



UŽSAKOVAS: AB „AKMENĖS CEMENTAS“
Sutartis Nr. SV9-409, 2024-11-05

VYKDYTOJAS: KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ IR KONSTRUKCIJŲ TYRIMŲ
CENTRAS

UŽSAKYMAS (Užsakymo data: 2022-06-14)

OBJEKTAS: ŠARMINEI BETONO KOROZIJAI ATSPARAUS BETONO
MIŠINIŲ SUKŪRIMAS PANAUDOJANT OPOKA IR
KLINTIMIS MODIFIKUOTĄ CEMENTĄ

DALIS: MTEP darbai (galutinė ataskaita)

**TYRIMŲ ATASKAITĄ
TVIRTINA**

SMKTC direktorius

dr. Algirdas Augonis

VYKDYTOJAI

SMKTC technikos vadovas
(sutarties vadovas)

dr. Ernestas Ivanauskas

SMKTC Inžinierius

dr. Audrius Grinys

SMKTC laborantas

Ignas Šiškauskas

TURINYS

Ivadas.....	3
1. Užsakovo pateiktos betono mišinio sudėtys ir reikalavimai.....	5
2. Šviežio betono mišinio ruošimo laboratorijoje metodika.....	5
3. Šviežio betono mišinio rezultatai.....	5
4. Sukietėjusio betono tyrimai.....	5
4.1. Gniuždymo stiprio rezultatai.....	8
4.2. Santykinės susitraukimo deformacijos.....	9
4.3. Atsparumo šarminiai korozijai tyrimai.....	11
4.4. Betono ilgaamžiškumo tyrimai. Atsparumo šalčio ciklams tyrimai.....	19
4.5. Betono vandens įsiskverbimo gylį veikiant slėgiui LST EN 12390-8.....	24
4.6. Betono chloridų migracijos koeficiento nustatymas.....	25
5. Šviežio betono mišinio ankstyvojo susitraukimo bandymo rezultatai.....	28
Išvados ir rekomendacijos.....	30

|

IVADAS

Ši ataskaita pateikiama remiantis AB „Akmenės cementas“ 2022-06-14 sudaryta sutartimi. Šio darbo apimties ribose buvo užsibrėžti atlikti šie uždaviniai:

1. Sukurti šarminei betonui korozijai atsparaus betono mišinių sudėtis bei įvertinti jų struktūros formavimosi ir svarbiausius fizikinių-mechaninių bei technologinių savybių dėsningumus panaudojant įvairias kristalizacines ir chemines įmaišas.
2. Nustatyti pasirinktą opoką ir klintimis modifikuotų cementų įtaką rišimosi ir kietėjimo trukmei, susitraukimo deformacijoms, efektyviam poringumui ir tankiui vertinant efektyvius difuzijos pokyčius.
3. Atlikti sukurtos šarminei betonui korozijai atsparaus modifikuoto betono fizikinių-mechaninių (gniuždymo stipris, stipris lenkiant) ir ilgaamžiškumo savybių (vandens įsiskverbimas, atsparumas šalčiui, karbonizacija) prognozavimą.
4. Atlikti gautų rezultatų analizę ir parengti sukurtų betono sudėčių su skirtingais cementais panaudojimo rekomendacijas.

1. Užsakovo pateiktos betono mišinio sudėtys ir reikalavimai

Užsakovo buvo suformuluota užduotis nustatyti savo naujai pradėto gaminti cemento CEM II/ A-P 52.5 N efektyvumą vietiniuose betonuose, lyginant jį su CEM I 42.5 R (kontrolinis cementas), nustatant žemiau pateiktas savybes ir pateikiant rezultatus, vertinant pagal eksploatuojamo betono aplinkos sąlygų klasifikavimą (STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“) suformuojant dvi identiškias betono mišinio sudėtis, tik su skirtingais cementais:

Normalus betonas C35/45-XC4-XS3-XD3-XF4 -F300(LT)-XA3-W12(LT)-C10,20-D_{max}16-S3

Kontrolinis cementas CEM I 42,5 R

Cementas CEM I 42,5	– 420 kg/m ³
Vandens ir cemento santykis (V/C)	– < 0,43
Smulkus užpildas – užsakovo pristatytas smėlis 0/4 mm,	~ 45 % 810 kg/m ³
Stambus užpildas - užsakovo pristatyta žvirgždo skalda 4/16 mm,	~ 55 % 990 kg/m ³
Užsakovo pristatyta Plastifikuojanti įmaiša (LST EN 934-2 T2; T3.1-T3.2) ~ 0,5% 2,10 kg/m ³ (atsižvelgiant į slankumo ribas)	
Užsakovo pristatyta Orą įtraukianti įmaiša (934-2 T5 (atsižvelgiant į oro kiekį mišinyje)	~ 0,15% 0,63 kg/m ³

Normalus betonas C35/45-XC4-XS3-XD3-XF4 -F300(LT)-XA3-W12(LT)-C10,2-D_{max}16-S3

Naujas A tipo portlandcementis su opoka CEM II/ A-P 52,5 N

Cementas CEM II/ A-P 52,5 N	– 420 kg/m ³
Vandens ir cemento santykis (V/C)	– < 0,43
Smulkus užpildas – užsakovo pristatytas smėlis 0/4 mm,	~ 45 % 810 kg/m ³
Stambus užpildas - užsakovo pristatyta žvirgždo skalda 4/16 mm,	~ 55 % 990 kg/m ³
Užsakovo pristatyta Plastifikuojanti įmaiša (LST EN 934-2 T2; T3.1-T3.2) ~ 0,5% 2,10 kg/m ³ (atsižvelgiant į slankumo ribas)	
Užsakovo pristatyta Orą įtraukianti įmaiša (934-2 T5 (atsižvelgiant į oro kiekį mišinyje)	~ 0,15% 0,63 kg/m ³

Užduotis papildyta nauju receptu:

Normalus betonas C35/45-XC4-XS3-XD3-XF4-F300(LT)-XA3-W12(LT)-C10,20-D_{max}16-S3

Naujas B tipo portlandcementis su opoka CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N

Cementas CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N	– 420 kg/m ³
Vandens ir cemento santykis (V/C)	– < 0,43
Smulkus užpildas – užsakovo pristatytas smėlis 0/4 mm,	~ 45 % 810 kg/m ³
Stambus užpildas - užsakovo pristatyta žvirgždo skalda 4/16 mm,	~ 55 % 990 kg/m ³
Speciali plastifikuojanti įmaiša (LST EN 934-2 T2; T3.1-T3.2) (atsižvelgiant į slankumo ribas)	~ 1,0% 4,20 kg/m ³
Orą įtraukianti įmaiša (934-2 T5 (atsižvelgiant į oro kiekį mišinyje)	~ 0,15% 0,63 kg/m ³

NUSTATYTI:

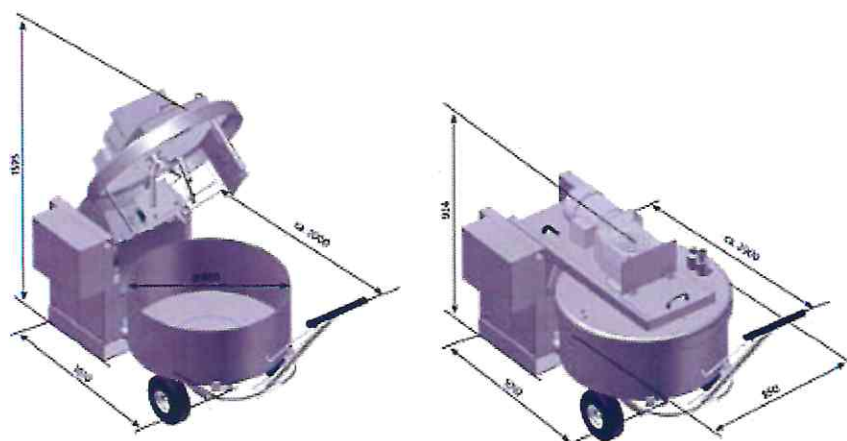
1. Betono mišinio slankumą pagal LST EN 12350-2.
2. Betono mišinio oro kiekį pagal LST EN 12350-7.
3. Betono mišinio tankį pagal LST EN 12350-6.
4. Betono gniuždymo stiprį ir tankį po 1, 3, 7, 28, 56, 90 parų kietėjimo pagal LST EN 12390-3 ir LST EN 12390-2, LST EN 12390-7.
5. Betono susitraukimo deformacijas pagal LST EN 12390-16 (C35/45).
6. Atlikti betono šarminės korozijos tyrimus pagal RILEM AAR-4.1 pagrindu sukurtą BŠK-1:2016 metodiką.
7. Betono vandens įsiskverbimo gylį veikiant slėgiui pagal LST EN 12390-8.
8. Betono lenkimo stiprį pagal LST EN 12390-5.
8. Betono atsparumą šalčiui pagal LST 1428-17 (tūrinis metodas cikliško šaldymo ir atšildymo masės ir gniuždymo stiprio pokyčio nustatymo metodu mirkymo terpė 3 % NaCl).
9. Betono atskilinėjimą esant šalčio poveikiui pagal SS 137244 (gamybos būdas II ir bandymo metodas A, t.y. 3 % NaCl).
10. Betono chloridų migracijos koeficiento nustatymas pagal LST EN 12390-18 ir NT BUILD 492 metodiką.

2. Šviežio betono mišinio ruošimo laboratorijoje metodika.

KTU SMKTC laboratorijoje betono mišinys buvo ruošiamas naudojant sausus užpildus bei mišinį maišant laboratorinėje maišyklėje Zyklos Rotating Pan Mixer ZZ 75 HE pagal komponentų supylimo seką aprašytą RILEM Recommended Test Method: AAR-4.1 metodikoje. Betono mišinio užmaišymo seka pateikta 3 lentelėje.

3 lentelė. Betono mišinio maišymo veiksmų seka.

Sudėtų medžiagų į maišyklę eiliškumas	Sudėtos medžiagos (sekundėmis nuo maišymo pradžios)	Suminis maišymo laikas (s)
Smulkūs + Stambūs užpildai	0	60
½ Vandens	60	120
Prastova	120	180
Cementas + ½ Vandens + įmaišos	180	300



1 pav. Tyrimuose naudotos betono maišyklės ZYKLOS ZZ 75 HE schematinis vaizdas

3. Šviežio betono mišinio rezultatai

Buvo atlikti šviežio betono mišinio bandymai, nustatytas mišinio tankis, slankumas, oro kiekis, temperatūra. Bandymai atlikti pagal galiojančius standartus: LST EN 12350-6, LST EN 12350-2, LST EN 12350-7, LST EN 12350-1. Rezultatai pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė. Betono mišinio tankio, slankumo, oro kiekio ir temperatūros, rezultatai:

Žymėjimas	Matavimas po sumaišymo	Tankis, kg/m ³	Slankumas, mm	Oro kiekis, %	Temperatūra, °C
Kontrolinis (CEM I) su užsakovo pateiktu betono superplastikliu 0,5 % n.c.m.	5min	2314	120	4,9	18,0
	60min	2384	70	3,5	18,3
Opoka (CEM II A) su užsakovo pateiktu betono superplastikliu 0,5 % n.c.m.	5min	2340	60	4,0	18,3
	60min	2360	0*	3,8	18,4
Opoka (CEM II A) su specialiu betono superplastikliu 0,75 % n.c.m.	5min	2354	150	4,2	18,5
	60min	2367	140	4,1	18,8
Opoka (CEM II B) su specialiu betono superplastikliu 1,0 % n.c.m.	5min	2315	170	4,9	19,1
	60min	2360	130	3,9	19,7

Pastaba: * - matuota po 10 min po betono mišinio sumaišymo.

Tiriamų sudėčių betono mišinio tankis tenkina normalaus betono kategoriją, t.y. betono, tankis yra ribose nuo 2 000 kg/m³ iki 2 600 kg/m³. Visų tiriamų sudėčių mišinio oro kiekis atitiko XF4 betonui keliamus reikalavimus (4 % -0,5%; +5 %). Pažymėtina, kad kontroliniam bandiniui po sumaišymo atliktus betono mišinio oro kiekio matavimą bei palyginus su matavimais, atliktais praėjus 1h po sumaišymo, oro kiekis betono mišinyje sumažėjo nuo 4,9 % iki 3,5 %. Tai rodo, kad naudojant tokio tipo cemento ir to tipo įmaišas, oro kiekis šviežiame betono mišinyje laikui bėgant linkęs pasišalinti. Šiuos rezultatus patvirtina ir gauti kontrolinio mišinio padidėjusio tankio rezultatai 2314 kg/m³ ir 2384 kg/m³ atitinkamai matuojant po 5 min ir po 60 min po sumaišymo. Sudėtyje naudojant CEM II A tipo portlandcementį, oro kiekio bei tankio pokyčiai gauti nežymūs. Tuo tarpu betono mišiniuose naudojant CEM II B tipo portlandcementį, analogiškai kaip ir su kontroliniu mišiniu, oro kiekis betono mišinyje laikui bėgant mažėja, kas tikėtina neigiamai įtakoja sukietėjusio betono atsparumą šalčiui. Mažėjantį oro kiekio rezultata patvirtina ir gauti didėjantys šviežio betono mišinio tankio rezultatai. Visų tiriamų betono mišinių temperatūra gauta apie +20 ±2 °C, todėl betono mišinius gaminant betono mazguose reikėtų įvertinti faktinės temperatūros poveikį šviežio bei sukietėjusio mišinio savybėms bei atitinkamai koreguoti sudėtis, įvedant rišimąsi lėtinančias ar kietėjimą greitinančias įmaišas. Betono mišinių slankumo matavimai pateikti 4-6 pav.:



4 pav. Kontrolinis
 su užsakovo superplastikliu 0,5% n.c.m.



5 pav. Opoka (CEM II A)
 su užsakovo superplastikliu 0,5% n.c.m.



6 pav. Opoka (CEM II A)
 su specialiu superplastikliu 0,75 % n.c.m.



7 pav. Opoka (CEM II B)
 su specialiu superplastikliu 1,0 % n.c.m.

Atlikus mišinio slankumo matavimus (4-7 pav.) gauta, kad kontrolinis mišinys atitiktų reikalaujamą slankumo klasę – S3 (vertės nuo 100 iki 150 mm) su 120mm kūgio nuoslūgiu. Atlikus kontrolinio mišinio konsistencijos matavimus po 60min, slankumas sumažėjo iki 70 mm, tai yra per 1 klasę iki S2 (nuo 50 iki 90mm) verčių. Betonų mišinyje naudojant opokinį portlandcementį CEM II/ A-P 52,5 N tipo bei šį mišinį lyginant su kontroliniu mišiniu, kuriame buvo naudojamas CEM I 42,5 R cementas, gaunami žymūs bei neigiami betono mišinio apdirbamumo pokyčiai. Nustatyta, kad naudojant opokinį

portlandcementį pirminis (matuojant iš karto po sumaišymo) betono mišinio slankumas atitiko S2 slankumo klasę, tai yra buvo gautas 1 klase mažesnis slankumas, lyginant su kontroliniu betono mišiniu, kuriame buvo naudojamas CEM I cementas. Be to, buvo pastebėtas žymiai didesnis ir greitesnis slankumo pokytis laikui bėgant. Buvo nustatyta kad naudojant opokinį portlandcementį betono mišinio slankumas po 10 min jau buvo nematuotinas, nes buvo gautos 0cm slankumo vertės (S1 slankumo vertės nuo 10 iki 40 mm). Tikėtina, kad dėl poringų opokos dalelių, bei didesnio vandens poreikio, standartiniam mišiniui išgauti, naudojant CEM II/ A-P 52.5 N tipo opokinį portlandcementį, būtina parinkti tinkamas įmaišas, kurios kompensuotų apdirbamumo nuostolius. Tai rodo ir papildomai išbandyta trečia sudėtis, kurioje buvo naudojamas CEM II/ A-P 52.5 N tipo opokinis portlandcementis bei modifikuota įmaiša - superplastiklis. Gauta, kad parinkus specialaus tipo superplastiklį bei padidinus superplastiklio dozavimą iki 50 %, gaunami ne tik geresni apdirbamumo rezultatai (slankumas 150 mm), lyginant su kontroliniu mišiniu (slankumas 120 mm), bet ir naudojant specialius superplastiklius mišiniuose su CEM II/ A-P 52.5 N cementu, konsistencija beveik nepakito po 60min. (slankumas 140 mm). Tolimesniuose sukietėjusio betono tyrimuose sudėtis „Opoka specialus superplastiklis (CEM II A)“ nebuvo naudojama. Užsakovui papildžius užduotį bei papildomai gavus naujo tipo cementą CEM II/B, su šiuo portlandemenčiu tyrimai buvo atliekami su specialiu superplastikliu, kadangi viena iš sudedamųjų B tipo portlandemenčio dalių taip pat yra naudojamas natūralus pucolanas – opoka. Atlikus konsistencijos bandymus su CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N tipo portlandemenčiu bei specialiu superplastikliu gauta, kad norint išgauti tinkamą betono mišinio konsistenciją bei konsistencijos išlaikymą, reikia naudoti ne tik su tuo cementu atidirbtus superplastiklius, tačiau jų dozavimo norma turi būti didesnė (bandymų atveju lyginant su kontroliniu mišiniu, specialaus superplastiklio dozavimo normą reikėjo padidinti 2 kartais). Tokiu principu sukomplektavus betono mišinio sudėtis, naudojant CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N tipo portlandcementį, betono mišinio apdirbamumą pavyko išlaikyti 1 valandą užsiduoto S3 slankumo klasės ribose (vertės nuo 100 iki 150 mm).

4. Sukietėjusio betono tyrimai

4.1 Gniuždymo stiprio rezultatai

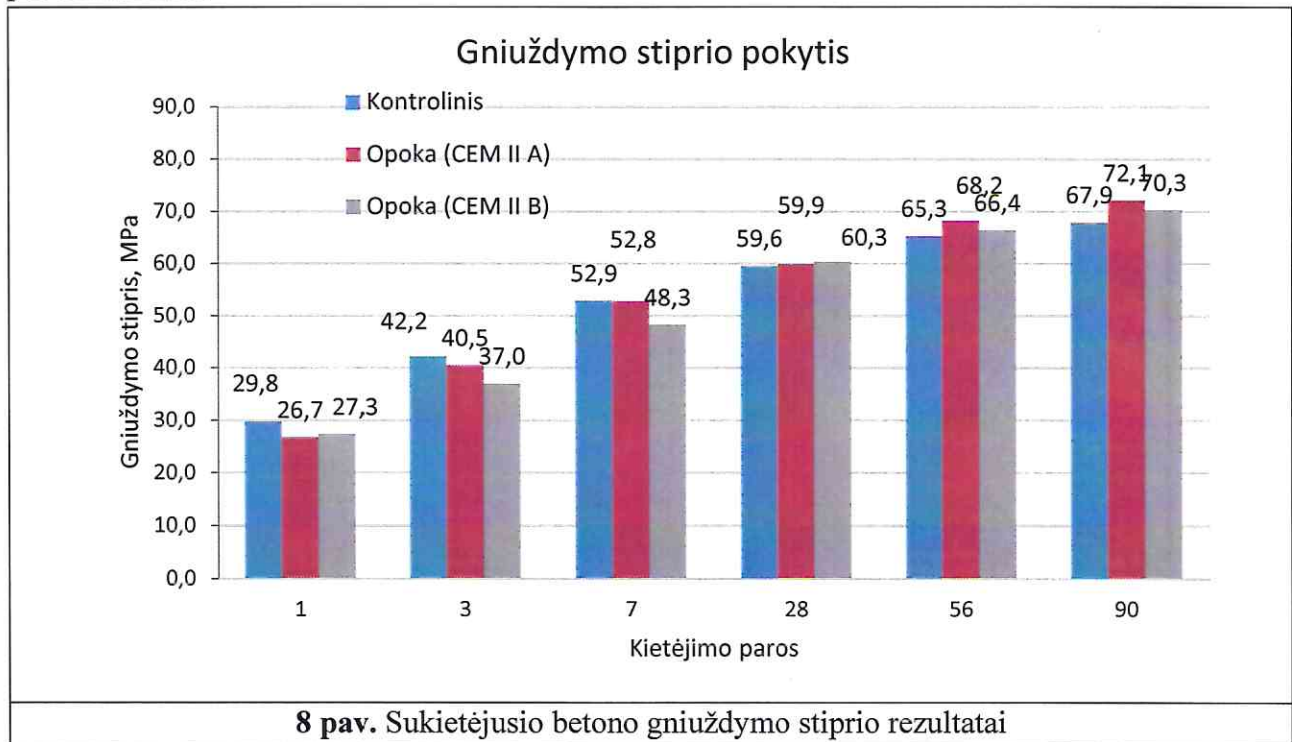
Sukietėjusio betono gautas vidutinis tankis po 28 parų kietėjimo yra – kontrolinio betono 2349 kg/m³, naudojant opokinį portlandcementį – 2350 kg/m³, tenkina normalųjį betono tankį (tankis yra ribose nuo 2 000 kg/m³ iki 2 600 kg/m³). Gauti gniuždymo stiprio rezultatai nustatyti pagal LST EN 12390-3 standartą pateikti 5 lentelėje bei 7 pav.

5 lentelė. Sukietėjusio betono gniuždymo stiprio rezultatai:

Žymėjimas	po 1 paros		po 3 parų		po 7 parų		po 28 parų		po 56 parų		po 90 parų	
	MPa	%, nuo 28 p stiprio	MPa	%, nuo 28 p stiprio	MPa	%, nuo 28 p stiprio	MPa	%, nuo 28 p stiprio	MPa	%, nuo 28 p stiprio	MPa	%, nuo 28 p stiprio
Kontrolinis	29,8	50	42,2	71	52,9	89	59,6	-	65,3	110	67,9	114

Opoka (CEM II/ A-P 52.5 N)	26,7	45	40,5	68	52,8	88	59,9	-	68,2	114	72,1	120
Sudėtinis portlance- mentis CEM II/ B- M (P-LL) 42,5 N	27,3	45	37,0	62	48,3	81	60,3	-	66,4	110	70,3	117

Remiantis nustatytais charakteristinio gniuždymo stiprio rezultatais gautais po 28 parų kietėjimo standartinėse sąlygose, abiejų sudėčių stipris gniuždam atitinka nurodytą C35/45 klasę, nes stipris gniuždam tenkina reikalavimus po 28 parų kietėjimo standartinės sąlygose pradinei gamybai reikalingą $f_{cm} \geq (f_{ck} + 4) \text{ N/mm}^2$ sąlygą. Išanalizavus ankstyvojo stiprio gniuždam pokyčio rezultatus, pastebėta, kad betonuose naudojant opokinių portlandementį gaunami apie 10 % mažesni ankstyvojo stiprio rezultatai (po 1 paros kietėjimo), nei betone, kuriame buvo naudojamas CEM I cementas. Tolimesni tyrimo rezultatai parodė, kad laikui bėgant betono, kuriame buvo naudojamas opokinis portlandementis, stiprumas gniuždam didėjo labiau nei kontrolinio betono stipris gniuždam, ir po 28 parų kietėjimo standartinėse sąlygose abiejų sudėčių stiprumas buvo vienodas. Taip pat nustatyta, kad naudojant opokinių portlandementį, betono stiprumas gniuždam didėjo labiau nei kontrolinio betono stipris gniuždam ir vėlyvesnėse stadijose (po 56 ar 90 parų kietėjimo), dėl tikėtina pasireiškusio opokos pucolaniškumo.



4.2. Santykinės susitraukimo deformacijos

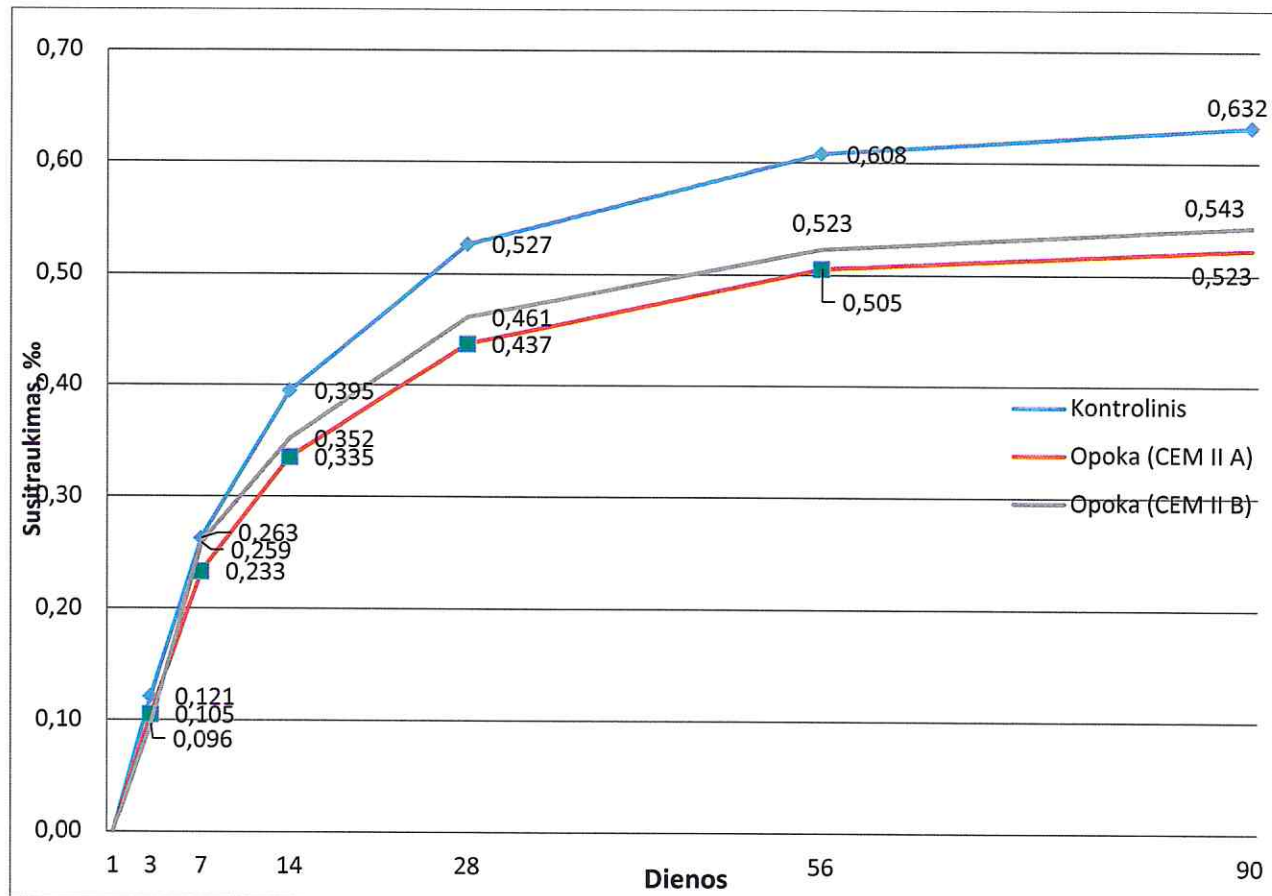
Betono santykinės susitraukimo deformacijos buvo nustatytos pagal LST EN 12390-16 standartą, t.y. pirminis matavimas buvo atliekamas po 1 paros po suformavimo ir po to bandinius laikant $20 \pm 2^\circ\text{C}$, RH 40÷60 % buvo nustatytos vidutinės matavimų vertės po 1, 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 parų džiovimo, rezultatus

išreiškiant dimensiniu dydžiu – promilėmis [‰]. Masės pokyčio rezultatai išreikšti procentais [%] pateikti 6 lentelėje, o bandinių susitraukimo džiūstant rezultatai pateikti 9 paveiksle.

6 lentelė. Bandinių masės pokyčio duomenys

Bandomasis objektas	Vid. Bandinių masė išformavus, g.	Vid. Bandinių masė po 90 parų, g.	Vid. Bandinių masės pokytis, %
Kontrolinis	3259,8	3192,9	-2,05
Opoka (CEM II/ A-P 52.5 N)	3331,9	3265,7	-1,99
Opoka (CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N)	3311,8	3222,4	-2,70

Tyrimai parodė, nežymų masės nuostolių skirtumą lyginant betoninius bandinius, kuriuose buvo naudojamas CEM I cementas su bandiniais, kuriuose buvo naudojamas CEM II/A-P bei CEM II/ B-M tipo cementai. Po 90 parų džiūvimo $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, RH 40÷60 % sąlygose bandiniai vidutiniškai neteko apie 2-2,7% masės, dėl pagrįste tikėtina laisvojo vandens pasišalinimo. Tačiau tyrimai parodė, kad naudojant opokinį portlandcementį, priklausomai jo tipo, vidutinės susitraukimo deformacijos po 90 parų džiūvimo $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, RH 40÷60 % sąlygose buvo 14-17% mažesnės nei vidutinės bandinių deformacijos, kuriuose buvo naudotas CEM I cementas. Tai rodo, kad gamtinis pucolanas teigiamai įtakoja džiūstančio betono traukumą. Pažymėtina, kad remiantis LST EN 12390-16 standartu pirminis/etaloninis matavimas buvo atliekamas po 1 paros po suformavimo, todėl cheminis-autogeninis betono susitraukimas šioms sudėtims (susitraukimo ar plėtros vertės pirmomis valandomis iki 24 valandų) nebuvo vertinamas.



9 pav. Betono susitraukimo priklausomybė nuo betono kietėjimo laiko (vidutinės matavimų vertės $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, RH 40÷60 %, matuota vertikaliai)

4.3. Betono šarminės korozijos tyrimai

Betono šarminės korozijos tyrimai buvo atlikti pagal RILEM AAR-4.1 metodikos pagrindu sukurtą ir pasiūlytą **KTU ŠBK-1/2016 tyrimų metodiką** ŠBK vertinimui su Lietuvos užpildais. Lietuvoje šarminė betono korozija su Lietuvos karjerų užpildais nėra tipinė, t.y. ji nepasižymi didelėmis tūrinėmis betono deformacijomis, tačiau ji gali įvykti betono paviršiuje sukeldama taip vadinamus paviršiaus atšokimus (angl. pop outs) ties reaktingu užpildu. Tai gali įvykti, jei betono sudėtyje yra reaktyvių užpildų, kurių sudėtyje yra amorfinio SiO₂ (opokos ar titnago), ties kuriais betono paviršiuje gali įvykti lokali šarminė betono korozija atskeliant betono paviršiaus dalį. Būtent dėl šių priežasčių KTU SMKTC akreditavo betono šarminės korozijos vertinimui sukurtą metodą (BŠK-1:2016), kuris yra tinkamas Lietuvos sąlygomis su Lietuvos karjerų užpildais pagaminto betono atsparumo šarminės betono korozijos vertinimui, t. y. didesnę dėmesį skiriant betono paviršiaus būklės vertinimui po 20 savaičių bandinių išlaikymo sočiųjų garų aplinkoje pagal Rilem AAR-4.1.

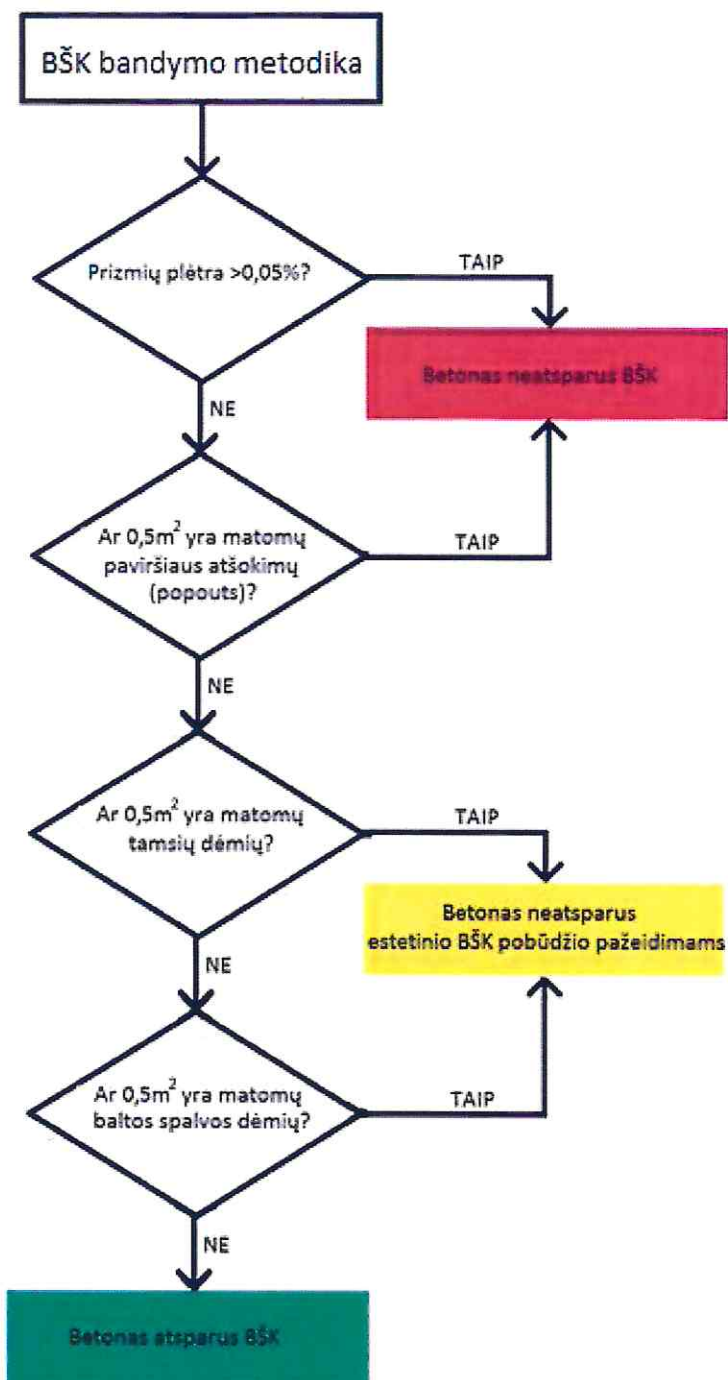
Pagal šią bandymo metodiką siekiant nustatyti ar gamintojo pateikta betono sudėtis yra atspari BŠK, suformuoti betono bandiniai yra laikomi sočiųjų garų aplinkoje apie 60 °C temperatūroje. Po 5, 10, 15 ir 20 savaičių yra matuojami bandinių ilgio pokyčiai ir vizualiai įvertinamas jų paviršius pagal žemiau pateiktus kriterijus.

Rezultatų vertinimas

- 1) Po 20 savaičių išlaikymo izoterminėje kameroje vizualiai apžiūrimos visos šešių/trijų betono bandinių šoninės plokštumos (jos sudaro apytikriai 0,50/0,25 m² plotą). Atskirai užrašomas betono paviršiuje aptiktas tamsių bei baltų dėmių kiekis, lokalių BŠK židinių – *lokalių paviršiaus atšokimų* kiekis ir *makro plyšių* aptikimo atvejai.
- 2) Ribiniai BŠK vertinimo kriterijai po 20 savaičių išlaikymo izoterminėje kameroje:
 - a) *Vidutinė santykinė betono bandinių plėtimosi deformacija* $\leq 0,050\%$ (atskiram bandiniui $\leq 0,060\%$);
 - b) *Lokalūs betono paviršiaus atšokimai* – turi nebūti (0).
 - c) Tamsių dėmių kiekis betono paviršiuje – nėra;
 - d) Baltų dėmių kiekis betono paviršiuje – nėra;
 - e) *Makro plyšiai* – turi nebūti (0).
- 3) Betono sudėtis gali būti pripažinta atspari BŠK ir eksploatuotina Lietuvoje natūraliomis sąlygomis, jei visų šešių/trijų betono bandinių *plėtimosi deformacijos, makro plyšiai, tamsios ar baltos dėmės* ir *lokalūs paviršiaus atšokimai* neviršija 2 punkte nurodytoms vertėms.
Betono sudėtis gali būti pripažinta neatspari BŠK ir neeksploatuotina Lietuvoje natūraliomis sąlygomis, jei visų šešių/trijų betono bandinių *plėtimosi deformacijos, makro plyšiai ir lokalūs paviršiaus atšokimai* viršija 2 punkte nurodytoms vertėms.

Betono sudėtis gali būti pripažinta atspari BŠK, tačiau neatspari estetinio BŠK pobūdžio pažeidimams, jei visų šešių/trijų betono bandinių *plėtimosi deformacijos, makro plyšiai ir lokalūs paviršiaus atšokimai* neviršija 2 punkte nurodytoms vertėms, tačiau jo bandinių paviršiuje yra aptiktos tamsios arba baltos dėmės.

BŠK vertinimo algoritmas parodytas 10 pav.



10 pav. Betono bandinių BŠK vertinimo algoritmas

Kontrolinio betono BŠK bandymo rezultatai:

Pagal pasiūlytą KTU ŠBK-1/2016 tyrimų metodiką atlikome visų metodikoje nurodytų betono bandinių vertinimą. Šiuose tyrimuose buvo naudojamas 3 vnt. bandinių kiekis, kurie sudaro bendrą ~ 0,250m² plotą. Po 5, 10, 15 ir 20 savaičių išlaikymo izoterminėje kameroje vizualiai apžiūrimos visos trijų betono bandinių šoninės plokštumos (jos sudaro apytikriai 0,250 m² plotą). Atskirai užrašomas betono paviršiuje aptiktas tamsių bei baltų dėmių kiekis, lokalių ŠBK židinių – lokalių paviršiaus atšokimų kiekis ir makro plyšių aptikimo atvejai.

Ribiniai ŠBK vertinimo kriterijai po 20 savaičių išlaikymo izoterminėje kameroje:

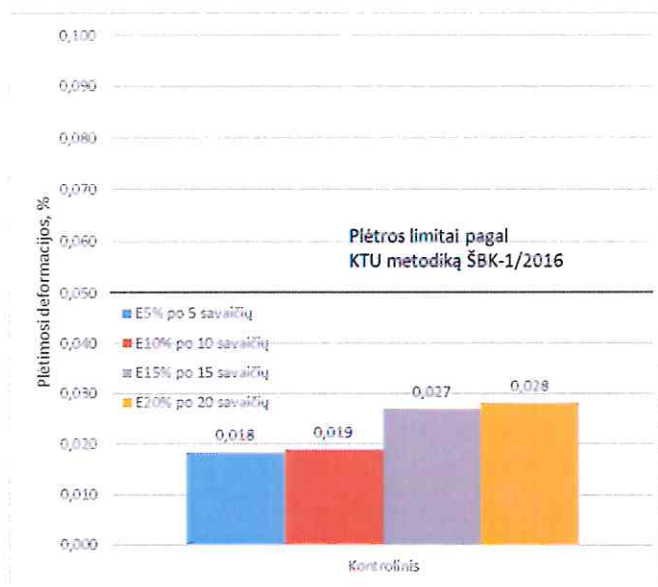
- a) Vidutinė santykinė betono bandinių plėtimosi deformacija $\leq 0,050\%$ (atskiram bandiniui $\leq 0,060\%$);
- b) Lokalūs betono paviršiaus atšokimai – turi nebūti (0).
- c) Tamsių dėmių kiekis betono paviršiuje – nėra;
- d) Baltų dėmių kiekis betono paviršiuje – nėra;
- e) Makro plyšiai – turi nebūti (0).

ŠBK vertinimo pagal siūlomą metodiką pateikti 7 lentelėje bei 10-11 pav.:

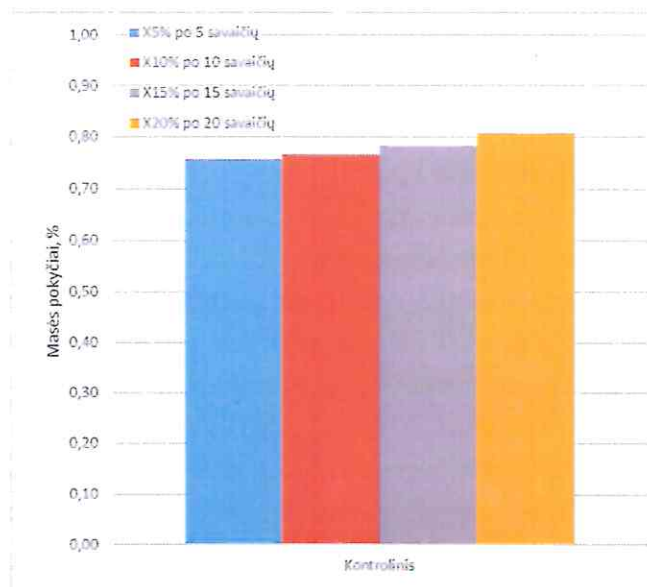
7 lentelė. ŠBK vertinimas pagal siūlomą metodiką.

Betono sudėties pavadinimas	Bandinio Nr.	Santykinė plėtimosi deformacija, E ₂₀ , %	Lokalūs paviršiaus atšokimai, vnt.	Tamsių dėmių kiekis, vnt.	Baltų dėmių kiekis, vnt.*	Makro plyšiai, vnt.	ŠBK vertinimas
Betono sudėtis kontrolinis							
Kontrolinis	(bandiniai K1, K2, K3)	0,025	0	0	5	0	Neįvyko, yra estetinio pobūdžio pažeidimai
		0,030					
		0,029					

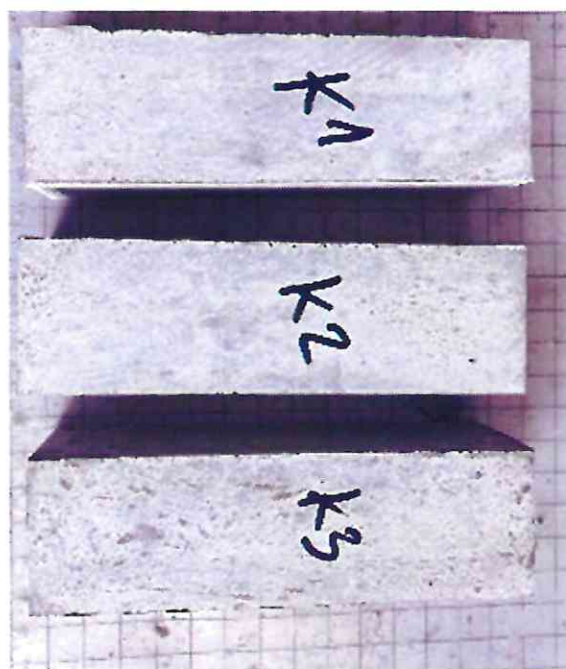
Pastaba: *Baltų dėmių aptikimas rodo, kad betone yra pakankamai daug kalcio hidroksido, todėl tokiais atvejais ŠBK pavojus potencialiai turėtų būti vertinamas kaip didesnis.



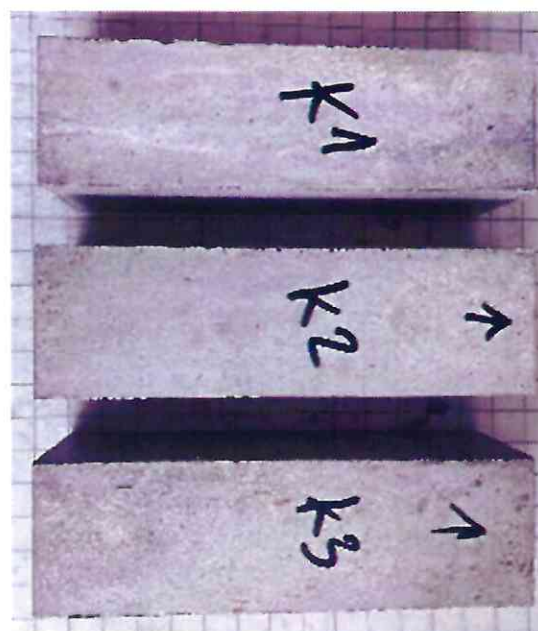
10 pav. Bandinių vidutinės plėtimosi deformacijos



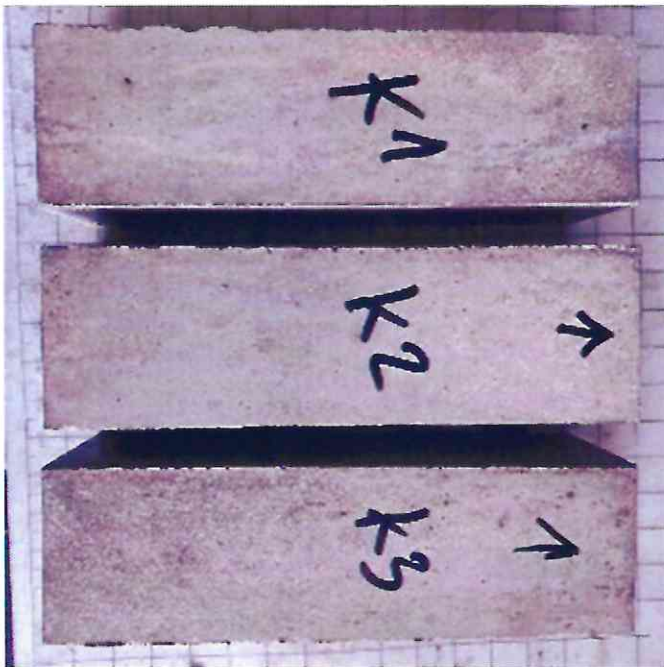
11 pav. Bandinių vidutiniai masės pokyčiai



12 pav. Bandiniai prieš laikymą izoterminėje kameroje



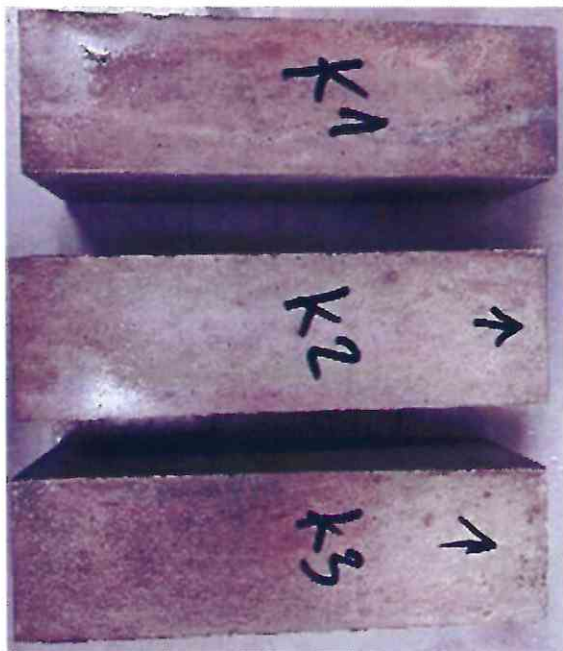
13 pav. Bandiniai po 5 sav. laikymo izoterminėje kameroje



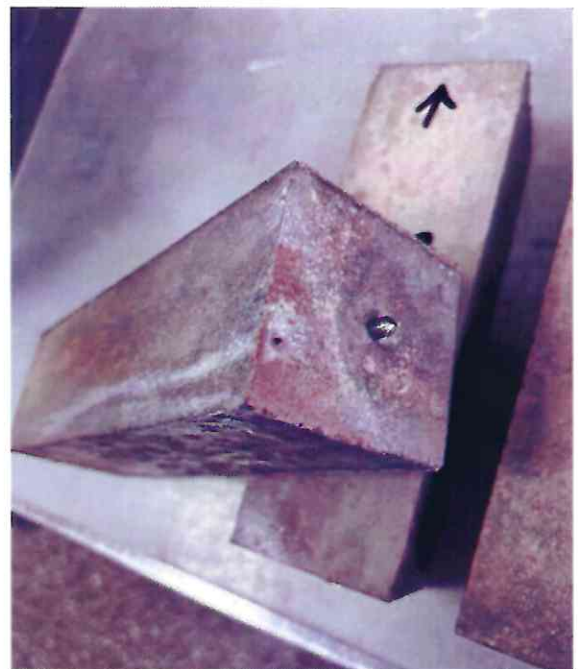
14 pav. Bandiniai po 10 sav. laikymo izoterminėje kameroje



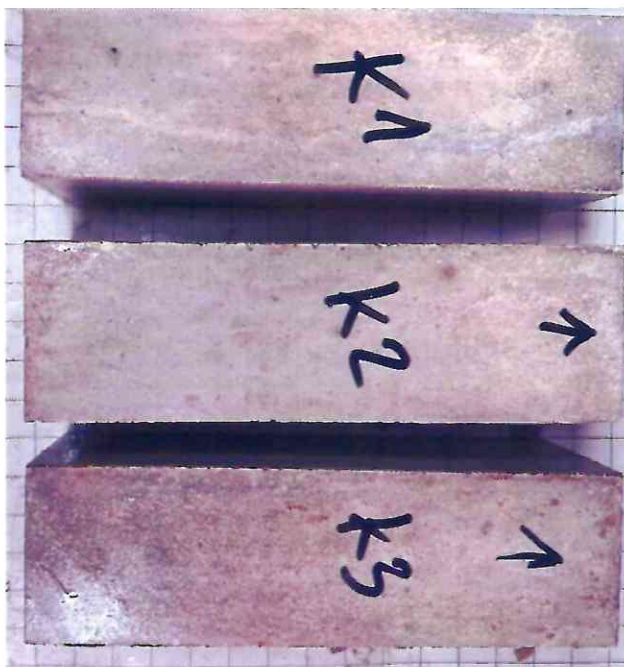
15 pav. Bandiniai po 10 sav. laikymo izoterminėje kameroje



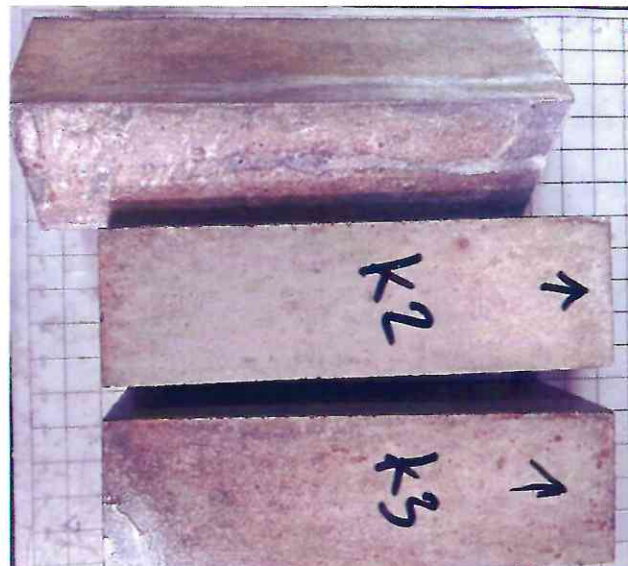
16 pav. Bandiniai po 15 sav. laikymo izoterminėje kameroje



17 pav. Bandiniai po 15 sav. laikymo izoterminėje kameroje



18 pav. Bandiniai po 20 sav. laikymo izoterminėje kameroje



19 pav. Bandiniai po 20 sav. laikymo izoterminėje kameroje

Nagrinėjant kontrolinio betono atsparumą šarminei korozijai, gauta, kad nustatytos bandinių plėtos neviršijo kritinių, tačiau dėl aptinkamų baltų dėmių galime teigti, kad betone yra pakankamai daug kalcio hidroksido, todėl tokiais atvejais ŠBK pavojus potencialiai turėtų būti vertinamas kaip didesnis (žr. 9 pav. algoritme žymima geltona spalva).

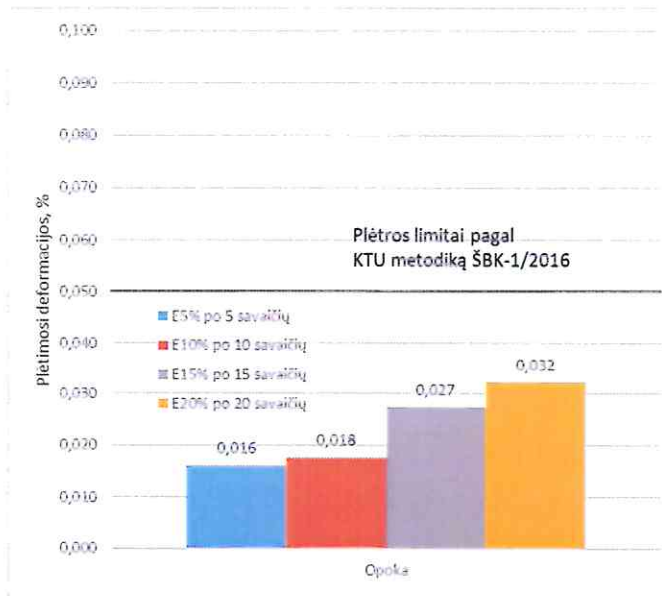
Betono su opokiniu CEM II/ A-P 52.5 N portlandcemenčiu BŠK bandymo rezultatai:

Analogiškai kaip ir su kontroliniais bandiniais pagal pasiūlytą KTU ŠBK-1/2016 tyrimų metodiką atlikome betono su opokiniu portlandcemenčiu bandinių vertinimą. ŠBK vertinimas pagal siūlomą metodiką pateiktas 8 lentelėje bei 20-29 paveiksluose:

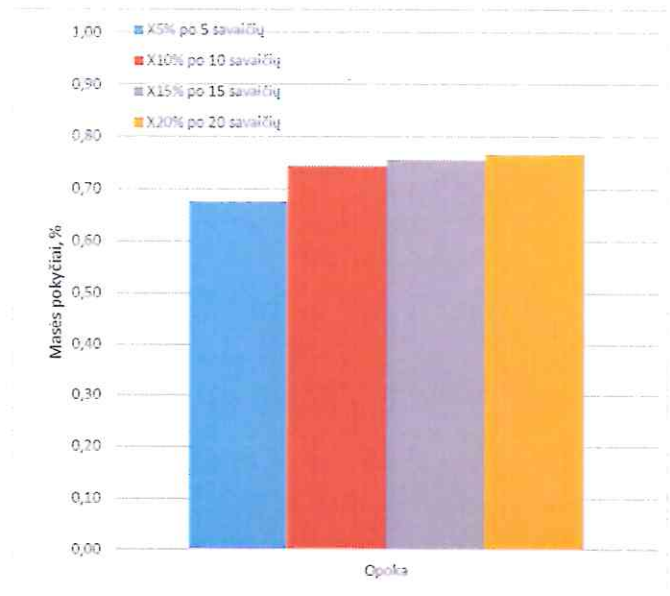
8 lentelė. ŠBK vertinimas pagal siūlomą metodiką.

Betono sudėties pavadinimas	Bandinio Nr.	Santykinė plėtimosi deformacija, E ₂₀ , %	Lokalūs paviršiaus atšokimai, vnt.	Tamsių dėmių kiekis, vnt.	Baltų dėmių kiekis, vnt.*	Makro plyšiai, vnt.	ŠBK vertinimas
Betono sudėtis Opoka CEM II/ A-P 52.5 N							
Opoka	(bandiniai O1, O2, O3)	0,038	0,032	0	0	3	0
		0,029					
		0,029					
							Neįvyko, yra estetinio pobūdžio pažeidimai

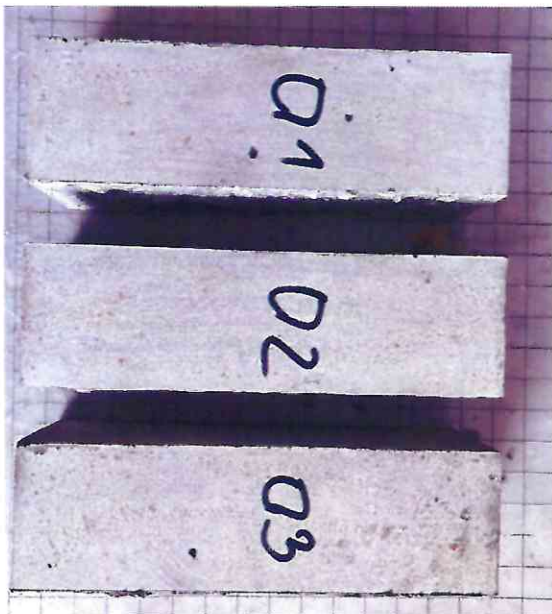
*Baltų dėmių aptikimas rodo, kad betone yra pakankamai daug kalcio hidroksido, todėl tokiais atvejais ŠBK pavojus potencialiai turėtų būti vertinamas kaip didesnis



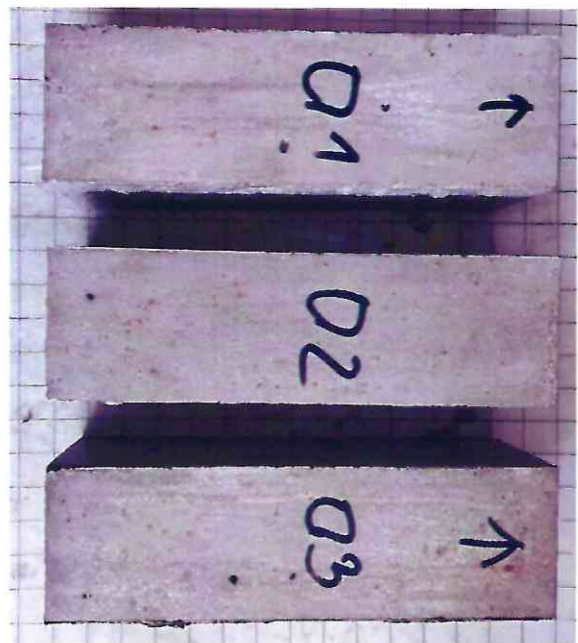
20 pav. Bandinių vidutinės plėtimosi deformacijos



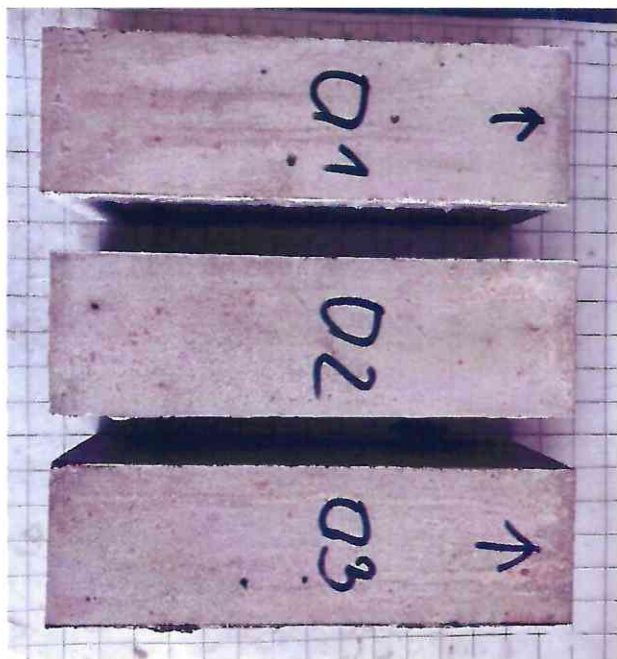
21 pav. Bandinių vidutiniai masės pokyčiai



22 pav. Bandiniai prieš laikymą izoterminėje kameroje



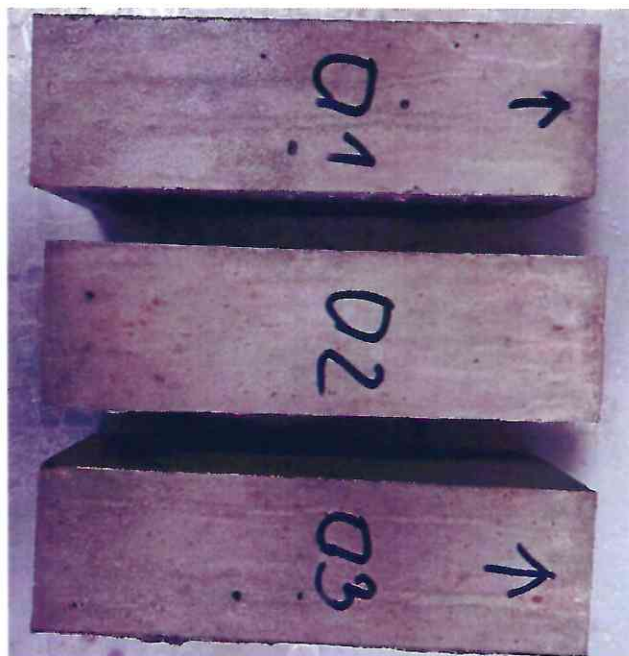
23 pav. Bandiniai po 5 sav. laikymo izoterminėje kameroje



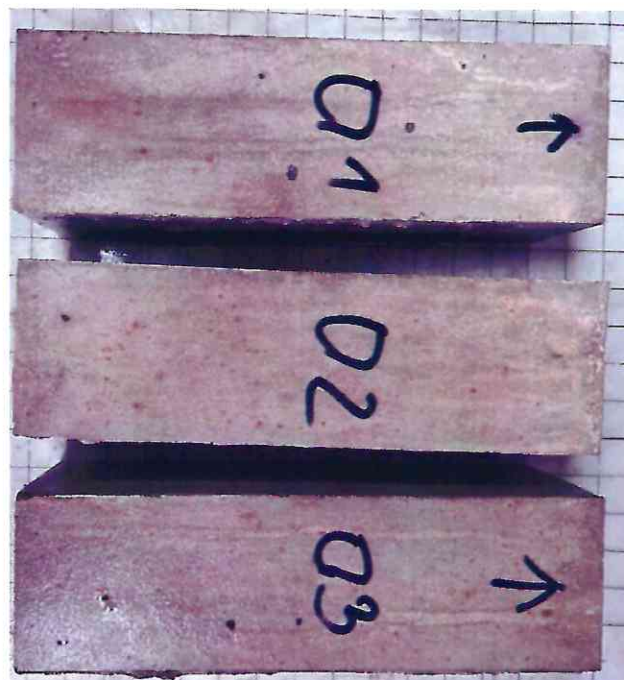
24 pav. Bandiniai po 10 sav. laikymo izoterminėje kameroje



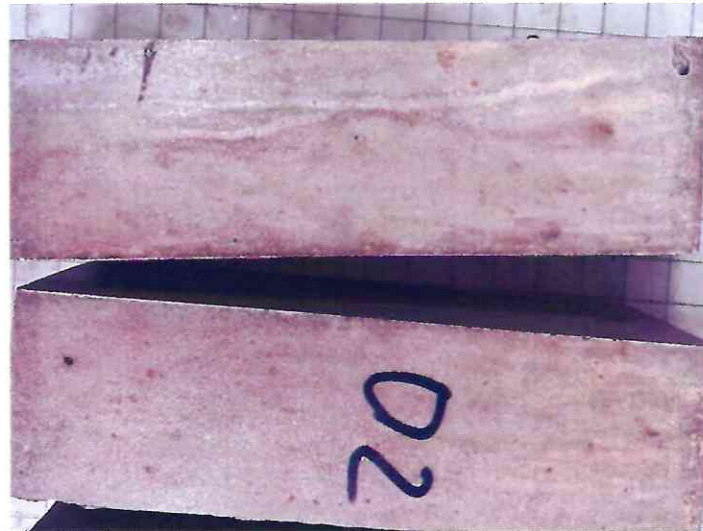
25 pav. Bandinys O3 po 10 sav. laikymo izoterminėje kameroje



26 pav. Bandiniai po 15 sav. laikymo izoterminėje kameroje



27 pav. Bandiniai po 20 sav. laikymo izoterminėje kameroje



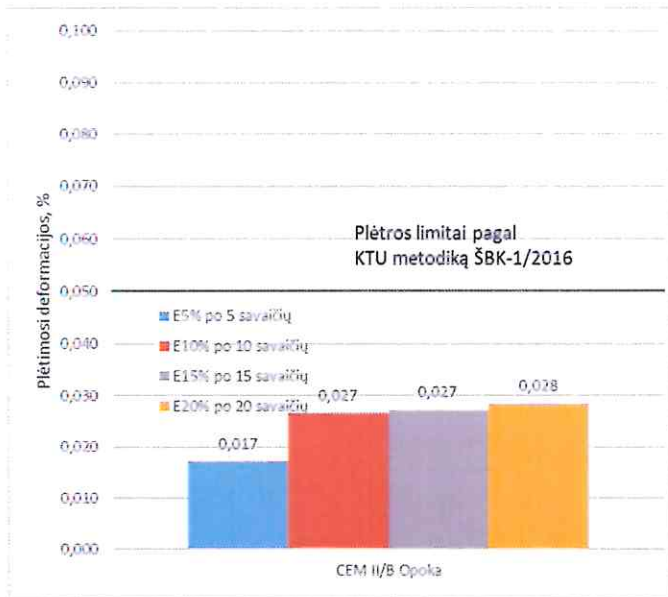
28 pav. Bandinys O1 po 20 sav. laikymo izoterminėje kameroje

Betono su opokiniu CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N portlandcementu BŠK bandymo rezultatai:

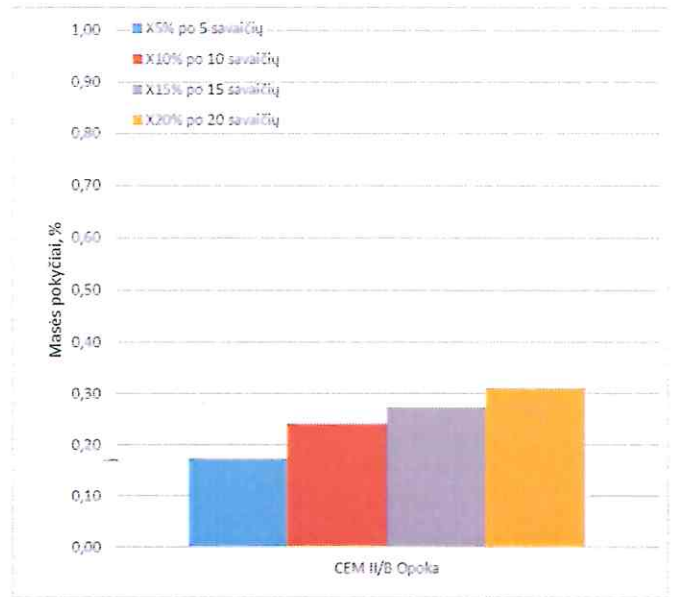
Pagal pasiūlytą KTU ŠBK-1/2016 tyrimų metodiką atlikome betono su CEM II/B tipo portlandcemenčiu bandinių vertinimą. ŠBK vertinimas pagal siūlomą metodiką pateiktas 9 lentelėje bei 30-29 paveiksluose:

9 lentelė. ŠBK vertinimas pagal siūlomą metodiką.

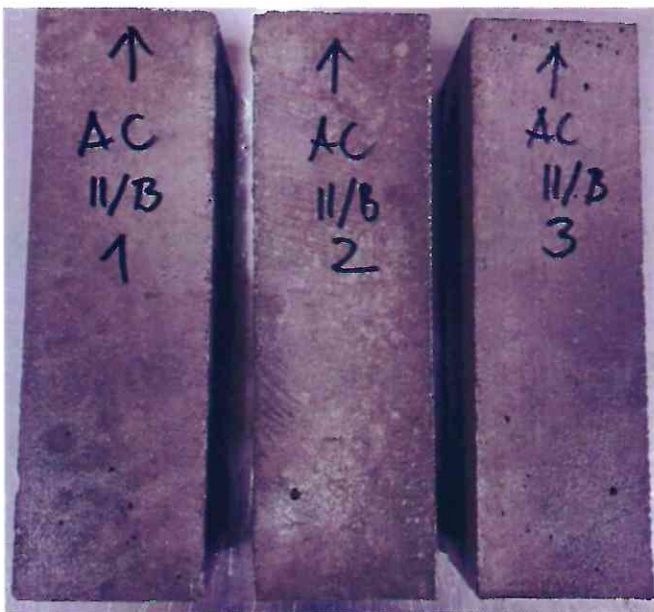
Betono sudėties pavadinimas	Bandinio Nr.	Santykinė plėtimosi deformacija, E ₂₀ , %	Lokalūs paviršiaus atšokimai, vnt.	Tamsių dėmių kiekis, vnt.	Baltų dėmių kiekis, vnt.	Makro plyšiai, vnt.	ŠBK vertinimas	
Betono sudėtis CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N								
CEM II/B Opoka	(bandiniai 1, 2, 3)	0,022	0,028	0	0	0	0	Neįvyko
		0,033						
		0,030						



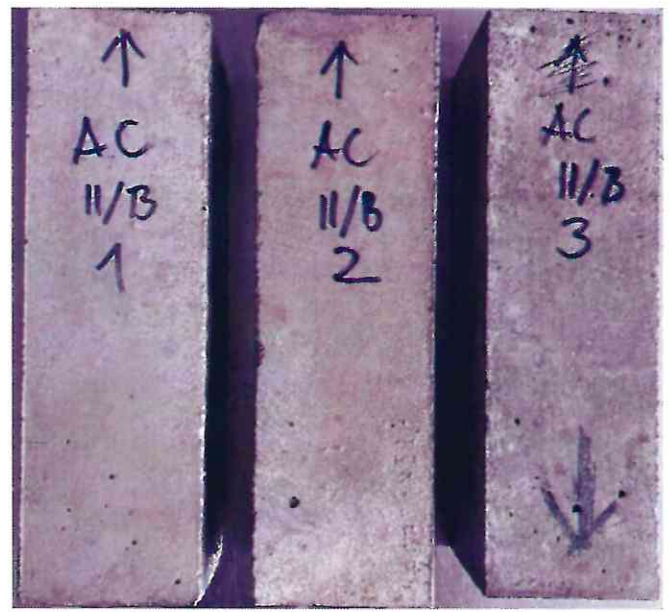
29 pav. Bandinių vidutinės plėtimosi deformacijos



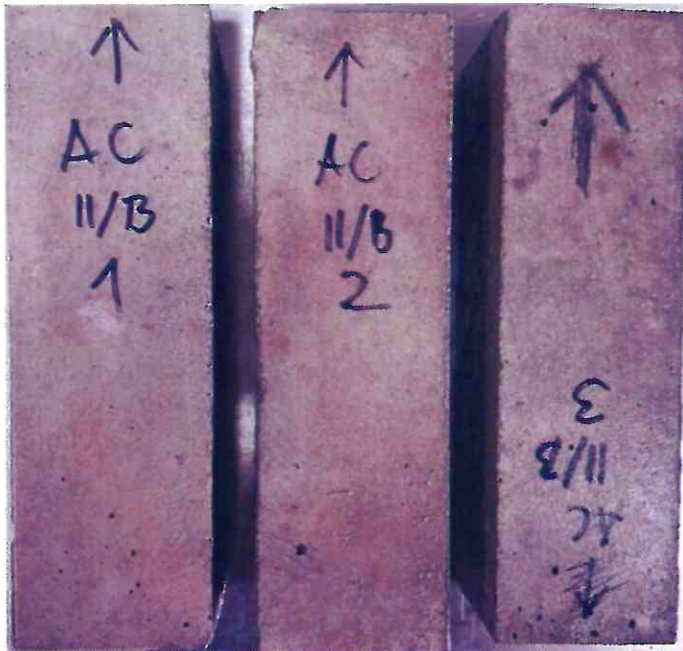
30 pav. Bandinių vidutiniai masės pokyčiai



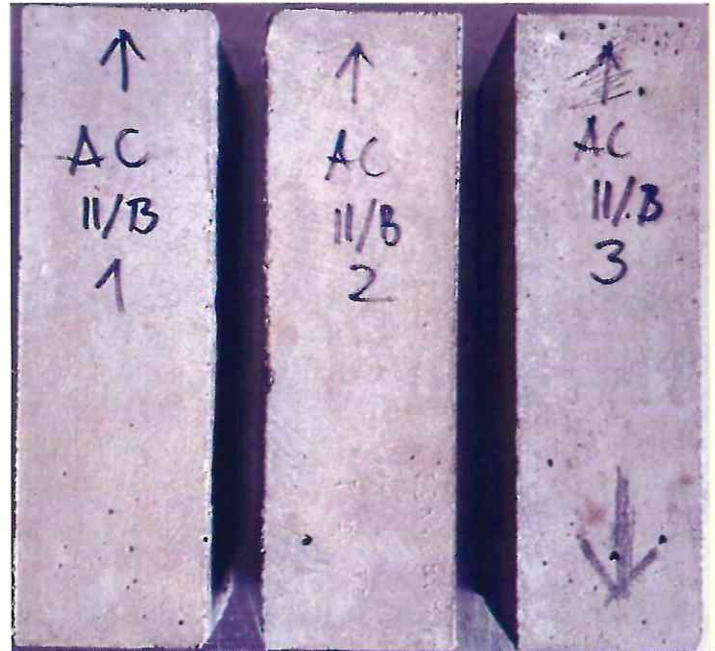
31 pav. Bandiniai prieš laikymą izoterminėje kameroje



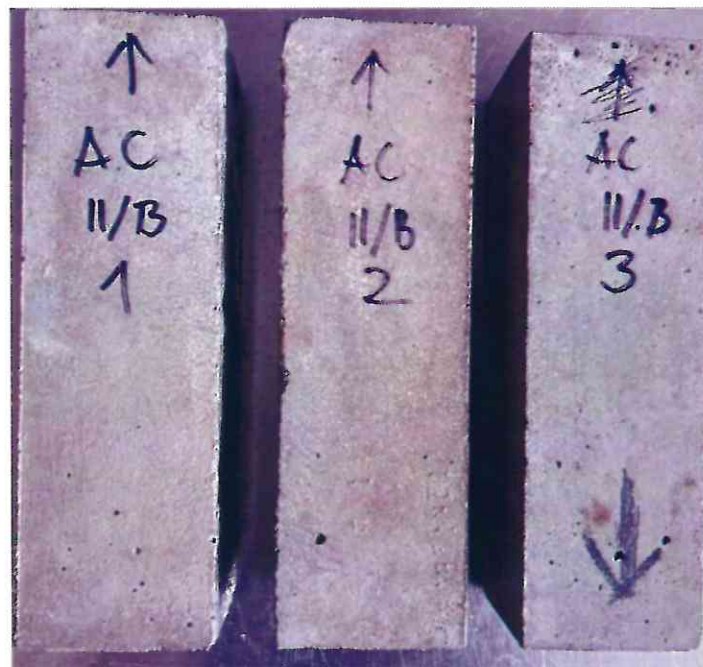
32 pav. Bandiniai po 5 sav. laikymo izoterminėje kameroje



33 pav. Bandiniai po 10 sav. laikymo izoterminėje kameroje



34 pav. Bandiniai po 15 sav. laikymo izoterminėje kameroje



35 pav. Bandiniai po 20 sav. laikymo izoterminėje kameroje

Pagal gautus tyrimo rezultatus, nagrinėjant betono, kuriame buvo naudojamas opokinis portlandcementis, atsparumą šarminiai betono korozijai, gaunami geresni rezultatai nei kontrolinio betono. Visose tiriamose betono sudėtyse po 20 sav. laikymo šutinimo kameroje (60°C ir $>95\% \text{RH}$) buvo gautos panašios betono bandinių plėtros, kurios neviršijo metodikoje aprašytų kritinių plėtrų ($>0,05\%$), tačiau tiek kontrolinio betono bendiniuose tiek betono bandiniuose su CEM II/A tipo opokiniu portlandementu buvo aptiktos baltos dėmės (žr. 15, 17, 19, 25, 28 pav). Baltų dėmių aptikimas rodo, kad betone yra pakankamai daug kalcio hidroksido, todėl tokiais atvejais ŠBK pavojus potencialiai turėtų

būti vertinamas kaip didesnis. Taip pat pastebėta, kad kontroliniuose bandiniuose buvo aptikti 5 (penki vnt) baltos spalvos nubėgimai, tuo tarpu betono bandiniuose su CEM II/A tipo portlandcementu, aptinkamų baltų dėmių/nubėgimų bandiniuose skaičius buvo beveik dvigubai mažesnis (3vnt.), o betono bandiniuose, kuriuose buvo naudojamas CEM II/B tipo portlandcementas, baltų dėmių neaptikta. Šiuo atveju vertinant BŠK atsparumą pagal 10 pav. pateiktą BŠK algoritmą, tiek kontrolinio betono sudėtis, tiek betono sudėtis su opokiniu CEM II/A tipo portlandcementu yra vertinama geltona spalva – „betonas neatsparus estetinio pobūdžio BŠK pažeidimams“, tuo tarpu betono sudėtis su opokiniu CEM II/B tipo portlandcementu yra vertinama žalia spalva – „betonas atsparus BŠK“.

Betono ilgaamžiškumo tyrimai. Atsparumo šalčio ciklams tyrimai.

Betono atsparumą šalčiui LST 1428.17 (tūrinis metodas cikliško šaldymo ir atšildymo masės ir gniuždymo stiprio pokyčio nustatymo metodu mirkymo terpė 3 % NaCl). Šiuo tyrimu buvo siekta įvertinti tiek kontrolinės tiek su opoka modifikuotu cementu CEM II/ A-P 52.5 N sudėčių atsparumą šalčiui tęsiant bandymą iki F300 užšalimo ir atšilimo ciklų. Bandymų rezultatai pateikiami 9 ir 10 lentelėse. Taip pat 29 - 32 pav. pateikiami atsparumo šalčiui naudoti bandiniai prieš bandymą ir po jo, kur matyti bandinių suirimo lygmuo įvykus atitinkamai iki 300 užšalimo ir atšilimo 3 % NaCl vandeniniame druskos tirpale. Iš 9 – 11 lentelėje pateikiamų bandymo rezultatų matyti, kad naudojant įprastinį cementą su ta pačia betono kontroline sudėtimi, šis neatlaiko F300 ciklų taikant atitirpinimą 3 % NaCl tirpale ir gniuždymo stipris sumažėjo ne mažiau kaip 20 %, o sudėčių su opokos cementu CEM II A ir CEM II/ B gniuždymo stipris po F300 ciklų sumažėja atitinkamai iki 4,89 % ir 4,68 %, tai yra labai artima vertė kritinei teigiamai ribai, kuri yra ≤ 5 %. Šiuo atveju nors gaunamas rezultatas ir teigiamas, tačiau matomas bandinių paviršinis irimas ir betono paviršiaus nutrupėjimas. Nepaisant to, reikia konstatuoti, kad turint analogiškas betono mišinio sudėtis, kuriose skyrėsi tik naudojami cemento tipai, žymiai geresni atsparumo šalčiui ilgaamžiškumo rezultatai gaunami naudojant naujo tipo CEM II A ir CEM II/ B opokinį cementą. Atkreiptinas dėmesys, kad po F200 užšaldymo ir atšildymo ciklų vandeniniame 3 % NaCl druskos tirpale abiejų opokinių cementų sudėtys patikimai išlaiko keliamus reikalavimus atsparumui šalčiui (gniuždymo stiprio pokytis yra iki 3 %), kai tuo tarpu su įprastiniu CEM I cementu bandymo rezultatai jau yra ribiniai ir siekia 4,78 %. Žinoma matant gautą rezultatą rekomenduotina atlikti papildomas šių sudėčių modifikacijas ir tyrimus, kurie leistų pasiekti kiek geresnius atsparumo šalčiui rezultatus, tikintis, kad gniuždymo stiprio pokyčio vertė po F300 šalčio ciklų būtų kiek mažesnė ir bandiniai būtų mažiau pažeidžiami vizualiai (įtrūkimai ir aptrupėjimas).



29 pav. Bandiniai prieš atsparumo šalčiui bandymą (kontroliniai (K1) su CEM I 42,5 R ir tiriamieji (O1) su CEM II/ A-P 52,5 N (bandoma F200 ir F300))



30 pav. Bandiniai (kontroliniai su CEM I 42,5 R (K1) ir tiriamieji (O1) su CEM II/ A-P 52,5 N po atsparumo šalčiui F300 atitirpinant 3 % NaCl vandeniniame druskos tirpale.



31 pav. Bandiniai prieš atsparumo šalčiui bandymą tiriamieji (AC) su (CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N) (bandoma F200 ir F300)



32 pav. Bandiniai po atsparumo šalčiui F300 atitirpinant 3 % NaCl vandeniniame druskos tirpale naudojant (CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N)

Atitinkamai vertinant abiejų sudėčių masės nuostolius kontrolinių bandinių masės pokytis yra žymiai didesnis ir siekia iki 30 g, o su opokos cementu CEM II/A-P 52.5 N tik apie 6...8 g. T.y. betonui panaudojant minėtą opokos cementą iki 4 kartų sumažinamas bandinių masės nuostolis ir bandiniai tenkina F300 atsparumo šalčiui ciklų skaičių.

9 lentelė. Kontrolinės betono sudėties su cementu CEM I 42,5 R mechaninių savybių bandymo (LST EN 12390-3, LST 1428-17) atsparumo šalčiui duomenys.

Imties Nr.	Bandinių bandymo data	Bandinio Nr.	Matmenys, mm	Masė, g		Ciklų skaičius	Gniuždymo stipris, MPa		Bandinių išvaizda (irimo požymiai)	Gniuždymo stiprio pokytis,		LST 1428-17 keliami reikalavimai
				Prieš šaldymą	Po šaldymo		Reikšmės įvertinus α	Vidutinė reikšmė		MPa	%	
	2022-07-15	K-22-1-7	100	100	-	-	61,9	-	-	-	-	-
		K-22-1-8	100	99	-	-	62,4	62,0	-	-	-	-
		K-22-1-9	101	99	-	-	61,7	-	-	-	-	-
1	2022-09-26	K-22-1-10	100	100	2359,7	2355,3	59,8	59,0	nėra	-	-2,96	Sumažėja ne daugiau 5% nuo vidurkio
		K-22-1-11	100	100	2359,8	2353,1	200	58,9	nėra	-	-4,78	Sumažėja daugiau 5% nuo vidurkio
		K-22-1-12	100	100	2377,3	2373,8	300	58,4	nėra	-	-	Sumažėja kaip 5% nuo vidurkio
	2022-11-04	K-22-1-13	101	100	2389,8	2357,0	48,2	49,2	nėra	-	-12,78	Sumažėja daugiau kaip 5% nuo vidurkio
		K-22-1-14	100	101	2381,6	2364,6	300	49,0	nėra	-	-20,62	Sumažėja daugiau kaip 5% nuo vidurkio
		K-22-1-15	100	99	2329,7	2301,9	300	50,4	nėra	-	-	Sumažėja daugiau kaip 5% nuo vidurkio

Pastabos: Bandinių mastelio koeficientas α lygus 0,95. Bandiniai – kubai 100×100×100 mm dydžio. Mirkymo terpė – vandeninis 3 % NaCl druskos tirpalas. Bandymo metodas – pagrindinis. Bandinys bandomas per 2-4 h nuo bandinių išėmimo iš vandeninio 3 % NaCl druskos tirpalo. Paviršiaus drėgnumo būklė bandymo metu – sausas. Bandinių paviršiaus plokštumas ir šonų statmenumas su nurodytu pagrindu tenkina standarto LST EN 12390-1:2021 keliamus reikalavimus. Jėgos kėlimo greitis: 0,6 MPa/s. Atsparumo šalčiui bandymo pradžios data: 2022-07-15.

Išvada: Kontrolinės betono sudėties su cementu CEM I 42,5 R atsparumui šalčiui nustatytas ciklų skaičius 200. Tęsiant bandymą toliau iki 300 ciklų, tirtu betono bandinių gniuždymo stipris sumažėja daugiau 5 % nuo vidurkio (žr. 9 lentelė). Tokiu atveju deklaruotinas atsparumas šalčiui yra 200.

10 lentelė. Opokos CEM II/ A-P 52.5 N cementu modifikuotos betono sudėties mechaninių savybių bandymo (LST EN 12390-3, LST 1428-17) atsparumo šalčiui duomenys.

Imties Nr.	Bandinių bandymo data	Bandinio Nr.	Matmenys, mm	Masė, g		Ciklų skaičius	Gniuždymo stipris, MPa		Bandinių išvaizda (irimo požymiai)	Gniuždymo stiprio pokytis,		LST 1428-17 keliami reikalavimai	
				Prieš šaldymą	Po šaldymo		Reikšmės įvertinus α	Vidutinė reikšmė		MPa	%		
2022-07-15		OI-22-2-7	100	100	-	Prieš šaldymą			-	-	-	-	
			100	100			61,8	61,9					
			101	99			61,7						
2022-09-26		OI-22-2-10	100	101	2379,7	200			nėra	nėra	-1,76	Sumažėja ne daugiau 5% nuo vidurkio	
			100	100	2379,8			60,9					60,2
			100	101	2397,1			60,0					
2022-11-04		OI-22-2-13	100	101	2371,8	300			nėra	nėra	-3,03	Sumažėja ne daugiau 5% nuo vidurkio	
			100	101	2401,6			59,3					58,9
			100	101	2399,5			59,0					
		OI-22-2-15	100	101	2391,4			nėra	nėra				

Pastabos: Bandinių mastelio koeficientas α lygus 0,95. Bandiniai – kubai 100×100×100 mm dydžio. Mirkymo terpė – vandeninis 3 % NaCl druskos tirpalas. Bandymo metodas – pagrindinis. Bandinys bandomas per 2-4 h nuo bandinių išėmimo iš vandeninio 3 % NaCl druskos tirpalo. Paviršiaus drėgnumo būklė bandymo metu – sausas. Bandinių paviršiaus plokštumas ir šonų statmenumas su nurodytu pagrindu tenkina standarto LST EN 12390-1:2021 keliamus reikalavimus. Jėgos kėlimo greitis: 0,6 MPa/s. Atsparumo šalčiui bandymo pradžios data: 2022-07-15.

Išvada: Opokos CEM II/ A-P 52.5 N cementu modifikuoto betono atsparumui šalčiui nustatytas ciklų skaičius 300, po kurių tirtu betono bandinių gniuždymo stipris sumažėja ne daugiau 5 % nuo vidurkio (žr. 10 lentelė).

11 lentelė. Sudėtinu CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N cementu modifikuotos betono sudėties mechaninių savybių bandymo (LST EN 12390-3, LST 1428-17) atsparumo šalčiui duomenys.

Imties Nr.	Bandinių bandymo data	Bandinio Nr.	Matmenys, mm	Masė, g		Ciklų skaičius	Gniuždymo stipris, MPa		Bandinių išvaizda (irimo požymiai)	Gniuždymo stiprio pokytis,		LST 1428-17 keliami reikalavimai	
				Prieš šaldymą	Po šaldymo		Reikšmės įvertinus α	Vidutinė reikšmė		MPa	%		
2024-02-15		AC-22-2-7	101	99	100	-	-	61,5	-	-	-	-	
		AC-22-2-8	100	100	100	-	61,1	61,0	-	-	-	-	
		AC-22-2-9	101	100	100	-	60,2	-	-	-	-	-	
2024-04-26		AC-22-2-10	100	101	100	2375,7	2372,3	59,1	nėra	nėra	-1,65	-2,71	Sumažėja ne daugiau 5% nuo vidurkio
		AC-22-2-11	100	100	100	2351,8	2349,0	59,9	200	nėra	-	-	-
		AC-22-2-12	101	101	101	2422,1	2419,4	58,9	300	nėra	-	-	-
2024-06-03		AC-22-2-13	100	100	100	2350,3	2365,4	58,4	300	nėra	-	-	-
		AC-22-2-14	100	101	101	2400,7	2397,4	58,1	300	nėra	-2,85	-4,68	Sumažėja ne daugiau 5% nuo vidurkio
		AC-22-2-15	100	100	101	2376,5	2371,4	57,8	300	nėra	-	-	-

Pastabos: Bandinių mastelio koeficientas α lygus 0,95. Bandiniai – kubai 100×100×100 mm dydžio. Mirkymo terpė – vandeninis 3 % NaCl druskos tirpalas. Bandymo metodas – pagrindinis. Bandinys bandomas per 2-4 h nuo bandinių išėmimo iš vandeninio 3 % NaCl druskos tirpalo. Paviršiaus drėgnumo būklė bandymo metu – sausas. Bandinių paviršiaus plokštumas ir šonų statmenumas su nurodytu pagrindu tenkina standarto LST EN 12390-1:2021 keliamus reikalavimus. Jėgos kėlimo greitis: 0,6 MPa/s. Atsparumo šalčiui bandymo pradžios data: 2024-02-15.

Išvada: Sudėtinu CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N cementu modifikuotos betono atsparumui šalčiui nustatytas ciklų skaičius 300, po kurių tirtu betono bandinių gniuždymo stipris sumažėja ne daugiau 5 % nuo vidurkio (žr. 11 lentelė).

Paviršinio šaldymo bandymo rezultatai (SS 137244:2019 ir CEN/TS 12390-9:2016)

Paviršinio šaldymo bandymai buvo atlikti pagal CEN/TS 12390-9:2016 ir švedų SS 137244:2019 standartus. Šių standartų bandymo metodikos yra praktiškai tos pačios. Kiekvienos sudėties paviršinio šaldymo bandymui buvo suformuoti keturi bandiniai (150×150×150 mm), kurie buvo kietinami 21 parą vandenyje, o vėliau apipjaustomi, bei apklijuojami guma ir įdedami į polistireninio putplasčio dėžutes. Praėjus 28 paroms nuo suformavimo pradžios trims paroms bandinių paviršius buvo užpiltas distiliuotu vandeniu, o praėjus 31 parai nuo bandinių suformavimo pradėtas pats šaldymo bandymas, kur šaldymo agentas buvo parinktas 3% NaCl tirpalas, kuris buvo užpiltas ant bandinių paviršiaus 6 mm aukščio sluoksniu. Per vieną parą bandiniai buvo veikiami vienu šaldymo-šildymo ciklu, kur temperatūra šaldymo kameroje pasikeisdavo nuo -20°C iki $+20^{\circ}\text{C}$ pagal atitinkamą temperatūros kitimo grafiką. Viso bandiniai buvo veikiami 56-iais šildymo šaldymo ciklais. Bandinių paviršinio šaldymo paviršiaus atskilimo-masės nuostoliai buvo nustatomi po 7, 14, 28, 42 ir 56 šildymo-šaldymo ciklų. Kontrolinės ir opokos (CEM II/ A-P 52.5 N), bei (CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N) sudėčių betono paviršinio šaldymo rezultatai yra pateikti 12, 13 ir 14 lentelėse.

12 lentelė. Kontrolinės sudėties išpjautų betono bandinių atsparumo šalčiui bandymo duomenys ir keliami reikalavimai pagal SS 137244 ir CEN/TS 12390-9 standartus.

Band. Nr.	Masės nuostolis bandinio ploto vienetui po 7 ciklų, kg/m^2	Masės nuostolis bandinio ploto vienetui po 14 ciklų, kg/m^2	Masės nuostolis bandinio ploto vienetui po 28 ciklų, kg/m^2	Masės nuostolių vidurkis m_{28} po 28 ciklų, kg/m^2	Masės nuostolis bandinio ploto vienetui po 42 ciklų, kg/m^2	Masės nuostolis bandinio ploto vienetui po 56 ciklų, kg/m^2	Masės nuostolių vidurkis m_{56} po 56 ciklų, kg/m^2	Standarto SS 137244 keliami reikalavimai kategorijai: m_{56} vidurkis turi būti $<0,10 \text{ kg}/\text{m}^2$	Atsparumas šalčiui pagal bandymą (standarto SS 137244, 7 skyrius)
1	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	$m_{56} = 0,04 \text{ kg}/\text{m}^2$ $< 0,10 \text{ kg}/\text{m}^2$	„Labai geras“
2	0,00	0,00	0,02		0,02	0,03			
3	0,00	0,01	0,02		0,03	0,05			
4	0,00	0,00	0,01		0,01	0,02			

Pastabos: Po 28 parų kietėjimo atsparumo šalčiui bandymui buvo naudoti keturi betono bandiniai, kurie prieš bandant buvo apipjaustyti. Prieš bandymą betono bandinys buvo pjaunamas iki 50 mm aukščio, t.y. šaldymui paruošto bandinio vidutiniai matmenys buvo 150×150×50 mm (kur vidutiniai šaldomojo paviršiaus matmenys dėl kraštų apklijavimo silikonu buvo 145×145 mm). Bandomo paviršiaus plotas - 21025 mm^2 . Šaldomas pjautas bandinio paviršius. Pagal SS 137244 standartą šaldymo bandymui buvo naudojamas I gamybos būdas ir A bandymo metodas.

13 lentelė. Opokos (CEM II/ A-P 52.5 N) sudėties išpjautų betono bandinių atsparumo šalčiui bandymo duomenys ir keliami reikalavimai pagal SS 137244 ir CEN/TS 12390-9 standartus.

Band. Nr.	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 7 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 14 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 28 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolių vidurkis m_{28} po 28 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 42 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 56 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolių vidurkis m_{56} po 56 ciklų, kg/m ²	Standarto SS 137244 keliami reikalavimai kategorijai: m_{56} vidurkis turi būti <0,10 kg/m ²	Atsparumas šalčiui pagal bandymą (standarto SS 137244, 7 skyrius)
1	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	$m_{56} = 0,01$ kg/m ² < 0,10 kg/m ²	„Labai geras“
2	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00			
3	0,00	0,00	0,01		0,01	0,01			
4	0,00	0,00	0,01		0,01	0,02			

Pastabos: Po 28 parų kietėjimo atsparumo šalčiui bandymui buvo naudoti keturi betono bandiniai, kurie prieš bandant buvo apipjaustyti. Prieš bandymą betono bandinys buvo pjaunamas iki 50 mm aukščio, t.y. šaldymui paruošto bandinio vidutiniai matmenys buvo 150×150×50 mm (kur vidutiniai šaldomojo paviršiaus matmenys dėl kraštų apklijavimo silikonu buvo 145×145 mm). Bandomo paviršiaus plotas - 21025 mm² Šaldomas pjautas bandinio paviršius. Pagal SS 137244:2019 standartą šaldymo bandymui buvo naudojamas I gamybos būdas ir A bandymo metodas.

14 lentelė. Betono (CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N) sudėties išpjautų betono bandinių atsparumo šalčiui bandymo duomenys ir keliami reikalavimai pagal SS 137244 ir CEN/TS 12390-9 standartus.

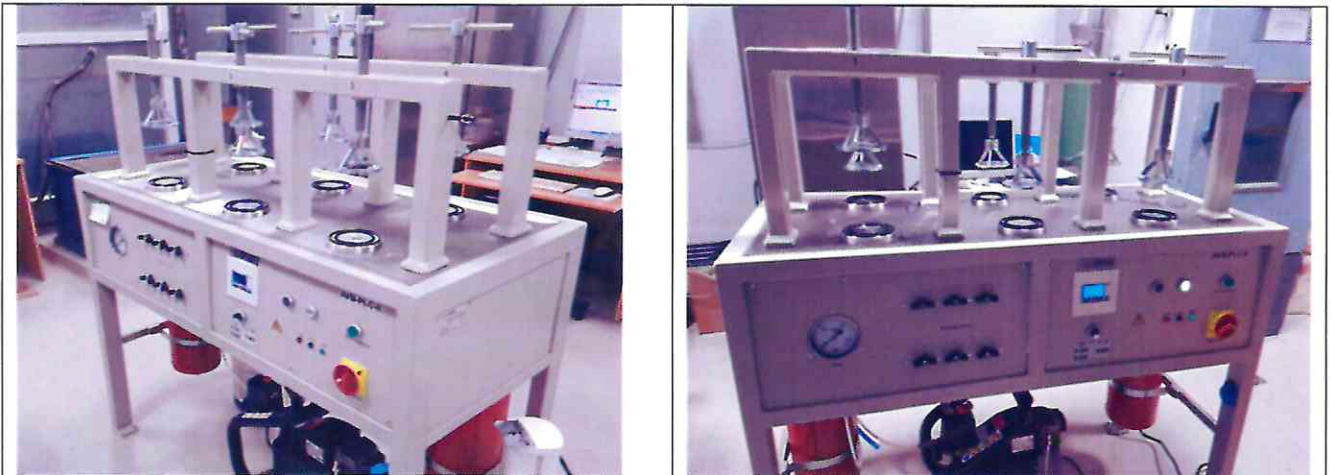
Band. Nr.	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 7 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 14 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 28 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolių vidurkis m_{28} po 28 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 42 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolis bandinio ploto vienetai po 56 ciklų, kg/m ²	Masės nuostolių vidurkis m_{56} po 56 ciklų, kg/m ²	Standarto SS 137244 keliami reikalavimai kategorijai: m_{56} vidurkis turi būti <0,10 kg/m ²	Atsparumas šalčiui pagal bandymą (standarto SS 137244, 7 skyrius)
1	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	$m_{56} = 0,04$ kg/m ² < 0,10 kg/m ²	„Labai geras“
2	0,00	0,01	0,02		0,03	0,04			
3	0,00	0,00	0,02		0,03	0,05			
4	0,00	0,01	0,02		0,03	0,04			

Pastabos: Po 28 parų kietėjimo atsparumo šalčiui bandymui buvo naudoti keturi betono bandiniai, kurie prieš bandant buvo apipjaustyti. Prieš bandymą betono bandinys buvo pjaunamas iki 50 mm aukščio, t.y. šaldymui paruošto bandinio vidutiniai matmenys buvo 150×150×50 mm (kur vidutiniai šaldomojo paviršiaus matmenys dėl kraštų apklijavimo silikonu buvo 145×145 mm). Bandomo paviršiaus plotas - 21025 mm² Šaldomas pjautas bandinio paviršius. Pagal SS 137244:2019 standartą šaldymo bandymui buvo naudojamas I gamybos būdas ir A bandymo metodas.

4.5. Betono vandens įsiskverbimo gylis veikiant slėgiui pagal LST EN 12390-8

Siekiant palyginti kontrolinės ir opokos (CEM II/ A-P 52,5 N) bei CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N cementu modifikuoto betono įtaką betono vandens nelaidumui, buvo suformuoti betono kubai (150×150×150 mm) po 6 vnt. kiekvienai sudėčiai. Po 28 parų kietėjimo vandenyje buvo nustatytas jų vandens įsiskverbimo gylis veikiant slėgiui pagal LST EN 12390-8. Bandymo metu betono

bandiniai buvo įdedami į specialų stendą (žr. 33 pav.), kuriame jie buvo 3 paras veikiami įprastiniu 0,5 MPa padidintu 1,2 MPa vandens slėgiu (viena bandinio pusė).



33 pav. Vandens įsiskverbimo gylio betone veikiant slėgiui nustatymo stendas BRIO AVB-PLC-6

Po bandymo bandiniai buvo perskeliami per pusę ir pagal LST EN 12390-8 buvo išmatuotas vandens įsiskverbimo gylis veikiant pasirinktam slėgiui. Betonų bandiniuose, kurie buvo pagaminti naudojant opokos (CEM II/ A-P 52.5 N) ir CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N cementus, vandens prasiskverbimo gylis betone, esant 1,2 MPa slėgiui, buvo iki 50-60 % mažesnis, t.y. veikiant pasirinktam slėgiui kontroliniuose bandiniuose vandens įsiskverbimo gylis maksimaliai siekė iki 32 mm, o naudojant opoka modifikuotus cementus vandens įsiskverbimo maksimalus gylis siekė iki 16-19 mm, t.y. net ir esant du kartus didesniai vandens slėgiui nei įprastai (0,5 MPa) reikalauja bandymo standartas LST EN 12390-8, minėtas betonai su opoka modifikuotu cementu tenkina standarto LST 1974 keliamus reikalavimus vandeniui nelaidžiam betonui, kai vandens įsiskverbimo gylio vidutinė vertė neviršija 20 mm. Bandymo metu fiksuotas vandens įsiskverbimo gylis pateikiamas 34 pav.



34 pav. Vandens įsiskverbimo gylis bandinius veikiant 1,2 MPa slėgiu. Kairėje pusėje kontrolinės sudėties bandinys, dešinėje opoka modifikuoto (CEM II/ A-P 52.5 N) cemento betono bandinys.

4.6. Betono chloridų migracijos koeficiento nustatymas

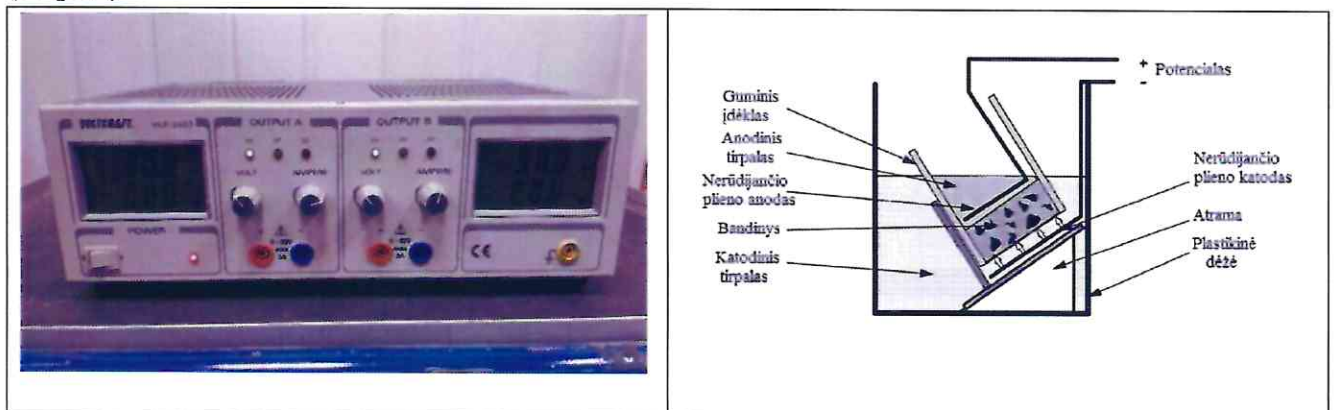
Chloridų difuzija/migracija yra vienas iš svarbiausių parametru apibrėžiančių gelžbetonio ilgaamžiškumą, nes nuo to priklausys kaip greitai prasidės armatūros korozijos procesai, kurių pasėkoje pradžioje atsiras trūkimai, po to dalis betono apsauginio sluoksnio nutrūpės, o atsidengus armatūrai ženkliai pagreitės jos korozijos ir atitinkamai betono struktūros ardymo procesai. Chloridų poveikį gali sumažinti betono mikrostruktūra, nuo kurios priklauso laidumo parametrai ir cemento matricos mineralinė sudėtis, nuo kurios priklauso chloridų cheminio surišimo galimybės. Bandymui naudojama įranga ir bandymo eiga pateikiama 35 - 37 pav., o gautų rezultatų vertinimui (žr. 15 lentelė) buvo naudojamas pasiūlytas atsparumo chloridų difuzijai klasifikatorius (O. Gjorv, “Performance and Serviceability of Concrete Structures in the Marine Environment”).

15 lentelė. Chloridų migracijos atsparumo vertinimo kriterijai pagal O. Gjorv.

Vertinimas (Evaluation)	Chloridų migracijos koeficientas ($\times 10^{-12}$, m ² /s)
excellent (puikus)	< 2,5
very high (labai aukštas)	2,5-5
high (aukštas)	5-10
moderate (vidutinis)	10-15
low (žemas)	> 15

Šio bandymo veikimo principas paremtas chloridų difuzijos skatinimu naudojant elektros srovės potencialą. Chloridų prasiskverbimo bandymo esmė: prie bandinio paviršiaus pridedami elektrodai, kurie sukelia chlorido jonų migraciją iš druskos tirpalo į betoną. Šis metodas yra pagrįstas Nernst'o ir Planck'o lygtimi darant prielaidą kad betonai, kuriame vyksta chloridų difuzija, yra homogeniška terpė.

Pagal standartinę chlorido jonų prasiskverbimo bandymų metodiką yra rekomenduojama naudoti cilindro formos bandinius, todėl bandymui buvo paruošti cilindro formos 100 mm skersmens ir 50 mm aukščio bandiniai. Bandiniai iki bandymo kietėjo vandenyje 28 paras. Bandymui taip pat buvo reikalingos kitos medžiagos tokios kaip: katodinis tirpalas NaCl (900 g distiliuoto vandens ir 100g NaCl), anodinis tirpalas (12g NaOH vienam litrui distiliuoto vandens), sidabro nitratas (AgNO₃). Taip pat buvo naudojamas reguliuojamas elektros maitinimo šaltinis Voltcraft vlp-2403, kuris gali tiekti iki 40 V elektros srovę 0,1 V tikslumu, o elektros srovės stiprį tiekti iki 3 A su 0,01 A tikslumu (35 pav.).



35 pav. Elektros srovės šaltinis Voltcraft vlp-2043

36 pav. Bandinio sujungimo schema

37 pav. Bandinių sujungimas su prietaisu ir bandymo eiga

Prietaise Voltcraft buvo nustatyta 30 V įtampa ir gautas 80 mA bei 90 mA srovės stiprumas. Bandiniai buvo palikti 24 h, tuo tarpu kai tarp katodo ir anodo veikiant elektriniam laukui buvo leidžiama chlorido jonams judėti pro bandinį. Praėjus 24 h prietaisas buvo išjungiamas, o bandiniai buvo perskeliami išilgai chloridų judėjimo krypties. Perskelti bandiniai buvo apipurškiami sidabro nitratu (AgNO_3), kuris sureaguodamas su chloru veikė kaip indikatorius išryškindamas chlorido jonų pėdsakus.

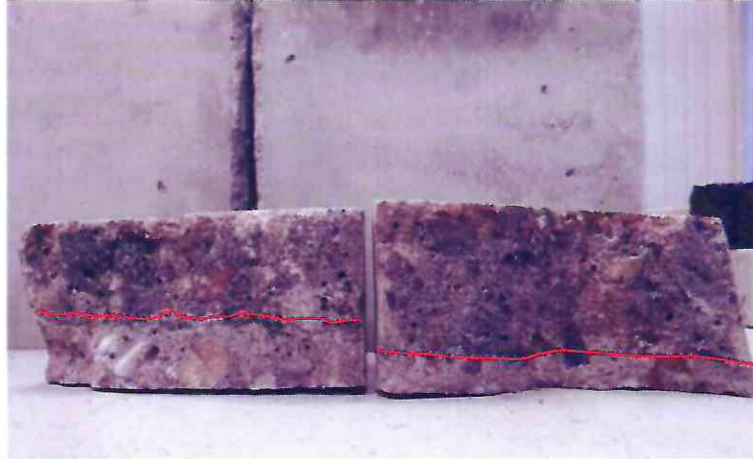
Chlorido jonų koeficiento apskaičiavimo formulė:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \times \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (1)$$

D_{nssm} – chloridų difuzijos koeficientas, $\times 10^{-12}$ m²/s; U – įtampos vertė, V; T – anodinio tirpalo, pradinės ir galutinės temperatūros vidurkis, °C; L – bandinio storis, mm; x_d – chloridų penetracijos gylis betone, mm; t – bandymo trukmė, h.

Kaip parodė tyrimų po 28 kietinimo parų rezultatai, kontroliniai bandiniai pasižymėjo vidutiniu atsparumu chloridų difuzijai ($10,13 \times 10^{-12}$ m²/s), kuris pagal taikomą klasifikaciją vertinamas kaip „moderate“ (vidutinis). Betono su modifikuotu opokiniu cementu CEM II/ A-P 52,5 N nustatyti tyrimų rezultatai yra $3,75 \times 10^{-12}$ m²/s, ir atitinkamai jų atsparumas chloridų difuzijai vertintinas kaip „very high“ (labai aukštas), o su opokiniu cementu CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N tyrimų rezultatas yra $4,87 \times 10^{-12}$ m²/s ir atitinkamai jų atsparumas chloridų difuzijai taip pat vertintinas kaip „very high“ (labai aukštas).

Taigi galime teigti, kad betonai, kuriuose buvo panaudotas opokiniai cementai CEM II/ A-P 52,5 N arba CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N yra apie 2 - 2,5 karto atsparesnis chloridų migracijai, o tai reiškia toks betonas bus žymiai atsparesnis chloridų poveikiui, bei jame esanti armavimo elementai išliks labiau apsaugoti nuo galimos armatūros korozijos, kai ją gali sukelti į betoną kartu su drėgme patenkantys Cl⁻ jonai. Gautas chloridų įsiskverbimo gylis kontroliniame ir su opoka modifikuotėu cementu betonuose pateikiamas 38 pav.



38 pav. Kontrolinio (kairėje) ir opoka modifikuoto CEM II/ A-P 52,5 N cemento (dešinėje) betonai ir juose matomas chloridų įsiskverbimo gylis, kurio vidutinė vertė atitinkamai yra 18,9 ir 7,3 mm.



39 pav. Opoka modifikuoto cemento CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N betonas ir jame matomas chloridų įsiskverbimo gylis, kurio vidutinė vertė yra 9,5 mm

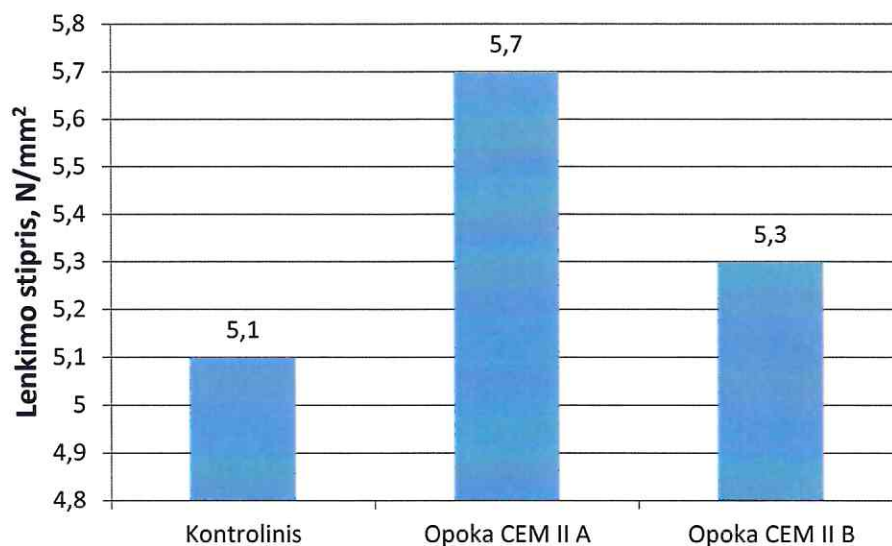
4.7. Betono lenkimo stiprio bandymo rezultatai

Visų trijų betono sudėčių lenkimo stiprio rezultatai po 28 parų kietėjimo nustatyti pagal LST EN 12390-5 standartą pateikti 41 pav. Bandymas buvo atliktas pagal trijų taškų lenkimo schemą (žr. 40 pav.).



40 pav. Betono lenkimo bandymas pagal trijų taškų schemą

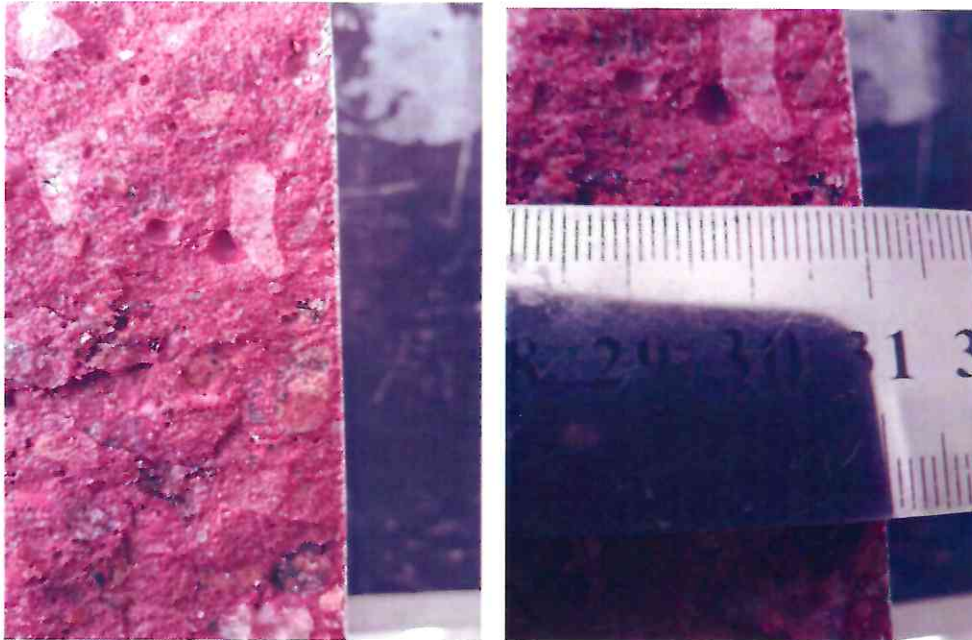
Bandymo metu atstumas tarp atraminių ritinių 300 mm. Apkrovimo intensyvumas 110 N/s. Bandiniai – betono prizmės 100×100×400 mm. Jėgos kėlimo greitis: 0,05 MPa/s.



41 pav. Visų trijų sudėčių vidutinis betono lenkimo stipris

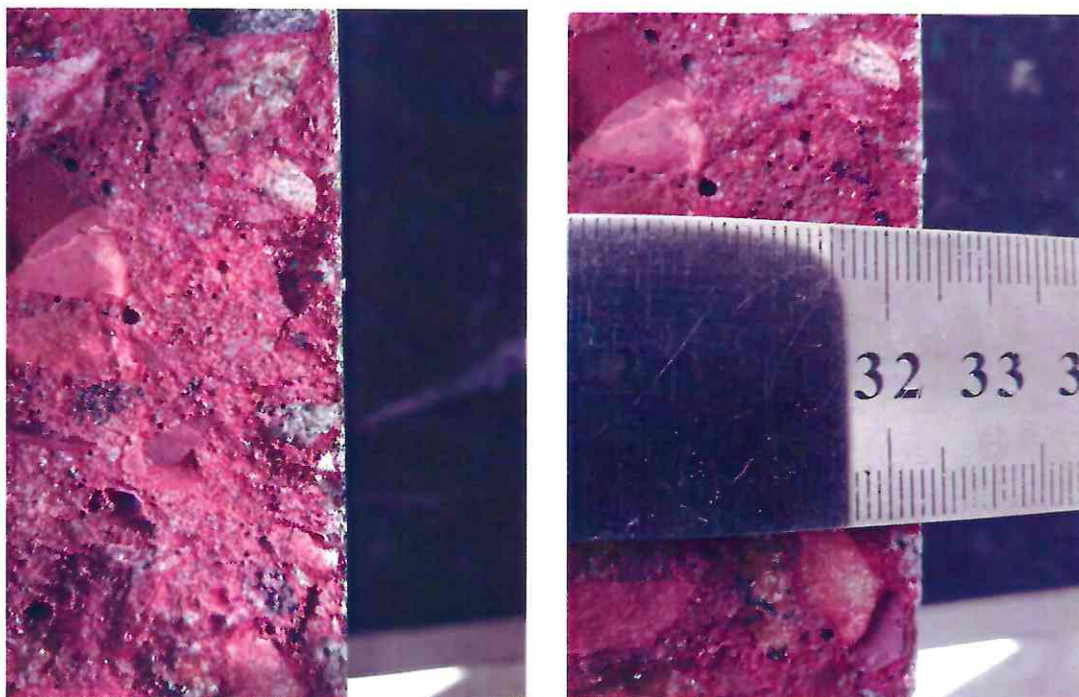
4.8. Betono natūralios karbonizacijos bandymo rezultatai

Visų trijų betono sudėčių karbonizacijos gylio matavimai pagal LST EN 12390-10 buvo atlikti išlaikius bandinius natūraliose atmosferos sąlygose (kur CO₂ koncentracija yra apie 0,04 %). Bandiniai šiose sąlygose buvo pradėti laikyti po 3 parų kietėjimo, t.y. pasiekus daugiau kaip 50 % gniuždymo stiprio lyginant su gniuždymo stipriu po 28 parų. Šiose sąlygose kontroliniai betono bandiniai ir bandiniai su opokiniu cementu CEM II/ A-P 52.5 N buvo laikomi 12 mėnesių. Tuo tarpu betono bandiniai su CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N portlandcemenčiu buvo laikomi 6 mėnesius, nes šis portlandcementis laboratoriniams tyrimams buvo atvežtas gerokai vėliau, nei pirmi du. Po šių kietėjimo laikotarpių perskėlus bandinius ir šiuos naujus paviršius nupurškus 1 % koncentracijos fenolftaleino tirpalu buvo tikimasi pamatuoti bandinių karbonizacijos gylį.



42 pav. Kontrolinių betono bandinių karbonizacijos gylis po 12 mėnesių kietėjimo natūraliose sąlygose ore buvo mažesnė, nei 0,5 mm

Tačiau tyrimų rezultatai parodė (žr. 42-44 pav.), kad šis laiko tarpas natūraliose atmosferos sąlygos buvo per trumpas aptikti žymesnius karbonizacijos gylio skirtumus, nes karbonizacija buvo labai nežymi ir vyko lėtai. Atsižvelgiant į tai, ateityje racionaliau būtų atlikti tokio pobūdžio bandymus pagreitintos karbonizacijos būdu, esant didesnei CO₂ koncentracijai (pvz.: 1 % ar didesnei).



43 pav. Betono bandinių su CEM II/ A-P 52.5 N portlandcemenčiu, karbonizacijos gylis po 12 mėnesių kietėjimo natūraliose sąlygose ore buvo mažesnis, nei 0,5 mm



44 pav. Betono bandinių su CEM II/ B-M (P-LL) 42.5 N portlandcemenčiu, karbonizacijos gylis po 6 mėnesių kietėjimo natūraliose sąlygose ore buvo mažesnis, nei 0,5 mm

5. Šviežio betono mišinio ankstyvojo susitraukimo bandymo rezultatai

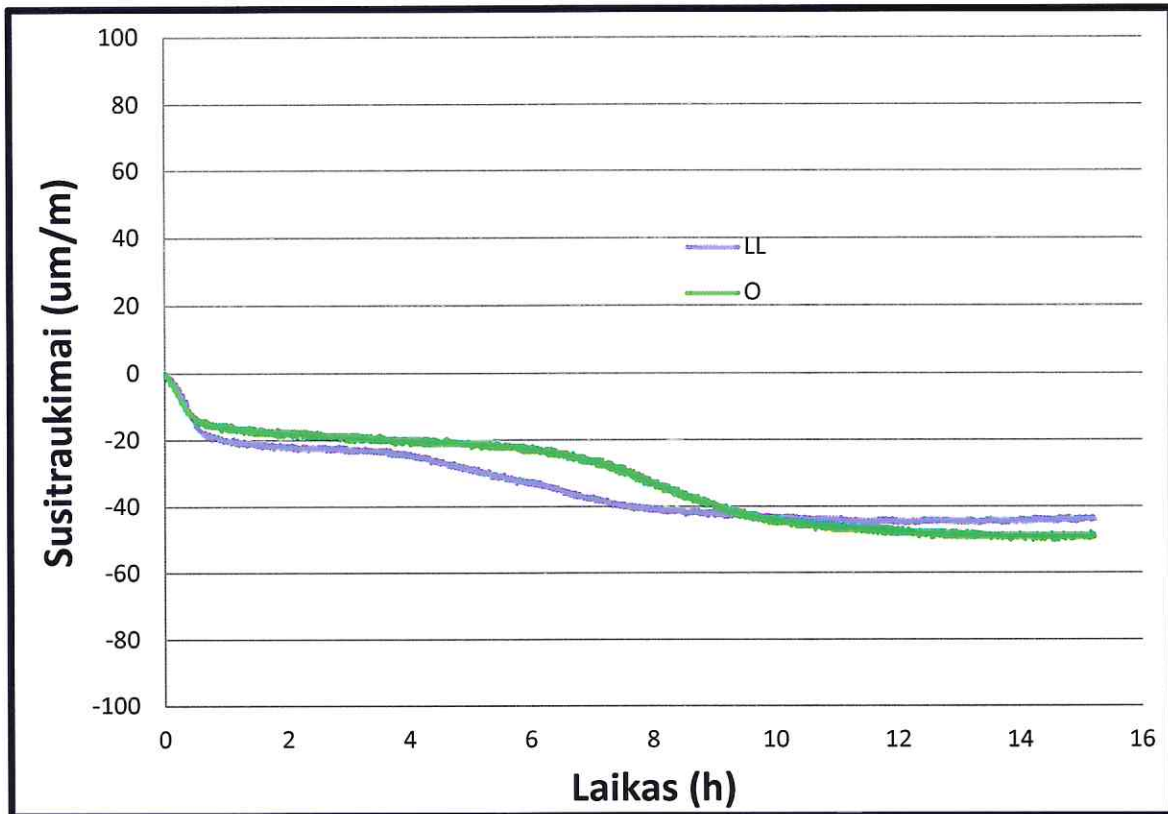
Europos sąjungoje esantis betono susitraukimo matavimo standartas numato betono susitraukimus matuoti tik praėjus 1-ai parai nuo betono suformavimo pradžios, t.y. pirmą parą nuo betono suformavimo pradžios šios deformacijos nėra matuojamos, nors jos yra gana didelės ir betono pvz. grindų ir kitų konstrukcijų gamintojams jos yra ypač svarbios (plastinis susitraukimas, „crazing“). KTU SMKTC įsigijus unikalią įrangą, pirmą kartą palyginimui buvo atlikti susitraukimų matavimai diapozone - nuo šviežio betono mišinio iki 16h kietėjimo. Ankstyvųjų susitraukimo deformacijų tyrimuose tokių pačių sudėčių palyginimui buvo naudojami skirtingi portlandcemenčiai (CEM II/A-LL 42,5 N) ir (Opoka CEM II 42.5N/ B-M (P-LL)). Šiame tyrime parinkti cementai pagal sudedamąsias dalis skiriasi tik opoka, t.y. abiejuose cementuose dedama klintis (LL) ir tik klinkerio dalis keičiama opoka, todėl mes galime lyginti opokos poveikį ankstyvajam betono susitraukimui. Rezultatai pateikti 16 lentelėje ir 45-46 pav.

16 lentelė. Betono sudėčių (kontrolinė ir opokos) ankstyvojo susitraukimo rezultatai

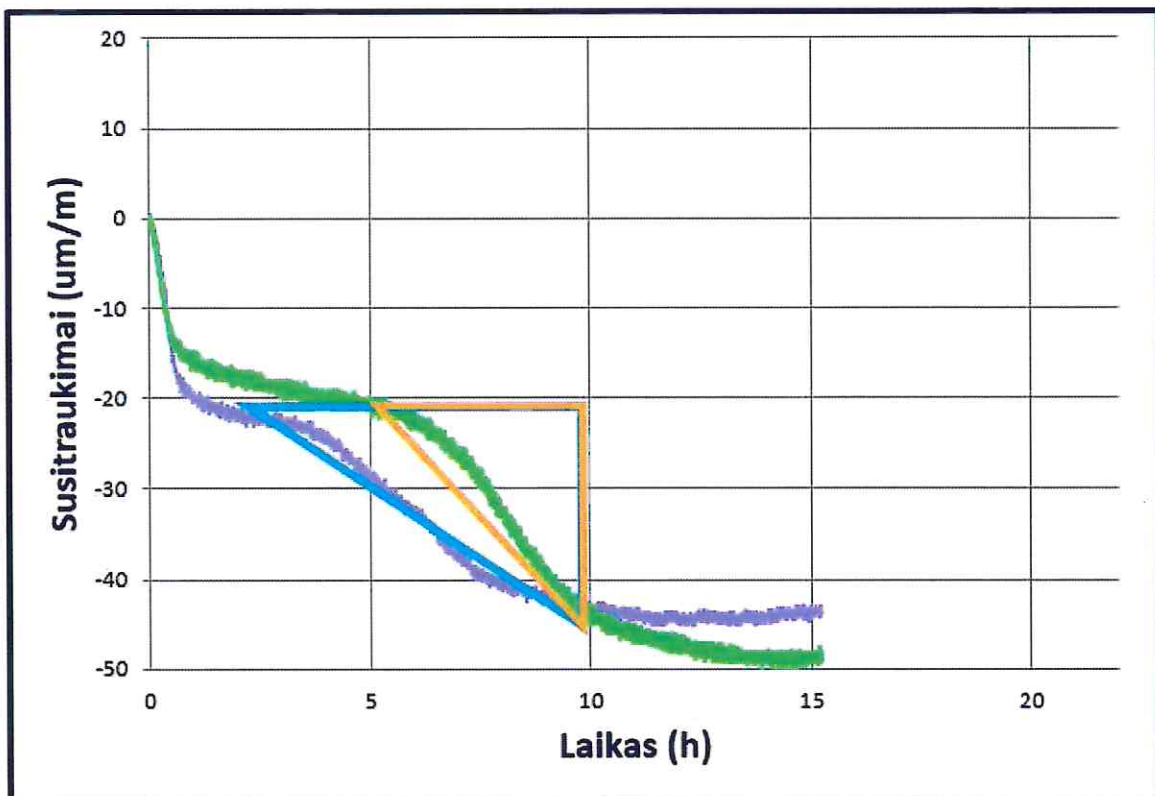
Susitraukimas matavimo laikas prasidėjus betono rišimosi pradžiai, val.	Šviežio betono bandinio santykinis susitraukimas, mm/m		Šviežio betono bandinio santykinis susitraukimas, $\mu\text{m}/\text{m}$	
	CEM II/A-LL 42,5N	CEM II/B-M 42,5	CEM II/A-LL 42,5N	CEM II/B-M 42,5
1	-0.019	-0.016	-19	-16
2	-0.022	-0.017	-22	-17
4	-0.025	-0.019	-25	-19
8	-0.041	-0.032	-41	-32
16	-0.043	-0.048	-43	-48

Šių skirtingų šviežių betono mišinių susitraukimo deformacijos ($\mu\text{m}/\text{m}$) yra pateiktos 45 pav.

Pagal atliktus tyrimus gauta, kad su opokiniu ir LL A tipo cementu gauname vėlyvesnę betono rišimosi laiko pabaigą, tačiau įvykus rišimuisi su opokiniu B tipo cementu vyksta spartesnės susitraukimo deformacijos, nei kad naudojant A tipo LL cementą. Iš 16 lentelės matyti, kad šviežias betono mišinys su CEM II/A-LL 42,5 N portlandcemenčiu iki 6-8 valandų kietėjimo nuo rišimosi pradžios (0 val.) traukiasi šiek tiek labiau, nei betonas su opokos portlandcemenčiu, tačiau dar po 8 valandų kietėjimo (viso po 16 val.) betono su opoka susitraukimo deformacijos tampa šiek tiek didesnės. Iš 45 pav. akivaizdu, kad šviežias betono mišinys su opokos portlandcemenčiu turi labiau išreikštą ir staigesnį susitraukimo šuolį, kuris prasideda praėjus 6 valandoms nuo betono rišimosi pradžios ir stabilizuojasi ties 9 valanda, t.y. per šį 3-jų valandų laikotarpį šis betonas traukiasi labiausiai. Tuo tarpu šviežias betono mišinys su CEM II/A-LL 42,5 N neturi tokio išreikšto staigaus susitraukimo šuolio. Detaliau šis traukimosi deformacijų kreivių pokytis ir tuo pačiu susitraukimo greitis šiems betonams yra parodytas 46 pav.



45 pav. Šviežių betono mišinių susitraukimo deformacijos ($\mu\text{m/m}$), kur žymėjimai reiškia portlandcemenčius: LL- CEM II/A-LL 42,5N, ir O - CEM II/B-M 42,5



46 pav. Šviežių betono mišinių susitraukimo deformacijų ($\mu\text{m/m}$) greitis parodytas trikampiais šalia deformacijų kreivių, kur betono su LL- CEM II/A-LL 42,5 N portlandcemenčiu susitraukimo kreivės kampas sudaro apie 33 laipsnius, o betono su CEM II/B-M 42,5 – apie 43 laipsnius, t.y. pastarasis betono mišinys tam tikru laiko momentu traukiasi greičiau.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS (LT)

1. Tyrimais nustatyta, kad cementuose naudojant natūralų pucolaną opoką, tai neigiamai įtakoja šviežio betono apdirbamumui ir konsistencijos išlaikymui. Dėl šios priežasties betonuose, kuriuose yra naudojamas cementas su gamtine opoka, turėtų būti naudojami specialiai sukurti didelę vandens kiekio redukciją atliekantys priedai – superplastikliai bei parenkamos didesnės jų dozės. Palyginus betono su II/A-P cementu bandymo rezultatus su kontroliniu betonu, kuriame buvo naudojamas CEM I, bandymo rezultatais, superplastiklio dozavimo norma buvo padidinta 50 % (iki 0,75 % nuo cemento kiekio), o naudojant II/B-M – 100 % (iki 1,0 % nuo cemento kiekio).
2. Betono, kuriame buvo naudojami II/A-P arba II/B-M cementai, buvo gautos mažesnės ankstyvojo (po 1, 3 ir 7 dienų) stiprio gniuždant vertės, lyginant su betonu, kuriame buvo naudojamas CEM I cementas. Betono stipris gniuždant su tirtais sudėtiniais portlandcemenčiais padidėjo po 28 dienų ir tapo vienodas su kontroliniu betonu, kuriame buvo naudojamas CEM I, bei gniuždymo stiprio rezultatai visuose tirtuose betonuose buvo 60 ± 1 MPa. Tuo tarpu po 56 ir 90 dienų kietėjimo buvo gauti teigiami ir didesni stiprumo rezultatai betone su opoka modifikuotu cementu. Betono lenkimo stipris po 28 parų kietėjimo bandiniuose su opokiniais cementais buvo gautas šiek tiek didesnis, todėl apibendrinant galima teigti, kad šių cementų naudojimas nesumažino betono mechaninių savybių.
3. Santykinai mažesni betono susitraukimo džiustant rezultatai gauti, kai betone buvo naudojami II/A-P arba II/B-M cementai, palyginti su betonu su CEM I. Buvo atlikti unikalūs betono su CEM II/A-LL ir CEM II/B cementais ankstyvojo cheminio – autogeninio betono susitraukimo tyrimai. Gauta, kad betonas su opoka modifikuotu portlandcemenčiu ankstyvojoje kietėjimo stadijoje pasižymi labiau išreikštu susitraukimo šuoliu, kuris prasideda praėjus 6 valandoms nuo betono rišimosi pradžios ir stabilizuojasi po 9 valandų, t.y. per šį 3 valandų laikotarpį šis betonas susitraukia labiausiai. Tuo tarpu šviežio betono mišinys su CEM II/A-LL 42,5 N neturi tokio ryškaus staigaus susitraukimo šuolio (žr. 46 pav.).
4. Vertinant bandinių šarminės korozijos reakciją (BŠK) pagal RILEM AAR-4.1 pagrindu sukurtą ir akredituotą metodiką KTU SMKTC BŠK-1:2016, betono paviršiuje neatsirado atskilinėjimų ar įtrūkimų (būdinga šarminės korozijos reakcijos pasekmė). Taip pat bandiniuose nesusidarė kritinio išsiplėtimo. Vizualiai apžiūrėjus bandinių paviršių su CEM I ir CEM II/A-P cementais, buvo pastebėtos baltos dėmės, kurios estetiniu požiūriu rodo, kad bandiniai **nėra atsparūs estetinio pobūdžio BŠK pažeidimams** (metodikoje įvardijama „Geltona šviesa“). Tačiau buvo pastebėta, kad bandinių paviršiuose su CEM II/A-P cementu buvo mažiau baltų dėmių, palyginti su bandiniais su CEM I cementu, tuo tarpu betono bandiniuose, kuriuose buvo naudojamas CEM II/B tipo portlandcementas, baltų dėmių neaptikta. Šiuo atveju vertinant BŠK atsparumą pagal 10 pav. pateiktą BŠK algoritimą, betono sudėtis su opokiniu CEM II/B tipo portlandcemenčiu yra vertinama žalia spalva – „betonas atsparus BŠK“.
5. Su analogiškais betono mišinių sudėtimis, kuriose tik skyrėsi naudojamo cemento tipas, gauta, kad naudojant naujo tipo CEM II A ir CEM II/B opokinį portlandcementą (palyginti su CEM I), gauti žymiai geresni betono atsparumo šalčiui rezultatai tiek bandant tūriniu, tiek paviršiniu bandymo metodu. Reikia pastebėti, kad betono su CEM II/ B opokiniu cementu atsparumas šalčiui buvo labai panašus kaip kontrolinio vertinant pagal paviršinį bandymo metodą.
6. Betono sudėčių, kurioms pagaminti buvo naudojami opokinis portlandcementis (CEM II/ A-P 52,5 N) ir CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N, gautas vandens įsiskverbimo į betoną gylis, esant 1,2 MPa slėgiui, buvo iki 50-60 % mažesnis, palyginti su betono sudėtimi, kuriai pagaminti buvo naudojamas kontrolinis (CEM I 42,5 R) portlandcementis.

7. Kontroliniai bandiniai parodė vidutinį atsparumą chlorido difuzijai ($10,13 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), kuris pagal taikomą klasifikaciją vertinamas kaip „vidutinis“. Betono su portlandcementu modifikuotu opoka CEM II/A-P 52,5 N bandymo rezultatai yra $3,75 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, o su CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N bandymų rezultatai yra $4,87 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, todėl jų atsparumas chlorido difuzijai gali būti vertinamas kaip „labai didelis“. Taigi, galime teigti, kad betonas, kuriame buvo naudojami opokiniai portlandcemenčiai CEM II/ A-P 52,5 N ir CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N, yra apie 2 - 2,5 karto atsparesni chloridų migracijai. Todėl tokiuose betonuose armatūra bus labiau apsaugota nuo korozijos dėl mažesnės chloridų migracijos.

8. Apibendrinus tyrimo rezultatus, galima konstatuoti, kad naudojant opokinius cementus yra įmanoma pasiekti teigiamas betono mechanines savybes ir atitinkamai ilgaamžiškumą, tačiau reikia turėti omeny, kad betono mišinių technologinėms savybėms išlaikyti reikia naudoti ženkliai didesnius superplastiklių kiekius, nei įprastai. Taip pat reikia turėti omenyje, kad šiais cementais pagamintas betonas šiek tiek lėčiau įgauna gniuždymo stiprį ankstyvuoju laikotarpiu.

CONCLUSIONS AND RECOMENDATIONS (EN)

1. When using natural puzzolana opoka in cements, it negatively influences fresh concrete workability and slump retention. For this reason, cements containing opoka materials should be used with specially created high water reducers - superplasticizers - and higher dosages of them. According to test results, in concrete with II/A-P cement, superplasticizer dosage was increased by 50% (up to 0.75% of the amount of cement), while with II/B-M, it was increased by 100% (up to 1.0% of the amount of cement), compared to control concrete where CEM I was used.
2. When II/A-P or II/B-M cements were used in concrete compared with concrete where CEM I was used, we obtained lower early strength properties after 1, 3, and 7 days. The concrete strength with investigated blended cements has gained after 28 days and become equal in all concrete, and compressive strength results in all concrete were 60 ± 1 MPa. While after 56 and 90 days, positive and higher strength results were obtained in concrete with opoka cements compared with concrete with control cement. The flexural strength of concrete after 28 days of curing was slightly higher in specimens with opoka cements, so in summary it can be said that the use of these cements did not reduce the mechanical properties of concrete.
3. Relatively lower results of concrete drying shrinkage were obtained when II/A-P or II/B-M cements were used in concrete compared with concrete with CEM I. Chemical – autogenous concrete shrinkage results of concrete with CEM II/A-LL and CEM II/B-M cements were investigated. It was obtained that fresh concrete mix with opoka Portland cement has a more pronounced and sharper shrinkage jump, which begins 6 hours after the start of concrete setting and stabilizes at 9 hours, i.e. during this 3-hour period, this concrete shrinks the most. Meanwhile, the fresh concrete mix with CEM II/A-LL 42.5 N does not have such a pronounced sharp jump in shrinkage (see fig. 40).
4. When evaluating the Alkali Aggregate Reaction (AAR) of the specimens according to the RILEM AAR-4.1 methodology developed and accredited by KTU SMKTC BŠK-1:2016, no concrete surface pop-outs or cracks (characteristic of alkali-silica reaction) or critical expansion were detected in any of the sample. After visually inspecting the specimens' surface with **CEM I** and **CEM II/A-P** cements, white spots were observed, which from an aesthetic point of view suggests that the specimens are **not esthetical resistant to AAR** ('Yellow light'). Also, it was observed that specimens' surfaces with CEMII/A-P cement had fewer white spots compared to specimens with CEM I cement, meanwhile no white spots were detected in the concrete samples that used CEM II/B type Portland cement. In this case, when assessing the resistance of AAR according to Fig. 10. according to the presented AAR algorithm, the composition of concrete with **CEM II/B** type Portland cement is evaluated in green color - "**AAR resistant concrete**".
5. With analogous concrete mix compositions, where only the type of cement used differed, significantly better frost resistance durability results in both volumetric and surface methods were obtained when the new type of CEM II A opoka cement (compared with CEM I) was used. Meanwhile, the frost resistance of concrete with CEM II B opoka cement was similar to that of the control when evaluated by the surface method.
6. In concrete samples made using opoka (CEM II/ A-P 52.5 N) and CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N cement, the depth of water penetration in concrete at a pressure of 1.2 MPa was up to 50-60 % lower compared to concrete samples made using control (CEM I 42.5 R) cement.
7. The control samples showed an average resistance to chloride diffusion (10.13×10^{-12} m²/s), which according to the applied classification is evaluated as 'moderate'. The test results of concretes with modified opoka cement CEM II/ A-P 52.5 N are 3.75×10^{-12} m²/s and with modified opoka cement CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N are $4,87 \times 10^{-12}$ m²/s, and accordingly their resistance to chloride diffusion can be assessed as 'very high'. Thus, we can say that the concrete in which the opoka cement CEM II/ A-P 52.5 N and CEM II/ B-M (P-LL) 42,5 N was used is about 2 - 2.5 times more resistant to chloride migration. Therefore, in such

concrete, the reinforcement will be more protected against corrosion due less chlorine diffusion.

8. Summarizing the results of the research, it can be concluded that using opoka cements it is possible to achieve positive mechanical properties of concrete and, accordingly, durability, but it should be note in mind that in order to maintain the technological properties of concrete mixtures, it is necessary to use significantly larger amounts of superplastics than usual. It should also be note in mind that concrete made with these cements acquires compressive strength a little more slowly in the early period.