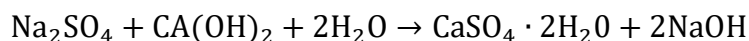


Etringito susidarimo metu prijungiamas didelis vandens kiekis, kuris didini kietosios fazės tūrį 1,63 karto, o esant $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 2,27 karto. Tokiu būdu betone susidaro dideli vidiniai įtempimai, kurie suardo cementinį akmenį.

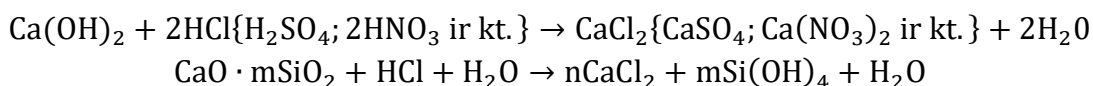


2 pav. Sulfatinė korozija, jos mechanizmas

Vykstant sulfatinei korozijai, pradžioje betono paviršius pasidengia plona gipso kristalų plėvele, toliau formuojasi etringitas, dėl kurio betoną lygiagrečiai paviršiui pleišeja tol, kol betoną suyra. Vandenyje esant Na_2SO_4 ir K_2SO_4 , šie junginiai dalyvauja reakcijoje su $\text{Ca}(\text{OH})_2$, esančiu cementiniame akmenyje sudarydami gipsą, kuris dalyvauja tolimesnėje reakcijoje sudarant etringitą:

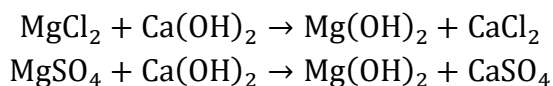


Rūgstinė korozija vyksta betoną veikiant rūgštimis, kurios reaguoja su $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ir kalcio silikatais:



Šių reakcijų metu susidaro kalcio druskos, kurios tirpsta vandenyje ir yra išplaunamos. Korozijos greitis priklauso nuo druskų tirpumo. Rūgštinė korozija dažnai vyksta kartu su pirmąja (tirpių junginių išplovimo) korozija.

Magnezitinė korozija vyksta betoną veikiant magnio druskomis. Gruntiniuose ir jūros vandenyse randama MgCl_2 bei MgSO_4 . Šios druskos reaguoja su kalcio hidroksidu:



Reakcijų metu susidaręs $\text{Mg}(\text{OH})_2$ yra amorfinė, rišamųjų savybių neturinti, besikaupianti betono porose medžiaga. Kitas reakcijos produktas CaCl_2 tirpsta vandenyje ir vykstant pirmąjai (tirpių junginių išplovimo) korozijai yra išplaunamas vandens. Susidarius CaSO_4 toliau vyksta rūgštinė korozija. Didėjant magnio druskų koncentracijai, didesnę atsparumą korozijai turi pucolaniniai cementai, kuriuose yra mažiau $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kuris dalyvauja reakcijose su druskomis.

Viena pagrindinių betoninės konstrukcijos suirimo priežasčių – plyšiai. Į plyšius patekęs vanduo esant neigiamai temperatūrai užšąla, taip padidindamas savo tūrį 10 % bei sugadindamas betoną. Pagrindinės plyšių atsivėrimo betoninėje konstrukcijoje priežastys skirstomos į mechanines apkrovas bei aplinkos poveikį.

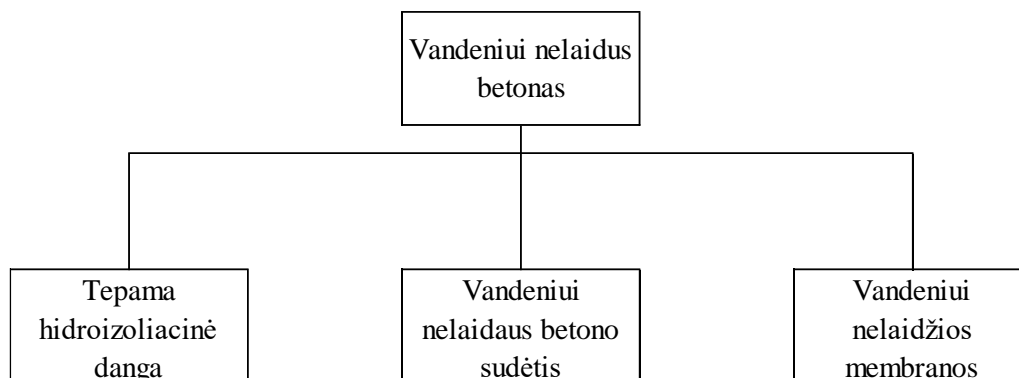
Mechaniškai apkrautoje konstrukcijoje atsiranda įtempimai, kurie gali sukelti pleišėjimą. Betoninė konstrukcija labiausiai pažeidžiama pleišėjimui ankstyvuoju periodu. Taip pat pleišėjimas dažniausiai pasireiškia betoninę konstrukciją pakartotinai apkraunant ir nukraunant bei pasireiškiant valkšnumo deformacijoms.

Dėl aplinkos poveikio pleišėjimas pasireiškia dėl vidinio plėtimosi bei tūrio mažėjimo. Plėtimosi reiškinys pasireiškia dėl vandens, esančio porose, tūrio padidėjimo šaldant arba cheminio poveikio. Betono konstrukcijos tūrio mažėjimą sukelia cheminės reakcijos, šiluminis bei drėgmės pokyčiai. Lentelėje nr. 1 pateikiami plyšių tipai.

1 lentelė. Plyšių tipai

Plyšio tipas	Plyšio vieta arba pobūdis	Plyšio atsivėrimo priežastis	Atsivėrimo laikas
Plastinis nuslūgimas	Prie armavimo	Prasta mišinio sudėtis, sukelianti per didelį vandens atsiskyrimą, per ilgas tankinimas.	10 min. - 3 val.
Plastinis susitraukimas	Atsitiktinė	Per didelis bei per greitas garavimas	30 min. - 6 val.
Terminis plėtimasis ir traukumas	Skersinis	Per didelis temperatūros gradientas	1 diena - 2-3 savaitės
Traukumas džiuvant	Skersinis	Per didelis V/C santykis	nuo kelių savaičių iki kelių mėnesių
Šildymas ir šaldymas	Lygiagrečiai betono paviršiui	Nepakankamas oro porų tūris	Priklauso nuo betono sudėties
Armatūros korozija	Prie armavimo	Per mažas apsauginis sluoksnis, chloridų poveikis.	Daugiau nei 2 metai
Šarmų-užpildų reakcijos	Išilginiai plyšiai, išsidėstę lygiagrečiai mažiausiai suvaržytoje pusėje	Reaktyvūs užpildai, šarmų hidroksidai ir drėgmė	Nuo kelių savaičių, priklausomai nuo aplinkos sąlygų
Sulfatų poveikis	Užpildų ir cementinės tešlos sandūroje	Sulfatai, skatinantys etringito formavimąsi	nuo 1 iki 5 metų

Siekiant pagaminti ilgaamžišką betoninę konstrukciją, ją būtina apsaugoti nuo vandens poveikio. Šiam tikslui įgyvendinti šiuolaikinėje statyboje yra 3 būdai: padengti betoninę konstrukciją teptine hidroizoliacija, pagaminti vandeniui nelaidų betoną bei betoninę konstrukciją padengti vandeniui nelaidžiomis membranomis (ritininė hidroizoliacija, bentonitinio molio danga).



3 pav. Vandeniui nelaidžios betoninės konstrukcijos gamybos būdai

1.2. Bentonitinio molio membranų sistema

Bentonitinio molio membranų sistema – tai sistema, susidedanti iš HDPE (didelio tankio polietileno), bentonitinio molio (sodium bentonite) ir iš apsauginio akyto rašto polypropileno sluoksnio.



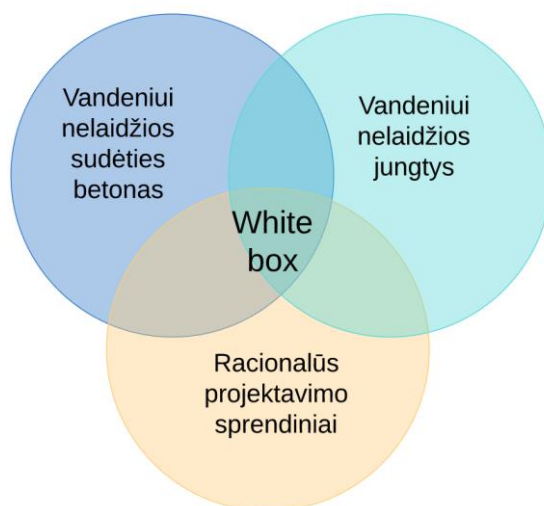
4 pav. Bentonitinio molio membranų sistema

Didelio tankumo polietileno sluoksnis užtikrina pirminę apsaugą. Bentonitinio molio sluoksnis atlieką pagrindinę apsauginę funkciją ir esant hidrostatiniam slėgiui užsandarina atsiradusiu sistemos įtrūkimus.

Sistema taikoma, kai reikia reikia įrengti hidroizoliacinę sistemą prieš betonuojant. Dažniausiai bentonitinis molis gaminamas iš montmorilonito mineralo (Sodium Montmorillonite).

1.3. “White box”

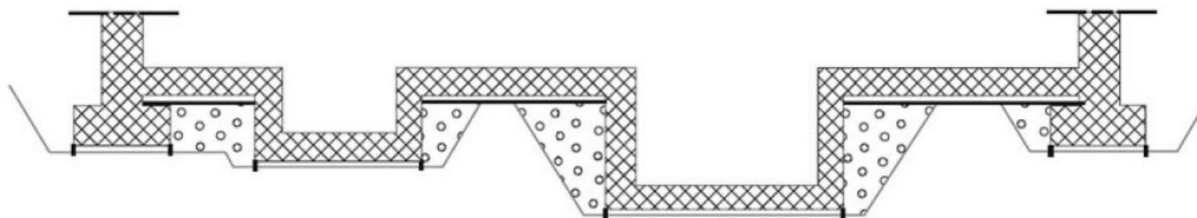
Siekiant konstrukciją apsaugoti nuo vandens poveikio projektuojamos hidroizoliacinės sistemos. Viena jų - “White Box”, susidedanti iš aukštos kokybės vandeniui nelaidaus betono, racionalių projektavimo principų bei tinkamai įrengtų jungčių bei siūlių.



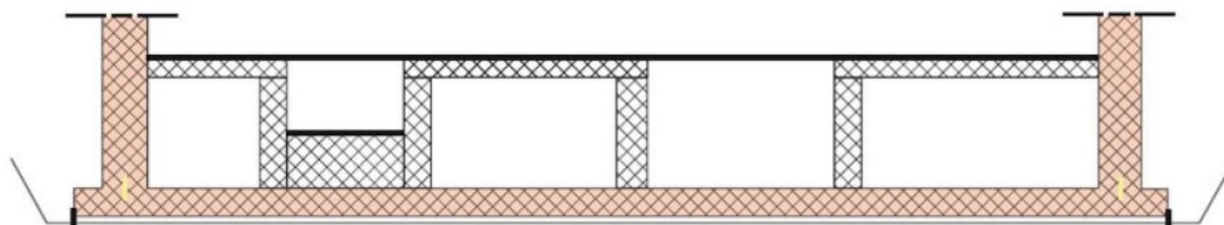
5 pav. “White box” sistemos principas

Racionalus konstrukcijos plano projektavimas svarbi „White box“ dalis. Konstrukcija turėtų būti kuo panašesnė į stačiakampį, turėti kuo mažiau vidinių kampų, jos pagrindas turėtų būti projektuojamas viename lygyje.

a)



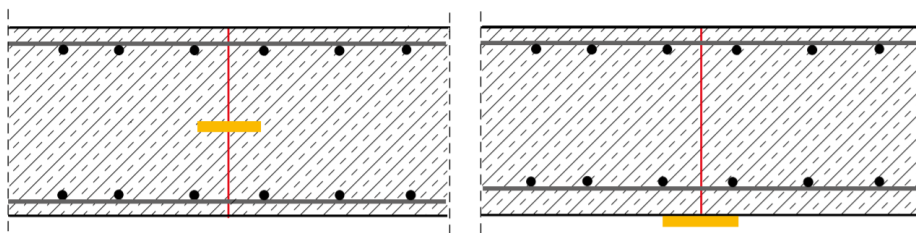
b)



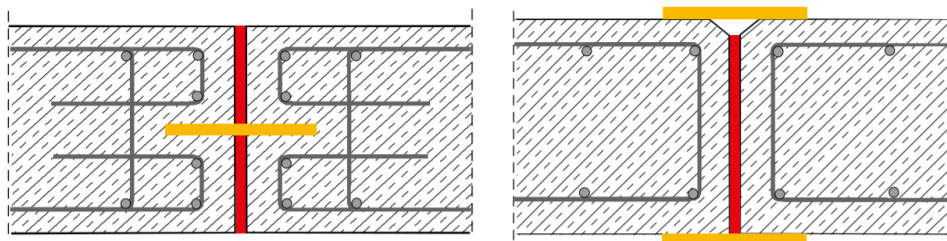
6 pav. a) Neracionaliai suprojektuota konstrukcija; b) Racionaliai suprojektuota konstrukcija

Konstrukcijose neišvengiamai tenka įrengti siūles, todėl siekiant padidinti konstrukcijos ilgaamžiškumą, siūles būtina hidroizoliuoti. Siūlių apsaugai nuo vandens poveikio dažniausiai

naudojamos sandarinimo juostos, kurių padėtis parenkama atsiželgiant į konstrukcijos eksploataavimo sąlygas. Rekomendaciniai sprendiniai pateikti 4 ir 5 pav.:

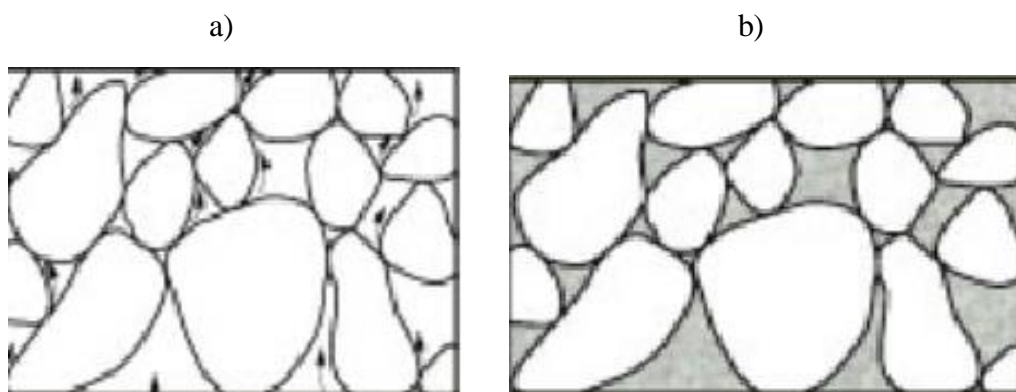


7 pav. Konstrukcinių siūlių įrengimo principas



8 pav. Deformacinių siūlių įrengimo principas

Vandeniui nelaidus betonas – svarbiausia “White box” sistemos sudedamoji dalis. Pagal LST EN 206-1 siekiant pagaminti vandeniui nelaidų betoną, vandens ir betono santykis turi būti ne didesnis nei 0,6, mažiausia gniuždymo stiprio klasė C25/30 bei mažiausias cemento kiekis – 280 kg/m³. Didėjant vandens ir cemento santykiui, perteklinis vanduo suformuoja kapiliarinę porų sistemą kuri mažina vandens nelaidumą, taip sumažindama betono ilgaamžiškumą. Didėjant konstrukcijos tankumui (jeigu nėra naudojamas orą įtraukiantis priedas), mažėja kapiliarinis poringumas, todėl didėja vandens nelaidumas, todėl būtinas minimalus cemento kiekis projektuojamas 280 kg/m³. Taip pat siekiant pagaminti ilgaamišką vandeniui nelaidų betoną – būtina tinkamai parinkti užpildus bei stambių ir smulkių užpildų santykį. Siekiant kuo tolygesnio užpildų pasiskirstymo, stambūs užpildai turėtų būti kuo apvalesni.



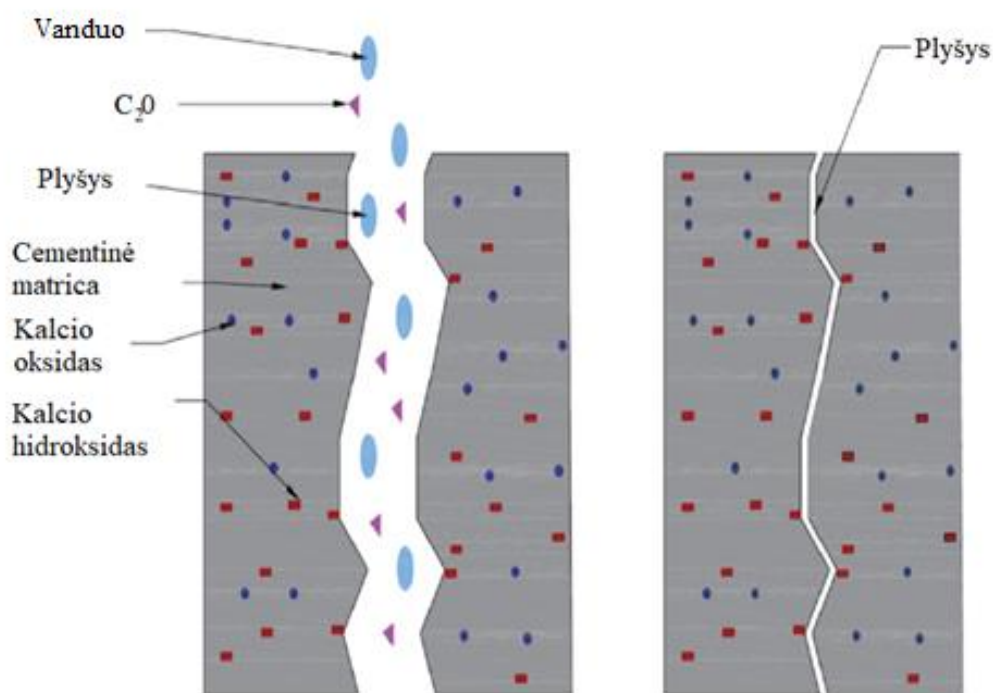
9 pav. a) Blogai parinkti užpildai, matomas vandens prasiskverbimas; b) Tinkamai parinkti užpildai

1.4. Savaimė atsinaujinantis betonas

Vienas būdų betoną padaryti ilgaamžiškesniu – naudoti savaiminį atsinaujinimą sukeliančius priedus. Savaimė atsinaujinantis betonas – tai betonas, pasižymintis autonominiu arba autogeniniu nedidelių plyšių užsisandarinimu.

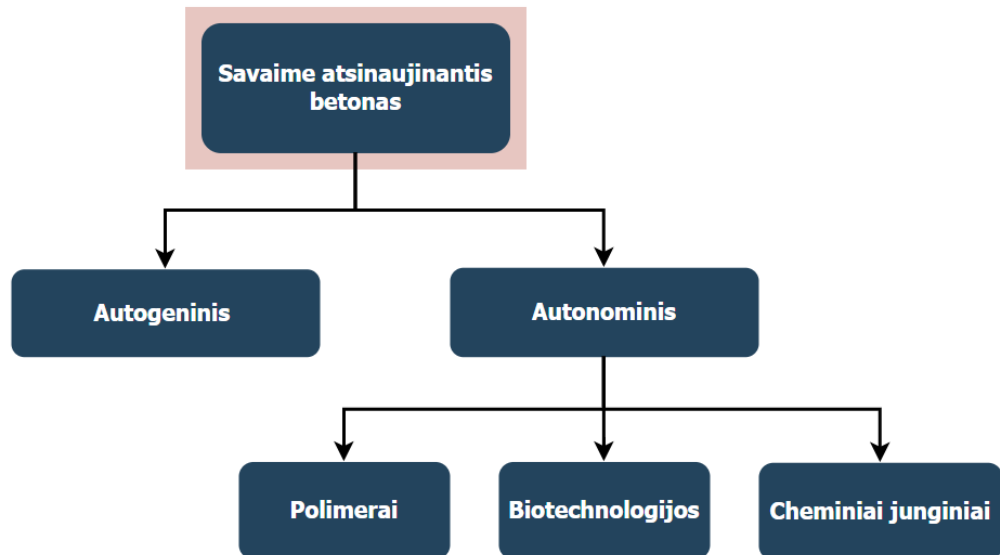
Mokslinėje literatūroje aprašoma, kad naudojant cementą kaip rišamąją medžiagą, betone esantys plyšiai gali užsiverti be papildomų priedų. Toks plyšių užsivėrimas vadinamas autogeniniu - tai plyšio užsivėrimo reiškinys, pagrįstas cheminėmis reakcijomis, kuriose dalyvauja vanduo. 1998 Jabobsen pasiekė 0,2 mm plyšio užsigydymą taikydamas mažą vandens ir cemento santykį bei apkrovęs betoną maksimaliais leistiniais įtempimais. Autogeninis atsinaujinimas skirstomas į 2 tipus. Pirmąjo tipo plyšio užsivėrimą sukelia į plyšį patekusi drėgmė, kuri sukelia tolesnę nehidratavusio cemento hidrataciją, kurios reakcijos metu produktas užpildo plyšio ertmę. Antrasis tipas – plyšyje vykstančios karbonizacijos produktas. Esant cementinių dalelių kontaktui su vandeniu, vandenyje ištirpsta ir nusėsta tirpūs hidroksidai, pavyzdžiui kalcio hidroksidas $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Apie 75 % cemento sudaro dikalcio silikatas (C_2S) ir trikalcio silikatas (C_3S). Veikiant cementinę matricą vandeniu, neištirpusios kalcio hidroksidos $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dalelės reaguoja su silika, taip suformuodamos kalcio karbonato kristalus (CaCO_3), kurie sumažina plyšio plotį. Ši reakcija vyksta tik esant didesnei nei 7,5 PH. Nevilis teigia, kad pirmasis autogeninio užsigydymo tipas pasireiškia pradinėje betono eksploatavimo stadijoje, o antroji – eksploatuojant betoną ilgą laiką.

Autogeninis užsivėrimas veikia tik esant labai mažam plyšio pločiui. Mokslinėje literatūroje pastebėta, kad norint pagaminti ilgaamžiškesnę konstrukciją, projektuojamas mažesnis vandens ir cemento santykio betono mišinys. Taip cemento matricoje lieka daugiau nesureagavusių medžiagų, kurios veikiant vandeniui padidina savaiminio atsinaujinimo efektyvumą.



10 pav. Autogeninio atsinaujinimo principas

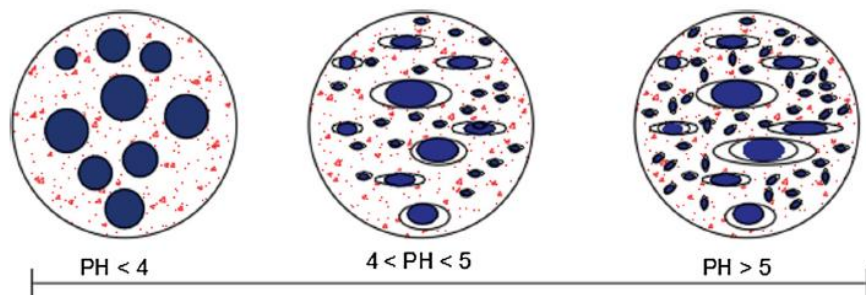
Savaiminio atsinaujinimo tipai pateikti 11 pav.



11 pav. Savaime atsinaujinačio betono rūšys

1.5. Autonominis savaiminis atsinaujinimas

Autonominis savaiminio atsinaujinimo reiškinys pasiekiamas papildant betono sudėtį priedais. Galimos 2 priedų pridėties technologijos: kapsulėmis bei vamzdeliais arba maišant laisvai kartu su betono sudėtyje esančiomis medžiagomis. Naudojant kapsules, jos turi būti pagamintos iš medžiagos, galinčios atlaikyti betono viduje veikiančias jėgas bei savaiminį atsinaujinimą sukelti priedas turi būti mažai takus, kad užtikrintų medžiagos efektyvumą plyšiuose. Verta paminėti, kad medžiagos efektyvumui daro įtaką kapsulės skersmuo (0,3 – 0,7 mm), sienutės storis (~0,3 mm) bei paviršiaus šiurkštumas. Taip pat medžiagos efektyvumui turi betono PH. PH įtaka priedo paskleidimo efektyvumui pateikta 11 pav. Kapsulės dažniausiai naudojamos naudojant bakterinį priedą.



12 pav. Kapsulių efektyvumo priklausomybė nuo PH

Efektyvi savaiminį atsinaujinimą sukelti medžiaga turi būti:

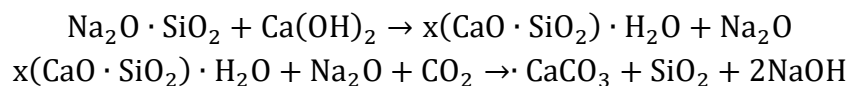
- Užsandarinti plyšį ir sumažinti betono vandens laidumą;
- Būti suderinama su cementine matrica;
- Turi išlikti aktyvi visą konstrukcijos eksploatavimo laikotarpį;
- Būti efektyvi daugiau nei vieną kartą;
- Būti ekonomiška.

1.6. Betonas su kristaliniu priedu

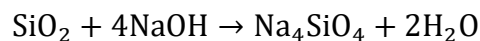
Kristalinis priedas – tai vandens laidumą mažinanti, hidrofilinių savybių turinti medžiaga. Literatūroje aprašoma, kad vieni mokslininkai teigia, jog savaiminis atsinaujinimas vyksta betono sudėtyje esančioms medžiagoms reaguojant su kristaliniu priedu, taip susidarant trikalčio silikatui, kiti teigia - jog reaguojančioji medžiaga yra kalcio hidroksidas.

Viena iš kristalinio priedo medžiagų - natrio silikatas. Ši medžiaga sukelia reakciją su neištirpusiu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kurios produktas – kalcio silikatas (C_2S). Natrio silikato ir kalcio hidroksido produktas yra kalcio silikato hidrato gelis (C-S-H), kuris yra identiškas pirminės cemento hidracijos produktui. Šis reakcijos produktas užpildo plyšius ir poras, taip padidindamas betono ilgaamžiškumą ir stiprumą. Ši reakcija vyksta atsivėrus plyšiui ir esant kontaktui su vandeniu. Taip pat toliau vyksta kita reakcija taip natrio ir kalcio hidroksidų, kuri suformuoja N-S-H gelį. Ši reakcija vyksta ilgai (pavyzdžiui metais).

C-S-H gelio reakcija

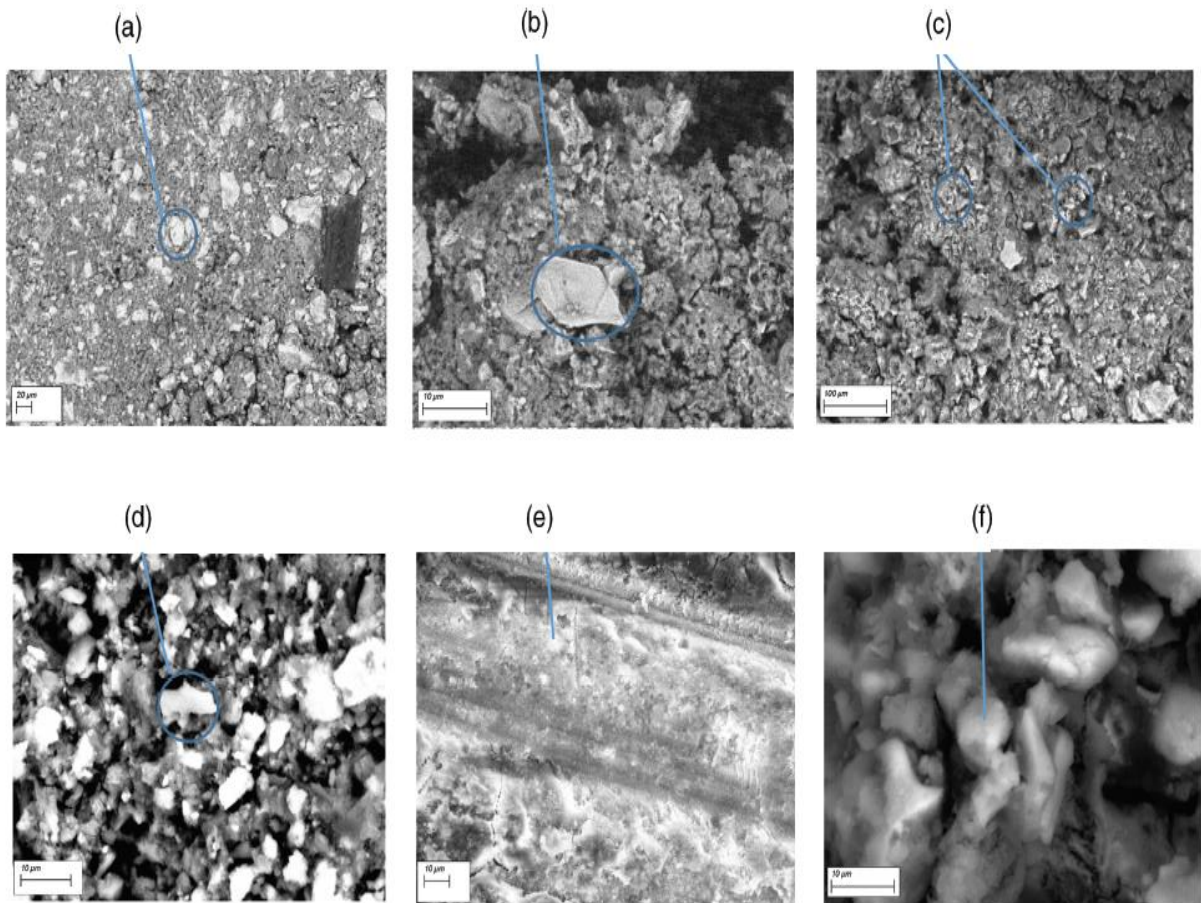


N-S-H gelio reakcija



Pagal literatūroje pateiktus bandymus, ši medžiaga grąžino ~17 % betono stiprio bei užsandarino plyšį 100 %.

Kristalinis priedas efektyvus, jeigu plyšiai yra ne didesni, negu 0,3 mm. Dauguma mokslinių leidinių aptaria vandens laidumo parametrus naudojant kristalinį priedą ir tik keletas iš jų tiria kristalinio priedo poveikį mechaninėms savybėms.



13 pav. Betono struktūros mikroskopinis vaizdas. a) susiformavę išsibarstę kristalai, b) pilnai susiformavęs kristalas, c) tankiai susiformavę kristalai, d), e) tankiai galutinai susiformavę kristalai, e) pilnai susiformavę kristalai, dengiantys betoną.

Literatūroje teigiama, kad po bandinių kontakto su vandeniu, 0,2 – 0,3 mm plyšiuose pastebimi baltos spalvos dariniai. Praėjus ne mažiau kaip 30 dienų, 0,2 – 0,3 mm plyšiai užsisandarino beveik visiškai. Taip pat pastebėta, kad bandiniai, kurie buvo laikomi aukštesnėje temperatūroje greičiau pilnai užsisandarino plyšį. Bandinių, kurie buvo laikomi vandenyje ir džiovunami cikliška, plyšis taip pat užsisandarino, tačiau tam reikėjo daugiau laiko. Vizualinės analizės rezultatai pateikti 14 pav.

		Ankstyvieji plyšiai		Konstrukciniai plyšiai	
		Prieš atsinaujinimą	Po atsinaujinimo	Prieš atsinaujinimą	Po atsinaujinimo
Aplinkos sąlygos	Panardinta vandenyje				
	Cikliškas vandens poveikis				
	Kontaktas su vandeniu				
	Oras				

14 pav. Vizualūs plyšių pokyčiai prieš ir po kontakto su vandeniu betone su kristaliniu priedu

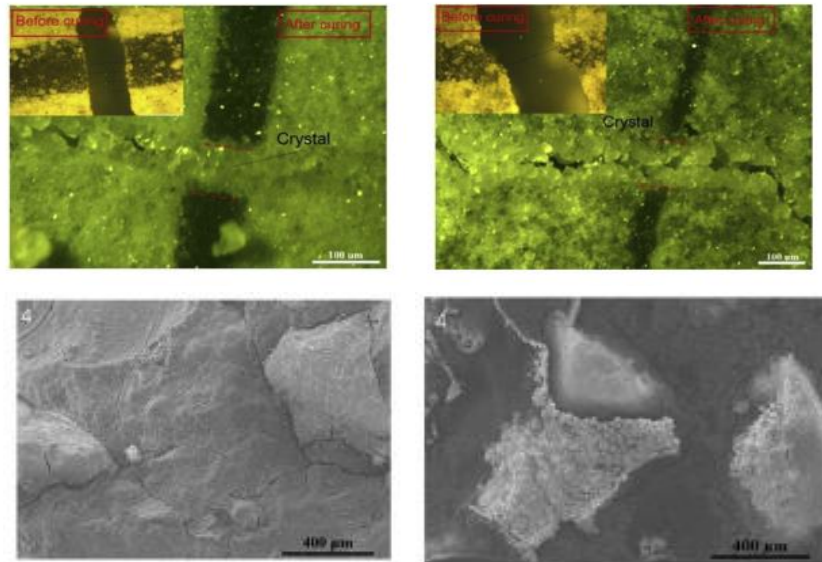
Analizuotoje literatūroje teigiama, kad naudojant kristalinį priedą betono slankumas padidėja ~ 17% priklausomai nuo mišinio sudėties. Šis reiškinys aiškinamas Na_2CO_3 buvimu cementinėje tešloje. Natrio karbonatas sukuria tirpale ištirpusius Na ir CO jonus. Dalis CO jonų nusėda ant mišinyje esančių Ca jonų. Dėl susidariusių netirpių nuosėdų, padengia nehidratavusių dalelių paviršių, todėl mišinio slankumas padidėja.

Naudojant kristalinį priedą, literatūroje aprašomas 8,7 % lenkiamojo stiprio padidėjimas lyginant su betonu be kristalinio priedo bei 7,5 % gniuždomojo stiprio padidėjimas lyginant su betonu be kristalinio priedo.

1.7. Savaiminio atsinaujinimo bandymų metodai

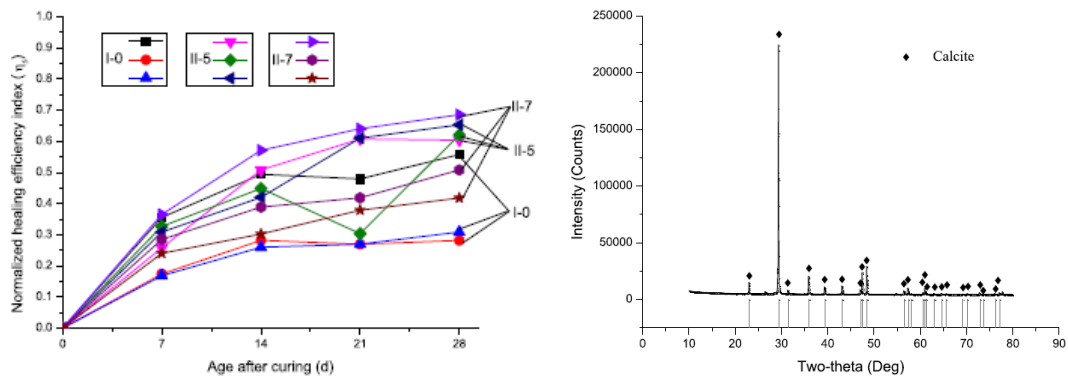
Savaiminio atsinaujinimo efektyvumo vertinimo metodika Europoje nėra standartizuota. Apžvelgtoje literatūroje teigiama, kad atsinaujinimo efektyvumas vertinamas tiriant stiprumą, standumą bei ilgaamžiškumą.

Optinė analizė – patogus metodas įvertinti savaiminio atsinaujinimo efektyvumą naudojant mikroskopą. Šios analizės metu galima patvirtinti arba paneigti kalcio karbonato kristalų susiformavimą bei vizualiai nustatyti plyšio pokytį.



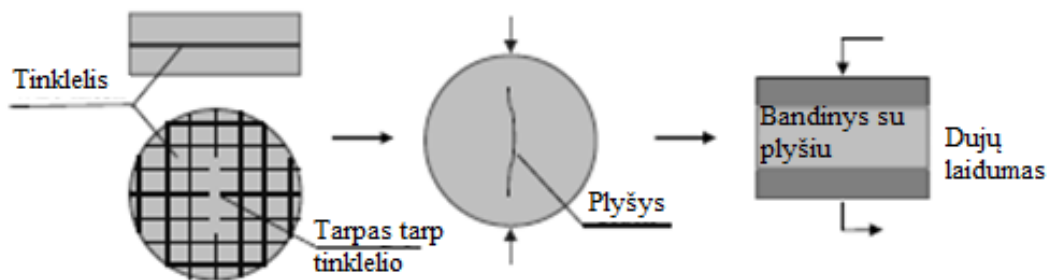
15 pav. Mikroskopinė plyšių analizė

Rentgeno spindulių difrakcijos metodas bei skenuojančio elektroninio mikroskopo analizė taikomos stebėti susidariusių medžiagų kiekį taip įvertinant savaiminio atsinaujinimo efektyvumą. Šios analizės metu rastas susiformavęs etringitas patvirtina medžiagos efektyvumą.

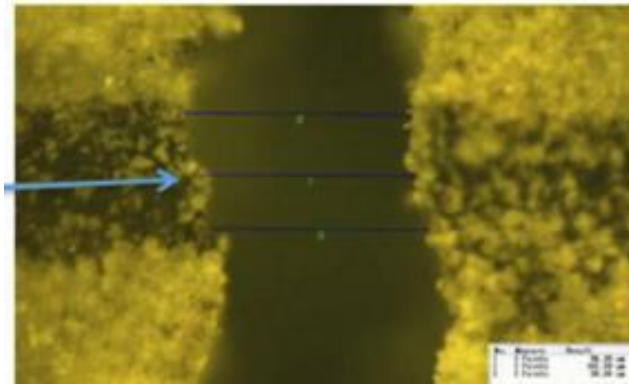


16 pav. XRAY ir SEM metodų rezultatai

Pralaidumo bandymas. Gniuždant cilindrinis suformuojamas plyšys. Atvėrus plyšį bei po bandinio laikymo vandenyje plyšys matuojamas 3 vienodais atstumais tarpusavyje nutolusiuose taškuose kiekvienoje pusėje, išvedamas vidurkis.

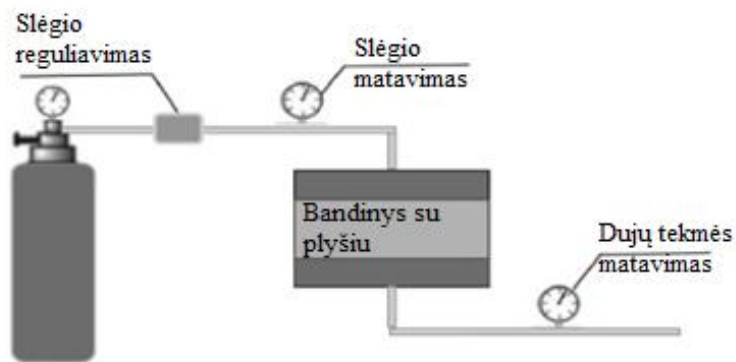


17 pav. Dujų laidumo bandymo schema



18 pav.. Plyšio matavimas

Kadangi plyšio matavimas teikia tik dvimačius rezultatus, o paviršinis plyšio užsigydymas nėra patikimas rodiklis, atliekamas dujų pralaidumo testas. Šis testas atliekamas esant 0,1 MPa, 0,15 MPa ir 0,2 MPa slėgiui.



19 pav. Dujų laidumo bandymo principas. Bandymo kamera

2. Naudotos medžiagos ir tyrimų metodika

2.1. Naudotos medžiagos ir betono sudėtis

Tiriant vandeniui nelaidaus betono mechanines ilgaamžiškumo savybes buvo pagaminti 4 skirtingų sudėčių betono bandiniai:

- 1 sudėtis – betonas be priedų, skirtas kontroliniam palyginimui bei teptinės hidroizoliacijos bandymams. Naudojama teptinė „SikaBond“ T8 hidroizoliacija;
- 2 sudėtis – betono sudėtis papildoma kristaliniu priedu SIKA WT-200, (1 % cemento masės, 3,5 kg);
- 3 sudėtis – betono sudėtis papildoma orą įtraukiančiu priedu “Sika® Luftporenbildner LPS A-94” (0,23 % cemento masės, 0,81 kg);
- 4 sudėtis – betono sudėtis papildoma kartu anksčiau naudotais priedais - kristaliniu bei orą įtraukiančiu priedais.

2 lentelė. Bandinių sudėtis 1 m³ betono.

	Sudėtis Nr. 1	Sudėtis Nr. 2	Sudėtis Nr. 3	Sudėtis Nr. 4
Cementas, kg	290	350	350	350
Vanduo, kg	174	158	158	158
V/C santykis	0,6	0,451	0,451	0,451
Smėlis 0/4, kg	880	880	880	880
Žvirgždas 4/16, kg	980	980	980	980
Superplastiklis, kg	0,5 % cemento masės, 1,45 kg	0,7 % cemento masės, 2,5 kg	0,7 % cemento masės, 2,5 kg	0,7 % cemento masės, 2,5 kg
Kristalinis priedas, kg	-	1 % cemento masės, 3,5 kg	-	1 % cemento masės, 3,5 kg
Orą įtraukiantis priedas, kg	-	-	0,23 % cemento masės, 0,81 kg	0,23 % cemento masės, 0,81 kg

Atliekant savaiminio betono atsinaujinimo bandymus (vandens pralaidumo bei pasiurbimo) buvo tiriamas kitos sudėties (2 lentelė) betonas, siekiant palyginti su kitų atliktais bandymais, kuriuose buvo tiriamas betonas su kitais savaiminių betono atsinaujinimą sukeliančiais priedais.

3 lentelė. Bandinių sudėtis 1 m³ betono.

	Sudėtis Nr. 5	Sudėtis Nr. 6
Cementas, kg	300	300
Vanduo, kg	165	165
V/C santykis	0,55	0,55
Dolomito atsijos 0/5, kg	900	900
Dolomitinė skalda 5/16, kg	1050	1050
Superplastiklis, kg	31	31
Kristalinis priedas, kg	1 % cemento masės, 3 kg	-
Fibros	30 kg	30 kg

2.2. Tyrimų metodika

2.2.1. Vandens pralaidumo bandymas

Bandymui naudojami 50 mm aukščio, Ø100 mm skersmens bandiniai. Prieš pradėdant vandens pralaidumo bandymą, visi bandiniai laikomi 20°C, 95±5% santykinės drėgmės patalpoje arba panardinti vandenyje.

Kiekvienas bandinys įpjauamas ~3 – 5 mm. Bandiniai suvaržomi perimetru (apvyniojami lipnia juosta arba suveržėjais). Bandiniai gniuždomi tol, kol liekamasis plyšis bus ~200 µm. Gniuždymo metu plyšių plotis matuojamas prie preso esančiais deformacijų davikliais. Plyšių pločio kontrolė atliekama naudojant elektroninį plyšių matavimo prietaisą.



20 pav. Plyšio formavimas

Atvėrus plyšį, kiekvienoje bandinio pusėje vienodais atstumais nutolę vienas nuo kito pažymimi 3 taškai (kas 25 mm), jų vietoje išmatuojamas plyšių plotis, išvedamas vidurkis.

a)

b)



21 pav. a) prietaisas, skirtas plyšio matavimui; b) plyšio matavimas

Atvėrus plyšį, prie bandinių naudojant hermetiką prikljuojami Ø110 mm skersmens PVC vamzdžiai.



22 pav. Bandymams paruošti bandiniai

Į vamzdžius pripilama 1,5 l vandens. Pirmos 60s bandymo nevertinamos siekiant išvengti duomenų netikslumo, galinčio atsirasti oro burbulams pasišalinant iš bandinio pradėjus tekėti vandeniui. Taip pat pamatuojamas laikas, per kurį pripildomas bandinys. Po 30 min. stabilaus vandens tekėjimo per plyšį sveriamas likęs vanduo. Pastebėjus, kad vanduo gali išbėgti greičiau nei per 30 min., fiksuojami tarpiniai rezultatai po 20 min.



23 pav. Vandens pralaidumo bandymas

Atlikus bandymą nuo bandinių nuimami PVC vamzdžiai. Paruošti laikymui vandenyje bandiniai sudedami į talpą bei užpilami vandeniu taip, kad visu tūriu būtų po vandeniu. Bandinių laikymas po vandeniu priklauso nuo to savaimino atsinaujinimo savybes suteikiančio priedo. Šiuo

atveju – naudojant kristalinį priedą, bandiniai vandenyje laikomi 30 d. Praėjus šiam laikotarpiui, bandymas pakartojamas.



24 pav. Bandiniai vandenyje

Praėjus betono atsinaujimo laikotarpiui – 30 dienų, bandymas pakartojamas.

2.2.2. Kapiliarinio pasiurbimo bandymas

Prieš pradėdant vandens pralaidumo bandymą, visi bandiniai laikomi 20°C, 95±5% santykinės drėgmės patalpoje arba laikomi panardinti vandenyje. Plyšiai atveriami analogiškai bandiniams, skirtiems pralaidumo bandymui. Bandymui naudojami 50 mm aukščio, Ø 100 mm skersmens diskai. Pusė kontrolinių bandinių paliekami be plyšio.

Prieš pradėdant bandymą, bandinių apatinė dalis padengiama hidroizoliuojančiu sluoksniu, paliekamas tik 10 mm x 100 mm centruotas plyšys. Bandinių šonai iki 30 mm taip pat padengiami hidroizoliacijos sluoksniu. Hidroizoliuoti bandiniai džiovinami 40° C temperatūroje ne trumpiau kaip 14 dienų – tol, kol pasiekiamas pastovus bandinių svoris. Po 14 dienų bandiniai laikomi 1 dieną patalpoje, kurios temperatūra 20° C bei santykinė drėgmė - 60% arba kol jų masė per valandą kinta ne daugiau kaip 0,2 %.



25 pav. Paruoštas bandinys

Bandymo pradžioje kiekvienas bandinys pasveriamas ir pamerkiamas į vandenį taip, kad ne daugiau kaip 5 mm bandinio aukščio būtų vandenyje. Talpa, kurioje atliekamas bandymas uždengiama, siekiant išvengti vandens garavimo nuo bandinių paviršiaus. Bandinių svoris matuojamas po 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, 196, 225, 256, 476, 1448 minučių (iš viso 24 h).

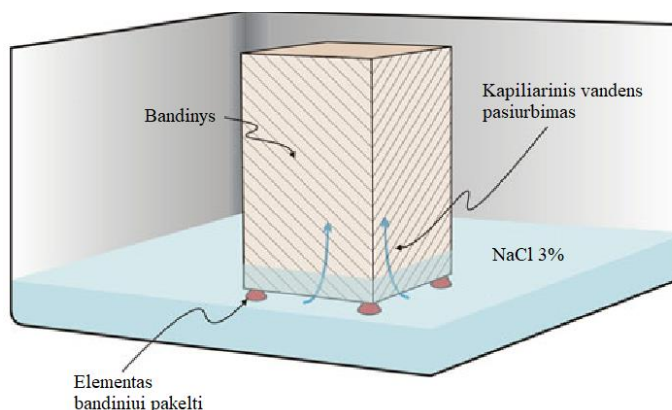


26 pav. Bandymas

Atlikus bandymą bandiniai sudedami į talpą bei užpilami vandeniu taip, kad visu tūriu būtų po vandeniu. Bandinių laikymas po vandeniu priklauso nuo to savaiminio atsinaujinimo savybes suteikiančio priedo. Šiuo atveju – naudojant kristalinį priedą, bandiniai vandenyje laikomi 30 d. Praėjus betono atsinaujimo laikotarpiui – 30 dienų, bandymas pakartojamas.

2.2.3. Kapiliarinio šaldymo tyrimas

Kontrolinis bandinys (sudėtis nr. 1) nutepamas SikaBond T8 teptine hidroizoliacija. Šis bandinys, o taip pat ir likusių sudėčių bandiniai panardinami ~1,5 – 2 cm į 3 % NaCl tirpalą ir bandomi atsparumo šalčiui bandymų kameroje. Bandiniai vizualiai apžiūrimi kas savaitę iki tol, kol bus matomas bandinių suirimas.



27 pav. Kapiliarinio šaldymo bandymo principas



28 pav. Bandinys, padengtas teptine hidroizoliacija



29 pav. Bandiniai 3 % NaCl tirpale

2.2.4. Tūrinio šaldymo tyrimas

Bandiniai bandomi pagal LST 1428.17:2004 “Betonas. Bandymo metodai. Atsparumo šalčiui nustatymas“. Bandymas atliekamas šaldymo kameroje, kuri gali palaikyti (-18 ± 2) °C temperatūrą bei turi priverstinės konvekcijos galimybę. Tiriama bandiniai dedami į perforuotus konteinerius. Po ne mažiau kaip 150 bei ne mažiau kaip po 300 ciklų vizualiai įvertinama bandinių išorinė būklė bei patikrinamas jų stipris gniuždant.

3. Rezultatai ir išvados

3.1. Betono slankumas

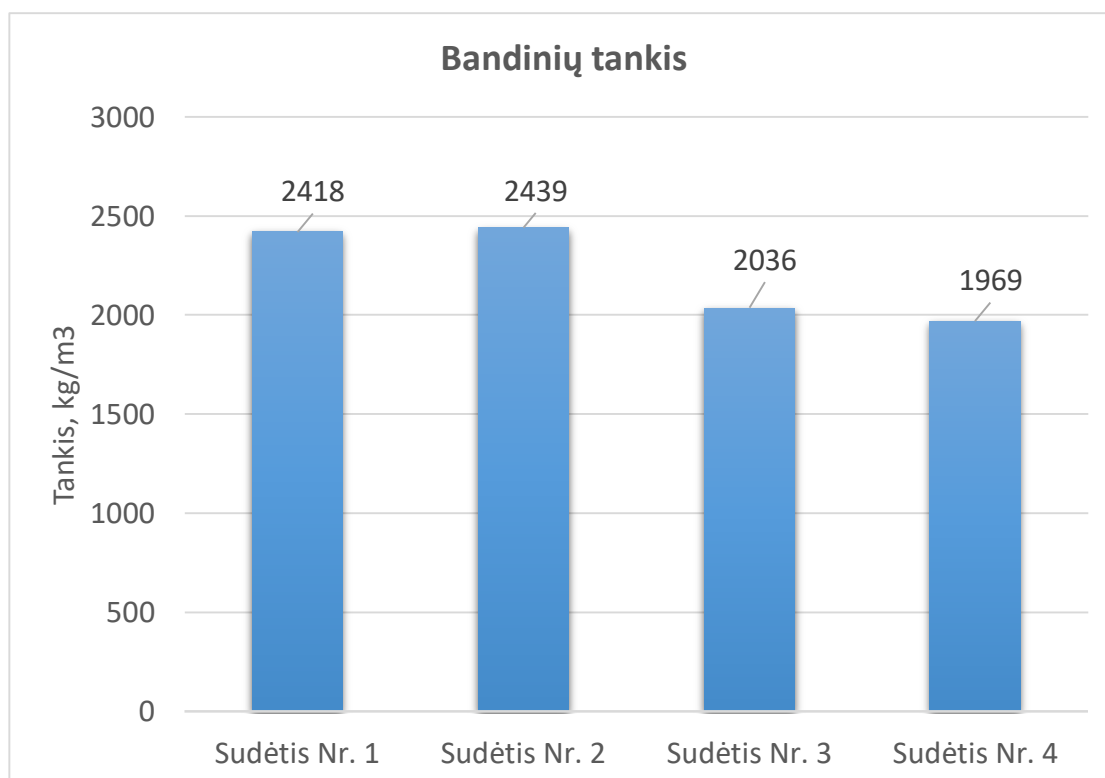
Slankumo matavimo rezultatai pateikti 3 lentelėje.

4 lentelė. Bandinių slankumo parametrai.

	Slankumas, mm	Slankumo klasė
Sudėtis nr. 1	102	S2
Sudėtis nr. 2	144	S3
Sudėtis nr. 3	111	S3
Sudėtis nr. 4	162	S4

3.2. Betono tankis

Didžiausias tankis gautas sudėtyje nr. 2, kurios V/C santykis yra mažiausias bei buvo naudotas kristalinis priedas. Labai panašūs rezultatai gauti kontroliniame bandinyje nr. 1. Šios sudėty klasifikuojamos kaip normalusis betonas ($2000-2600 \text{ kg/m}^3$). Sudėčių nr. 3 ir nr. 4 tankiai mažesni, nes buvo naudotas orą įtraukiantis priedas, todėl dėl susidarančių porų betono tankis ženkliai mažesnis. Pagal klasifikaciją šis betonas patenka tarp normaliojo ir lengvojo D2,0 ($1800-2000 \text{ kg/m}^3$) klasių.



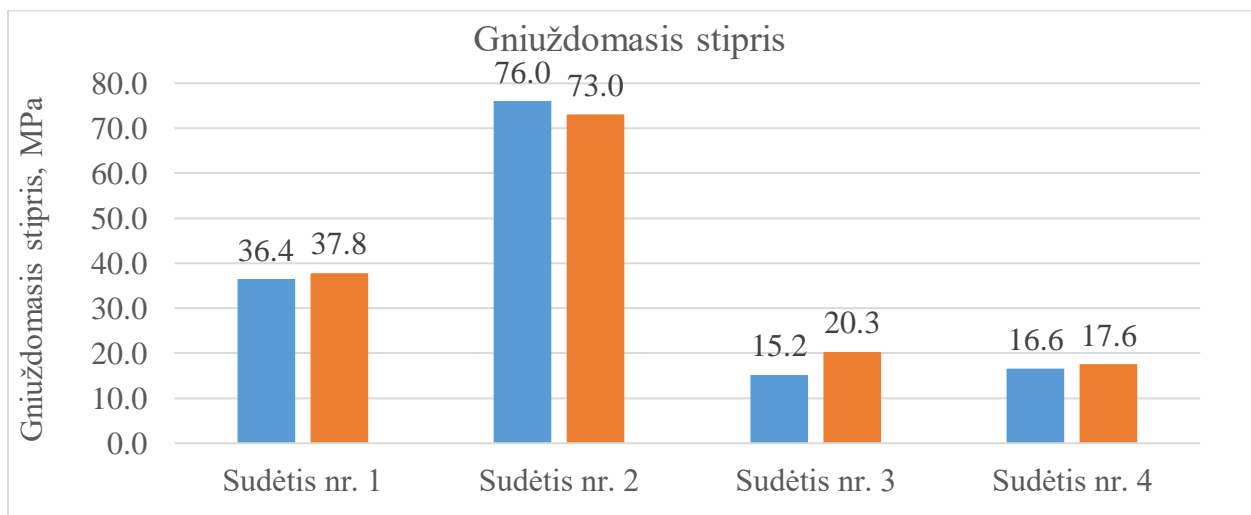
30 pav. Bandinių tankių diagrama

3.3. Tūrinis šaldymas

Bandinių gniuždomasis stipris po 150 tūrinio šaldymo ciklą pateiktas 8 lentelėje bei pav. 30.

5 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė.

Bandinio nr.	a ₁ , cm	a _{1, vid} , cm	a ₂ , cm	a _{2, vid} , cm	A _{vid} , cm ²	Jėga, kN	Stipris gniuždant, MPa
1.1	10,05	10,06	9,84	9,94	99,99	364,2	36,4
	10,05		9,99				
	10,09		9,99				
1.2	9,99	9,96	9,73	9,73	96,91	366,5	37,8
	10,00		9,74				
	9,98		9,73				
2.1	9,75	9,75	10,12	10,10	98,48	748,4	76,0
	9,76		10,08				
	9,75		10,10				
2.2	10,12	10,12	10,01	10,2	101,34	739,9	73,0
	10,08		10,01				
	10,15		10,03				
3.1	10,04	10,04	11,02	10,71	107,49	163,4	15,2
	10,01		11,01				
	10,07		10,09				
3.2	9,99	10,00	10,01	10,01	100,03	203,3	20,3
	10,02		10,00				
	9,98		10,01				
4.1	9,98	10,00	9,93	9,95	99,43	165,4	16,6
	10,01		9,94				
	10,00		9,97				
4.2	10,04	10,01	10,00	10,02	100,23	176,0	17,6
	10,00		10,06				
	9,98		9,99				

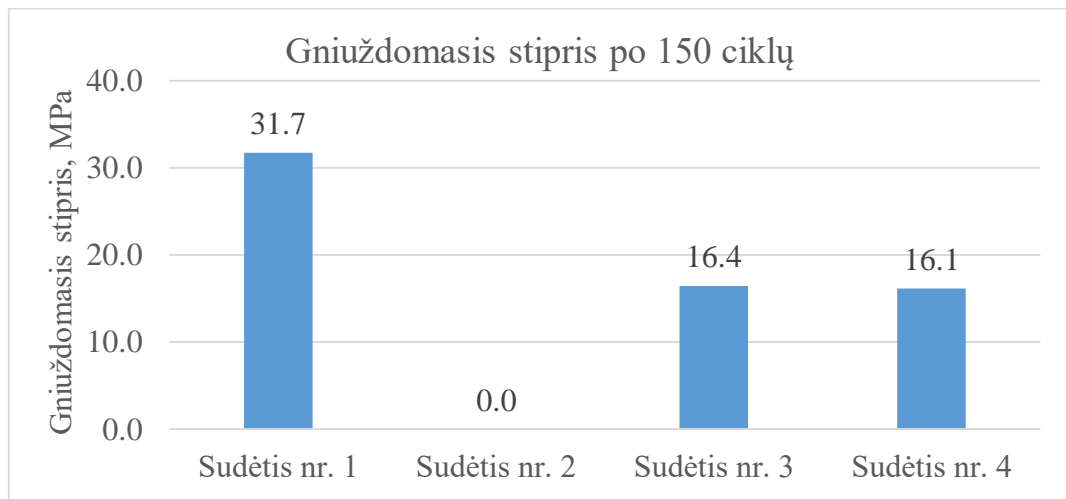


31 pav. Bandinių gniuždomųjų stiprių diagrama

Praėjus 150 ciklų tūrinio šaldymo kameroje bandinys su kristaliniu priedu suiro visiškai ir buvo nebetinkamas stiprumo bandymui. Pastebėta, kad kontrolinio bandinio paviršius suaižėjo. Bandinių, pagamintų pagal sudėtis nr. 1, 3 ir 4 pateikti lentelėje:

6 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė.

Bandinio nr.	a_1 , cm	$a_{1, vid}$, cm	a_2 , cm	$a_{2, vid}$, cm	A_{vid} , cm^2	Jėga, kN	Stipris gniuždant, MPa
1.3	10,08	10,08	10,10	10,10	101,81	323,0	31,7
	10,07		10,12				
	10,09		10,08				
3.3	10,15	10,16	10,13	10,14	103,02	169,2	16,4
	10,16		10,14				
	10,14		10,15				
4.3	10,09	10,10	10,09	10,09	101,91	164,4	16,1
	100,10		10,11				
	101,11		10,07				



32 pav. Bandinių stiprių po 150 šaldymo ciklų diagrama

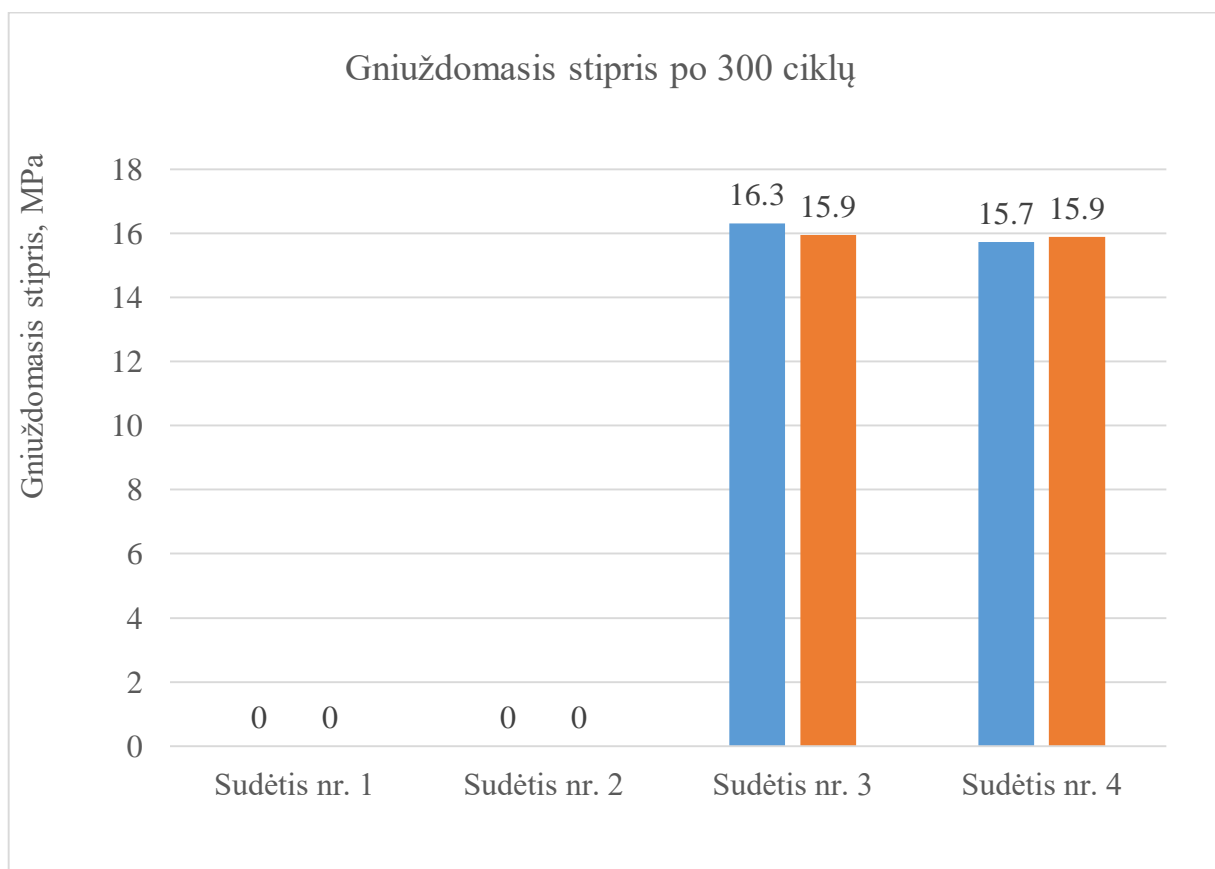


33 pav. Bandiniai po 150 šaldymo ciklų.

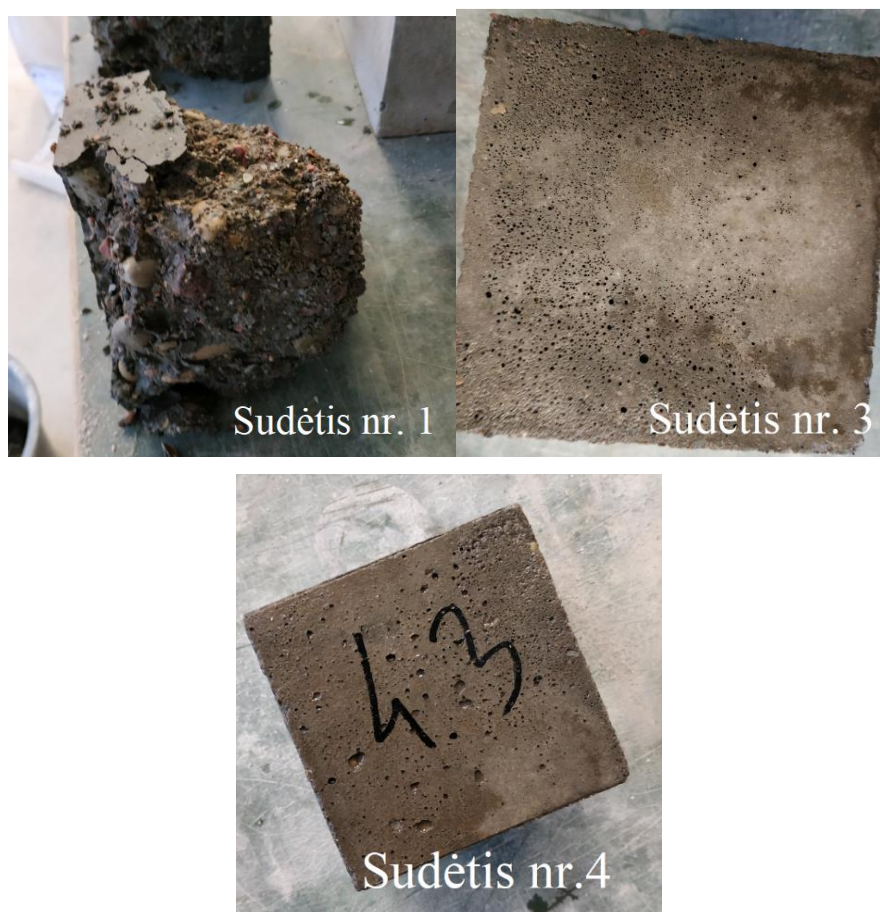
Praėjus 300 ciklų tūrinio šaldymo kameroje, kontrolinis (sudėtis nr. 1) bandinys suiro visiškai ir buvo nebetinkamas stiprumo bandymui. Bandinių, pagamintų pagal sudėtis nr.,3 ir 4 pateikti 10 lentelėje bei 33 pav.:

7 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė

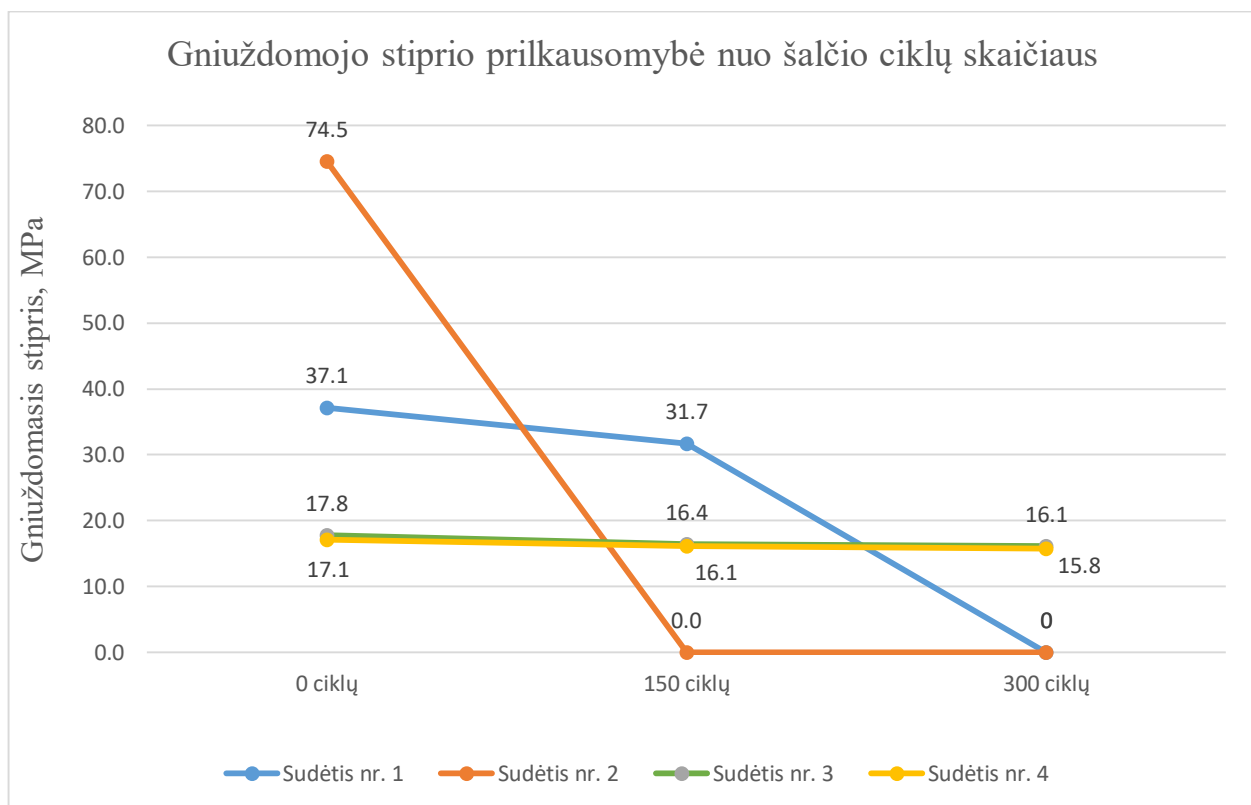
Bandinio nr.	a ₁ , mm	a _{1, vid} , mm	a ₂ , mm	a _{2, vid} , mm	A _{vid} , mm ²	Jėga, kN	Stipris gniuždant, MPa
3.4	100,5	100,5	101,0	101,0	10150,5	165,6	16,3
	100,5		101,0				
	100,6		100,9				
3.5	101,3	101,3	98,2	98,3	9957,8	158,8	15,9
	101,1		98,3				
	101,5		98,3				
4.4	96,7	96,7	101,6	101,5	9815,1	154,3	15,7
	96,8		101,4				
	96,6		101,5				
4.5	95,7	95,7	100,4	100,4	9608,3	152,6	15,8
	95,7		100,4				
	55,8		100,4				



34 pav. Bandinių stiprių po 300 šaldymo ciklų diagrama



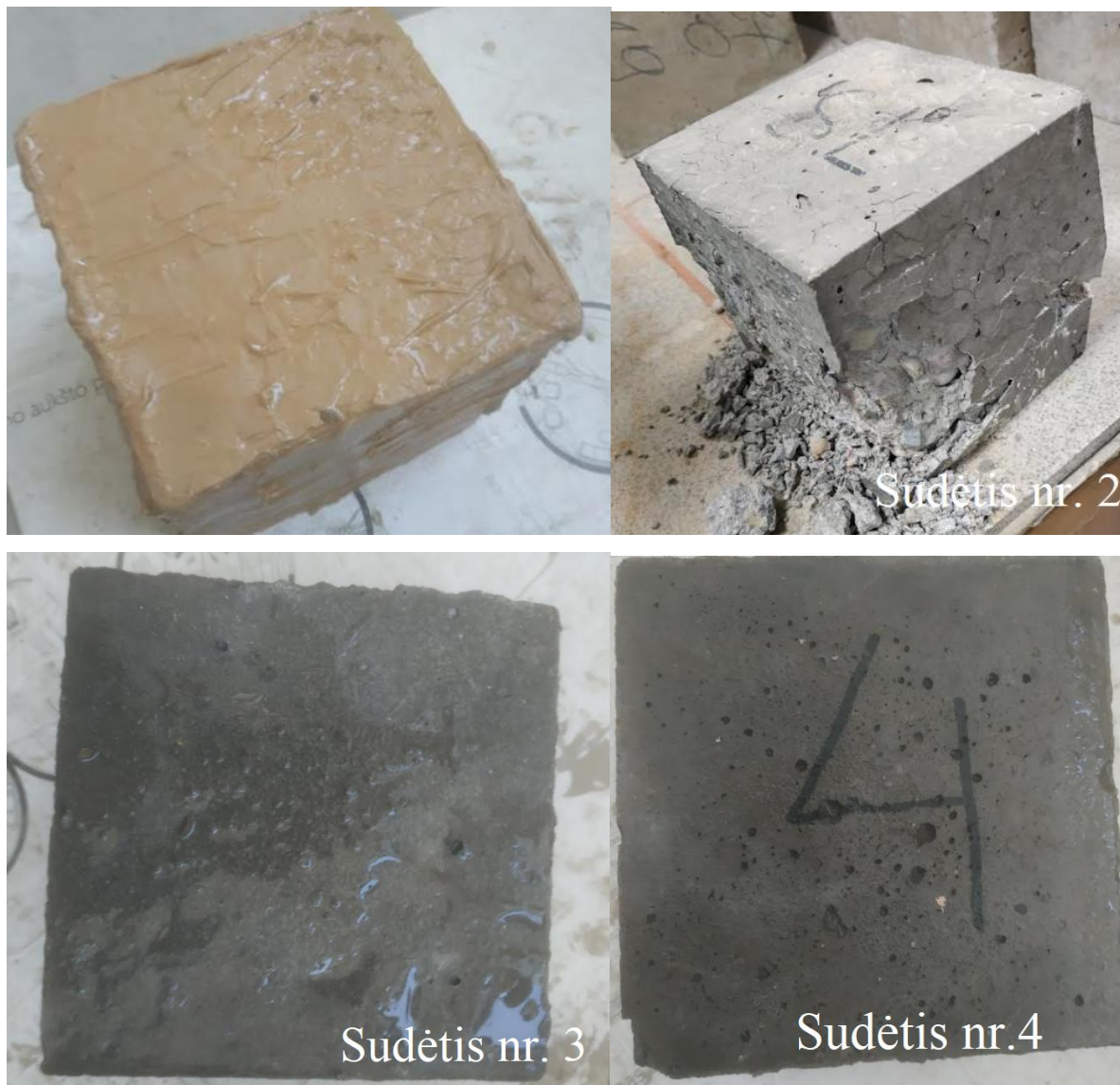
35 pav. Bandiniai po 300 šaldymo ciklų



36 pav. Tūrinio šaldymo tyrimo rezultatų suvestinė diagrama

3.4. Kapilairinis šaldymas

Nr. 2 sudėties bandinio paviršius praėjus ~20 ciklų 3 % NaCl tirpale pradėjo irti, o praėjus 30-35 ciklams – suiro visiškai. Likę bandiniai praėjus 300 šaldymo ciklų vizualiai įvertinus paviršiaus pažeidimų neturėjo.



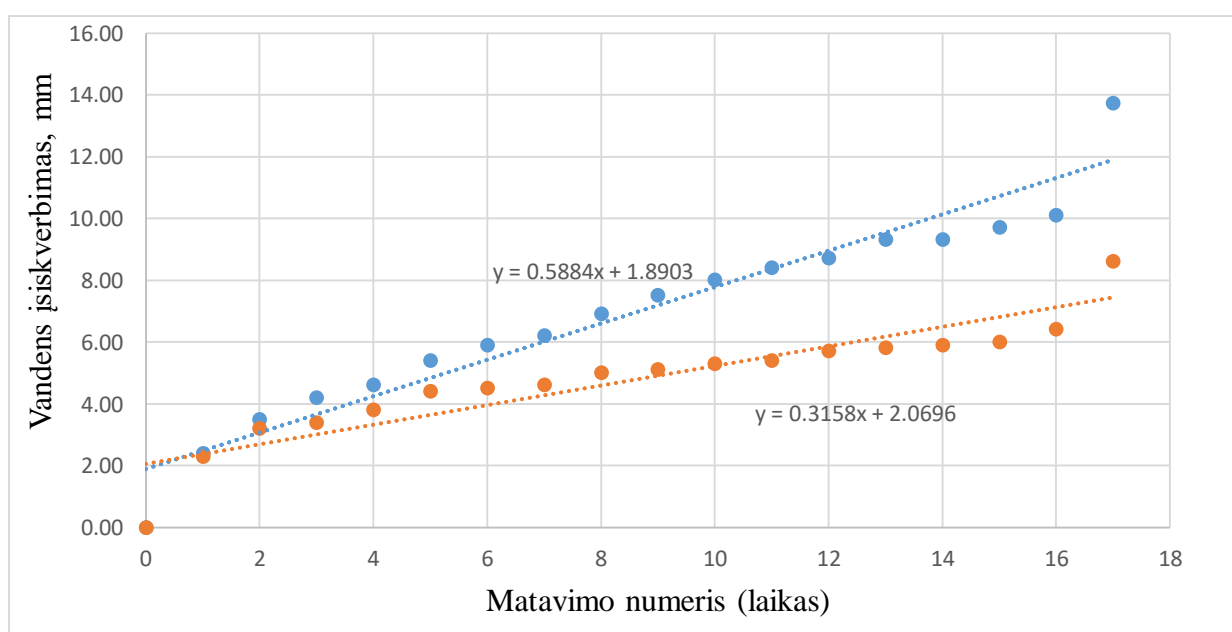
37 pav. Bandiniai po kapilairinio šaldymo bandymo

3.5. Kapiliarinis pasiurbimas

Atlikus pirmąjį bandymą gauti rezultatai:

7 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (kontroliniai bandiniai nr. 1 ir 2)

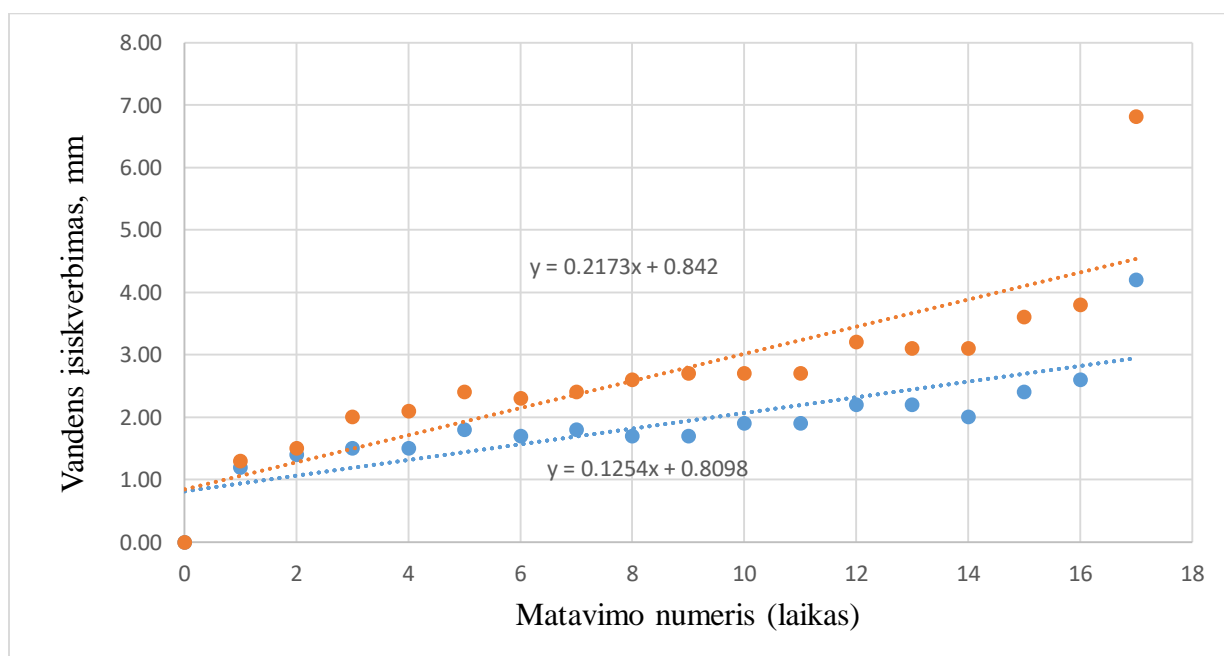
Bandymo nr.	Laikas, min	Bandino masė, g		Įsiskverbimas, mm	
		Bandinys nr.1	Bandinys nr.2	Bandinys nr.1	Bandinys nr.2
0	0	999,9	1009,8	0,00	0,00
1	1	1002,3	1012,1	2,40	2,30
2	4	1003,4	1013,0	3,51	3,21
3	9	1004,1	1013,2	4,21	3,41
4	16	1004,5	1013,6	4,61	3,81
5	25	1005,3	1014,2	5,41	4,41
6	36	1005,8	1014,3	5,91	4,51
7	49	1006,1	1014,4	6,21	4,61
8	64	1006,8	1014,8	6,91	5,01
9	81	1007,4	1014,9	7,52	5,11
10	100	1007,9	1015,1	8,02	5,31
11	121	1008,3	1015,2	8,42	5,41
12	144	1008,6	1015,5	8,72	5,71
13	169	1009,2	1015,6	9,32	5,81
14	196	1009,2	1015,7	9,32	5,91
15	225	1009,6	1015,8	9,72	6,01
16	256	1010,0	1016,2	10,12	6,41
17	1448	1013,6	1018,4	13,73	8,62
		Kapiliarinis pasiurbimas		0,5884	0,3158
				Vidurkis	0,45



38 pav. Kontrolinių bandinių nr. 1 ir nr. 2 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas

8 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (kontroliniai bandiniai nr. 3 ir 4)

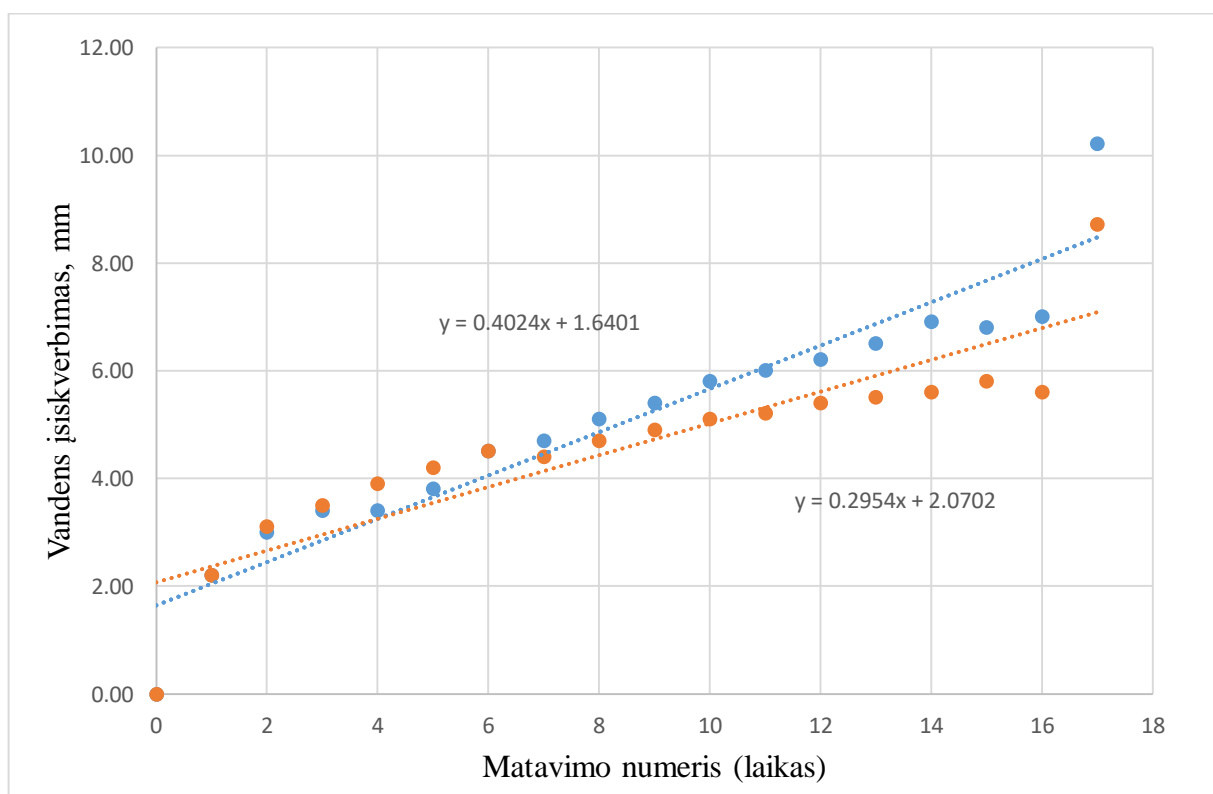
Bandymo nr.	Laikas, min	Bandino masė		Įsiskverbimas, mm	
		Bandinys nr.3	Bandinys nr.4	Bandinys nr.3	Bandinys nr.4
0	0	1002,8	1048,8	0,00	0,00
1	1	1004,0	1050,1	1,20	1,30
2	4	1004,2	1050,3	1,40	1,50
3	9	1004,3	1050,8	1,50	2,00
4	16	1004,3	1050,9	1,50	2,10
5	25	1004,6	1051,2	1,80	2,40
6	36	1004,5	1051,1	1,70	2,30
7	49	1004,6	1051,2	1,80	2,40
8	64	1004,5	1051,4	1,70	2,61
9	81	1004,5	1051,5	1,70	2,71
10	100	1004,7	1051,5	1,90	2,71
11	121	1004,7	1051,5	1,90	2,71
12	144	1005,0	1052,0	2,20	3,21
13	169	1005,0	1051,9	2,20	3,11
14	196	1004,8	1051,9	2,00	3,11
15	225	1005,2	1052,4	2,40	3,61
16	256	1005,4	1052,6	2,61	3,81
17	1448	1007,0	1055,6	4,21	6,81
Kapiliarinis pasiurbimas				0,1254	0,2173
				Vidurkis	0,17



39 pav. Kontrolinių bandinių nr. 3 ir nr. 4 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas

9 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (bandiniai su kristaliniu priedu nr. 1 ir 2)

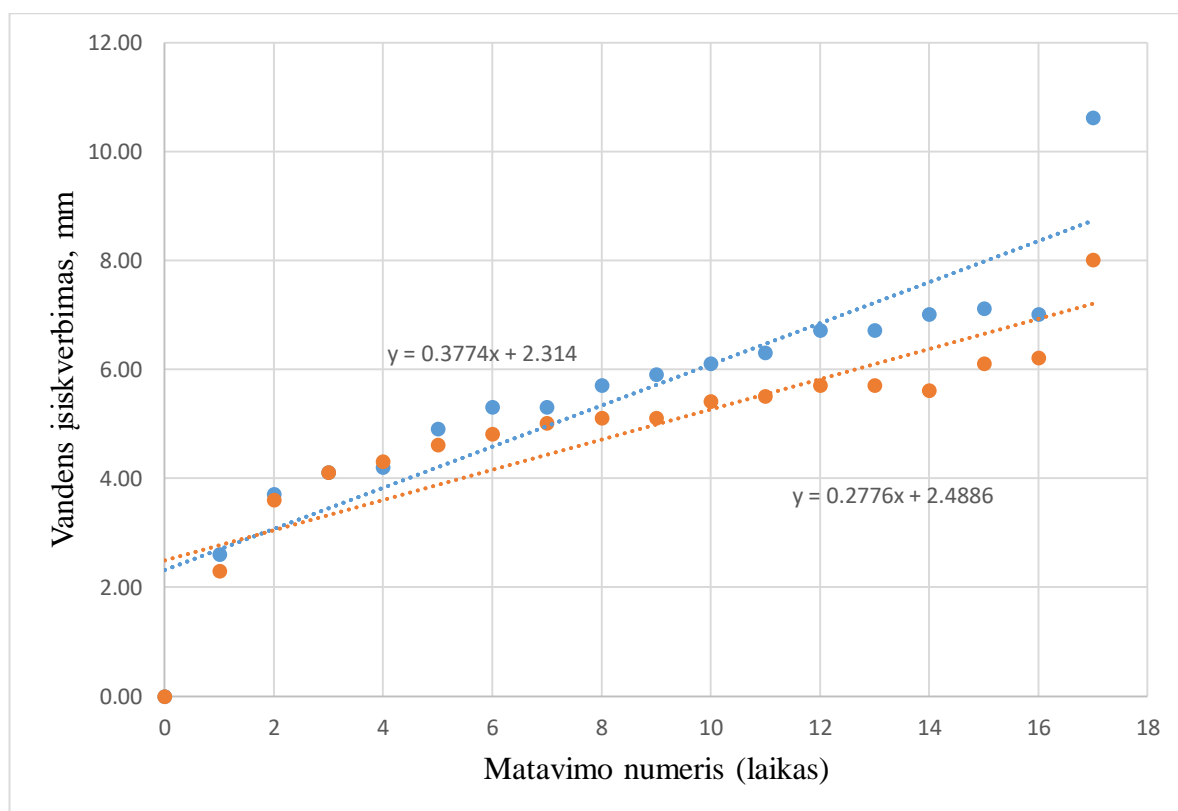
Bandymo nr.	Laikas, min	Bandino masė, g		Įsiskverbimas, mm	
		Bandinys nr.1	Bandinys nr.2	Bandinys nr.1	Bandinys nr.2
0	0	1082,7	991,1	0,00	0,00
1	1	1084,9	993,3	2,20	2,20
2	4	1085,7	994,2	3,01	3,11
3	9	1086,1	994,6	3,41	3,51
4	16	1086,1	995,0	3,41	3,91
5	25	1086,5	995,3	3,81	4,21
6	36	1087,2	995,6	4,51	4,51
7	49	1087,4	995,5	4,71	4,41
8	64	1087,8	995,8	5,11	4,71
9	81	1088,1	996,0	5,41	4,91
10	100	1088,5	996,2	5,81	5,11
11	121	1088,7	996,3	6,01	5,21
12	144	1088,9	996,5	6,21	5,41
13	169	1089,2	996,6	6,51	5,51
14	196	1089,6	996,7	6,91	5,61
15	225	1089,5	996,9	6,81	5,81
16	256	1089,7	996,7	7,01	5,61
17	1448	1092,9	999,8	10,22	8,72
		Kapiliarinis pasiurbimas		0,2954	0,4024
				Vidurkis	0,35



40 pav. Bandinių su kristaliniu priedu nr. 1 ir nr. 2 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas

10 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (bandiniai su kristaliniu priedu nr. 3 ir 4)

Bandymo nr.	Laikas, min	Bandino masė		Įsiskverbimas, mm	
		Bandinys nr.3	Bandinys nr.4	Bandinys nr.3	Bandinys nr.4
0	0	1043,4	1034,7	0,00	0,00
1	1	1046,0	1037,0	2,61	2,30
2	4	1047,1	1038,3	3,71	3,61
3	9	1047,5	1038,8	4,11	4,11
4	16	1047,6	1039,0	4,21	4,31
5	25	1048,3	1039,3	4,91	4,61
6	36	1048,7	1039,5	5,31	4,81
7	49	1048,7	1039,7	5,31	5,01
8	64	1049,1	1039,8	5,71	5,11
9	81	1049,3	1039,8	5,91	5,11
10	100	1049,5	1040,1	6,11	5,41
11	121	1049,7	1040,2	6,31	5,51
12	144	1050,1	1040,4	6,71	5,71
13	169	1050,1	1040,4	6,71	5,71
14	196	1050,4	1040,3	7,01	5,61
15	225	1050,5	1040,8	7,11	6,11
16	256	1050,4	1040,9	7,01	6,21
17	1448	1054,0	1042,7	10,62	8,02
Kapiliarinis pasiurbimas				0,3774	0,2776
				Vidurkis	0,33

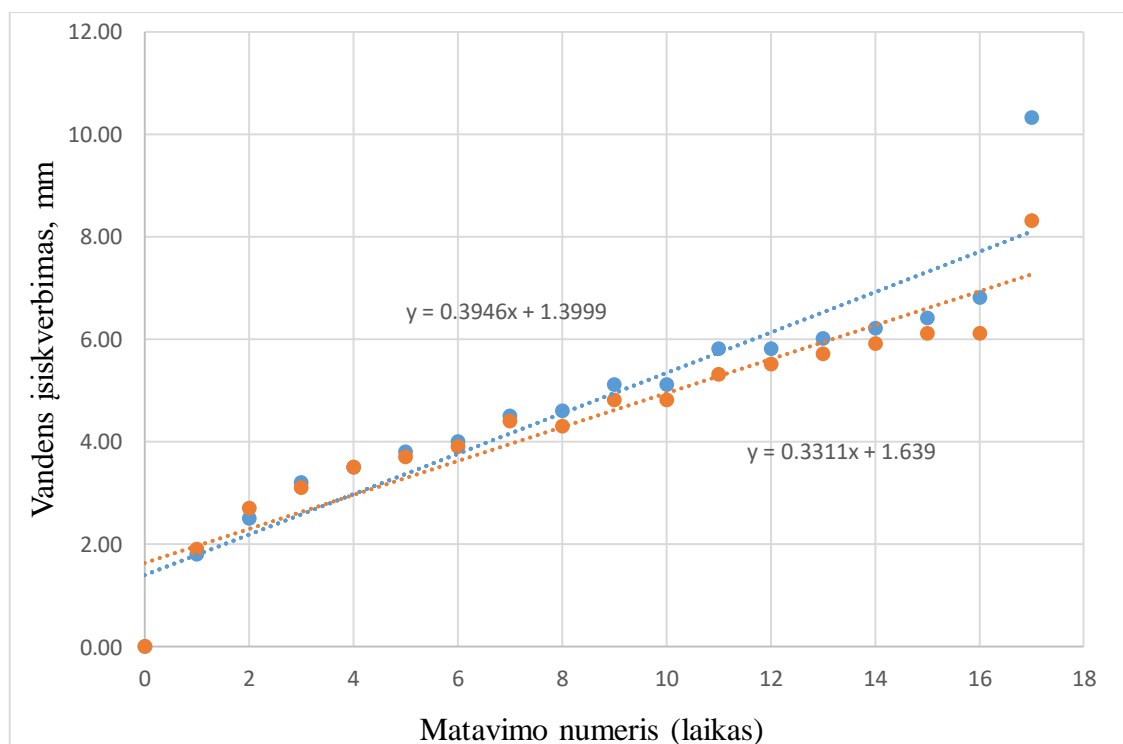


41 pav. Bandinių su kristaliniu priedu nr. 3 ir nr. 4s laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas

Atlikus pakartotinį bandymą po 30 dienų gauti rezultatai:

11 lentelė. B Bandymo rezultatų suvestinė (kontroliniai bandiniai nr. 1 ir 2)

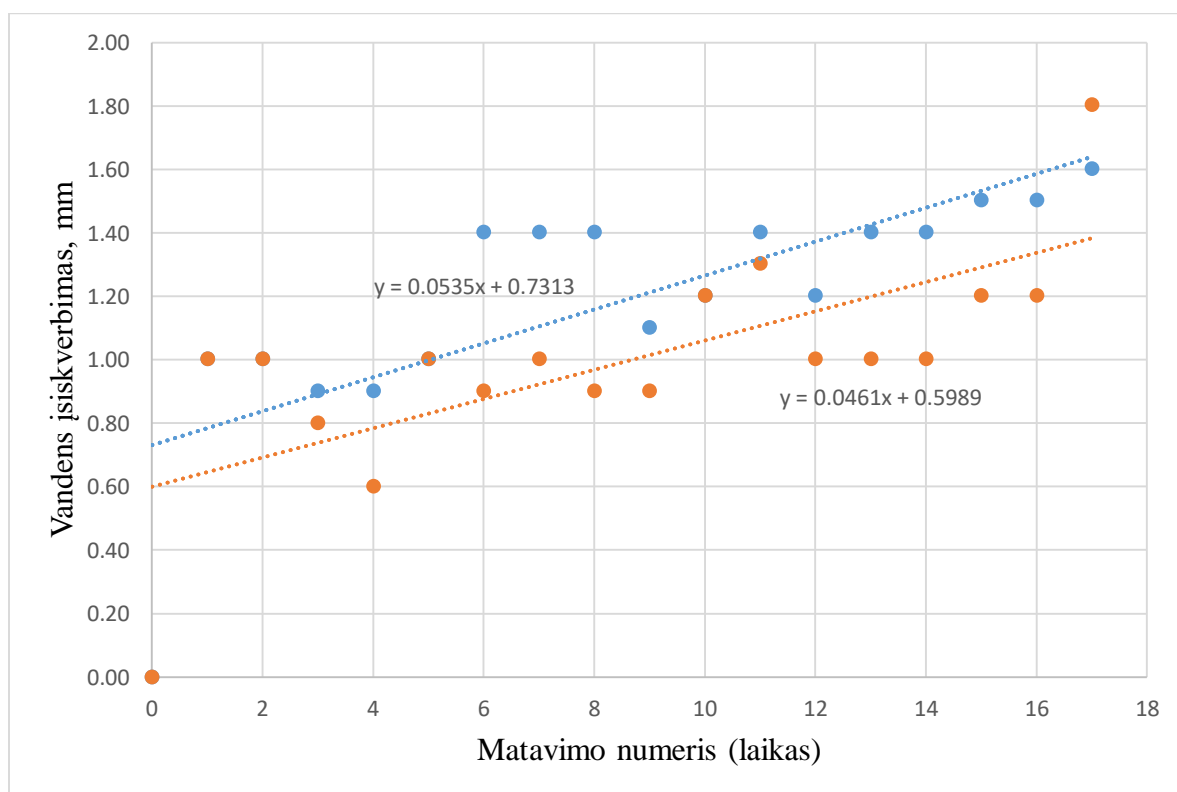
Bandymo nr.	Laikas, min	Bandino masė, g		Įsiskverbimas, mm	
		Bandinys nr.1	Bandinys nr.2	Bandinys nr.1	Bandinys nr.2
0	0	997,4	1007,9	0,00	0,00
1	1	999,2	1009,8	1,80	1,90
2	4	999,9	1010,6	2,51	2,71
3	9	1000,6	1011,0	3,21	3,11
4	16	1000,9	1011,4	3,51	3,51
5	25	1001,2	1011,6	3,81	3,71
6	36	1001,4	1011,8	4,01	3,91
7	49	1001,9	1012,3	4,51	4,41
8	64	1002,0	1012,2	4,61	4,31
9	81	1002,5	1012,7	5,11	4,81
10	100	1002,5	1012,7	5,11	4,81
11	121	1003,2	1013,2	5,81	5,31
12	144	1003,2	1013,4	5,81	5,51
13	169	1003,4	1013,6	6,01	5,71
14	196	1003,6	1013,8	6,21	5,91
15	225	1003,8	1014,0	6,41	6,11
16	256	1004,2	1014,0	6,81	6,11
17	1448	1007,7	1016,2	10,32	8,32
Kapiliarinis pasiurbimas				0,3946	0,3311
Vidurkis					0,36



42 pav. Kontrolinių bandinių nr. 1 ir nr. 2 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas

12 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (kontroliniai bandiniai nr. 3 ir 4)

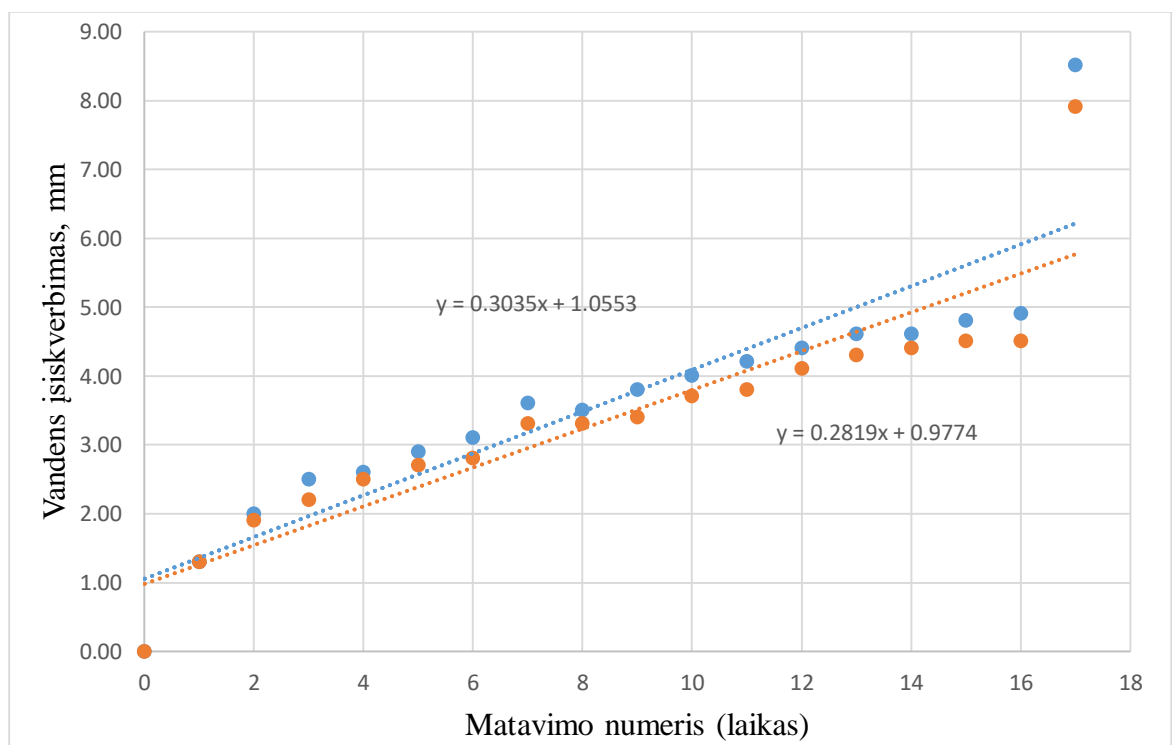
Bandymo nr.	Laikas, min	Bandino masė		Įsiskverbimas, mm	
		Bandinys nr.3	Bandinys nr.4	Bandinys nr.3	Bandinys nr.4
0	0	1007,6	1052,2	0,00	0,00
1	1	1008,6	1053,2	1,00	1,00
2	4	1008,6	1053,2	1,00	1,00
3	9	1008,5	1053,0	0,90	0,80
4	16	1008,5	1052,8	0,90	0,60
5	25	1008,6	1053,2	1,00	1,00
6	36	1009,0	1053,1	1,40	0,90
7	49	1009,0	1053,2	1,40	1,00
8	64	1009,0	1053,1	1,40	0,90
9	81	1008,7	1053,1	1,10	0,90
10	100	1008,8	1053,4	1,20	1,20
11	121	1009,0	1053,5	1,40	1,30
12	144	1008,8	1053,2	1,20	1,00
13	169	1009,0	1053,2	1,40	1,00
14	196	1009,0	1053,2	1,40	1,00
15	225	1009,1	1053,4	1,50	1,20
16	256	1009,1	1053,4	1,50	1,20
17	1448	1009,2	1054,0	1,60	1,80
Kapiliarinis pasiurbimas				0,1469	0,1567
Vidurkis				0,15	



43 pav. Kontrolinių bandinių nr. 3 ir nr. 4 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas

13 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (bandiniai su kristaliniu priedu nr. 1 ir 2)

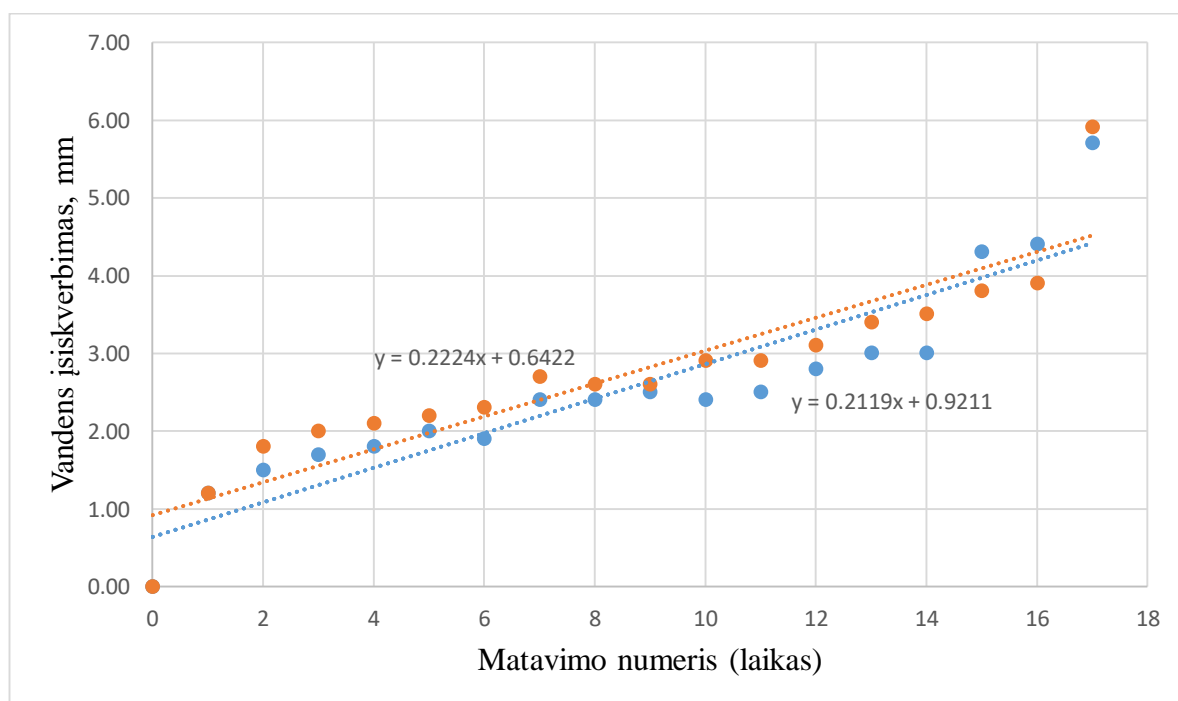
Bandymo nr.	Laikas, min	Bandino masė, g		Įsiskverbimas, mm	
		Bandinys nr.1	Bandinys nr.2	Bandinys nr.1	Bandinys nr.2
0	0	1080,0	988,7	0,00	0,00
1	1	1081,3	990,0	1,30	1,30
2	4	1082,0	990,6	2,00	1,90
3	9	1082,5	990,9	2,51	2,20
4	16	1082,6	991,2	2,61	2,51
5	25	1082,9	991,4	2,91	2,71
6	36	1083,1	991,5	3,11	2,81
7	49	1083,6	992,0	3,61	3,31
8	64	1083,5	992,0	3,51	3,31
9	81	1083,8	992,1	3,81	3,41
10	100	1084,0	992,4	4,01	3,71
11	121	1084,2	992,5	4,21	3,81
12	144	1084,4	992,8	4,41	4,11
13	169	1084,6	993,0	4,61	4,31
14	196	1084,6	993,1	4,61	4,41
15	225	1084,8	993,2	4,81	4,51
16	256	1084,9	993,2	4,91	4,51
17	1448	1088,5	996,6	8,52	7,92
Kapiliarinis pasiurbimas				0,3035	0,2819
Vidurkis				0,29	



44 pav. Bandinių su kristaliniu priedu nr. 1 ir nr. 2 laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas

14 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė (bandiniai su kristaliniu priedu nr. 3 ir 4)

Bandymo nr.	Laikas, min	Bandino masė		Įsiskverbimas, mm	
		Bandinys nr.3	Bandinys nr.4	Bandinys nr.3	Bandinys nr.4
0	0	1045,9	1036,8	0,00	0,00
1	1	1047,1	1038,0	1,20	1,20
2	4	1047,4	1038,6	1,50	1,80
3	9	1047,6	1038,8	1,70	2,00
4	16	1047,7	1038,9	1,80	2,10
5	25	1047,9	1039,0	2,00	2,20
6	36	1047,8	1039,1	1,90	2,30
7	49	1048,3	1039,5	2,40	2,71
8	64	1048,3	1039,4	2,40	2,61
9	81	1048,4	1039,4	2,51	2,61
10	100	1048,3	1039,7	2,40	2,91
11	121	1048,4	1039,7	2,51	2,91
12	144	1048,7	1039,9	2,81	3,11
13	169	1048,9	1040,2	3,01	3,41
14	196	1048,9	1040,3	3,01	3,51
15	225	1050,2	1040,6	4,31	3,81
16	256	1050,3	1040,7	4,41	3,91
17	1448	1051,6	1042,7	5,71	5,91
		Kapiliarinis pasiurbimas		0,2224	0,2119
				Vidurkis	0,22



45 pav. Bandinių su kristaliniu priedu nr. 3 ir nr. 4s laiko ir vandens įsiskverbimo priklausomybės grafikas

Į langelį „Kapiliarinis pasiurbimas“ įrašoma iš grafiko gautos formulės išraiška $y=ax+b$ reikšmė „a“.

3.6. Vandens pralaidumo bandymas

Bandinių plyšių pločio vidurkis pateiktas 12 lentelėje.

15 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė

Bandinio nr.	1	2	3	4	5	6	Vidurkis, mm
P-1	0,3	0,25	0,2	0,25	0,35	0,2	0,26
P-2	0,3	0,2	0,3	0,15	0,1	0,1	0,19
P-3	0,2	0,25	0,2	0,1	0,15	0,2	0,18
P-4	0,15	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,13
Ref-1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,25	0,2	0,23
Ref-2	0,1	0,15	0,2	0,3	0,1	0,15	0,17
Ref-3	0,1	0,4	0,25	0,15	0,1	0,2	0,20
Ref-4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,15	0,1	0,21

Bandymo rezultatai pateikti 13 ir 14 lentelėse.

16 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė

Bandinys	Bandinio numeris	Vidinis vamzdžio skersmuo (mm)	deltaH (mm)	deltaT (min)	deltaW (l)	WF (l/min)
Kontrolinis	1	103,6	87,9	30	0,74	0,02
Kontrolinis	2	103,6	25,0	30	0,21	0,01
Kontrolinis	3	103,6	99,7	30	0,84	0,03
Kontrolinis	4	103,6	78,1	30	0,66	0,02
Su priedu	1	103,6	122,5	30	1,03	0,03
Su priedu	2	103,6	100,6	30	0,85	0,03
Su priedu	3	103,6	108,6	30	0,92	0,03
Su priedu	4	103,6	75,7	30	0,64	0,02

17 lentelė. Bandymo po 30 dienų rezultatų suvestinė

Bandinys	Bandinio nr.	Vidinis vamzdžio skersmuo (mm)	delta H (mm)	delta T (min)	delta W (l)	WF (l/min)	Atsinaujinimo efektyvumas
Kontrolinis	1	103,6	84,3	30	0,71	0,02	4,18%
Kontrolinis	2	103,6	21,4	30	0,18	0,01	14,45%
Kontrolinis	3	103,6	93,5	30	0,79	0,03	6,22%
Kontrolinis	4	103,6	64,3	30	0,54	0,02	17,65%
Su priedu	1	103,6	81,7	30	0,69	0,02	33,33%
Su priedu	2	103,6	48,2	30	0,41	0,01	52,12%
Su priedu	3	103,6	72,3	30	0,61	0,02	55,44%
Su priedu	4	103,6	20,9	30	0,18	0,01	72,41%

Išvados

- Tiriant vandeniui nelaidaus betono ilgaamžiškumą pastebėta, kad naudojant kristalinį priedą be orą itraukiančio priedo, jis mažina betono ilgaamžiškumą, kadangi naujai susidarę dariniai sumažina porų tūrį ir besiplečiantis užšalęs vanduo sukelia didesnius vidinius įtempius lyginant su betonu be kristalinio priedo. Siekiant pagaminti ilgaamžišką vandeniui nelaidų betoną su kristaliniu priedu, būtina naudoti orą įtraukiantį priedą.
- Atliekant bandymus pastebėta, kad esant 30 dienų betono kontaktui su vandeniu, vandens pralaidumas per plyšius betone su kristaliniu priedu sumažėjo vidutiniškai 53 proc., o bandiniuose be kristalinio priedo – vidutiniškai 11 proc. Betone be kristalinio priedo vykstantis plyšio užsivėrimas prisikiriamas autogeniniam savaiminiam atsinaujinimo tipui.
- Gauti rezultatai parodė, kad esant 30 dienų betono kontaktui su vandeniu, betono vandens įgeriamumas betone su kristaliniu priedu sumažėjo vidutiniškai 25 proc, o bandiniuose be kristalinio priedo – vidutiniškai 19 proc.
- Mažėjant vandens laidumui per plyšį bei vandens įgeriamumui, didėja vandeniui nelaidaus betono ilgaamžiškumas. Taip pat pastebėta, kad plyšio užsisandarinimo efektyvumas priklauso nuo plyšio pločio – didėjant plyšiui, mažėja atsinaujinimo efektyvumas.

Literatūros sąrašas

1. Sidiq A., Gravina R. ir Giustozzi F. Is concrete healing really efficient? A review. *Construction and Building Materials*. Australija: RMIT University, 2019, 205, 257-273. Prieiga: per Science Direct.
2. Roig-Flores M., Pirritano F., Serna P ir Ferrara L. 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*. Spain: Institute of Concrete Science and Technology, 2016, 114, 447-457. Prieiga: per Science Direct.
3. Muhammad N.Z., Keyvanfar A., Majid M.Z. Abd., Shafaghat A. ir Mirza J. Waterproof performance of concrete: A critical review of implemented approaches. *Construction and Building Materials*. Malaizija: UTM Construction Research Centre, 2015, 101, 80-90. Prieiga: per Science Direct.
4. Coppola L., Coffetti D. ir Crotti E. Innovative carboxylic acid waterproofing admixture for self-sealing watertight concretes. *Construction and Building Materials*. Italija: Department of Engineering and Applied Sciences, 2018, 817-824. Prieiga: per Science Direct.
5. Park B., Choi Y.C. Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs). *Construction and Building Materials*. Šiaurės Korėja: High-Tech Construction Materials Center, Department of Civil and Environmental Engineering, 2018, 1054-1066. Prieiga: per Science Direct.
6. Reddy T.C.S., Ravitheja A. Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments. *Ain Shams Engineering Journal*. Indija: GPR Engineering College, 2019, Journal 10, 23-32. Prieiga: per Science Direct.
7. Wang X.F., Yang Z.H., Fang C., Wang W., Liu J. ir Xing F. Effect of carbonate-containing self-healing system on properties of a cementitious composite: Fresh, mechanical, and durability properties. *Construction and Building Materials*. Kinija: College of Civil and Transportation Engineering, 2020, 235. Prieiga: per Science Direct.
8. Sprinkel M. M. (2006). Control of cracking in concrete. Transportation research circular. Nr. E-C107. Washington
9. Skripkiūnas, Gintautas. Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės [interaktyvus]. Kaunas: Technologija, 2012. ISBN 9789955686507. Prieiga per:
<https://www.ebooks.ktu.lt/eb/359/statybiniu-konglomeratu-struktura-ir-savybes/>

Priedai

18 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė

Bandinio nr.	a ₁ , mm	a _{1, vid} , mm	a ₂ , mm	a _{2, vid} , mm	A _{vid} , mm ²	Jėga, kN	Stipris gniuždant, MPa
3.4	100,5	100,5	101,0	101,0	10150,5	165,6	16,3
	100,5		101,0				
	100,6		100,9				
3.5	101,3	101,3	98,2	98,3	9957,8	158,8	15,9
	101,1		98,3				
	101,5		98,3				
4.4	96,7	96,7	101,6	101,5	9815,1	154,3	15,7
	96,8		101,4				
	96,6		101,5				
4.5	95,7	95,7	100,4	100,4	9608,3	152,6	15,8