



TALLINNA
TEHNIKA KÕRGGKOOI

Margo Pädam

LEELIS-RÄNI REAKTSIOONI ÜLEVAADE JA KATSELINE UURIMINE

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2025



Margo Pädam

LEELIS-RÄNI REAKTSIOONI ÜLEVAADE JA KATSELINE UURIMINE

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Hoonete ehitus

Juhendajad: Karin Lellep, MSc

Martti Kiisa, PhD

Tallinn 2025

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Margo Pädam

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Leelis-räni reaktsiooni ülevaade ja katseline uurimine

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, Margo Pädam

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja Karin Lellep

Juhendaja Martti Kiisa

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1 LEELIS-RÄNI REAKTSIOON EHK ASR	6
1.1 Senised teadmised	6
1.2 Lühiülevaade ASR keemilisest reaktsioonist	10
1.3 Sideaine roll ASR arenemisel	11
1.4 Täitematerjali roll ASR arenemisel	14
1.5 Keskkonna roll ASR kujunemisel.....	16
1.6 ASR ennetamine	19
2 ASR OLEMASOLEVATEL KONSTRUKTSIOONIDEL	21
2.1 Tuvastamine	21
2.2 Näited	24
3 LABORATOORSED KATSED	27
3.1 Levinud meetodikad	27
3.2 ASR riski käsitlevad nõuded Eestis ja lähiriikides	31
3.3 Täitematerjalide katsed lähiriikides.....	33
4 KATSED EESTIS KOGUTUD LIIVAGA	36
4.1 Meetodika	36
4.2 Katseplaan	36
4.3 Ettevalmistused	38
4.4 Katsekehade valmistamine ja hoiustamine.....	41
4.5 Katsetamine	43
4.6 Katsetulemused	46
5 ETTEPANEKUD EDASISTEKS UURIMUSTEKS	50
KOKKUVÕTE	51
SUMMARY.....	52
VIIDATUD ALLIKAD	53
LISA. KATSEKEHADE MÕÕTMISANDMED.....	57

SISSEJUHATUS

Leelis-räni reaktsioon (*alkali-silica reaction – ASR*) on peamiselt tsemendist pärineva leelise ja täitematerjalis sisalduva teatud tüüpi räni mineraalide omavaheline reaktsioon betoonis. Reaktsiooni tulemusel areneb betooni poorides hügrokoopne geel, mis aja jooksul paisudes võib viia ulatuslike struktuursete kahjustuste tekkimiseni.

Reaktsiooni kujunemine sõltub betooni valmistamiselt kasutatud koostisosadest. Kuigi nende komponentide kvaliteedinõuded on üldiselt reglementeeritud, siis Eestis hetkel kehtivas Euroopa standardis EVS-EN 12620, millega määratletakse ühtlasi nõuded betoonis kasutatavate looduslike täitematerjalide omadustele, ei käsitleta ASR riski hindamist piisava põhjalikkusega. Leelis-räni reaktsiooni levikut ja potentsiaali Eestis on seni uuritud napilt, mistõttu eestikeelset teaduskirjandust leidub vähe. Arvestades, et ASR esineb üle maailma, sh. ka naaberriikides, sarnastes kliimatilistes tingimustes, on põhjust eeldada, et probleem võib aktuaalne olla ka Eestis.

Käesoleva töö eesmärgiks hinnata ASR esinemise riski Eestis kasutatavate peentäitematerjalide kontekstis. Selleks otsitakse esmalt vastuseid küsimustele, mis ASR on ja kuidas tekib ning millist rolli omavad seejuures betooni valmistamisel kasutatavad materjalid või hilisem eksploatatsioonikeskkond. Uuritud teadustööde, artiklite ja juhendmaterjalide põhjal tutvustatakse meetodeid reaktsiooni ennetamiseks betooni valmistamisel ja tuvastamiseks olemasolevatel konstruktsioonidel koos näidetega. Teema arenedes antakse ülevaade levinud katsetoodikatest, nende põhjal kujundatud lähiriikide regulatsioonidest ja täitematerjalide katsetamisel saadud tulemustest.

Lõputöö praktilises osas kirjeldatakse rakendatavat meetodikat ning viiakse läbi laboratoorsed katsed Eesti karjäärdest pärinevate liivadega leelis-räni reaktsiooni riski esmaseks hindamiseks.

1 LEELIS-RÄNI REAKTSIOON EHK ASR

1.1 Senised teadmised

Käesolevas töös vaadeldav leelis-räni reaktsioon (*alkali-silica reaction – ASR*) on üks seni avastatud betoonkonstruktsioonidel avalduvast leelise-täitematerjali reaktsiooni alaliikidest, mis tekib betooni poorides oleva leelise reageerimisel täitematerjalis esineva teatud tüüpi räni sisaldava kivimiga. [1]

ASR on reaktsioon, mis betooni tugevuse omadusi mõjutades kutsub betoonkonstruktsioonides esile mehaanilisi kahjustusi. Keemilise reaktsiooni käigus reageerivad betooni poorilahuses olevad leelised täitematerjali amorfses või nõrgalt kristalliseerunud olekus oleva räniga, mille tulemusel betooni poorides toimuvate muutustena leiab aset betooni paisumine, mis põhjustab sisepingeid. Kui reaktsiooni tulemusel tekkinud sisepinged ületavad materjali vastupanuvõime, toimub betooni struktuurne lagunemine pöördumatu pragunemise näol, mis mõjutab otseselt betoonkonstruktsiooni tugevusomadusi ja eluiga. [2]



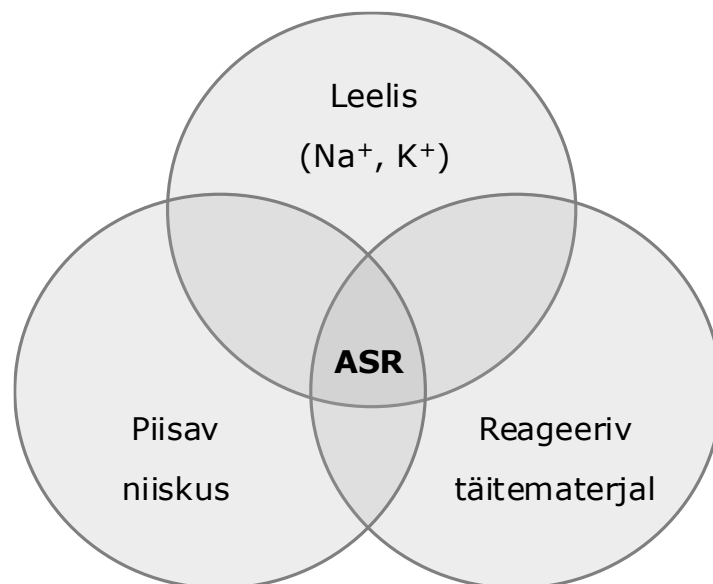
Foto 1. Thomas E. Stanton tüüpilise vaatepildiga ASR tulemusel kahjustunud betooniga [3]

Leelis-räni reaktsioonile omistatavaid kahjustusi kirjeldas esmakordselt 1940-datel aastatel Ameerika Ühendriikides Thomas E. Stanton (Foto 1), kuid betooni lagunemist põhjustava leelise-täitematerjali reaktsiooni on uuritud juba 1920ndatest aastatest seoses leelis-räni reaktsioonist tingitud kahjustuste esinemisega Ameerika Ühendriikides,

Californias asuval tammil. Kui algselt peeti ASR-ist tingitud kahjustusi USA-s esinevaks probleemiks, siis esimeste juhtumite avastamisel Euroopas, alustades Islandist ja Ühendkuningriigist, need seisukohad muutusid ning järjest enam sellekohaseid uuringuid hakati läbi viima ka siin pool ookeanit. Olukorra teadlikkuse kasvamisest tingituna, on tänaseks päevaks leelis-räni reaktsiooni esinemist tuvastatud ligi 50s riigis üle maailma. [3], [4]

Leelis-räni reaktsioon toimub, kui betoonis olevad leelised (peamiselt naatrium- ja kaaliumoksiidid) reageerivad täitematerjalis sisalduva reaktiivse räniga. Keemiline reaktsioon algab leelise oksiidide reageerimisega sobivas olekus räniga, mis viib vett siduva kaltsiumirikka leelise-räni geeli moodustumiseni betooni poorides. Moodustunud geel imab vett ja paisub, tekitades sisepeingeid materjalis, mille akumulereerudes tekivad praod. [5]

Geeli moodustumine ja paisumine, mis ühel hetkel võib viia konstruktsioonide purunemiseni, on otseses seoses betooni leeliselise keskkonnaga, kasutatud täitematerjali mineraloogilise eripäraga ja eksploatatsioonitingimustega (Joonis 1). Eelnimetatud tingimustest sõltub otseselt, millal avalduvad kahjustused – mitte kunagi, paari aasta või paarikümne aasta pärast. [5]



Joonis 1. Leelis-räni reaktsiooni esinemiseks on vajalik kõigi kolme komponendi üheaegne esinemine – leeliseline keskkond, niiskus ja reageeriv täitematerjal [6]

Lihtsustatud käsitluse puhul vaadeldaksegi kogu protsessi kahes staadiumis, millest esimeses reageerib täitematerjali pinnal olev räni betooni poorides sisalduva leeliselega ja

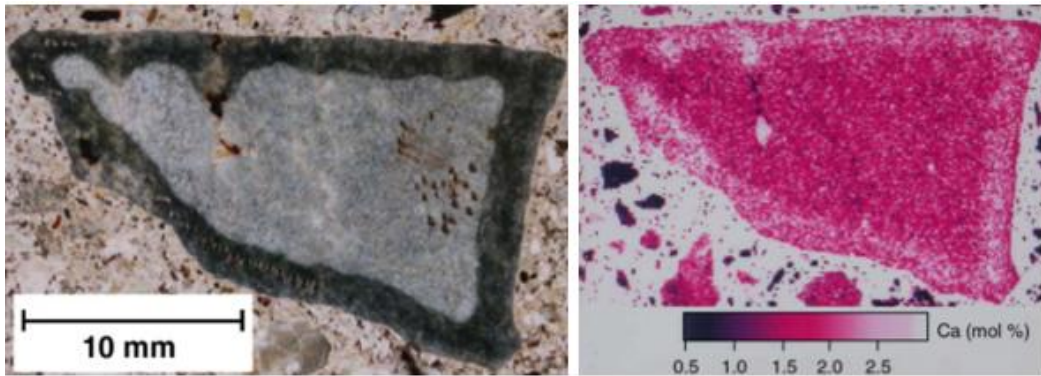
lahustub, moodustades leelise-räni geeli ning teises etapis seob moodustunud geel endasse konstruktsioonis olevat niiskust ja hakkab paisuma. [7]

Reaktsiooni täpsema käsitluse puhul vaadeldakse protsessi nelja etapilisena. Esimeses staadiumis lahustub metastabiilne või amorfne ränidioksiid leelises, teises etapis moodustub kolloidne räni-vedelik, mis kolmandas etapis tiheneb geeli-laadseks massiks ning neljandat etappi iseloomustab geeli paisumine. Piisavate sidemete esinemisel, on tugevalt degradeerunud kujul ränidioksiid võimeline ka koheselt lahustuma ja ränigeeliks muunduma. Nende reaktsioonide jadas peetakse ränidioksiidi lahustumise protsessi tihti kõige aeglasemaks, mistõttu kujundab lahustumise protsess leelis-räni reaktsiooni arenemise kiiruse betoonis. Tegureid, nagu kõrge leeliselisus ja temperatuur, kasutatakse reaktsiooni kiirendamiseks laboratoorsete katsete läbiviimisel. [8]

Kuigi eelpool kirjeldatud leelise ja räni vahelise reaktsiooni protsess on põhimõtteliselt mõistetav, on mitmete teadlaste huvi ühelt poolt pehme, kuid samas purustava sisemise surveni viiva, geeli moodustumise täpsema mehhanismi edasine uurimine.

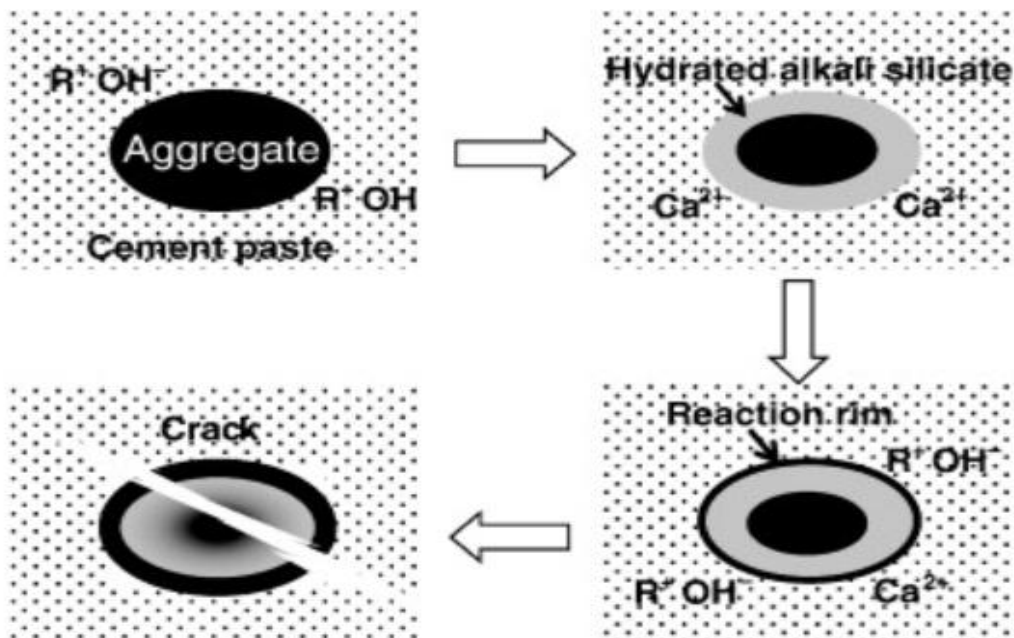
Reaktsiooni kineetikat iseloomustava matemaatilise mudeli uurimisel leiti, et pragude tekkimist betoonis põhjustab kasvav surve täitematerjali ja tsemendipasta vahelises piirkonnas ning surve kasvades paisub geel edasi täitematerjali pinnal olemasolevatesse mikropooridesse. Täitematerjali ümbritsevate pooride täielikul täitumisel ja geeli edasise arengul surve kasvab ning põhjustab tsemendipasta pragunemise. Uuringud näitavad, et leelis-räni reaktsiooni tõttu tsemendipastas tekkinud pragunemine ei põhjusta pragunemisi täitematerjalis, vaid vastupidi – pragunemine saab alguse täitematerjalis olevast reageerivast terast, milles tekkinud pragunemine kandub edasi seda ümbritsevale tsemendipastale. [9]

Eelnevat järeldust täiendab reageeriva täitematerjali elementanalüüsil põhinev uuring, milles püüti leida vastuseid küsimusele, miks täitematerjali ja leeliselise poorilahuse vahelise leelise ja räni reaktsiooni tagajärjel moodustuv pehme ja hüdreeritud ränidioksiidi geel tekitab paisutavat survet, mis on võimeline esile kutsuma nii täitematerjali kui ka ümbritseva betooni purunemist. Leelis-räni reaktsioonist põhjustatud betooni pragunemise analüüsimisel leiti, et hüdreeritud geeli põhjustatud kasvav surve koondub esmalt reageerivas täitematerjalis, mille tulemusena täitematerjal paisub ja tekkinud surve põhjustab pragunemise nii täitematerjalis, kui seda ümbritsevas tsemendipastas. Ichikawa ja Miura toovad tsemendipastas oleva täitematerjali (andesiidi) elementanalüüsi põhjal välja, et täitematerjali ümber moodustub omapärane kiht, mis sisaldab kaltsiumi ioone (Joonis 2). [10]



Joonis 2. Vasakul nähtav andesiidi tera ümbritsev kaltsiumi ionidega tugevnenud kiht, paremal kaltsiumi esinemine tera pinnal [10]

Leitakse, et moodustunud kiht on tihedam ja tugevam, kui ümbritsev keskkond, ja hoiab kinni ränigeeli, kuid võimaldab leelise läbi tungimist. Ühesuunalise liikuvuse tõttu kasvavad sisepinged täitematerjali teras, kuni sisemine paisutav jõud on suurem tera koos hoidvast tõmbetugevusest ning tera, koos seda ümbritseva betooni pastaga, puruneb. Elementanalüüsis mudelist järeldatakse, et betooni pragunemist ei põhjusta otseselt leelis-räni reaktsioon ise, vaid purustava jõu tekkimiseks on määrav kaltsiumi-ionidest vöö moodustumine täitematerjali ümber, mille tõttu jõud kuni tera purunemiseni akumulēeruda saab. Kirjeldatud uuringu tulemuste põhjal kujutavad uuringu autorid purunemise neljaetapilist mehhanismi illustreeriva skeemiga (Joonis 3). [10]

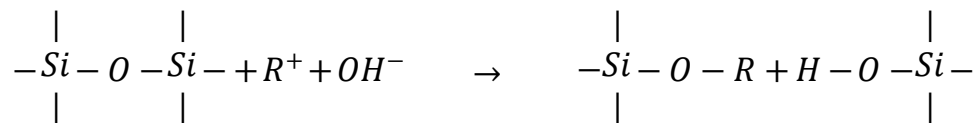


Joonis 3. Pragunemise etapiline tekkemehhanism [10]

1.2 Lühülevaade ASR keemilisest reaktsioonist

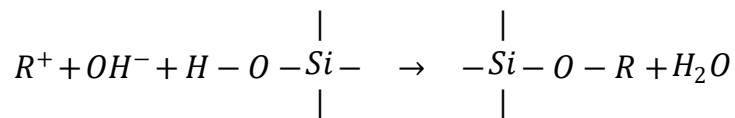
Leelis-räni reaktsioon on olemuselt betoonis aset leidev keemiline protsess, mille käigus täitematerjalis sisalduv amorfne või nõrgalt kristalliseerunud ränidioksiid reageerib tsemendi leeliselega. Nagu eelpool kirjeldatud, viib purustavate jõudude tekkimiseni rida keemilisi reaktsioone.

Esmalt reageerib sobivas vormis ränidioksiid poorilahuses oleva leeliselega (NaOH või KOH). Hüdroksiidiioonid (OH⁻) lõhustavad täitematerjalis oleva ränidioksiidi siloksaansidemed, mille tagajärjel tekivad leeliseline ränidioksiid (ränigeel) ja ränihape (Joonis 4). [10]



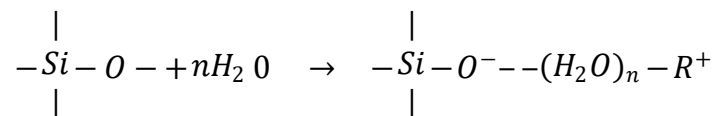
Joonis 4. Aluselise ränidioksiidi ja ränihappe moodustumine, kus R⁺ tähistab leelismetalli Na⁺ või K⁺iooni [10]

Reaktsiooni käigus moodustunud ränihape on nõrk hape, mistõttu reaktsioon jätkub koheselt ning ränihape reageerib hüdroksiidiiooniga, moodustades leeliselise ränigeeli ehk vastavalt naatrium- või kaaliumsilikaadi (Joonis 5). [10]



Joonis 5. Ränihape reageerib OH⁻ ning moodustub leeliseline ränigeel [10]

Tekkiv ränigeel on olemuselt hügrokoopne (seob hästi vett), mille tagajärjel leiab aset geeli paisumine (va juhul, kui R tähistaks Li katiooni, selgitus peatükis 1.6 ASR ennetamine, lk 19), mis viib pragude tekkimiseni betoonis (Joonis 6). [10]

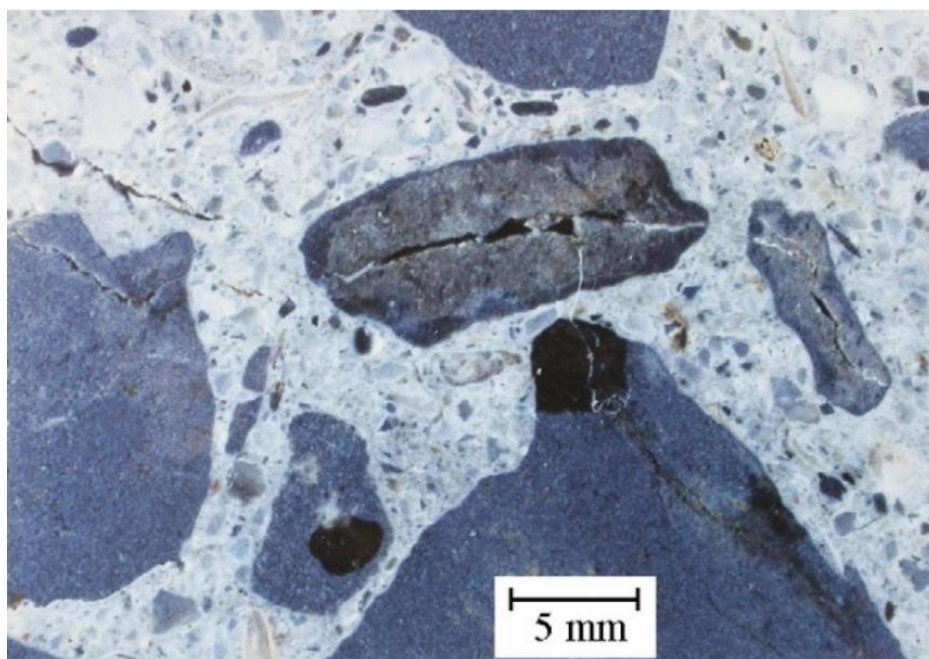


Joonis 6. Ränigeeli hüdratatsioon, kus n tähistab silikaataniooni hüdratatsiooniarvu [10]

Lisaks hügrokoopsetest omadustest tingitud ränigeeli paisumisele on leitud, et geeli moodustumine iseseisvalt ei põhjusta veel deformatsioone. Leelis-räni reaktsiooni käigus kasutatud hüdroksiidi ionid muudavad poorilahuse koostist selliselt, et tsemendi hüdratatsiooni (tardumise) faasidest pärinevad kaltsiumiioonid (Ca^{2+}) reageerivad tekkinud ränigeeliga ning geeli ümber moodustub tihedam ja tugevam kaltsium-silikaatkiht (Joonis 2), (Joonis 7). Moodustunud kiht võimaldab geeli paisumisest tingitud survejõu akumulereerumist, mis kriitilise piiri ületamisel viib kihi purunemiseni ning tekib pragunemine täitematerjalis ja tsemendipastas (Joonis 8). [10]



Joonis 7. Kaltsium-silikaatkihi moodustumine leeliselise ränigeeli toimel [10]



Joonis 8. Täitematerjali (andesiid) leelis-räni reaktsioonist tingitud purunemine [10]

1.3 Sideaine roll ASR arenemisel

Kõikides betoonides on olemas teatud hulgal leeliseid. Betooni leeliselise keskkonna kujundab peamiselt selle valmistamisel kasutatud tsement ja teised sideained. Kuna leelis-räni reaktsioon moodustub ühelt poolt täitematerjalis sisalduva reageeriva räni ja teiselt poolt betoonis oleva leelise vahel, siis on sideainena kasutatav tsement üks peamistest komponentidest leelis-räni reaktsiooni kujundamisel. Sõltuvalt kogusest, avaldavad

leeliselisusele mõju ka betooni valmistamisel kasutatud lisaained nagu lendtuhk, räbu, õhku manustavad lisandid jms. [11]

Tundub, et seni pole siiski päris üheselt kokku lepitud, millisel määral mõjutab tsemendi leeliselisus ehk $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ leelis-räni reaktsiooni arenemist, mistõttu on katsemetoodikad loodud selles osas mõnevõrra erinevalt. Peamise probleemina tuuakse välja leelise-lekkeid, mis võivad esineda nii katsekehast väliskeskkonda ja vastupidi, kui ka täitematerjali reageerimisel tekkivad täiendavad leelised.

Rahvusvahelise mördipulga paisumiskatse standardi ASTM C 1260-23 kirjelduses tuuakse välja, et tsemendi leeliselisuse mõju katse tulemustele hinnatakse vaieldavaks või minimaalseteks, mistõttu peetakse katsekehade valmistamisel sobivaks ka madala $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ väärtusega (näiteks 0,6%) portland- või komposiit-tsementi. Kuigi meetodika kirjeldust uuendatakse regulaarselt, tuginetakse madala leeliselisusega tsemendi kasutamisel 1987 ja 1990 aastal läbi viidud uuringutele. [12]

ASTM C 1260 meetodikale vastav samasugustele piirmääradele ja mõõtetulemustele tuginev RILEM AAR-2 meetodika kirjelduses on minimaalseks $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ väärtuseks toodud 1,0%, seejuures etalontsemendi leeliselisus meetodika välja töötamisel oli 1,28%. [13]

Värskemate uuringute valguses on alust arvata, et sõltuvalt täitematerjalis olevast konkreetsest reaktiivsest mineraalset või selle kogusest, omab nii tsemendi leeliselisus kui ka $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ mahuline osakaal valmisbetoonis olulist rolli ning avaldab mõju reaktsiooni arenemisele [14]. Näiteks 2019. aastal Pyrex klaasi ja räniliivaga läbi viidud uuringust nähtub, et katsekeha paisumist mõjutab nii temperatuur kui tsemendi leeliselisus. Kui 0,6% leeliselisega valmistatud katsekehad saavutasid 30 °C juures 20 päevaga pikenemise, mis jäi vahemikku ca 0,004–0,01%, siis sama koostisega, kuid 1,2% leeliselisusega katsekehad saavutasid sama aja jooksul pikenemise, mis jäi vahemikku ca 0,01–0,38%. Pikenemise erinevusest saab järeldada, et suurema leeliselisusega tsemendi kasutamisel kasvab leelis-räni reaktsioonist tingitud paisumine. [15]

Reaktsiooni ulatuse määrab peamiselt betooni poorides olev leeliselisus, seejuures on kriitiline pH-tase sõltuv täitematerjali koostisest – teades seda taset, saab kasutatava sideaine osas tehtavate muudatustega, näiteks madalama leeliselisusega tsemendi või leeliselisust vähendavate lisaainete kasutamisega, vähendada poorilahuse leeliselisust ning reaktsiooni aeglustada või isegi vältida. Tüüpiline ülemine piir, pikemaajaliste betoonprismade paisumiskatsetel, näiteks katsemetoodikad RILEM AAR-3 ja ASTM C 1293, on 3–5 kg $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ betooni kuupmeetri kohta. Kuna nimetatud katsed on seni andnud kõige võrreldavamaid tulemusi päriselulise kogemusega, siis on nimetatud piirmääradest lähtuvaid nõudeid rakendatud erineva rangusega mitmetes riikides. [16]

Leelis-räni reaktsiooni pidurdamiseks või ära hoidmiseks betooni tootmisel saab kasutada madalama leeliselisusega tsemente või täiendavaid lisaaineid, näiteks lendtuhka või liitium-soolad. Sideaine osalisel asendamisel lisaainetega seotakse vaba leelis, mistõttu ei ole räniühenditega reageerimiseks vajalikku leelist enam ohtlikul tasemel saadaval. Mitmetes uuringutes rõhutatakse, et lisaainete efektiivsust tuleb siiski alati enne kasutusele võtmist katsetada konkreetsete täitematerjalidega, samuti on oluline hinnata lisaainete mõju betooni tugevusomadustele [17], [18]. Lisaainete katsetamiseks tuleb teha piisavalt eeltööd, eesmärgiga välja selgitada sobilike katsemetoodikate kasutamine, kuna erinevad meetodid võivad anda väga erinevaid, sh. vale-negatiivseid või vale-positiivseid tulemusi. Saadud tulemusi tuleks kindlasti võrrelda sarnaste rahvusvaheliselt läbiviidud uuringutega ning teha adekvaatsed järeldused. [19]

Eestis toodetud tsementide leeliselisus on olnud aja jooksul muutuv, olles peamiselt seotud tsemendi tootmiseks kasutatavate materjalide omaduste ja päritoluga. Kui viimastel aastatel kasutatakse Eestis tsemendi tootmiseks peamiselt Rootsist, Sliite tehasest, imporditud klinkrit, siis enne 2020. aastat kasutati Kundas toodetud portlandtsemendi klinkrit, mille $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ oli mõnevõrra kõrgem. Teine oluline muutus tsemendi leeliselisuse kujunemisel toimus 2019. aastal, kui lõpetati Narva elektrijaama tolm põletuskatelde tuha kasutamine ning asendati nn. keevkihtkatla tuhaga, mille leeliselisus on olnud ligi 20% madalam. Olenevalt põletatud põlevkivi osakaalust tsemendi koostisest, muutub märkimisväärselt kogu tsemendi leeliselisus. Üldistatult saab kokku võtta, et kuni 2019. aastani oli põlevkivikiirtsemendi ja komposiitsemendi (CEM II) $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ 1,5–1,6 ning CEM I $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ 1,1–1,2. Viimase viie aasta jooksul on tsementide leeliselisus seega märgatavalt vähenenud, jäädes ehitustsemendil ja komposiitsemendil (CEM II) vahemikku 1,0–1,2 ning portlandtsemendil CEM I vahemikku 0,85–1,0. [20]

Olemas on ka sulfaadikindel tsement CEM I 42,5N -SR3, mida toodetakse eriklinkrist. Lisaks sulfaadikindluse omadusele on selle tsemendi puhul $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ oluliselt madalam ehk ca 0,5–0,6. [20]

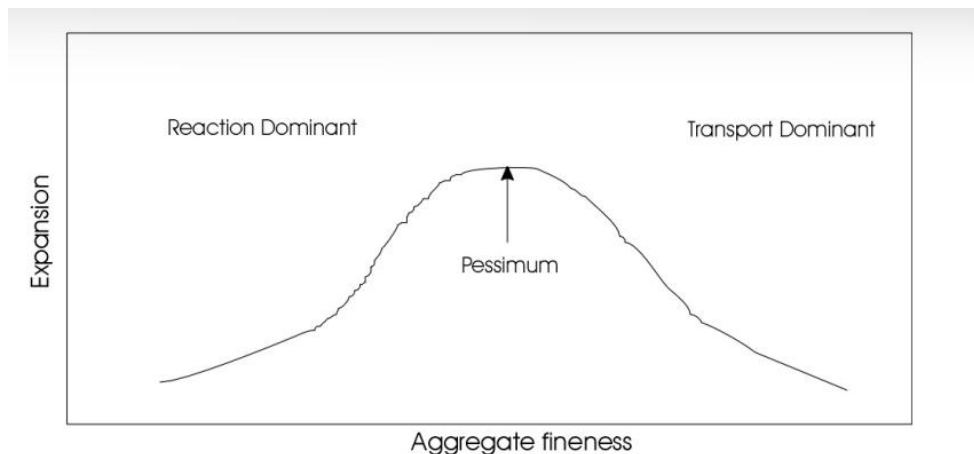
Huvitava faktina võib siinkohal välja tuua 1978. aastal ehitusinstituutide ja -teaduskondade üliõpilastele ning inseneride jt ettevalmistamiseks avaldatud eestikeelse õpiku „Ehitustehnoloogia“ peatüki 7.9.4 „Keemiliste lisandite kasutamine“. Nimetatud peatükis käsitletakse erinevate soolade, näiteks NaCl ja CaCl_2 , soodsat mõju betooni kivinemise kiirendamisel [21]. Kuigi on teada, et soolad omavad negatiivset mõju betoonkonstruktsioonidele nende eksploatatsiooniperioodil, pole piisavate andmete puudumise tõttu hetkel teada, kas või millisel määral võisid tolleaegsed ehitusvõtted soodustada leelis-räni reaktsiooni pahaaimamatut forsseerimist.

1.4 Täitematerjali roll ASR arenemisel

Leelis-räni reaktsiooni arenemise teine oluline eeldus on reaktsioonivõimelise mineraali olemasolu täitematerjalis. Tingituna geoloogilistest eripäradest, võib reaktiivsete mineraalide esinemine kivimis olla piirkonniti erinev ning kivimi mineraloogiline koostis tuleks kindlaks teha laboratoorsete katsetega. Oluline on silmas pidada asjaolu, et väliselt sarnasena näivad kivimid võivad koosneda siiski erineva struktuuriga mineraalidest, mistõttu ei saa hinnanguid anda pealiskaudse vaatlusega, vaid alustada tuleks põhjalikust petrograafilisest analüüsist, millele vajadusel järgnevad täitematerjaliga valmistatud mördipulkade või -prismadega paisumiskatsed. [22]

Räni esineb looduslikult mitmel pool ning väga paljude erinevate kivimite koostises, kuid seejuures ei ole alati tegemist uuritavat reaktsiooni põhjustava räni vormiga, mis betooni poorides oleva lahusega reageerides kahjustusi põhjustaks. Näiteks mineraalses kvartsis on räni keemilised sidemed tavapäraselt korrapärased ja tugevad, mistõttu sidemete purunemist ja uute moodustumist leelise ionide vahel üldiselt ei toimu. Seevastu korrapäratu (amorfse) keemilise struktuuriga ränisisaldusega mineraalide, nagu opaali, tulekivi või kristobaliidi, samuti ka tehisklaasi, struktuursed sidemed on suhteliselt nõrgad ja ebakorrapärased, seetõttu leeliselisega reageerides kergelt muutuvad. [1]

Lisaks eelnevale võib täitematerjalide erineva reageerivuse põhjus peituda selle terastiku suuruses, mis põhjustab nn *pessimum* efekti. Efekti olemus seisneb reageeriva mineraali pinnal olevate pooride ja seda mineraali ümbritseva tsemendipasta pooride mahu omavahelisest suhtest, mille kõige optimaalsema taseme saavutamisel avaldub suurim võimalik räni geelist tingitud materjali paisumine. Tsemendipastas olevate pooride maht ei sõltu tera suuruselt ning püsib muutumatuna, kuid tera suuruse muutudes terade pinnal olevate pooride hulk võrrelduna täitematerjali kogumahuga suureneb. Võttes kindla mahulise hulga täitematerjali ning vaadeldes selles sisalduvate terade pindala, siis väiksemate terade puhul on terade kogupindala suurem, kui seda oleks suuremate terade puhul. Kuna reaktsioon tekib täitematerjali tera pinnal asuvates poorides, siis on seetõttu reageerivat pinda ja poore, milles geel tekib, rohkem. *Pessimumi* tipp asub piirkonnas, kus tera pinnal tekkiv geeli hulk on piisavalt suur, et pooridesse mitte mahtuda ning tekib surve, mille tagajärjel toimub betooni purunemine. Reaktsiooni kujunemise seisukohast liiga väikese tera puhul tekib ränigeeli piisavalt väikeses koguses, et sel on võimalik edasi paigutada ümbritseva tsemendipasta pooridesse ning paisumine on vähene. Tera suuruse edasisel vähendamisel muutub tekkiva ränigeeli hulk võrreldes tsemendipastas olevate pooridega nii väikeseks, et kogu tekkiv geel mahub tera ümbritsevatesse tsemendipasta pooridesse ja paisumist ei teki. Järgneval joonisel (Joonis 9) on visuaalselt kujutatud maksimaalse paisumise sõltuvus täitematerjali tera suuruselt. [23], [24]



Joonis 9. Paisumise sõltuvus täitematerjali tera suuruselt [23]

Kuigi Eestis betooni peentäitematerjalidena kasutatava liiva osas ei ole kehtestatud täiendavaid piirkondlikke nõudeid liivade mineraloogilise koostise täpsemaks tuvastamiseks, siis naaberriikide kogemuste ja kasutusele võetud meetmetele tuginedes saab öelda, et vajadus põhjalikumaks uurimiseks on tegelikult olemas. Varasemalt on uuritud Eesti geoloogilist aluskihti erinevatest eesmärkidest tulenevalt varieeruva põhjalikkuse ja fookusega, kuid kirjalikest allikatest nähtub [25], et Eesti liivade mineraloogilise koostise osas puudub piisav teave, mille põhjal võiks teha esmaseid üldistavaid järeldusi leelis-räni reaktsiooni tekkimise eelduste olemasolu suhtes nii lühema kui pikema perioodi jooksul.

Betooni spetsifitseerimist, toimivust, tootmist ja vastavust käsitlev standard EVS-EN 206:2014+A2:2021 või betoonis kasutatavate täitematerjalidele esitatavaid nõudeid käsitlev standard EVS-EN 12620:2005+A1:2008 ei sisalda konkreetseid juhiseid leelis-räni reaktsiooni vältimiseks või ennetamiseks, mille üheks osaks võiks olla täitematerjali klassifitseerimine mineraloogilise koostise põhjal. Mineraloogiline määramine annab selgema ülevaate kivimi koostisest, kuna pealtnäha sarnased kivimid võivad olla leelis-räni reaktsiooni mõistes väga erineva reaktiivsusega, kuna sisaldavad mõnevõrra erinevaid mineraale. Täitematerjalide reageerivuse liigitamine peaks toimuma vastavalt selle leiukoha piirkondlike eripärasid arvesse võttes, kuna piirkondade erineva geoloogilise kujunemise tingimusena võib vaadeldav kivimi tüüp ühes riigis olla täiesti kahjutu samas teises riigis esile kutsuda reaktsiooni.

Vaatamata piirkondlikele eripäradele, on siiski teada mineraale ja kivimeid, mida saab tõenäoliselt reageerivateks pidada. Erinevad nimekirjad reageerivatest kivimitest ja neis sisalduvatest mineraalidest on leitav erialases kirjanduses, standardites ja juhendmaterjalides [16]. Näitena olgu toodud Ühendkuningriigi madala reaktiivsusega klassifitseeritud gneiss ja graniit [26], millede puhul Rootsis läbiviidud uuringust nähtub,

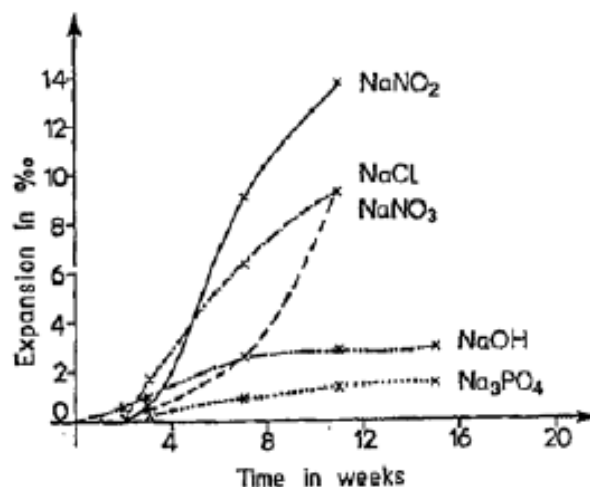
et sõltuvalt kivimi mineraloogilisest eripärast on leelis-räni reaktsiooni iseloomustava katsekeha pikenemine maksimaalse lubatud piirmäära tasemel täiesti võimalik. [7]

Betooni tootmisel kasutatavate täitematerjalidele on rahvuslikult konkreetsemad leelis-räni reaktsiooni käsitlevad nõuded ja piirmäärad esitatud Rootsi standardites SS-EN 12620 ning SS 137003, milles esitatakse selged nõuded võimalike leelisega reageerivate mineraalide avastamisel ning standardis toodud piirmäärade saavutamisel. Leelis-reaktiivsetena on Rootsi moondekivimitest tuvastatud näiteks müloniit ja gneissne granitoid; peeneteralised metamorfsed vulkaanilised kivimid ning settekivimitest metamorfne liivakivi, kvartsiit või kvarts-liivakivi. [7]

1.5 Keskkonna roll ASR kujunemisel

Pole kahtlust, et keskkonnatingimused, milles betoon paikneb, võivad avaldada sellele negatiivset mõju, mille tõttu on kohalduvates standardites välja toodud keskkonnast tingitud nõuded, millele betoon peab vastama. Peamiselt vaadeldakse seejuures temperatuuri, niiskust ja keemilisi tegureid.

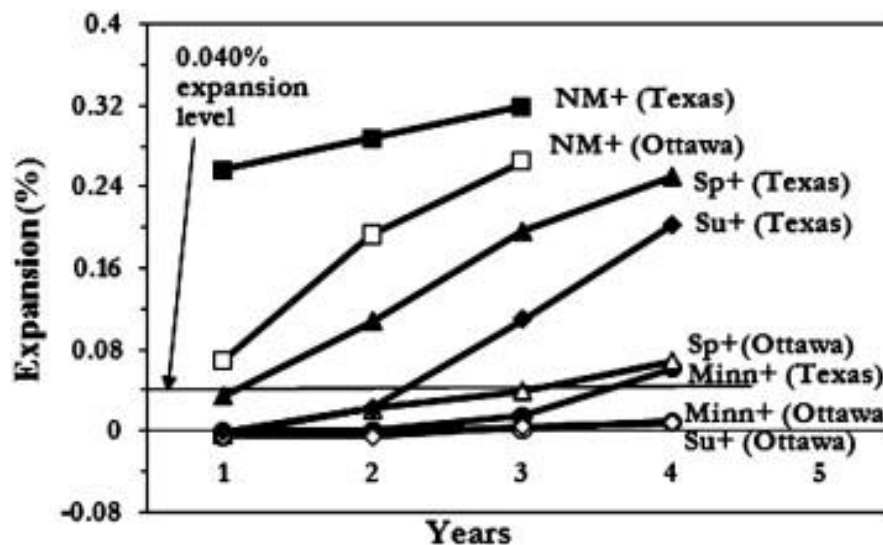
Kuigi täitematerjalide reageerivuse hindamiseks on välja töötatud laboratoorsed katsed, siis mõningate uuringute põhjal on avaldunud, et tegelikus eksploatatsiooni keskkonnas võib täitematerjalidest tingitud reaktsioon olla intensiivsem, kui laboritingimustes. Näiteks SINTEF-i 2006. aastal avaldatud PARTNER programmi aruandes kirjeldatud uuringu tulemustest selgub, et laboratoorsete paisumiskatsete puhul leeliselise keskkonna võimendamiseks kasutatav NaOH pigem lahustab täitematerjalis sisalduvat reaktiivset tera, kui moodustab räni geeli. Seevastu juhul, kui leeliselise keskkonna loomiseks on kasutatud NaCl, näitavad katsekehad ulatuslikumat paisumist (Joonis 10). [11]



Joonis 10. Naatriumisooladega lahuses hoitud mördiprismad näitavad suuremat paisumist, kui naatriumhüdroksiidi lahuses [11]

Betoonkonstruktsioonide loomulikus keskkonnas on lisanduvate leeliste allikateks, milles NaCl sisaldub, näiteks libeduse tõrjel kasutatavad soolad või merevesi. Eelnevalt tulenevalt, on oluline arvestada täitematerjalide kasutatavuse hindamisel asjaoluga, et kuigi laboratoorseid katseid peetakse tihti võimendatuks, millel puuduvad võrreldavad seosed päriseluliste situatsioonidega, siis on võimalik, et konstruktsioonile mõjuvad keskkonnast tingitud karmid ekspluatatsiooni tingimused võivad tegelikkuses põhjustada veel suuremaid kahjustusi. [11]

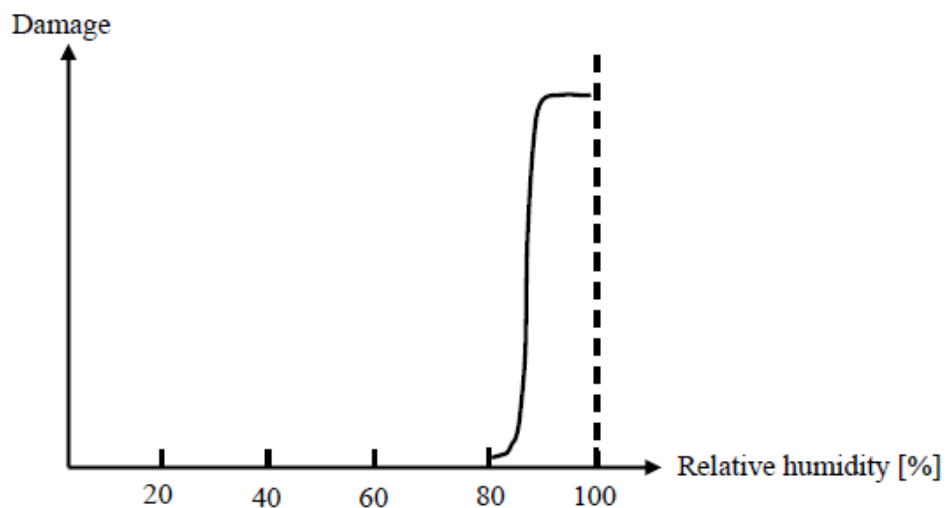
Kliima rolli ASR arenemisel uuriti 2009. aastal Ameerikas Ühendriikides, samuti võrreldi omavahel erinevaid katsetoodikaid ning võimalikke kaitsemeetmeid leelis-räni reaktsiooni vähendamiseks. Erineva reageerivusega täitematerjalide uurimiseks valmistati betoonprismad vastavalt standardile ASTM C 1293, mördipulgad vastavalt standardile ASTM C 1260 ning neid hoiustati vastavalt katsetoodikale. Standardi ASTM C 1293 kohaselt valmistatud katsekehad paigutati geograafiliselt ja kliimaatiliselt erinevatesse piirkondadesse – Ottawa piirkonda Kanadas ja Austini piirkonda Texas, Ameerika Ühendriikides. Tulemustest nähtub, et keskmiselt soojema kliimaga Austini piirkonnas välitingimustes hoiustatud betoonprismad näitasid katseperioodi jooksul suuremaid paisumistulemusi, kui samal meetodil valmistatud katsekehad külmema kliimaga Ottawa piirkonnas (Joonis 11).



Joonis 11. Kliimaatiliselt erinevatesse piirkondadesse paigutatud katsekehade paisumise erinevus nelja-aastase katseperioodi vältel viitab keskkonna mõjule ASR arengus [27]

Autorid järelavad uuringu tulemustest, et leelis-räni reaktsiooni põhjustavad täitematerjalid käituvad erinevates kliimaatilistes tingimustes erinevalt, mistõttu võib kahjustav mõju lisaaineteta betoonist valmistatud konstruktsioonidele avalduda soojemas keskkonnas 4-5 korda kiiremini kui jahedamas keskkonnas. [27]

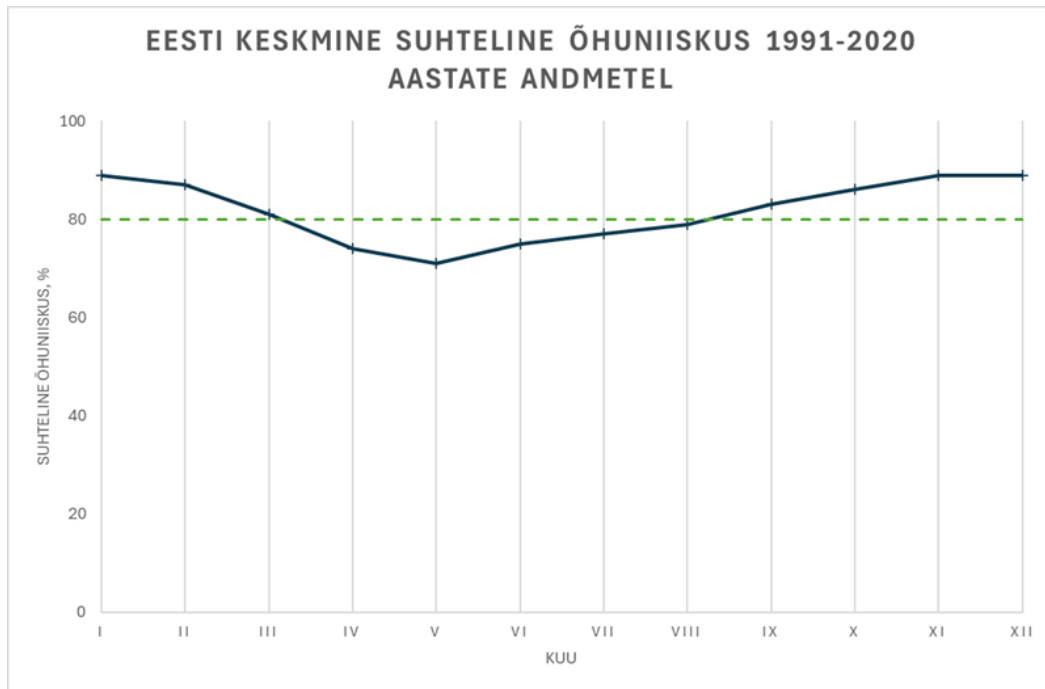
Lisaks õhutemperatuurile, leitakse uuringutes, et leelis-räni reaktsiooni arenemist mõjutab ümbritseva keskkonna õhuniiskus. Kuigi niiskuse täpsema mõju suuna osas tehakse kohati vastanduvaid järeldusi, siis valdavalt on katseliselt kinnitatud seisukohad, et kõrgem niiskuse osakaal tingib leelis-räni reaktsioonist tingitud paisumiste kasvamist. Järgneval joonisel (Joonis 12) on näha, et betooni suhtelisel niiskusel alla 80% on reaktsiooni esinemine pigem ebatõenäoline, seevastu RH 80% taseme ületamisel võib täitematerjalist tingitud reaktsioon aset leida kui ka teised teadaolevad eeltingimused (piisav leeliselisus ja reageeriva täitematerjali olemasolu) on täidetud. [11]



Joonis 12. Suhtelise niiskuse mõju leelis-räni reaktsioonist tingitud kahjustuste arenemisele [11]

Ilmateenistuse andmetel on suhtelise õhuniiskuse tase üle Eesti mõnevõrra varieeruv, olles kuude lõikes keskmisest madalam sisemaal ning kõrgem ranniku lähedastes piirkondades. Järgnevalt graafikult (Joonis 13) nähtub, et üle-eestiline keskmine suhteline õhuniiskus jääb 1991–2020 aasta andmetel üle 80% seitsmel kuul aastas. [28]

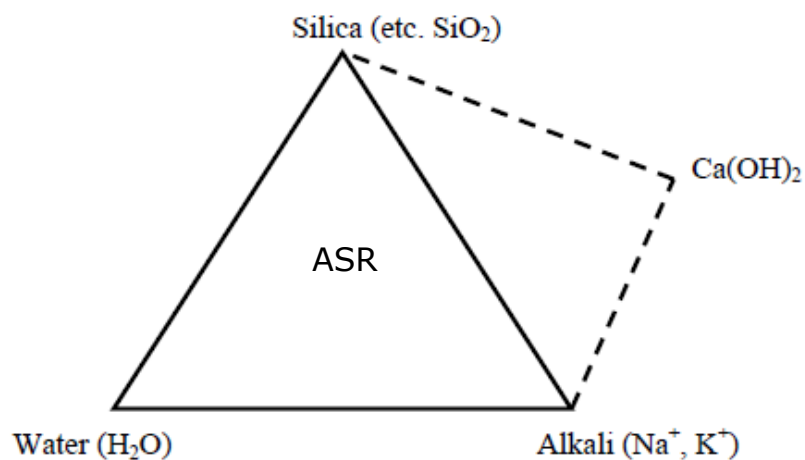
Eelnevast tuleks järeldada, et keskkonna mõju suhtelise õhuniiskuse näol on leelis-räni reaktsiooni arenemist pigem soosiv, mistõttu tulevikus sellekohaste uuringute kavandamine Eestis on selgelt põhjendatud.



Joonis 13. Eesti keskmine suhteline õhuniiskus ajavahemikul 1991-2020 jäi ilmateenistuse andmetel alla 80% viiel kuul aastas [28]

1.6 ASR ennetamine

Leelis-räni reaktsiooni ennetusmeetmete välja töötamise ja rakendamise alused põhinevad vähemal või rohkemal määral teadaolevatel reaktsiooni tekkimist või arenemist põhjustavate tegurite eemaldamisel või nende mõju vähendamisel. Üldiselt ollakse veendumusel, et reaktsiooni tekkimiseks peaks korraga olema esindatud kolm põhilist tegurit, nagu on näidatud järgneval joonisel (Joonis 14), millele lisaks kahtlustatakse ka $\text{Ca}(\text{OH})_2$ rolli protsessis. [11]



Joonis 14. Leelis-räni reaktsiooni arenemiseks vajalikud tegurid [11]

Kõige kindlamaks meetmeks leelis-räni reaktsiooni ennetamisel saab paratamatult pidada reageerivaid räniühendeid sisaldava täitematerjali mitte kasutamist, kuid erinevatel põhjustel ei ole selline lahendus alati võimalik. Järjest kasvav nõudlus betooni järele [29] võib tekitada mitte-reageeriva materjali defitsiiti või liigseid ehituskulusid, mistõttu täitematerjali kasutamise vältimise kõrvale tuleb leida ka teisi võimalusi leelis-räni reaktsiooni ennetamiseks.

Positiivset mõju ASR ennetamisel on leitud erinevate lisandite kasutamisel betooni või tsemendi tootmisel. Näiteks hiljuti tehtud uuringust nähtub, et isegi kõrge leeliselisusega tsemendi kasutamisel aitab lendtuha lisamine vähendada või ära hoida leelis-räni reaktsioonile omaseid tunnuseid [18]. Peamised põhjused seisnevad betooni poorilahuse leeliselisuse ja vaba kaltsiumi vähenemisel, kuna lendtuhaga lisanduv ränidioksiid reageerib kaltsiumhüdroksiidiga moodustades sekundaarset kaltsiumsilikaathüdraati, mille struktuuris võivad seonduda ka leelismetallide Na^+ ja K^+ ioonid. Lisaks omab moodustunud kaltsiumsilikaathüdraat positiivset mõju ka betooni tugevusele, olles kivistunud tsemendikivimi peamine tugevust andev sideaine [30].

Betooni valmistamisel lisaainete kasutamise kavandamisel tuleks siiski eelnevalt teostada põhjalikud uuringud ekspluatatsioonikeskkonna tingimusi arvesse võttes, sest erinevates tingimustes võib avalduda, et meetmed, mis ühel juhul võivad leelis-räni reaktsiooni arenguid takistada, võivad teises piirkonnas üldse mitte toimida või teha seda kordades halvemaks. [27]

Ühe potentsiaalse lisandina on uuritud liitiumi. Erinevalt naatriumi- ja kaaliumi ionidest arvatakse, et liitium moodustab ränidioksiidiga mittereageeriva ja -paisuva liitiumsilikaadi, mis omakorda tekitab kaitsekihi allesjäänud reaktiivse ränimineraali ümber, pärssides selliselt edasiste kahjulike reaktsioonide arenemist. 2022. aastal läbi viidud uuringus keskendusid autorid küll peamiselt sobiva mudeli loomisele, läbi mille oleks edaspidi võimalik leida optimaalne liitiumi kogus saavutamaks võimalikult häid tulemusi leelis-räni reaktsiooni pidurdamiseks või ära hoidmiseks, kuid läbiv analüüs ja teostatud katsed kinnitasid liitiumi positiivset mõju. Teostatud katsetega jõudsid autorid arvutusmudolini, millega ennustatud tulemused kattusid väga lähedalt realselt saavutatud paisumisega. [31]

Kuigi käesolevas töös viidatud uuringutes jõuti rahuldavate tulemusteni, kinnitasid nende autorid, et lisandite kasutamiseks ennetavate meetmetena tuleb neid eelnevalt põhjalikult katsetada konkreetsete täitematerjalidega, mille omadused võivad sõltuvalt kasutuskohast väga palju erineda. Lisandite kasutamisel leelis-räni reaktsiooni tekkimise takistamiseks, on oluline hinnata nendega kaasnevat mõju ka muudele betooni omadustele, näiteks survetugevusele, ilmastikukindlusele või vastupidavusele karboniseerumisele. [31], [26]

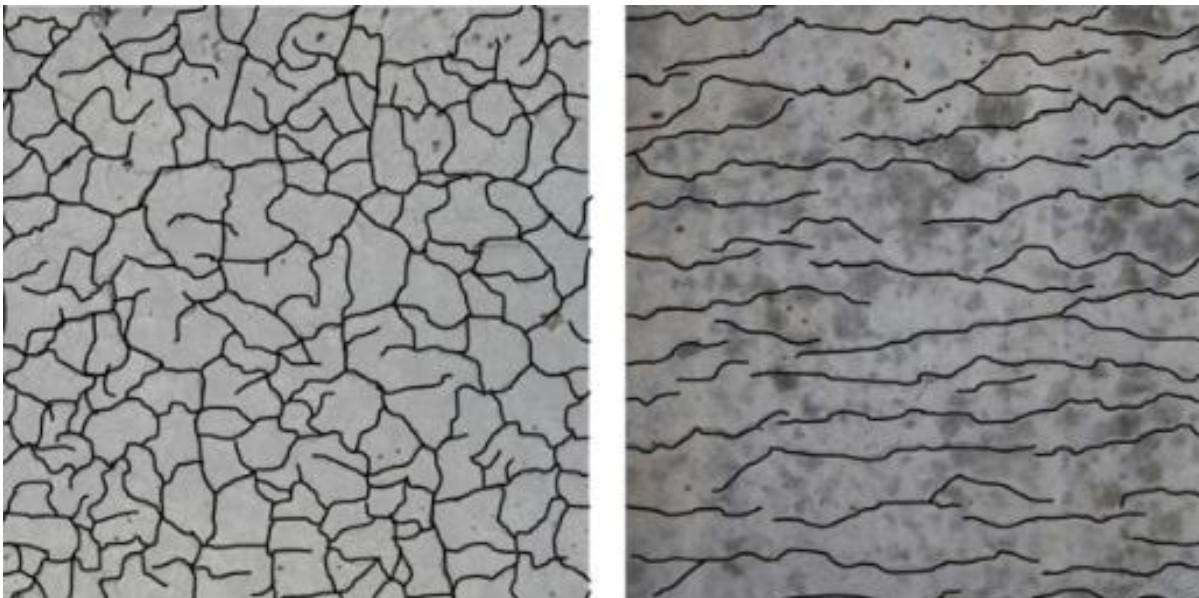
2 ASR OLEMASOLEVATEL KONSTRUKTSIOONIDEL

2.1 Tuvastamine

Leelis-räni reaktsiooni tuvastamine konstruktsioonidel on oluline faktor saamaks informatsiooni võimaliku reaktsiooni esinemise ulatuse, konstruktsiooni eluea ja võimalike parandusmeetmete ja hooldusvajaduse kohta. Visuaalsel vaatlusel tuvastatavad märgid nagu betooni paisumine või pragunemine, aga ka pinna värvimuutused ja pinnalt eralduvad tükid võivad olla hoiatavad märgid konstruktsioonis aset leidvast leelis-räni reaktsioonist. Ühtedena peamistest ASR indikatsioonidest, mida visuaalselt jälgida, on konstruktsioonide pragunemine ja paisumine, kuid siinkohal tuleb hoiduda ennatlikke järelduste tegemisest.

Pragunemise käigus tekib betooni pinnale pragude võrgustik. Vähese või puuduva terassarruse olemasolul on võrgustik tavaliselt tiheda ning mõnevõrra ebaühtlase jaotusega. Raudbetoonkonstruktsioonide puhul mõjutab pragude teket ning nende paiknemist terassarrus ning pinnal nähtavad praod paiknevad konstruktsioonis olevate terasvarraste suunaliselt. Visuaalsel vaatlusel tekkiva kahtluse korral tuleb leelis-räni reaktsiooni olemasolu kinnitamiseks või välistamiseks betooni põhjalikumalt edasi uurida. [32]

Järgneval joonisel (Joonis 15) on kujutatud leelis-räni reaktsiooni tagajärjel tekkinud armeerimata ja armeeritud betoonpindadele iseloomulik pragunemispiltide erinevus.



Joonis 15. ASR poolt põhjustatud iseloomulik pragunemispilt armeerimata betoonpinnale vasakul, armeeritud pinnale paremal [33]

Järgneval fotol (Foto 2) on kujutatud võrgustikku meenutav pragunemispilt tammi betoonkonstruktsioonil ning ülejärgmisel fotol (Foto 3) on kujutatud sillakonstruktsiooni pragunemine, mis kulgeb sarrusega paralleelses suunas. Sellised on visuaalselt tuvastatavad leelis-räni reaktsiooni tagajärjed.



Foto 2. Näide ASR kahjustuse tagajärjel tekkinud võrkpragunemisest sarrustamata betooni pinnal [34]



Foto 3. Näide ASR kahjustuse tagajärjel tekkinud peasarruse suunda järgivast pragunemisest sillakonstruktsiooni pinnal [35]

Pragunenud betoonpindade uurimisel võib neile esmalt läheneda keemilisi lahuseid sisaldava testkomplektiga. Sellised indikaator-testid on tavaliselt seotud mingi kindla keemilise elemendi tuvastamisega, mis indikaatorvedelikus sisalduva kemikaali toimel pigmentatsiooni esile kutsub. Leelis-räni reaktsioon on tihedalt seotud betooni leeliselise keskkonnaga ning reaktsiooni tagajärjel tekkinud geel koosneb teatud kindlatest leelismetallidest. Reaktsiooni komponentide tuvastamiseks kasutatakse näiteks koobaltnitritit, mis kaaliumi olemasolul kollaseks või pruunikas-kollaseks värvub [36]. Lõpparuandes „Teedeehituslik betoon kasutuseaga 100 aastat ja rohkem“ tutvustatakse näiteks USAs välja töötatud kahte erinevat kemikaali sisaldavat ASR-i tuvastamise komplekti (Foto 4), millega betoon ühe komponendi toimel kollaseks ning teise komponendi toimel roosaks värvudes annab indikatsiooni leelis-räni olemasolust ja edasi arenemise võimalikkusest [26].

Kui on vaja suhteliselt kiiret esmast indikatsiooni leelis-räni reaktsiooni võimaliku esinemise kohta, siis kirjeldusest lähtuvalt võiks keemiliste indikaatorite komplekt olla hea alternatiiv põhjalikule petrograafilisele uuringule. Indikaatoritestiga saadud reaktsiooni olemasolule viitava tulemuse korral tuleks selle ulatuse täpsemaks hindamiseks teostada põhjalikum laboratoorne analüüs.



Foto 4. Indikaatorvedelikega testkomplekt ASR-i tuvastamiseks [37]

Mitmed näited sellest, kuidas leelis-räni reaktsiooni poolt kahjustunud konstruktsioonid välja näevad ning juhised visuaalseks tõlgendamiseks, on koondatud USA Transpordiameti tellimusel koostatud juhendmaterjalidesse „*Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook*“ [38] ja „*Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book*“ [1].

2.2 Näited

Viimase 30 aasta jooksul on Eesti lähiriikides leelis-räni reaktsiooni uurimisele hakatud järjest rohkem rõhku panema.

Kui Norras ja Rootsis avastati esimesed kahjustunud konstruktsioonide juhtumid juba 1980-ndatel aastatel ja järkjärguliselt hakati probleemiga tõsisemalt tegelema, siis Soomes ilmusid esimesed ettepanekud põhjalikemateks uuringuteks teadaolevalt alles 2009. aastal, kuigi üksikuid juhtumeid oli tuvastatud juba 1990-ndate aastate keskpaigas. [39]

2011. aastal alanud uuringu käigus tuvastati Soomes kokku 56-l juhul selgeid leelis-räni reaktsiooni kahjustuse tunnuseid nii elu- ja tööstushoonetel, sildadel kui ka teistel rajatistel. [39]

2013. aastal Riias toimunud töötoas tutvustasid Soome esindajad mõningaid seni avastatud juhtumeid. Näiteks Paltanmäki sillapostide purunemine 2004. aastal, mille põhjustas tekiplaadi leelis-räni reaktsioonist tingitud pikenemine (Foto 5) ning Mäntylä ASR tagajärjel kahjustunud sillatekk ja servaprussid, millest sillatekile teostati osaline renoveerimine ja servaprussid asendati täielikult (Foto 6 ja Foto 7) 2006. aastal. [7]



Foto 5. Raudbetoonist tugiposti otsa purunemine ASR mõjul pikenenud tekiplaadi tõttu

[7]



Foto 6. ASR kahjustusega sillateki osaline renoveerimine [7]



Foto 7. ASR kahjustusest tingitud servaprusside asendamine [7]

Samas töötoas osalenud Läti esindaja on arvamusel, et betoonkonstruktsioonis sildade seisukord on kriitilise tähtsusega, mistõttu peaks läbi viima iga-aastaseid ülevaatuseid. Senistele uuringutele tuginedes tõdes ta, et leelis-räni reaktsioonist tingitud kahjustusi on tuvastatud nii vanemate (Foto 8) kui ka suhteliselt uute sildade (Foto 9) puhul. Samas on Lätis ka näiteid ligi 100 aastastest sildadest, millel puuduvad igasugused märgid leelis-räni reaktsiooni olemasolust. [7]



Foto 8. ASR kahjustusega 1970. aastatel ehitatud sild Lielupe jõel [7]



Foto 9. ASR põhjustatud võrkpraod Via Baltical asuva silla servaprussil [7]

3 LABORATOORSED KATSED

3.1 Levinud meetodikad

Leelis-räni reaktsiooni täitematerjalist tingitud ohu hindamiseks on rahvusvaheliselt välja töötatud mitmeid standardseid katsemetoodikaid. Kõikide meetodikate ühine eesmärk on selgitada välja täitematerjalide leeliselises keskkonnas reageerivuse potentsiaal, läbi mille tuletatakse reaktsiooniohu hinnang ja rakendatakse võimalikke ennetusmeetmeid betoonkonstruktsioonide kahjustuste vältimiseks. Meetodiliselt jagunevad läbiviidavad katsed üldiselt kaheks: terastiku koostise määramine petrograafilise analüüsiga ning erinevates katsetingimustes läbiviidavad laboratoorsed paisumiskatsed (Tabel 1). Meetodika valiku ja tulemuste tõlgendamise abistamiseks on RILEM Tehnilise Komitee 2016. aastal avaldatud aruandes TC 219-ACS pealkirjaga „*RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures*“ [13] toodud juhendmaterjal RILEM AAR-0. [11], [13], [40]

Tabel 1. Enamlevinud meetodikad

Meetodika	Katsekeha	Katseaeg	Temperatuur
ASTM C 295 / RILEM AAR-1	Õhik	-	-
ASTM C 1260 / RILEM AAR-2	Mördipulk	16 päeva	80 °C
ASTM C 1293 / RILEM AAR-3	Betoonprisma	12 kuud	38 °C

Üheks esmastest võimalikest sammudest täitematerjali potentsiaalse reageerivuse hindamisel on RILEM AAR-1 või ASTM C 295 meetodikal põhinev kivimite petrograafilise analüüs. Uuringu eesmärk on tuvastada reageeriva kvartsi mineraalide sisaldus täitematerjalis, mille järel klassifitseeritakse täitematerjal mitte-reageerivaks, võimalikult reageerivaks või reageerivaks. Meetodiliselt tähendab see uuritavast täitematerjalist valmistatud õhikute mikroskoopilist uurimist (Foto 10) ning vastavalt mineraalide erinevale valguspeegeldusele ja filtrite kasutamisele tuvastatakse probleemsed mineraalid (Foto 11). Petrograafilist uuringut kasutatakse ka ASR tuvastamiseks betooni poorides (Foto 12). Euroopas laialdast kasutust leidva RILEM meetodika puhul tähistatakse täitematerjalid eelnevale vastavalt klassi I-S, II-S või III-S kuuluvaks. Petrograafilise analüüsi läbiviija peaks kindlasti omama põhjalikke eelteadmisi ja teatavat kogemust reageerivatena tuvastatud mineraalide avastamiseks. [5], [13], [41]

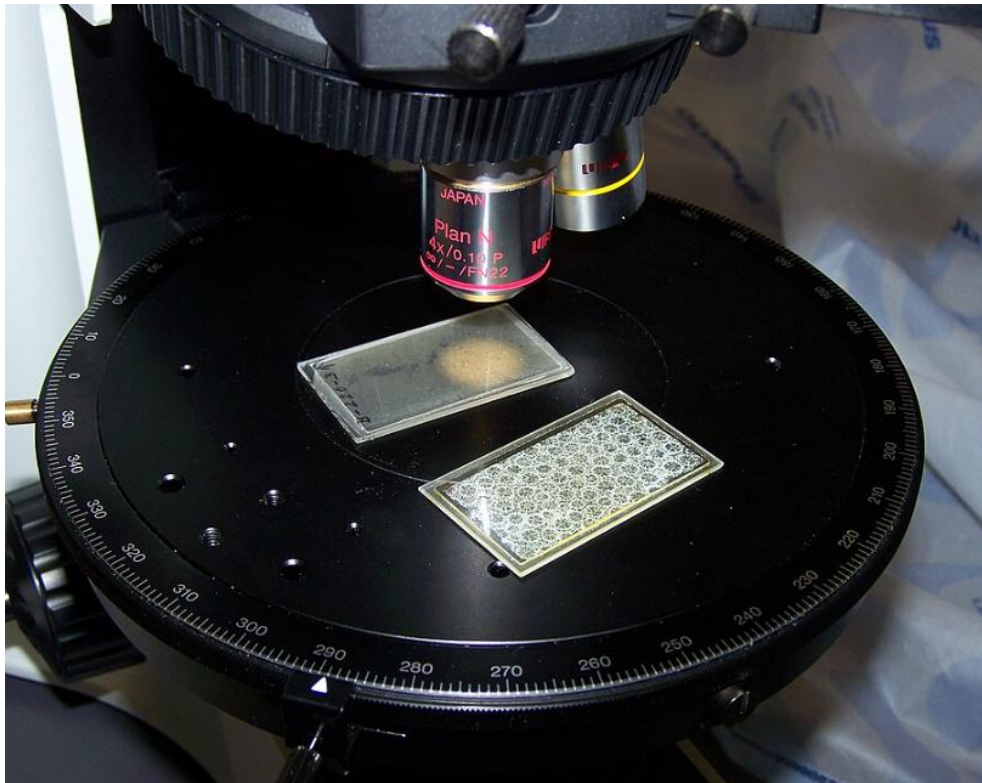


Foto 10. Õhikute uurimine petrograafilise mikroskoobiga [42]

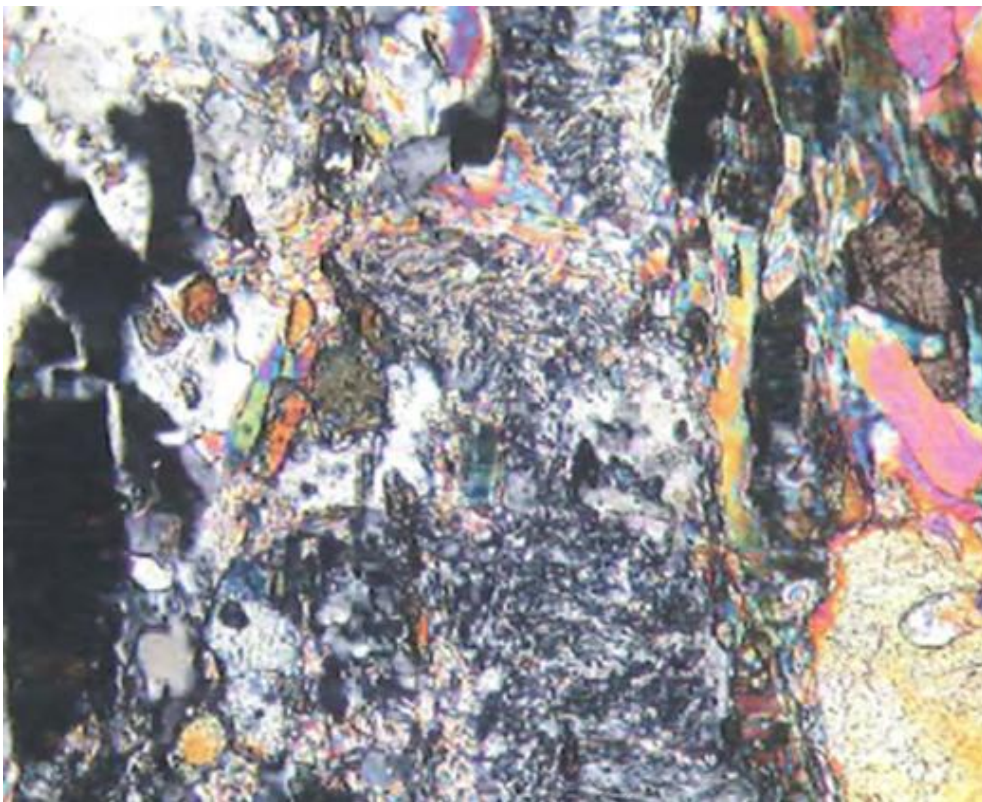


Foto 11. Mikro-krüptokristalliline kvarts gneisis [43]

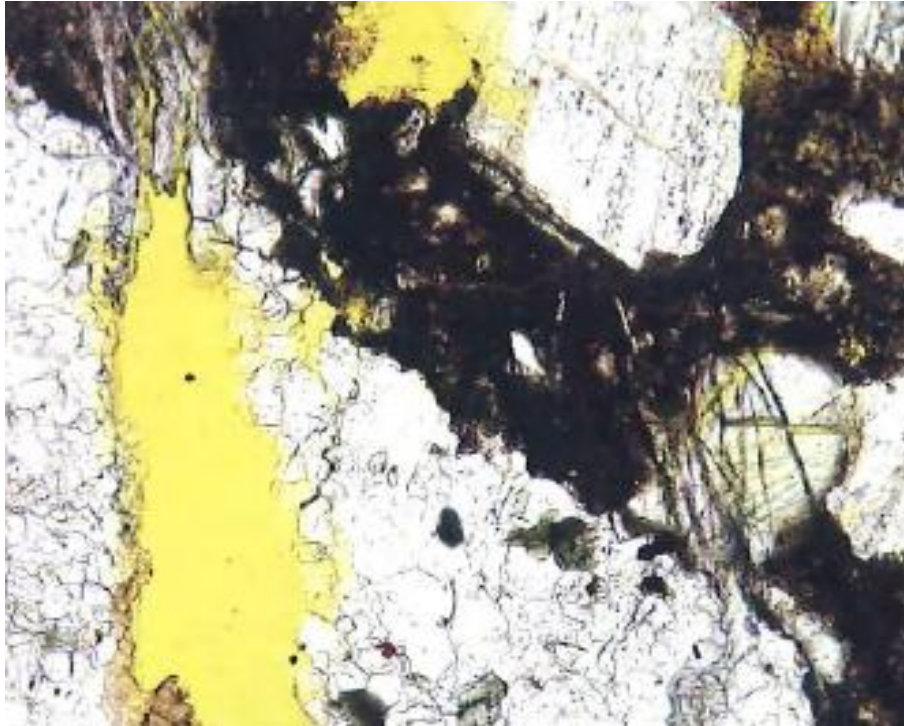


Foto 12. ASR geel (tumedam ala) täitematerjali tera ümber [43]

ASTM C 1260 ja RILEM AAR-2 on 16 päeva kestvad kiirendatud mördipulga katsed, mille eesmärk on hinnata täitematerjalide potentsiaalset reageerimisvõimet leelistega. ASTM C 1260 meetodika näeb ette $25 \times 25 \times 285$ mm mõõtmetega mördipulkade valmistamist. RILEM AAR-2 meetodika kohaselt valmistatakse katsekehad mõõtmetega $25 \times 25 \times 285$ mm (Foto 13) või $40 \times 40 \times 160$ mm, mille järgi täpsustatakse valitud meetodika tähistamist vastavalt RILEM AAR-2.1 või RILEM AAR-2. Peale valmistatud mördipulkade 24 tunnist tardumist need eemaldatakse vormidest, mõõdetakse ning asetatakse destilleeritud veega täidetud anumasse järgnevas 24 tunniks $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ahju. 24 tunni möödumisel katsekehad taas mõõdetakse (Foto 14) ning asetatakse 1M NaOH lahusega anumasse järgmiseks 14ks päevaks $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ahju.

Mördipulkade pikenemist mõõdetakse vastavalt vajadusele vahepealsetel perioodidel, kuid kindlasti 14. päeval alates NaOH lahusesse paigutamist. Mõõtmistega registreeritud mördipulga protsentuaalse pikenemise järgi antakse hinnang täitematerjali reageerivuse kohta. ASTM C 1260 ja RILEM AAR-2.1 mõõtmetele vastavate katsekehade pikenemine alla 0,10% viitab tõenäoliselt mitte-reageerivale ja üle 0,20% tõenäoliselt reageerivale. Tulemusi, vahemikus 0,10%–0,20%, tõlgendatakse kui reageerivus ebaselge, mille puhul on vajalik pikema kestusega meetodika kohane edasine katsetamine. Lisaks eelnevale leitakse, et tulemuste tõlgendamisel võiks kasutada ka matemaatilist mudelit, mis ei keskendu niivõrd pikenemisele endale vaid pikenemise muutusele ajas. Mudeli kasutamise eeliseks oleks muidu ebaselge reageerivusega vahemikku jäävate tulemuste konkreetne

tõlgendamine, aeglaselt reageerivate täitematerjalide usaldusväärsem tuvastamine ja reaktsioonist tingitud võimalike arengute prognoosimine päriselulises keskkonnas. Lühikese katseperioodi ja suhteliselt suure täpsusega kiirendatud mördipulgakatse on kasutusel otseselt või mingis osas osaliselt modifitseerituna mitmete riikide rahvuslike nõuete hulgas. [9], [12], [13], [26]



Foto 13. 25×25×285 mm mördipulgad enne vormist eemaldamist



Foto 14. Mördipulgad veevannis ja laboratoorne võrdlusmõõteseade (*length comparator*)

Sõltuvalt eesmärgist ja vajadusest teostatakse katsed ka vastavalt ASTM C 1293 või RILEM AAR-3 meetodikale. Need on pikemaajalised betoonprisma katsed, mis on ainsa meetodikana sobivad lisaainete toimivuse hindamiseks või jätkukatse meetodikana ASTM C 1260 (RILEM AAR-2) kiirendatud mördipulgakatsesele, kui täitematerjali reageerivus jäi ebaselgeks. Tavaliselt üks aasta kestva katseperioodi jooksul hoiustatakse 75 × 75 × 285 mm prismasid 38 °C ja RH > 95% keskkonnas. Sarnaselt mördipulga katsetele, on katsetulemuste tõlgendamiseks vajalik registreerida katsekeha pikisuunaline paisumine, mille põhjal tehakse järeldused. Lineaarne pikenemine üle 0,04% viitab potentsiaalselt reageerivale materjalile ning rakendada tuleks sobivaid ennetusmeetmeid. Betoonprisma katse tulemused on uuringutes andnud kõige paremaid reaalse eluga võrreldavaid tulemusi, kuid pika kestvuse tõttu ei ole see eelistatud valik. Lisaks tuuakse aeg-ajalt välja seetõttu tuvastatud probleeme leelise lekkimisega katsekehadest, mis võib saadud tulemusi mõjutada. [13], [40]

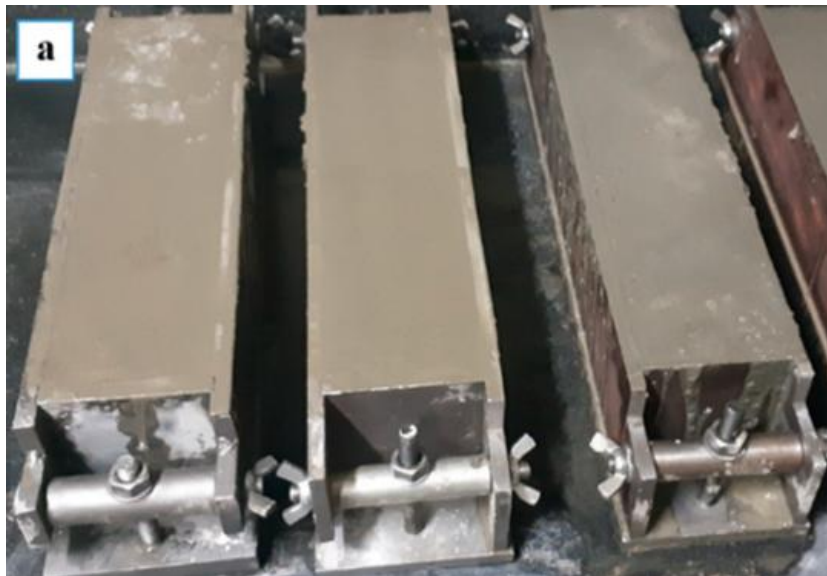


Foto 15. Betoonprismad vormides [40]

3.2 ASR riski käsitlevad nõuded Eestis ja lähiriikides

Nii palju kui on teada, pole Eestis rajatud betoonkonstruktsioone leelis-räni reaktsiooni tuvastamiseks uuritud ega täitematerjalidega seotud võimalikku ASR-i riski süsteemselt hinnatud. Sellekohase info puudumise tõttu ei ole hetkel kehtivate kohalike standarditega seatud konkreetsemaid piiranguid või kohustusi leelis-räni reaktsiooni tuvastamiseks või riski hindamiseks.

Betooni täitematerjalidele esitatud nõudeid käsitlevas standardis EVS-EN 12620 ja betooni spetsifitseerimist, toimivust ning tootmist ja vastavust käsitlevas standardis EVS-EN 206:2014+A2:2021 pööratakse tähelepanu järgmistele omadustele: peenosiste

sisaldus, plaatusindeks, merekarpide sisaldus (asjakohane ainult merest ammutatud täitematerjali korral), purunemiskindlus, terade kuivtihedus, veeimavus, happes lahustuvate sulfaatide sisaldus, üldväävli sisaldus, vees lahustuvate kloriidide sisaldus jne. Samas ei käsitle mainitud standardid täitematerjali mineraloogilist koostist mahus, mis seaks nõuded uuringute teostamiseks ning koostise järgimiseks teadaolevate ASR põhjustavate mineraalide suhtes. Standardi EVS-EN 12620:2005+A1:2008 Lisas G viidatakse Euroopa Standardi Komitee aruandele CR1901:1995 „*Regional specifications and recommendations for the avoidance of alkali-silica reactions in concrete*“, milles selgitatakse leelis-räni reaktsiooni olemust ja tuuakse välja 1995. a. CEN riikide kasutatavad meetodid ASR kahjustuste ennetamiseks. [44], [45], [46]

Betooni tootmisel kasutatavatele täitematerjalidele on rahvuslikult konkreetsemad leelis-räni reaktsiooni käsitlevad nõuded ja piirmäärad esitatud meie lähiriikidest Rootsi standardites SS-EN 12620 ning SS 137003, milles antakse selged juhised võimalike leelise reageerivate mineraalide lubatavuse ning piirmäärade kohta, mis tähendab, et täitematerjale tuleb laboratoorselt katsetada. Näiteks potentsiaalselt aeglase või keskmise reageerivusega osade sisaldus peab olema alla 15% mahust ning ületada ei tohi RILEM AAR-2.2 meetodil läbi viidud katsete piirmäärasid. Lisaks paisumisele, on sõltuvalt katsetulemustest kindlaks määratud katsete kordamise intervall (Tabel 2). [7]

Tabel 2. Proovivõtmise sagedus lähtuvalt eelmisest paisumiskatse tulemusest, vastavalt standardile SS 137003:2021 [47]

Katsemeetod	Variant C	Variant B	Variant A	Piirväärtus
RILEM AAR-2.2 pärast 14 päeva	≤ 0,03% iga 6. aasta järel	≤ 0,06% iga 3. aasta järel	> 0,06% igal aastal	≤ 0,08%
RILEM AAR-2.2 pärast 28 päeva	≤ 0,10% iga 6. aasta järel	≤ 0,20% iga 3. aasta järel	> 0,20% igal aastal	≤ 0,25%
RILEM AAR-3 pärast 1 aastat	≤ 0,020% iga 6. aasta järel	≤ 0,030% iga 3. aasta järel	> 0,030% igal aastal	≤ 0,040%
RILEM AAR-4 pärast 20 nädalat	≤ 0,015% iga 6. aasta järel	≤ 0,025% iga 3. aasta järel	> 0,025% igal aastal	≤ 0,030%
NT Build 295 pärast 20 nädalat	Kui esinevad kiiresti reageerivad mineraalid, soovitatakse paisumiskatseid teha igal aastal			≤ 0,10%

Leedus määratletakse standardiga LTS 197-4 leelis-räni reaktsiooni kahjustuste ennetamise piirangud seotuna ekspluatatsioonitingimustega ning reguleeritud on seda keskkonnaklasside XR0, XR1 ja XR2 järgi. XR0 on mitte agressiivne, madala suhtelise niiskusega ($\varphi \leq 60\%$) keskkond ning sellele klassile vastavas keskkonnas kasutatavale betoonile piiranguid ei ole seatud. XR1 on agressiivne keskkond, mille suhteline õhuniiskus

$\phi \geq 80\%$ – sellele klassile sobiva betooni leeliselisus peab olema väiksem kui $4,0 \text{ kg/m}^3$ ja betooni tootmiseks kasutatava tsemendi CEM I leeliselisus $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eqv}}$ peab olema väiksem või võrdne $0,8\%$ -ga massist. XR2 on väga agressiivne keskkond, kus lisaks kõrgele niiskuse kontsentratsioonile mõjuvad täiendavalt Na ja K ühendid, näiteks libeduse tõrjeks kasutatavad soolad. XR2 klassis kasutatava betooni valmistamiseks kasutatava tsemendi $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eqv}}$ peab olema väiksem või võrdne $0,8\%$ -ga massist ja kogu betooni leeliselisus ei tohi ületada $3,0 \text{ kg/m}^3$. [7]

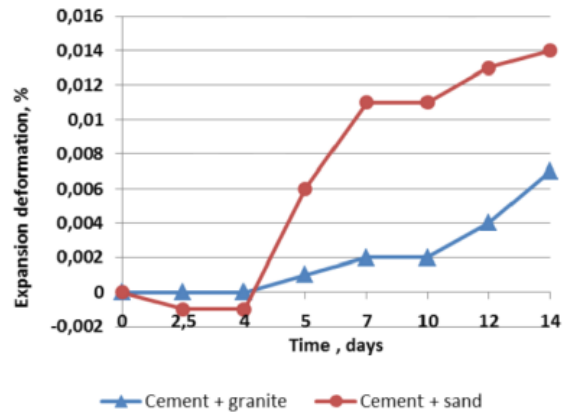
Lätis on standardis LVS EN 206 seatud piirangud leelis-räni reaktsiooni ennetamiseks. Ühelt poolt on piirid seatud leeliselisusele vastavalt keskkonnaklassile. Mitte agressiivsete keskkonnaklasside puhul X0 ja XC1 tsemendi ja betooni osas leeliselisuse piiranguid ei seata, neist agressiivsemate keskkonnaklasside puhul on lubatud kasutada tsementi, mille $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eqv}}$ on väiksem või võrdne $1,0\%$ -ga eeldusel, et maksimaalne leeliselisuse määr betoonis ei ületa $3,0 \text{ kg/m}^3$ [48]. Täiendavalt on esitatud nõuded täitematerjalidele. Vastavalt levinud ASTM ja RILEM katsete meetoodika tõlgendamisjuhiste eeltohi 16 päevase kiirendatud mördipulga katse ASTM C 1260 või RILEM AAR-2 tulemusel katsekeha pikenemine ületada $0,10\%$; 52 nädalat kestva ASTM C 1293 või RILEM AAR-3 katse puhul ei tohi pikenemine ületada $0,040\%$; lisaks ei tohi jämetäitematerjali veeimavus ületada $1,0\%$ ning väiksemate kui $0,063 \text{ mm}$ terade osakaal ei tohi ületada $3,0\%$. [48]

Kuna leelis-räni reaktsiooni riske ei ole Eestis varasemalt hinnatud, siis puudub selge ülevaade hetkeolukorrast ja arusaam regulatsioonide rakendamise vajadusest. Naaberriikides on reaktsiooni ennetamiseks võetud ette samme edasiste kahjustuste vältimiseks tavaliselt peale teatud hulga kahjustunud konstruktsioonide avastamist. Olenemata eelarvamustest, milles kaheldakse ASR võimalikkuses mõne riigi territooriumil, ei sõltu selle keemilise protsessi avaldumine niivõrd administratiivsetest piiridest, kui kasutatavatest täitematerjalidest, sideainest ja keskkonnatingimustest. Olukorra kaardistamiseks on esimese etapina otstarbekas alustada olemasolevate konstruktsioonide uurimisest, mille järel saab otsustada standardiseerimise vajaduse. Käesoleva töö autor soovib kaaluda RILEM välja töötatud meetoodika rakendamist edasistel uuringutel. Kuna sellekohane kogemus lähiriikide teadlaste ja uurimisrühmade seas tundub olevat enim kasutatav, siis sellevõrra parem on ekspertiis ja teadmised, millest koostöös järeltööst teha.

3.3 Täitematerjalide katsed lähiriikides

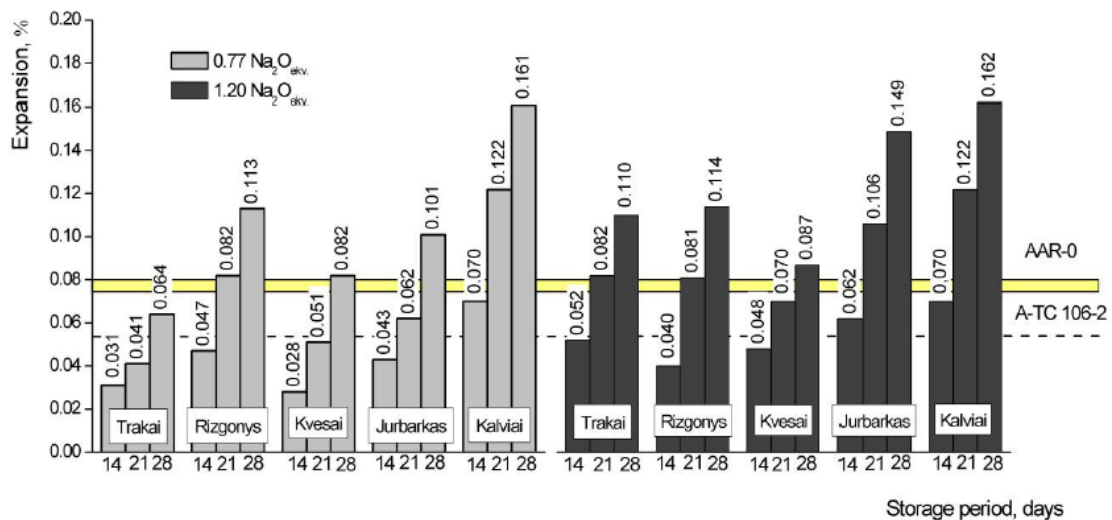
Naaberriigis Lätis asuvas Riia Tehnikaülikoolis viidi läbi RILEM AAR-2.1 meetoodikal põhinevad mördipulgakatsed kahe erineva seguga, millest üks sisaldas täitematerjalina graniiti ja teine liiva. Peale 14 päeva 1M NaOH lahuses hoidmist, näitas graniidiga valmistatud katsekeha väga väikest paisumist, keskmiselt $< 0,01\%$ ning liivaga

valmistatud katsekeha keskmiseks paisumiseks mõõdeti 0,014% (Joonis 16). Kombineerides katse läbi viimise ajal olevat informatsiooni saadaolevate tsementide ning Läti aastase keskmise õhuniiskuse analüüsiga, järeldas uuringu autor, et leeliselisuse ja niiskuse mõjutamisel on omad piirid, mistõttu on ainukeseks leelis-räni reaktsiooni ennetamiseks mittereageerivate täitematerjalide kasutamine [7].



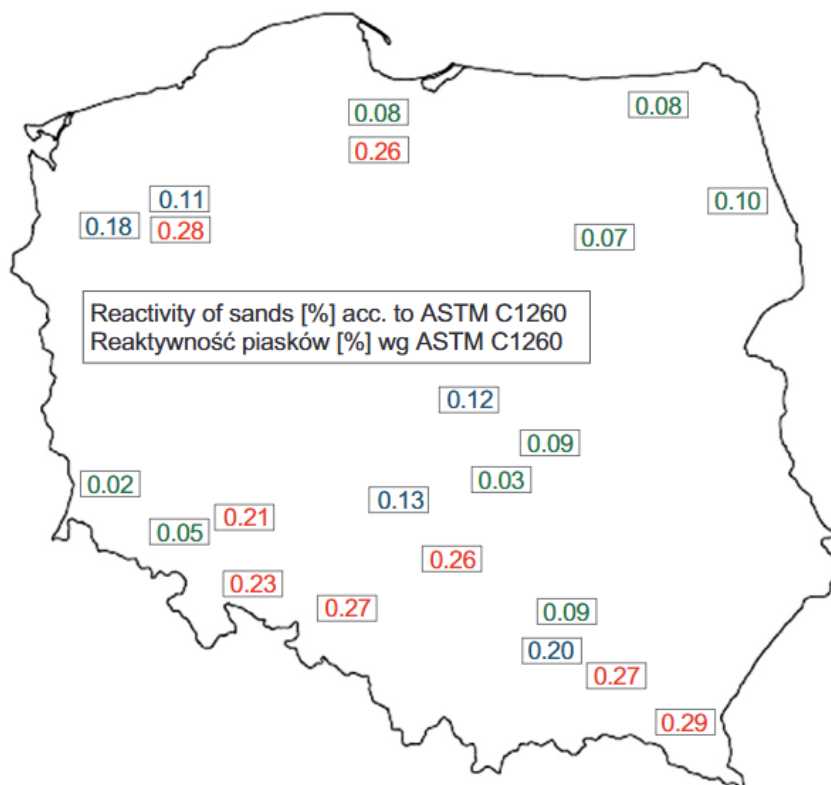
Joonis 16. Riia Tehnikaülikoolis läbi viidud RILEM AAR-2 katsekehade paisumisgraafik [7]

Leedus, Vilniuse Gedimino Tehnikaülikoolis, katsetati kohalikke täitematerjale vastavalt RILEMi metodikatele AAR-2.2. Kasutatud 40 × 40 × 160 mm mördipulkade pikenemised jäid peale 14 päevast katseperioodi valdavalt allapoole 0,08% piirmäära, mis viitab täitematerjali ebatõenäolisele reageerivusele. Kuid hilisemad mõõtmised (peale 21 päeva möödumist) ületasid piirmäära, mis kinnitas aeglaselt reageeriva mineraali olemasolu täitematerjalis, mistõttu liigitati täitematerjal klassi II-S (Joonis 17). Klass II-S iseloomustab täitematerjale, mille reageerivus on ebaselge ning vajalik on teostada järgmised katsed. [14]



Joonis 17. AAR-2.2 katsekehade paisumisgraafik [14]

Poolas viidi läbi ulatuslik uuring riigi erinevatest piirkondadest kogutud täitematerjaliga. Petrograafilise uuringuga tuvastati esmalt, et liivades sisaldus vähemal või rohkemal määral leelis-räni reaktsiooniga seotud mineraale nagu mikro- ja krüptokristalliline kvarts, opaal, kaltsedoon, tridümiit ja kristobaliit. ASTM 1260 meetodikal põhineva paisumiskatse tulemused varieerusid. 20-st katsekehast üheksa viitasid täitematerjali ebatõenäolisele reageerivusele (paisumine $\leq 0,1\%$), samas teised üheksa katsekeha viitasid otsesele täitematerjali reageerivusele (paisumine $\geq 0,20\%$). Kahe katsekeha tulemused jäid $0,1\%$ - $0,2\%$ vahemikku, mis viitab edasise katsetamise vajadust, näiteks vastavalt ASTM C 1293 või RILEM AAR-3 meetodikale. Seejuures on tähelepanuväärne, et uuringus toodud joonisel (Joonis 18) võivad madala ja kõrge reageerivusega liivad paikneda geograafiliselt ka väga lähestikku, millest saab järeldada, et oluline on uuringuid läbi viia võrdlemisi kitsal kaevandusalal ning seejuures tuleks hoiduda lähi-piirkondlike üldistuste tegemisest. [49]



Joonis 18. ASTM C1260 paisumiskatse tulemused näidatud peentäitematerjalide proovivõtu asukohtades Poolas [49]

4 KATSED EESTIS KOGUTUD LIIVAGA

4.1 Metoodika

Käesolevas töös teostatud katsete metoodika valiti RILEM Tehnilise Komitee 2016. aastal avaldatud aruandest TC 219-ACS pealkirjaga „*RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures*” [13]. Kogumikus toodud katsemetoodika hulgast valiku tegemisel ja tulemuste tõlgendamiseks juhinduti RILEM AAR-0 kirjeldusest, mille põhjal valiti järgmisteks meetoditeks RILEM AAR-1 ja RILEM AAR-2:

- RILEM AAR-1 metoodika valiti kogutud liivade uurimiseks, et saada täpne ülevaade täitematerjali mineraloogilisest koostisest ning selgitada välja võimalikud reageerivad mineraalid.
- RILEM AAR-2 metoodika valiti võimaliku leelis-räni reaktsiooni hindamiseks, sest lõputöö õigeaegseks esitamiseks on katse oma suhteliselt lühikese kestvuse tõttu kõige sobivam. Valikut toetas asjaolu, et mitmete Euroopa riikide rahvuslikud nõuded täitematerjalide reageerivuse piirmääradele põhinevad RILEM AAR-2 või analoogse metoodika järgi läbi viidud katsetel.

RILEM Tehnilise Komitee välja töötatud metoodika rakendamine edaspidiselt Eestis läbi viidavatel uuringutel võib pikemas vaates lihtsustada lähiriikide vahelist koostööd.

4.2 Katseplaan

Käesoleva lõputöö osana kavandati laboratoorsed katsed Eesti erinevates piirkondades asuvatest liivakarjääridest pärinevate liivadega, eesmärgiga hinnata betooni valmistamiseks kasutatava peentäitematerjali leelis-räni reaktsiooni esinemise riski.

Katsete teostamiseks kogusid kaks betooni tootmisega tegelevat ettevõtet oma tehases asuvatest liivaladudest liivanäidised 10–15 liitristesse kaanega suletavatesse plastikämbritesse. Kokku koguti seitsme erineva Eesti karjääri liivanäidised: Soodla, Aardlapalu, Siimusti, Männiku, Krüüdneri, Pannjärve ja Potsepa (Foto 16 ja Foto 17).

Kogutud liivad transporditi Tallinna Tehnikakõrgkooli laborisse, kus need valmistati katsetamiseks ette valitud RILEM metoodiliste juhendite järgi.



Foto 16. Soodla, Aardlapalu, Siimusti ja Männiku karjääridest pärinevate liivade näidised Tallinna Tehnikakõrgkooli laboris



Foto 17. Krüüdneri, Pannjärve ja Pottsepa karjääridest pärinevate liivade näidised Tallinna Tehnikakõrgkooli laboris

Vastavalt meetodika kogumikule, on esimese uuringuetapina soovituslik alustada RILEM AAR-1 petrograafilise analüüsiga, mis on keerukam tavapärasest betoonsegudes kasutatavate täitematerjalide uurimisest, mistõttu peaks analüüsi teostama spetsiifilisi teadmisi ja kogemust omav isik. Plaani täitmiseks otsiti koostöövõimalusi erinevate laboritega, kellel on varasem petrograafilise uuringu läbiviimise kogemus. Vaatamata pingutustele, ei leitud RILEM AAR-1 katse läbiviimisest huvitatud petrograafi, mistõttu jäi analüüs teostamata. Peamise keeldumise põhjusena toodi välja teadmiste ja varasema kogemuse puudumine mineraloogilise koostise analüüsimisel leelis-räni reaktsiooni tingimustest lähtuvalt ning tavapäraselt mineraloogilisel analüüsimisel erineva meetodi (röntgendifraktsiooni ehk XRD) kasutamine, millega ei saa juhendikohaseid ülesandeid täita.

4.3 Ettevalmistused

Mördipulga katsete läbiviimiseks valmistati ette täitematerjal. Selleks kaaluti kõikidest näidistest 7 kg liiva, mis pesti voolava vee all 0.125 mm ava läbimõõduga sõelal (Foto 18) ning asetati ligikaudu 110 °C sisetemperatuuriga ahju kuivama (Foto 19).



Foto 18. Liiva pesemine 0,125 mm ava läbimõõduga sõelal



Foto 19. Liivasid kuivatati ahjus ligikaudu 16 tundi

Peale ligikaudu 16 tunni möödumist liivad sõeluti ja defraktsioneeriti (Foto 20). Mördipulkade valmistamiseks kasutatavate liivade hulgast eraldati terad, mis läbisid 0,125 mm avaga sõela ja ei läbinud 4 mm avaga sõela. Alles jäänud terastikulise koostisega liiv pakendati suletavatesse kottidesse, kokku kolme 900 grammise portsjonina (Foto 21).



Foto 20. Sõelumisel kasutati Controls vibreerivat sõeltorni, mille 0,125 ja 0,250 mm sõelale jäänud näidis hiljem täiendavalt käsitsi üle sõeluti



Foto 21. Mördi valmistamiseks välja kaalutud ja pakendatud liiv

RILEM AAR-2 meetoodika järgi valmistatakse mördipulgad mõõtmetega 25 × 25 × 285 mm või 40 × 40 × 160 mm, millest tulenevalt täpsustatakse valitud meetoodika nimetust vastavalt AAR-2.1 või AAR-2.2 [13]. Otsustati valida mördipulkade mõõtmeteks 25 × 25 × 285 mm, mis on ka ASTM C 1260 meetoodika standardmõõt [12], eesmärgiga säilitada võimalus tulemuste omavaheliseks võrdlemiseks kui edasiste uuringutega peaks tekkima selline vajadus. Katsespetsiifikast lähtuvalt on vajalik kasutada vorme, mille otstes on avad paisumise jälgimiseks kasutatavate mõõtetihvtide jaoks. Katsekehade vormid valmistati 18 mm paksusega filmivineerist. Vormid nummerdati ja töödeldi vormiõliga. Mõõtepunktidenä kasutatavad 22,5 mm pikkused tihvtid valmistati Ø6 mm roostevabast terasest ning paigutati vormide otsplaatidesse puuritud avadesse (Foto 22). Vormi otsplaadi sisse jäävad tihvtide otsad töödeldi vaseliiniga vähendamaks kinni jäämise riski.

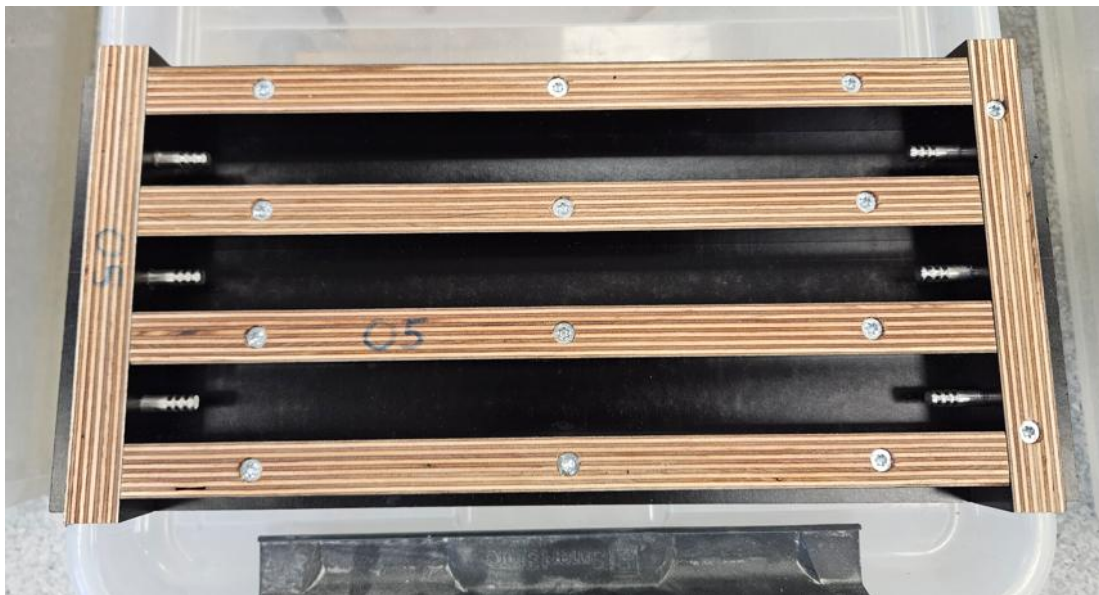


Foto 22. Mõõtetihvtidega vorm 25 × 25 × 285 mm mördipulkade valmistamiseks

Mördisegu valmistamiseks kasutatav tsement valiti kohaliku tootja toodete hulgast. Peamisteks valimikukriteeriumiteks olid tsemendi tüüp CEM I, eripind > 450 m²/kg ning võimalikult kõrge leeliselisus. Valiti Kunda Nordic portlandtsement CEM I 52,5R, kaubanimetusega ultratsement, mille kasutamise võimaldas ja tarnimise korraldas tsemendi tootja. Meetoodikast tulenevad olulisemad tsemendi parameetrid on: tsemendi tüüp CEM I, eripind > 555 m²/kg, Na₂O_{ekv}=0,9% [50].

Lisaks hangiti betoonitootjalt segu töödeldavust parandavat superplastifikaatorit Carboxyment L4.

4.4 Katsekehade valmistamine ja hoiustamine

Katsekehade valmistamisel lähtuti juhendis [13] toodud koostisosade vahetavast, mille kohaselt tuleb ühe tsemendi massiosa kohta kasutada 2,25 massiosa täitematerjali. Vaba vee/tsemendi massi suhe on 0,47, st. segu valmistamisel lisatav vee kogus on vaba vesi koos selle veega, mis on vajalik täitematerjali pindkuiv-küllastunud seisundi saavutamiseks. Tuginedes katsetel osalenud TTK laboriinseneri varasematele kogemustele, määrati vabale veele lisatavaks vee esialgseks koguseks 0,3% täitematerjali massist.

Kolme 25 × 25 × 285 mm katsekeha jaoks vajamineva mördi valmistamiseks kasutati 400g tsementi ja 900g kuiva täitematerjali. Lisatava vee kogus sõltus koonuse valgumise tulemustest. Valmistatud mördi valgumist mõõdeti valgumislaual (Foto 23) vastavalt standardile EN 10153. RILEM AAR-2 meetodika kohaselt peab katsetatava mördi valgumine olema vahemikus 205–220 mm. Kui valgumine erines oluliselt ettenähtud vahemikust, muudeti segule lisatava vee ja/või plastifikaatori hulka. Katsekehades kasutatava mördi valmistamisel lähtuti EN 196-1 protseduuridest ning mörti segati laboratoorse mikseriga (Foto 24).



Foto 23. Segu valgumist mõõdeti valgumislaual – nõuetekohase valgumise korral paigutati mört edasi vormidesse ja tihendati vastavalt kahes osas



Foto 24. Mõrdi valmistamiseks kasutatud mikser koos valmis kaalutud liivadega

Vajadusel, s.o. juhul kui koonuse valgumine on lisatud vee koguse juures alla 205 mm, kasutatakse superplastifikaatorit, milles sisalduva vee koguse võrra vähendatakse töösegule lisatavat vett. Vormidesse paigaldatud mõrdi lõplik koostis koos mõõdetud valgumisega on toodud järgnevas tabelis (Tabel 3).

Tabel 3. Katsekehade valmistamiseks kasutatud mõrdi koostis ja valgumine

Karjäär	Tsement, g	Liiv, g	Vesi, g	Plastifikaator, g	Valgumine, mm
Soodla	400	900	189,5	0,80	206;219
Aardlapalu	400	900	192,5	-	216;213
Siimusti	400	900	191,5	2,00	221;216
Männiku	400	900	189,5	0,85	220;221
Krüüdneri	400	900	192,5	-	216;221
Pannjärve	400	900	189,5	0,80	213;214
Pottsepa	400	900	191,5	2,00	215;215

Juhendi kohaselt tuleb vormis olevaid katsekehasid hoiustada 24 ± 2 tundi keskkonnas, mille suhteline õhuniiskus on min. 90% ja temperatuur 20 ± 1 °C. Katsekehad paigutati koheselt peale vormimist edasi osaliselt veega täidetud kaanega suletavatesse polüpropüleenist hoiukastidesse (Foto 25), milles olid sobivad keskkonnatingimused.

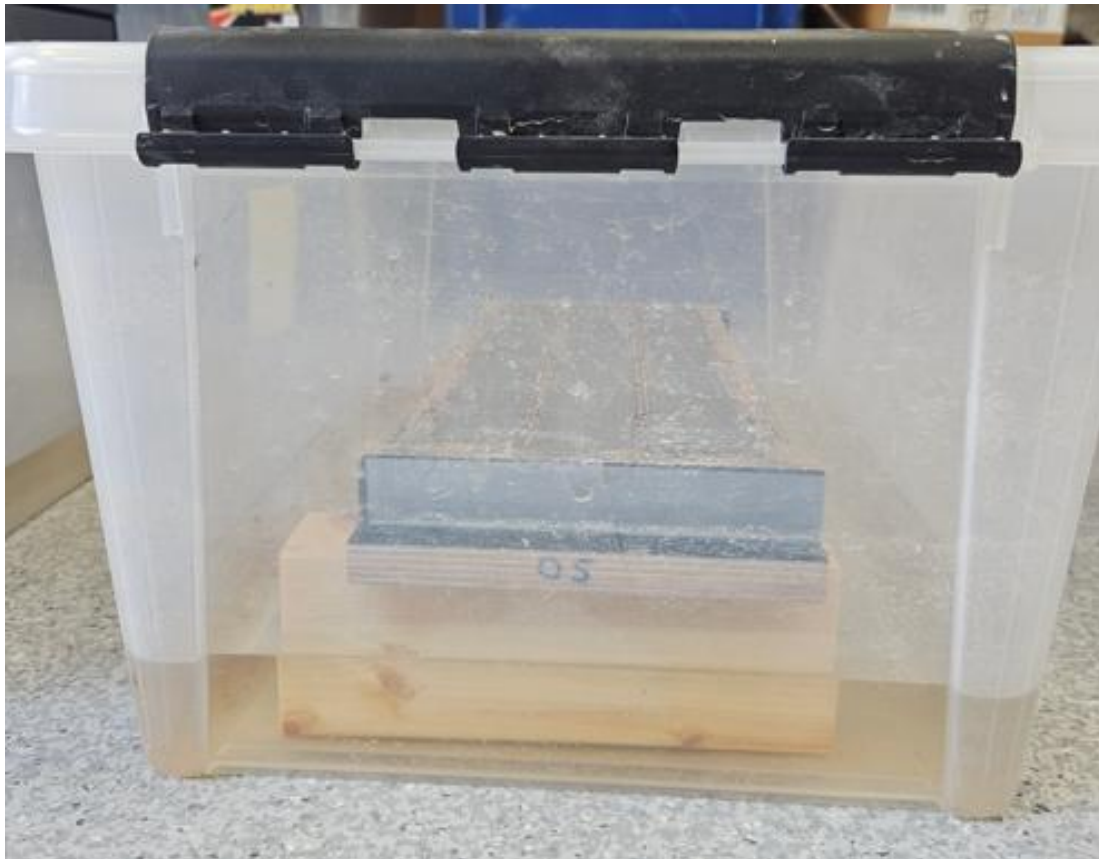


Foto 25. Vormitud katsekeha hoiustamine 24 ± 2 tundi

4.5 Katsetamine

24 ± 2 tunni möödumisel eemaldati katsekehad vormidest ja mõõdeti esialgne pikkus L_i , mis on vajalik hilisematel mõõtmistel kasutatava gabariitpikkuse (*gauge length*) leidmiseks. Kõikidel mõõtmistel kasutati kalibreeritud digitaalset mõõteseadet ja 295 mm pikkust referentspulka, mõõtmised teostati lähima 0,001 millimeetrini. Iga katsekeha komplekti mõõtmisele eelnevalt ja järgnevalt registreeriti saadud mõõtetulemuse valideerimiseks mõõtekellal olev referentsväärtus (Foto 26). Kõik mõõdud võeti igal päeval enam-vähem samal ajal. Mõõtmisprotseduuride järgselt asetati mördipulgad destilleeritud veega täidetud vanni (Foto 27) ning tõsteti ahju, mille temperatuur oli eelnevalt seatud 80 ± 2 °C tasemele.



Foto 26. Referentsväärtuse mõõtmine referentspulga abil [51]

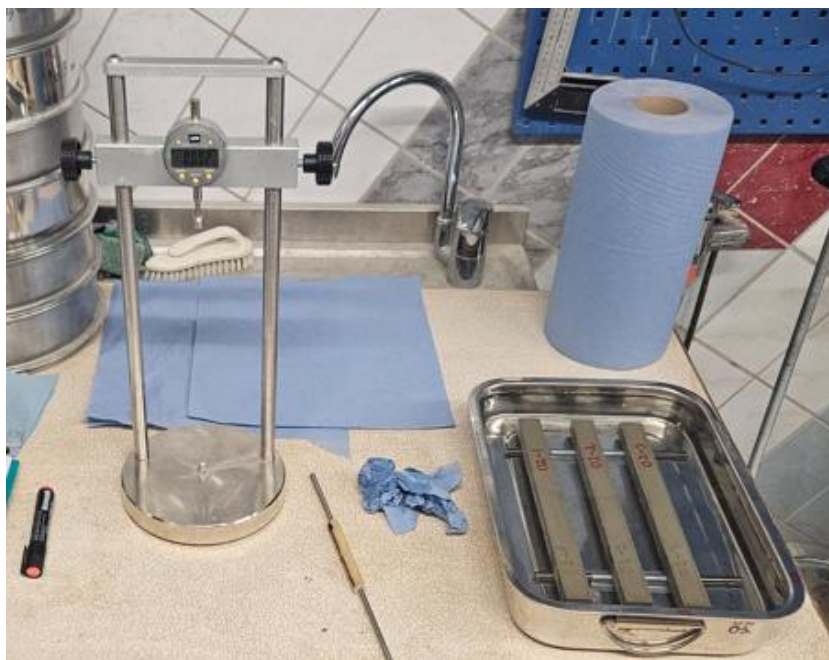


Foto 27. Pikkuse L_i mõõtmine, mille järgselt asetati mõrdipulgad veevanni

Peale 24 ± 2 tunni möödumist võeti katsekehad mõõtmise järjekorras koos veevannidega ahjust välja, kuivatati kergelt ja teostati katsekehade mõõtmine, millega saadi väärtus L_0 . Mõõtmise järgselt asetati katsekehad selleks ettevalmistatud 80 ± 2 °C 1M NaOH lahusega täidetud kaanega suletavatesse kastidesse ja paigutati tagasi ahju. Temperatuuri juhendile vastavust kontrolliti pisteliselt digitaalse termomeetriga, mille andur paigaldati lahusesse (Foto 28).

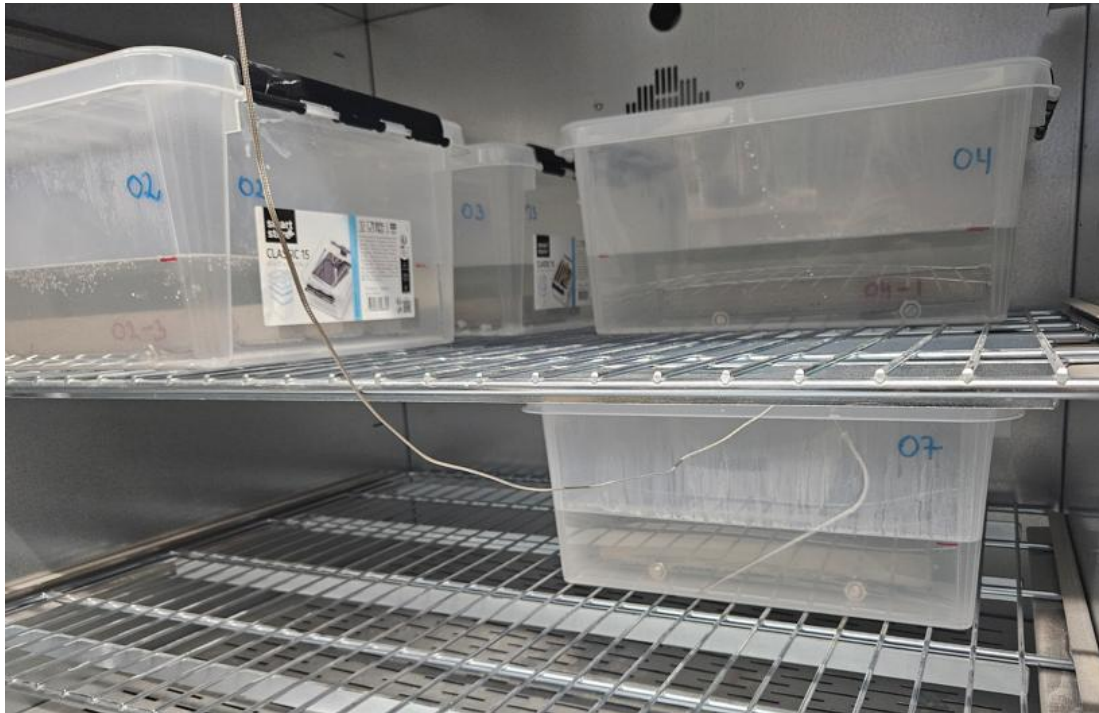


Foto 28. Katsekehasid ümbritseva lahuse temperatuuri kontrollimine

Järgnevad mõõtmised (Foto 29) teostati 3, 6, 9, 12, 14 ja 21 päeva pärast katsekehade lahusesse asetamisest. Mõõtmistel registreeriti väärtused $R_{P,n}$ ja $K_{M,n}$, kus n viitab lahuses olnud päevade arvule, mille põhjal arvutati väärtused L . Detailsemad andmed mõõdetud ja arvutatud väärtuste kohta on toodud lisa (Lisa).



Foto 29. Katsekeha mõõtmine [51]

4.6 Katsetulemused

Katsetulemuste tõlgendamise kriteeriumid on toodud RILEM Tehnilise Komitee 2016. aastal avaldatud aruande TC 219-ACS juhises RILEM AAR-0, samuti ka katsetoodika RILEM AAR-2 kirjeldavas peatükis. Tulemusi tõlgendatakse katsekehade NaOH lahuses oldud aja jooksul tekkinud keskmise pikenemise põhjal.

Katsekeha pikenemine alla 0,10% 14 päeva pärast NaOH lahuses olekut viitab tõenäoliselt mitte-reageerivale materjalile ning paisumine üle 0,20% viitab tõenäoliselt reageerivale materjalile. 0,10–0,20% vahemikku jäävate tulemuste tõlgendamiseks selged juhised puuduvad, kuid samas tuuakse välja, et parema kohaliku teabe puudumisel tuleks sellise tulemuse andnud materjale käsitleda potentsiaalselt reageerivaks. [13]

Juhendi kohaselt peab keskmise pikenemise tulemused esitama 0,01% täpsusega. Katse saab lugeda õnnestunuks, kui valmistatud katsekehade keskmisel pikenemisel üle 0,10%

erineb üksiku mördipulga pikenemine keskmisest vähem, kui 10% või katsekehade keskmisel pikenemisel alla 0,10% erineb üksiku mördipulga pikenemine keskmisest pikenemisest 0,01% võrra. [13]

Katsetulemuste tõlgendamiseks arvutatakse esmalt gabariitpikkus L , mm valemiga (1):

$$L = R_V - (R_M - K_M) - 2 \times T_P, \quad (1)$$

kus R_V – referentsvarda pikkus, 295 mm;

R_M – referentsvarda mõõtmisel saadud näit mõõtekellal, mm;

K_M – katsekeha mõõtmisel saadud näit mõõtekellal, mm;

T_P – mõõtetihvti pikkus, mm.

Järgmisena leitakse üksikute mördipulkade pikenemine, % vaadeldava perioodi jooksul valemiga (2) [13]:

$$\text{Pikenemine} = 100 \times (L_n - L_0) / L, \quad (2)$$

kus L_0 – katsekeha mõõt vahetult enne NaOH lahusesse panemist (algmõõt), mm;

L_n – igal järgneval korral saadud mõõt peale NaOH lahusesse asetamist, kus n viitab päevade arvule L_0 mõõtmisest, mm;

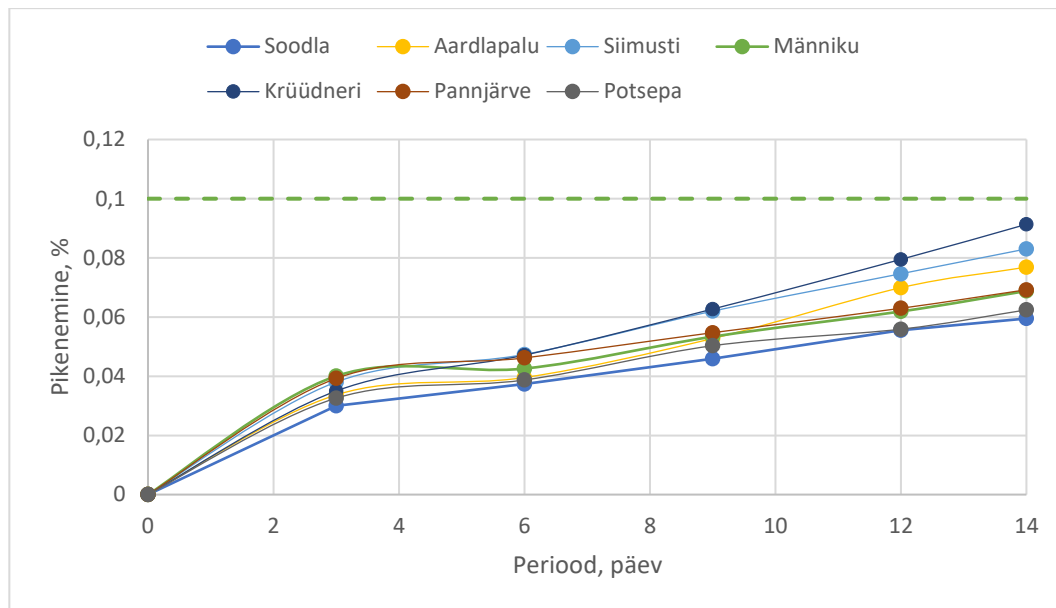
L – gabariitpikkus ehk mördipulgas olevate tihvtide sisemiste otste vaheline kaugus, mm.

Seejärel leitakse saadud üksikute mördipulkade keskmine pikenemine.

Mördipulkade katsetamisel saadud koondtulemustest (Tabel 4) ja jooniselt (Joonis 19) nähtub, et kõikide katsetamiseks kogutud liivade pikenemised jäävad 14 mõõtmispäeva järel alla piirmäära 0,10%, mis juhendi kohase tõlgenduse järgi viitab tõenäoliselt mitte paisuvatele täitematerjalidele. Kõige suurem pikenemine mõõdeti Aardlapalu, Siimusti ja Krüüdneri karjääridest pärinevate liivadega valmistatud katsekehadel, millest esimese kahe puhul oli arvestuslik keskmine pikenemine vastavalt Siimustil 0,08% ja Krüüdneril 0,09%, samal perioodil kõige väiksemat pikenemist näitasid Soodla ja Potsepa liivad, jäädes 0,06% tasemele.

Tabel 4. Katsekehade pikenemine peale 14 päeva, %

	Soodla	Aardlapalu	Siimusti	Männiku	Krüüdneri	Pannjärve	Potsepa
Mördipulk 1	0,06	0,08	0,08	0,07	0,09	0,07	0,06
Mördipulk 2	0,06	0,08	0,08	0,07	0,09	0,07	0,06
Mördipulk 3	0,06	0,08	0,08	0,07	0,09	0,07	0,06
Keskmine	0,06	0,08	0,08	0,07	0,09	0,07	0,06



Joonis 19. Mördipulkade keskmine pikenemine 14 päeva jooksul

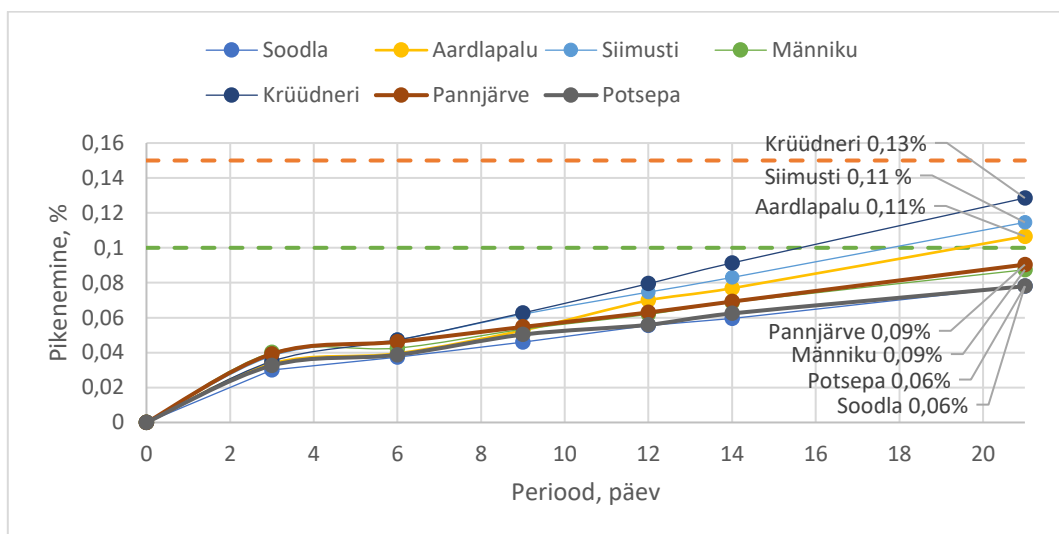
Katsekehade vahepealsetel mõõtmistel täheldati, et Siimusti ja Krüüdneri karjäärist pärinevatest liivadest valmistatud mördipulkade pindadel oli märke (tõenäoliselt pindmistest pooridest) erituvast omapärasest valgest materjalist (Foto 30), mida katse perioodi edenedes vähehaaval mördipulga pinnale juurde tekkis. Teistest liivanäidistest valmistatud katsekehadel sarnast materjali eritust 14 päevase mõõtmisperioodi lõpuks ei tuvastatud või esines seda märgatavalt vähemal määral. Arvestades, millisel eesmärgil katsed läbi viidi, võib eeldada, et tegemist on pinnale lekkiva räni geeliga, kuid täpse hinnangu andmiseks, tuleks materjali keemilist koostist täpsemalt uurida.



Foto 30. Eritis Krüüdneri karjääri liivast valmistatud mördipulga pinnal

Kuigi RILEM AAR-2 kohaselt tõlgendatakse tulemusi peale 14 päevast NaOH lahuses hoiustamist mõõdetud pikenemise alusel, siis on ka arvatud, et selle perioodi jooksul võivad tuvastamata jääda aeglaselt reageerivad täitematerjalid, mis reaalses keskkonnas hiljem betoonikahjustusi põhjustavad ning sellest tulenevalt võiks rakendada madalamat pikenemise piirmäära või pikendada katseperioodi [52]. Aeglaselt reageerivate täitematerjalide tuvastamiseks pakutakse välja, et 14 päeva järel võiks kasutada pikenemise piirmäära 0,08% või 21 päeva järel 0,10% (looduslike peentäitematerjalide puhul 0,15%) [53].

Kuna mõrdipulkade pikenemine oli 14. päevaks püsinud olulisemate muutusteta endiselt kasvutrendis ja paaril katsekehal olid moodustunud eritised, mida seostatakse leelis-räni geeliga, otsustati katse kestvust pikendada ning teostada uued mõõtmised 21. päeval peale katsekehade NaOH lahusesse paigutamist. Graafikult (Joonis 20) nähtub, et kõik katsekehad jätkasid sarnases tempos pikenemist ka pärast 14 päeva, kuid Aardlapalu, Siimusti ning Krüüdneri katsekehad ületasid ainukestena 0,10% piiri, seejuures 0,15%-ni jõudmata.



Joonis 20. Mõrdipulkade keskmine pikenemine 21. päevaks

Katsete õnnestunuks lugemise kriteeriumitele vastavuse kontrollimiseks võrreldi üksikute mõrdipulkade pikenemist kõigi kolme, samas grupis olnud mõrdipulga keskmise pikenemisega. Kuna mõõteandmetel jäävad keskmised pikenemised arvutuslikult alla 0,10% piiri, kontrolliti kas üksikute mõrdipulkade pikenemise vahe võrreldes katsekomplekti keskmise pikenemisega jääb maksimaalse lubatud 0,01% sisse. Tabelisse (Tabel 4) kantud andmed näitavad, et kõikide üksikute mõrdipulkade pikenemine võrreldes komplekti keskmisega jääb lubatud piiridesse, s.t. ka üksikute pulkade lõikes olid paisumised ühtlased ja katse saab lugeda sellest seisukohast õnnestunuks.

5 ETTEPANEKUD EDASISTEKS UURIMUSTEKS

Lõputöö praktilises osas katsetati seitsmest erinevast karjäärast pärinevaid liivasid, et saada esmane ülevaade Eestis betooni tootmisel kasutatavate peentäitematerjalide ASR riskist.

Töö mahu piiramiseks, uuriti vaid väikest juhuslikult valitud osa tegelikest aktiivsetest karjääridest, mistõttu sarnaste uuringutega jätkamine teistest piirkondadest kaevandavate materjalidega omab suurt väärtust laiapindsema ülevaate saamiseks. Jätkuvad katsed on otstarbekas kavandada RILEM välja töötatud meetodikal põhinevalt, soovitatav on kaaluda RILEM AAR-4 meetodikal põhinevate katsete läbiviimist selle parema usaldusväärsuse tõttu. Käesolevas töös uuritud liivade näidistest on säilinud piisav hulk materjali, millega saaks läbi viia täiendavad uuringud RILEM AAR-4 meetodil hindamaks RILEM AAR-2 tulemuste usaldusväärsust Eestis leiduva peentäitematerjalide katsetamisel.

Lõputöö osana ei uuritud ühtegi betoonkonstruktsiooni, mis asub tegelikus eksploatatsiooni keskkonnas, mistõttu ei ole teada, kas või millisel määral võib leelis-räni reaktsioonist tingitud kahjustusi esineda. Edasiste sammude kavandamiseks ja võimalike ennetusmeetmete välja töötamiseks peaks sellele eelnema süsteemne hetkeolukorra kaardistamine, mille põhjal saab järeldusi teha.

Läbiviidud mördipulga katsetamisel kasutati tsementi, mille $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ oli 0,9%. Tsemendi leeliselisuse rolli osas korrektsete katsetulemuste saamiseks, puututi lõputöö koostamisel kokku vastanduvate järeldustega. RILEM AAR-2 meetodikaga sarnastel eelteadmistel välja töötatud ASTM C 1260 juhendis on aja jooksul tehtud muudatusi, mille kohaselt on lubatud kasutada nii CEM I kui CEM II tüüpi tsementi, seejuures leeliselisuse taset ei peeta oluliseks. RILEM AAR-2 kohase kõrge (või sellele ligilähedase) leeliselisusega ja sobiva eripinnaga kohalikult toodetud CEM I tsementi ei ole olemasoleva info järgi saadaval. Katseliselt tuleks uurida, kas või millisel määral erinevad Eesti täitematerjalide katsetamisel tulemused, kui RILEM AAR-2 juhendis toodud (või sellele ligilähedastele) omadustele vastav tsement asendada avalikus kaubandusvõrgus kättesaadavama alternatiiviga.

KOKKUVÕTE

Leelis-räni reaktsioon (ASR) on betooni poorides aset leidv keemiline protsess, kus peamiselt tsemendist pärinev leelis reageerib nõrga kristallilise struktuuriga räni mineraale sisaldava täitematerjaliga. Reaktsiooni tulemusel moodustub poorides hügrokoopne geel, mis võib piisava niiskuse toimetel paisudes põhjustada betoonkonstruktsioonide struktuurseid kahjustusi.

Lõputöös on ülemaailmsete teadusuuringute ja -artiklite põhjal antud lühiülevaade senistest teadmistest ASR olemuse, keemilise reaktsiooni mehhanismi ja kahjustuste kujunemise tingimuste kohta. Selgub, et nii sideaine, täitematerjalide kui ka keskkonnatingimuste kaudu saab reaktsiooni tekkimist ennetada või arenemist pidurdada. Kuigi reaktsioon avastati rohkem kui kolmveerand sajandit tagasi, on reaktsiooni uurimisega hakatud rohkem tegelema viimastel kümnenditel. Kui põhjamaades Norras ja Rootsis tunti reaktsiooni vastu põhjalikumalt huvi juba 1980-1990ndatel aastatel, siis näiteks Soomes hakati sellele rohkem tähelepanu pöörama alles peale 2011. aastal alanud laiapindset uuringut, mille käigus avastati selgete ASR tunnustega betoonkonstruktsioone. Nende hulka kuulusid nii elu- ja tööstushooned, kui ka sillad ja muud rajatised.

Nii olemasolevate konstruktsioonide kui ka betooni valmistamiseks kasutatava täitematerjali katsetamiseks on välja töötatud mitmed meetodilised juhendid, millest enamlevinumad on RILEM ja ASTM kohandatud versioonid. Lätis ja Leedus teostatud katsetest selgub, et ka seal leiduv täitematerjal on paiguti leelise reageeriv ning esineb kahjustuste risk. Kõikides eelnimetatud lähiriikides on kohalike standarditega seatud nõuded, milles määratakse piirmäärad täitematerjalide reageerivusele ning piiratakse tsemendi või betoonisegu leeliselisust kahjustuste ennetamiseks.

Lõputöö praktilises osas Eesti karjäärdest pärinevate liivadega läbi viidud kiirendatud mördipulga katse tulemused näitavad, et kõikide valmistatud katsekehade pikenev 14. päeval peale katsekehade NaOH lahusesse paigutamist oli alla 0,10% piirmäära ehk täitematerjalid klassifitseeritakse vastavalt meetodilisele juhendile tõenäoliselt mitte reageerivateks. Enim, 0,08–0,09% paisunud katsekehadel jäi keskmine lineaarne pikenev küll alla piirmäära, kuid katse käigus mördipulga pinnale omapäraste eritiste tekkimine võib viidata leelis-räni reaktsiooni toimumisele.

Kuivõrd leelis-räni reaktsiooni hindamise meetodika ja lõputöö koostamisel läbi töötatud uuringud kinnitavad varasemate kohalike teadmiste ja kogemuste olulisust, ei leitud selliseid andmeid Eestis asuvate betoonkonstruktsioonide uuringute kohta, millega saaks läbi viidud laboratoorse katse tulemusi võrrelda. Andmete puudumine viitab vajadusele jätkata leelis-räni reaktsiooni ja sellest tingitud kahjustuste võimaliku esinemise uurimist.

SUMMARY

Review and Experimental Study of Alkali-Silica Reaction

The aim of this thesis is to assess the risk of ASR in the context of fine aggregates used in Estonia. To this end, answers are first sought to the questions of what it is and how it occurs, what role the materials used in the production of concrete, or the subsequent operational environment play in this. Based on the world-wide published scientific research and articles studied, methods for preventing the reaction in the production of concrete and detecting it in existing structures are introduced, along with examples from neighboring countries.

According to publications studied, it turns out that the deleterious process can be somewhat prevented by being attentive to binders and aggregates used in concrete production or to the environment, to where concrete structures are designed.

When preparing the thesis, it was observed, there has been more thorough interest in the reaction in the Nordic countries since the 1980s and 1990s, significantly later, though still, in Finland as well. Tests carried out in Latvia and Lithuania show that the aggregates found there can also pose a certain risk of damage caused by alkali-silica reaction. In all the neighboring countries mentioned, with local standards, requirements are determined to define the limits for the reactivity of aggregates and limit the alkalinity of cement or concrete mixtures to prevent damage. So far, no comprehensive risk assessment of a possible reaction has been carried out in Estonia, nor have preventive measures been introduced.

An accelerated screening test, based on RILEM AAR-2 methodology using "long-thin" mortar-bars, was conducted to assess the risk for potential alkali-silica reactivity on selected fine aggregates used in Estonian concrete production. The test results show that the expansion of all test specimens after 14 days in 1M NaOH solution was below the 0,10% limit, which is likely indicating to non-reactive materials. The average linear elongation of the specimens that expanded the most, 0,08–0,09%, remained below the limit, but the peculiar exudate that appeared on the surface of the mortar-bar during the test might indicate the presence of an alkali-silica reaction.

While the methodology for assessing the alkali-silica reaction and the studies carried out in the preparation of this thesis confirms the importance of previous local experience, no such info was to be found to compare the results of the laboratory test with conditions of structures in real-life environment. This clearly indicates the need to continue the research of alkali-silica reaction and the risks of damage it may cause in Estonia.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] M. D. A. Thomas, B. Fournier, ja K. J. Folliard, „Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book“, lk 211.
- [2] D. Vo *et al.*, „Evaluation of structures affected by Alkali-Silica reaction (ASR) using homogenized modelling of reinforced concrete“, *Eng. Struct.*, kd 246, lk 112845, nov 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112845.
- [3] E. O. Fanijo, J. T. Kolawole, ja A. Almakrab, „Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States“, *Case Stud. Constr. Mater.*, kd 15, lk e00563, dets 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00563.
- [4] „Alkali Silica Reaction - an overview | ScienceDirect Topics“. Vaadatud: 15. aprill 2025. [Online]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/alkali-silica-reaction>
- [5] K. K. Liu ja W. H. Tam, „THE USE OF ACCELERATED MORTAR BAR TEST METHODS FOR ASSESSMENT OF ALKALI-AGGREGATE REACTIVITY OF AGGREGATE IN HONG KONG“, nr 145.
- [6] S. Willard, „What You Should Know About Alkali-Silica Reactivity in Concrete“, AET. Vaadatud: 15. aprill 2025. [Online]. Available at: <https://www.teamaet.com/what-you-should-know-alkali-silica-reactivity-in-concrete/>
- [7] „Workshop-proceeding-No-11_nov2013-Riga.pdf“. Vaadatud: 15. aprill 2025. [Online]. Available at: https://nordicconcrete.net/wp-content/uploads/2016/06/Workshop-proceeding-No-11_nov2013-Riga.pdf
- [8] F. Rajabipour, E. Giannini, C. Dunant, J. H. Ideker, ja M. D. A. Thomas, „Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps“, *Cem. Concr. Res.*, kd 76, lk 130–146, okt 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.024.
- [9] Z. P. Bazant ja A. Steffens, „Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete“, *Cem. Concr. Res.*, kd 30, nr 3, lk 419–428, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00270-7.
- [10] T. Ichikawa ja M. Miura, „Modified model of alkali-silica reaction“, *Cem. Concr. Res.*, kd 37, nr 9, lk 1291–1297, sept 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.008.
- [11] J. Lindgård *et al.*, „The EU “PARTNER” Project — European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations“, *Cem. Concr. Res.*, kd 40, nr 4, lk 611–635, apr 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.09.004.
- [12] *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*¹, C1260.

- [13] P. J. Nixon ja I. Sims, Toim, *RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures*. Springer Dordrecht Heidelberg, 2016.
- [14] J. Žvironaitė ja J. Pranckevičienė, „The Investigation of Alkali – Silica Reactivity (ASR) of Lithuanian Aggregates“, *Procedia Eng.*, kd 172, lk 1305–1310, jaan 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.160.
- [15] B. Li, Z.-R. Wang, H.-B. Liu, X.-Z. Liu, H. Li, ja X. Chen, „Meso-mechanical research on alkali-silica reaction expansion in Pyrex glass and silica sand at different temperatures and curing times“, *Constr. Build. Mater.*, kd 223, lk 377–393, okt 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.232.
- [16] J. Lindgård, Ö. Andiç-Çakır, I. Fernandes, T. F. Rønning, ja M. D. A. Thomas, „Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing“, *Cem. Concr. Res.*, kd 42, nr 2, lk 223–243, veebr 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.10.004.
- [17] M. Vacher ja S. Jacobsen, „Empirical Modelling of Lithium Mitigation for Alkali-Silica Reactivity“, *Nord. Concr. Res.*, kd 67, nr 2, lk 1–14, jaan 2023, doi: 10.2478/ncr-2022-0003.
- [18] M. Ranger, M. T. Hasholt, J. Lindgård, ja R. A. Barbosa, „Laboratory and field investigations of alkali-silica reaction prevention by supplementary cementitious materials: Influence of the free alkali loading“, *Constr. Build. Mater.*, kd 442, lk 137599, sept 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137599.
- [19] M. Thomas, „The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review“, *Cem. Concr. Res.*, kd 41, nr 12, lk 1224–1231, dets 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.003.
- [20] A. Rekka, „Tsementide leeliselisus“, 7. aprill 2025.
- [21] O. Litvinov *et al.*, *Ehitustehnoloogia*. kirjastus „Valgus“, 1984.
- [22] J. Lindgård, Ö. Andiç-Çakır, I. Fernandes, T. F. Rønning, ja M. D. A. Thomas, „Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing“, *Cem. Concr. Res.*, kd 42, nr 2, lk 223–243, veebr 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.10.004.
- [23] A. Suwito, W. Jin, Y. Xi, ja C. Meyer, „A Mathematical Model for the Pessimism Size Effect of ASR in Concrete“.
- [24] T. Dyer, „Modelling alkali-silica reaction from micro-computed tomography images: role of particle size and water/cement ratio“, *Mag. Concr. Res.*, kd 76, nr 21, lk 1217–1228, nov 2024, doi: 10.1680/jmacr.24.00022.
- [25] „Geology and Mineral Resources of Estonia“. Vaadatud: 24. aprill 2025. [Online]. Available at: <https://geoloogia.info/geology/>

- [26] M. Kiisa, K. Lellep, J. Šommet, J. Vanamõisa, R. Aunpu, ja S. Sein, *Teedeehituslik betoon kasutuseaga 100 aastat ja rohkem*. Tallinna Tehnikakõrgkool, 2022. [Online]. Available at: <https://www.etis.ee/portal/publications/display/49d7db37-2edf-4e42-9e5a-76a3dfb31396>
- [27] B. Fournier, J. H. Ideker, K. J. Folliard, M. D. A. Thomas, P.-C. Nkinamubanzi, ja R. Chevrier, „Effect of environmental conditions on expansion in concrete due to alkali-silica reaction (ASR)“, *Mater. Charact.*, kd 60, nr 7, lk 669–679, juuli 2009, doi: 10.1016/j.matchar.2008.12.018.
- [28] „Õhuniiskus |“, Keskkonnaagentuur | ILM. Vaadatud: 1. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/ohuniiskus/>
- [29] S. Näide, „vähendamine betoonivaldkonnas“.
- [30] „Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book“.
- [31] M. Vacher ja S. Jacobsen, „Empirical Modelling of Lithium Mitigation for Alkali-Silica Reactivity“, *Nord. Concr. Res.*, kd 67, nr 2, lk 1–14, jaan 2023, doi: 10.2478/ncr-2022-0003.
- [32] D. Vo *et al.*, „Evaluation of structures affected by Alkali-Silica reaction (ASR) using homogenized modelling of reinforced concrete“, *Eng. Struct.*, kd 246, lk 112845, nov 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112845.
- [33] „Figure 2.4: Crack patterns of (a) plain concrete and (b) reinforced...“, ResearchGate. Vaadatud: 30. aprill 2025. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Crack-patterns-of-a-plain-concrete-and-b-reinforced-concrete-from-Kreitman-2011_fig3_271270924
- [34] R. B. Figueira *et al.*, „Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods“, *Constr. Build. Mater.*, kd 222, lk 903–931, okt 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.230.
- [35] „Fig. 4 Pattern of the cracks related to ASR. In both structures (a, b),...“, ResearchGate. Vaadatud: 30. aprill 2025. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Pattern-of-the-cracks-related-to-ASR-In-both-structures-a-b-the-major-cracks-reflect_fig4_257806232
- [36] „issue03.pdf“. Vaadatud: 4. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/reactive/issue03.pdf>
- [37] „Alkali Silica Reaction ASR | Testing in concrete non destructive“, www.NDTJames.com. Vaadatud: 4. mai 2025. [Online]. Available at: https://www.ndtjames.com/product_p/i-as-3000.htm
- [38] „hif12022.pdf“. Vaadatud: 4. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/asr/pubs/hif12022.pdf>
- [39] H. Pyy, E. Holt, ja M. Ferreira, „An Initial Survey on the Occurrence of Alkali Aggregate Reaction in Finland“.

- [40] P. Kazemi, M. R. Nikudel, M. Khomehchiyan, P. Giri, S. Taheri, ja S. M. Clark, „Assessment of Alkali–Silica Reaction Potential in Aggregates from Iran and Australia Using Thin-Section Petrography and Expansion Testing“, *Materials*, kd 15, nr 12, Art. nr 12, jaan 2022, doi: 10.3390/ma15124289.
- [41] E. O. Fanijo, J. T. Kolawole, ja A. Almakrab, „Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States“, *Case Stud. Constr. Mater.*, kd 15, lk e00563, dets 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00563.
- [42] „Thin section“, *Wikipedia*. 10. jaanuar 2024. Vaadatud: 5. mai 2025. [Online]. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thin_section&oldid=1194635521
- [43] G. Lorenzi *et al.*, *Petrographic atlas of the potentially alkali-reactive rocks in Europe*. 2006.
- [44] Technical Committee CEN/TC 104, „Regional Specifications and Recommendations for the avoidance of damaging alkali silica reactions in concrete“, European Committee for Standardization, CR 1901:1995.
- [45] *Betooni täitematerjalid*, EVS-EN 12620:2005+A1:2008. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12620-2005-a1-2008-consolidated>
- [46] *Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus*, EVS-EN 206:2014+A2:2021. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-en-206-2014-a2-2021-consolidated>
- [47] *Concrete - Application of SS EN 206:2013+A2:2021 in Sweden*, SS-EN 137003:2021.
- [48] „Tiltu-specifikacijas-2020“.
- [49] Z. Naziemiec, „Alkali-silica reactivity of selected domestic fine aggregates“, *Roads Bridg. – Drogi Mosty*, kd 17, nr 4, Art. nr 4, dets 2018, doi: 10.7409/rabdim.018.017.
- [50] „Kval_SertCEMI52R_25“.
- [51] K. Lellep, „Lõputöö juhendaja fotod katsetamisest“.
- [52] A. Shayan, „Field evidence for inability of ASTM C 1260 limits to detect slowly reactive Australian aggregates“, *Aust. J. Civ. Eng.*, kd 3, nr 1, lk 13–26, jaan 2007, doi: 10.1080/14488353.2007.11463917.
- [53] P. Rocker, Iman (James) Mohammadi, Vute Sirivivatnanon, ja W. South, „Linking New Australian Alkali Silica Reactivity Tests to World-Wide Performance Data“, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.4020.7842.

LISA. KATSEKEHADE MÕÖTMISANDMED

Tabel 1. Soodla katsekehade mõõtmisandmed

#	Tähis valemities (1), (2)	L _i	L ₀	L ₃	L ₆	L ₉	L ₁₂	L ₁₄	L ₂₁
1	R _{P,n} , mm	4,526	4,508	4,508	4,508	4,512	4,509	4,509	4,509
	K _{M,n} , mm	5,172	5,305	5,375	5,397	5,422	5,444	5,452	5,500
	L, mm	250,6	250,8	250,9	250,9	250,9	250,9	250,9	251,0
	Pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08
2	R _{P,n} , mm	4,526	4,508	4,508	4,508	4,512	4,509	4,509	4,509
	K _{M,n} , mm	6,860	6,991	7,069	7,088	7,114	7,133	7,146	7,194
	L, mm	252,3	252,5	252,6	252,6	252,6	252,6	252,6	252,7
	Pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08
3	R _{P,n} , mm	4,526	4,508	4,508	4,508	4,512	4,509	4,509	4,509
	K _{M,n} , mm	4,253	4,382	4,460	4,474	4,500	4,522	4,531	4,575
	L, mm	249,7	249,9	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,1
	Pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08
	Keskmine pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08

Tabel 2. Aardlapalu katsekehade mõõtmisandmed

#	Tähis valemities (1), (2)	L _i	L ₀	L ₃	L ₆	L ₉	L ₁₂	L ₁₄	L ₂₁
1	R _{P,n} , mm	4,526	4,506	4,509	4,507	4,512	4,509	4,509	4,509
	K _{M,n} , mm	4,767	4,896	4,984	4,996	5,033	5,075	5,090	5,170
	L, mm	250,2	250,4	250,5	250,5	250,5	250,6	250,6	250,7
	Pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,11
2	R _{P,n} , mm	4,526	4,506	4,509	4,507	4,512	4,509	4,509	4,509
	K _{M,n} , mm	4,730	4,861	4,947	4,960	4,996	5,035	5,053	5,124
	L, mm	250,2	250,4	250,4	250,5	250,5	250,5	250,5	250,6
	Pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10
3	R _{P,n} , mm	4,526	4,506	4,509	4,507	4,512	4,509	4,509	4,509
	K _{M,n} , mm	4,824	4,951	5,039	5,052	5,093	5,132	5,151	5,223
	L, mm	250,3	250,4	250,5	250,5	250,6	250,6	250,6	250,7
	Pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,11
	Keskmine pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,11

Tabel 3. Siimusti katsekehade mõõtmisandmed

#	Tähis valemities (1), (2)	L _i	L ₀	L ₃	L ₆	L ₉	L ₁₂	L ₁₄	L ₂₁
1	R _{P,n} , mm	4,509	4,506	4,508	4,506	4,510	4,509	4,507	4,509
	K _{M,n} , mm	4,840	4,959	5,059	5,078	5,121	5,151	5,172	5,252
	L, mm	250,3	250,5	250,6	250,6	250,6	250,6	250,7	250,7
	Pikenemine, %			0,04	0,05	0,06	0,08	0,08	0,12
2	R _{P,n} , mm	4,509	4,506	4,508	4,506	4,510	4,509	4,507	4,509
	K _{M,n} , mm	5,020	5,149	5,250	5,270	5,310	5,340	5,357	5,439
	L, mm	250,5	250,6	250,7	250,8	250,8	250,8	250,9	250,9
	Pikenemine, %			0,04	0,05	0,06	0,08	0,08	0,11
3	R _{P,n} , mm	4,509	4,506	4,508	4,506	4,510	4,509	4,507	4,509
	K _{M,n} , mm	5,284	5,403	5,494	5,519	5,558	5,590	5,609	5,690
	L, mm	250,8	250,9	251,0	251,0	251,0	251,1	251,1	251,2
	Pikenemine, %			0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,11
	Keskmine pikenemine, %			0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,11

Tabel 4. Männiku katsekehade mõõtmisandmed

#	Tähis valemities (1), (2)	L _i	L ₀	L ₃	L ₆	L ₉	L ₁₂	L ₁₄	L ₂₁
1	R _{P,n} , mm	4,517	4,505	4,508	4,506	4,510	4,509	4,507	4,508
	K _{M,n} , mm	4,808	4,927	5,029	5,033	5,066	5,085	5,104	5,150
	L, mm	250,3	250,4	250,5	250,5	250,6	250,6	250,6	250,6
	Pikenemine, %			0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09
2	R _{P,n} , mm	4,517	4,505	4,508	4,506	4,510	4,509	4,507	4,508
	K _{M,n} , mm	5,157	5,278	5,379	5,382	5,413	5,435	5,448	5,496
	L, mm	250,6	250,8	250,9	250,9	250,9	250,9	250,9	251,0
	Pikenemine, %			0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09
3	R _{P,n} , mm	4,517	4,505	4,508	4,506	4,510	4,509	4,507	4,508
	K _{M,n} , mm	4,967	5,082	5,189	5,195	5,224	5,244	5,258	5,307
	L, mm	250,5	250,6	250,7	250,7	250,7	250,7	250,8	250,8
	Pikenemine, %			0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09
	Keskmine pikenemine, %			0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09

Tabel 5. Krüüdneri katsekehade mõõtmisandmed

#	Tähis valemities (1), (2)	L _i	L ₀	L ₃	L ₆	L ₉	L ₁₂	L ₁₄	L ₂₁
1	R _{P,n} , mm	4,506	4,505	4,507	4,505	4,508	4,508	4,507	4,508
	K _{M,n} , mm	4,810	4,942	5,031	5,059	5,102	5,145	5,174	5,272
	L, mm	250,3	250,4	250,5	250,6	250,6	250,6	250,7	250,8
	Pikenemine, %			0,03	0,05	0,06	0,08	0,09	0,13
2	R _{P,n} , mm	4,506	4,505	4,507	4,505	4,508	4,508	4,507	4,508
	K _{M,n} , mm	4,937	5,069	5,160	5,191	5,229	5,270	5,298	5,391
	L, mm	250,4	250,6	250,7	250,7	250,7	250,8	250,8	250,9
	Pikenemine, %			0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,13
3	R _{P,n} , mm	4,506	4,505	4,507	4,505	4,508	4,508	4,507	4,508
	K _{M,n} , mm	4,817	4,940	5,029	5,055	5,100	5,142	5,171	5,262
	L, mm	250,3	250,4	250,5	250,6	250,6	250,6	250,7	250,8
	Pikenemine, %			0,03	0,05	0,06	0,08	0,09	0,13
	Keskmine pikenemine, %			0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,13

Tabel 6. Pannjärve katsekehade mõõtmisandmed

#	Tähis valemities (1), (2)	L _i	L ₀	L ₃	L ₆	L ₉	L ₁₂	L ₁₄	L ₂₁
1	R _{P,n} , mm	4,491	4,504	4,506	4,504	4,508	4,508	4,507	4,508
	K _{M,n} , mm	4,697	4,837	4,937	4,959	4,975	4,996	5,012	5,063
	L, mm	250,2	250,3	250,4	250,5	250,5	250,5	250,5	250,6
	Pikenemine, %			0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09
2	R _{P,n} , mm	4,491	4,504	4,506	4,504	4,508	4,508	4,507	4,508
	K _{M,n} , mm	4,753	4,890	4,990	5,000	5,032	5,051	5,065	5,121
	L, mm	250,3	250,4	250,5	250,5	250,5	250,5	250,6	250,6
	Pikenemine, %			0,04	0,04	0,06	0,06	0,07	0,09
3	R _{P,n} , mm	4,491	4,504	4,506	4,504	4,508	4,508	4,507	4,508
	K _{M,n} , mm	5,183	5,319	5,420	5,434	5,462	5,484	5,498	5,553
	L, mm	250,7	250,8	250,9	250,9	251,0	251,0	251,0	251,0
	Pikenemine, %			0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09
	Keskmine pikenemine, %			0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09

Tabel 7. Potsepa katsekehade mõõtmisandmed

#	Tähis valemities (1), (2)	L _i	L ₀	L ₃	L ₆	L ₉	L ₁₂	L ₁₄	L ₂₁
1	R _{P,n} , mm	4,506	4,503	4,508	4,505	4,510	4,507	4,512	4,507
	K _{M,n} , mm	4,676	4,811	4,897	4,910	4,945	4,955	4,974	5,008
	L, mm	250,2	250,3	250,4	250,4	250,4	250,4	250,5	250,5
	Pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08
2	R _{P,n} , mm	4,506	4,503	4,508	4,505	4,510	4,507	4,512	4,507
	K _{M,n} , mm	5,492	5,629	5,717	5,727	5,758	5,772	5,795	5,829
	L, mm	251,0	251,1	251,2	251,2	251,2	251,3	251,3	251,3
	Pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08
3	R _{P,n} , mm	4,506	4,503	4,508	4,505	4,510	4,507	4,512	4,507
	K _{M,n} , mm	4,676	4,779	4,865	4,879	4,915	4,924	4,946	4,980
	L, mm	250,2	250,3	250,4	250,4	250,4	250,4	250,4	250,5
	Pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08
	Keskmine pikenemine, %			0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08