



TALLINNA  
TEHNIKA KÕRGGKOOI

Arina Mironocheva

**LEELIS-RÄNI REAKTSIOONI  
KATSELISE UURIMISE II ETAPP**

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2026



**Arina Mironocheva**

# **LEELIS-RÄNI REAKTSIOONI KATSELISE UURIMISE II ETAPP**

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Hoonete ehitus

Juhendaja: Karin Lellep, *MSc*

Tallinn 2026

# LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, Arina Mironocheva

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

## Leelis-räni reaktsiooni katselise uurimise II etapp

- 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, Arina Mironocheva  
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  
Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

# SISUKORD

|  |    |
|--|----|
| SISSEJUHATUS .....   | 6  |
| 1 ÜLEVAADE TEADUS- JA ERIALAKIRJANDUSEST .....                                   | 7  |
| 1.1 Ülevaade uuringu esimesest etapist.....                                      | 7  |
| 1.2 Leelis-räni reaktsiooni (ASR) kohta üldiselt.....                            | 7  |
| 1.3 ASR keemilise reaktsiooni kirjeldus.....                                     | 11 |
| 2 ÜLEVAADE KILLUSTIKU ROLLIST LEELIS-RÄNI REAKTSIOONIS.....                      | 13 |
| 2.1 Killustiku rollist üldiselt .....  | 13 |
| 2.2 Soome agregaatide uuring .....   | 13 |
| 2.3 Hispaania killustiku uuring.....   | 16 |
| 2.4 Leedu kruusakarjääri täitematerjalide uuring.....                            | 17 |
| 3 KONSTRUKTSIOONID, MILLEL ON TUVASTATUD ASR.....                                | 20 |
| 3.1 Sillad Soomes.....   | 20 |
| 3.2 Elgeseter sild Norras.....   | 21 |
| 3.3 Alto Ceira pais Portugalis.....  | 23 |
| 4 JÄMETÄITEMATERJALIDE KATSETAMINE.....  | 25 |
| 4.1 Meetodikad .....   | 25 |
| 4.1.1 Petrograafiline uuring .....   | 25 |
| 4.1.2 Mördivarda pikenemise katse (AAR-2, AAR-3 ja AAR-4.1).....                 | 26 |
| 4.2 Jämetäitematerjali purustamise protsessi ja meetodi mõju katsetulemustele .. | 28 |
| 4.3 Katsed jämetäitematerjalidega.....   | 32 |
| 4.3.1 Katseplaan .....   | 32 |
| 4.3.2 Ettevalmistused .....  | 33 |
| 4.3.3 Katsekehade valmistamine .....   | 34 |
| 4.3.4 Katsetamine .....  | 37 |
| 4.3.5 Katsetulemused .....   | 39 |
| 5 ASR TUVASTAMINE OLEMASOLEVATEL KONSTRUKTSIOONIDEL .....                        | 44 |
| 5.1 Meetodikad .....   | 44 |
| 5.2 ASR Detect.....  | 47 |
| 5.3 Sõpruse sild .....   | 48 |
| 5.4 Objekt 1 .....   | 51 |
| 5.5 Objekt 2 .....   | 54 |
| 5.6 Objekt 3 .....   | 57 |
| 5.7 Objekt 4 .....   | 60 |
| 5.8 Objekt 5 .....   | 62 |
| 6 ETTEPANEKUD EDASISTEKS UURINGUTEKS .....                                       | 65 |
| KOKKUVÕTE .....  | 66 |

|   |    |
|---|----|
| SUMMARY .....   | 68 |
| VIIDATUD ALLIKAD .....                                      | 69 |
| Lisa 1. Jämetäitematerjalide mikrofotod .....               | 73 |
| Lisa 2. Katsekehade mõõtetulemuste kehtivuse kontroll ..... | 85 |
| Lisa 3. Katsekehade pikenemise mõõdistuste andmed .....     | 91 |

# SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö eesmärk on jätkata leelis-räni reaktsiooni ehk ASR uuringud Tallinna Tehnikakõrgkoolis. Töö raames uuritakse, kas ja mis määral on Eestis toodetav killustik leelis-räni reaktsioonile vastuvõtlik ning teostatakse esmased uuringud hindamaks ASR võimalikku esinemist olemasolevatel konstruktsioonidel.

Leelis-räni reaktsioon tekib betoonkonstruktsioonidel tsemendis sisalduvate leeliste ja täitematerjalides sisalduva räni reageerimisel. Reaktsiooni käigus tekib paisuv geel, mis kahjustab konstruktsiooni visuaalselt ning vähendab selle tugevust ja vastupidavust väliskeskkonna mõjudele. ASR-i hakati uurima Ameerika Ühendriikides juba 1930. aastatel [1] ning tänaseks on see teema oluline osa betoonkonstruktsioonide pikaajalise tagamise üle maailma. Tallinna Tehnikakõrgkoolis uuriti 2025. aastal peentäitematerjali vastuvõtlikkust leelis-räni reaktsioonile RILEM AAR-2 meetodil M Pädami lõputöö raames. Katse tulemusena klassifitseerusid kõik uuritud peentäitematerjalid mitte reageerivateks, kuid tekkis vajadus edasiste uuringute järele eesmärgiga kinnitada saadud tulemusi ning uurida jämetäitematerjalide reaktiivsust. [2]

Teostatavad katselised uuringud annavad ülevaate ASR-i aktuaalsusest Eestis. Katsete tulemused omavad tähtsust ehitusinseneridele, ehitiste ja karjäärade omanikele ning betooni tootmisega tegelevatele ettevõtetele.

Lõputöö esimeses pooles antakse ülevaade leelis-räni reaktsioonist ja välisriikides teostatud jämetäitematerjalide ASR uuringutest. Samuti tutvustatakse olemasolevaid konstruktsioone, millel on avastatud ASR. Töö teises pooles keskendutakse leelis-räni reaktsiooni katselisele uurimisele. Lõputöös teostatakse katseid RILEM AAR-2 meetodil (mördivarda pikenemise katse) kestvusega 14 päeva [3]. Esimeseks katsemeetodiks on tavapäraselt RILEM AAR-1 meetod, kuid kuna Eestis sellist katset ei teostata, sellest loobuti. Olemasolevaid konstruktsioone uuritakse ASR Detect komplektiga.

# 1 ÜLEVAADE TEADUS- JA ERIALAKIRJANDUSEST

## 1.1 Ülevaade uuringu esimesest etapist

Margo Pädami 2025. aasta kevadel kirjutatud lõputöös „Leelis-räni reaktsiooni ülevaade ja katseline uurimine“ käsitleti leelis-räni reaktsiooni ehk ASR-i nii laialdaselt Eestis esimest korda. Lõputöös anti ülevaade ASR olemusest, reaktsiooni toimumisest ja betooni kahjustuste kujunemiseks vajalikest tingimustest. Toodi välja, et reaktsiooni teket ja kulgemist on võimalik mõjutada täitematerjalide, sideaine ja keskkonningimuste abil. Töös käsitleti ka ASR-i uurimise meetodikate arengut ajaloos ja eri riikides. Sealhulgas Eesti kontekstis tähtsa koha peal olevates põhjamaades, eriti Soomes. Kirjeldati ka naaberriikide tulemusi leelis-räni reaktsiooni hindamisel ja uurimisel. Lätis teostatud mõrdipulga pikendamise katsed (RILEM AAR-2 järgi) näitasid ASR-i positiivset tulemust, kui kasutati kohalikku peentäitematerjali. Samuti anti ülevaade ka Leedus AAR-2.2 meetodil teostatud uuringust. Selles kasutatud täitematerjalid ei ületanud 14 päeva jooksul reaktiivsuse piirmäära, kuid 28 päeva möödumisel pikenesid kuni 0,17%-ni. See viitas aeglasemale reaktsiooni arengule katsekehades, kuid siiski nende potentsiaalsele reaktiivsusele. [2]

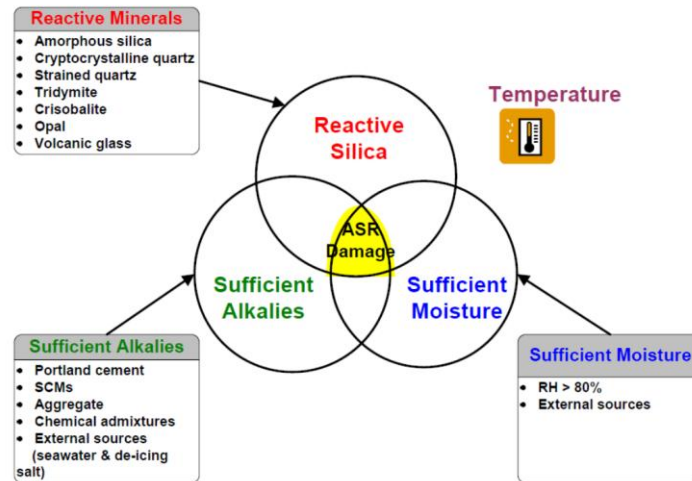
Lõputöö praktilise osa katselised teostati RILEM AAR-2 meetodika järgi Eesti karjäärdest saadud liivaga. Peentäitematerjalide katsetulemused olid ASR suhtes negatiivsed, ehk täitematerjalid ei näidanud 14 päeva jooksul leelis-räni reaktsiooni teket. Katse pikendamisel 28. päevani ületasid 3 katsekeha reaktiivsuse piiri pikenedamisega üle 0,1% jõudes II klassi (potentsiaalselt reaktiivsed). Katsekehadel märgati ka visuaalseid tunnuseid, mis võiksid viidata ASR võimalikule esinemisele. [2]

## 1.2 Leelis-räni reaktsiooni (ASR) kohta üldiselt

Leelis-räni reaktsioon ehk *alkali-silica reaction* ehk ASR on betoonis esinev reaktsioon, mille käigus reageerivad leelised täitematerjalis esineva ränidioksiidiga. Keemilise reaktsiooni tagajärjel moodustub paisuv leelis-räni geel, mis kahjustab betooni. Reaktsiooni on esmalt kirjeldatud 1940-ndatel Ameerika Ühendriikides. [1], [4]

ASR arenemiseks on vajalik kolme teguri samaaegne olemasolu: piisav leeliselisus betooni poorilahuses, piisavalt kõrge ränisisaldus täitematerjalis ning niiskus. Juhul kui vähemalt üks eelmainitud tingimustest jääb täitmata, siis reaktsiooni ei teki. Niiskuse olemasolul saab reaktsiooni käigus tekkiv geel paisuda – madala niiskuse puhul ei avalda reaktsiooni käigus tekkiv geel konstruktsioonile märkimisväärset mõju. Kõrgem väliskeskkonna temperatuur kiirendab reaktsiooni kulgemist. Seejuures peab leelis-räni reaktsiooni

arenguks olema tagatud ka piisav niiskus ja aluselisus – nende tegurite olemasolul tekib ja paisub ASR geel. Allolev joonis illustreerib reaktsiooni tekkeks vajalikke eelmainitud kriteeriumeid (Joonis 1) [4], [5].



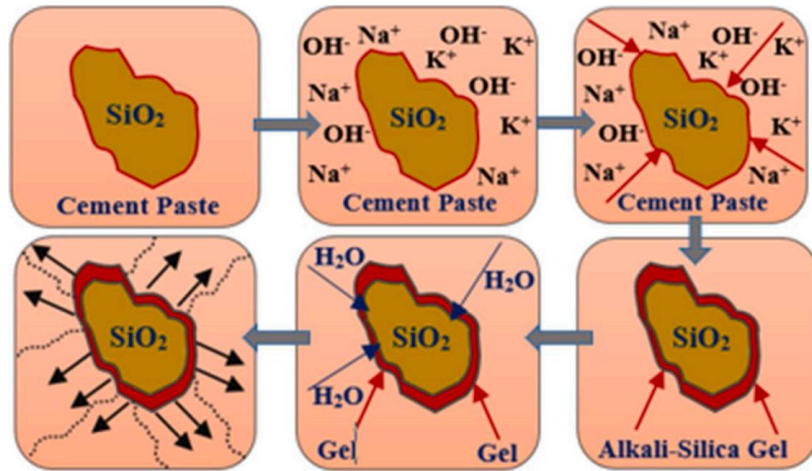
Joonis 1. ASR-kahjustuse tekkimise kriteeriumid [5]

Täitematerjalide koostises, mis on leelis-räni reaktsioonile vastuvõtlikumad, sisaldub sageli basalti, opaali, dolomiitset lubjakivi, ränikivi, kvartsi, vulkaanilist klaasi ning teatud moonde- ja settekivimeid. Nende keemiline stabiilsus leeliselises keskkonnas on madalam ehk need on reaktiivsed. Ülevaade mõningatest reaktiivsetest materjalidest on välja toodud allolevas tabelis (Tabel 1) [4].

Tabel 1. Täitematerjalide ASR reaktiivsus [4]

| Täitematerjali tüüp     | ASR klassifikatsioon |
|-------------------------|----------------------|
| Basalt                  | Reaktiivne           |
| Opaal                   | Reaktiivne           |
| Dolomiitne lubjakivi    | Reaktiivne           |
| Ränikivi                | Reaktiivne           |
| Spratt (lubjakivi tüüp) | Reaktiivne           |
| Klaastäitematerjal      | Reaktiivne           |
| Lubjakivi               | Mittereaktiivne      |
| Andesiit                | Reaktiivne           |
| Dolomiit                | Mittereaktiivne      |
| Datsiit                 | Reaktiivne           |
| Kvartsiiv               | Mittereaktiivne      |
| Rüoliit                 | Reaktiivne           |

ASR käigus moodustuv leelis-räni geel on hügrokoopne ning imab endasse niiskust ja paisub. Selle protsessi käigus aga suurenevad sisepinged, mis ületavad materjali tõmbetugevuse ja põhjustavad mikroskoopilisi kahjustusi ja pragunemist (Joonis 2), (Foto 1), (Tabel 2, lk 10). [4]



Joonis 2. ASR mehhanismi skeem betoonis [4]

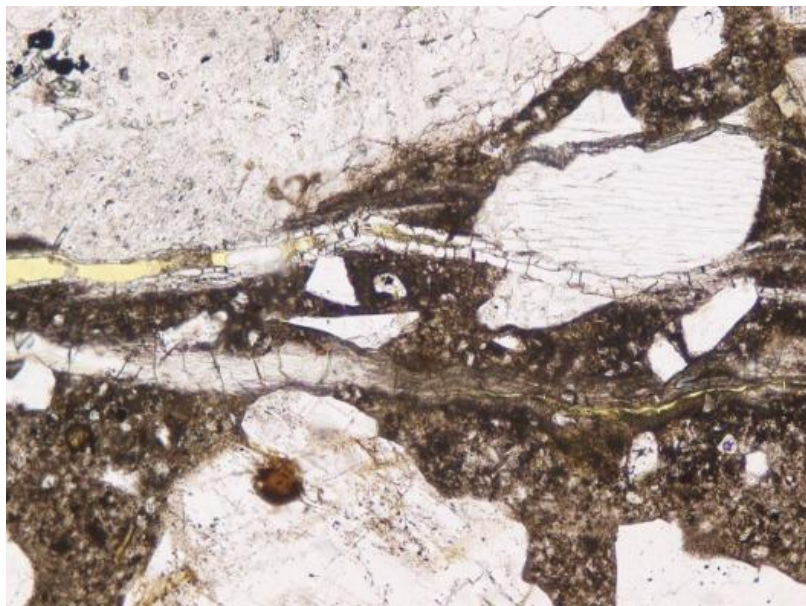


Foto 1. ASR mikropragunemised [6]

Tabel 2. ASR-le eriti vastuvõtlikud täitematerjalid ja nende terasuuruste vahemikud [4]

| <b>ASR suhtes testitud täitematerjal</b>       | <b>ASR-le vastuvõtlikuim terasuurus, mm</b> |
|--|---|
| Opaali sisaldav ränirikas magneesium-lubjakivi | 0,17...0,60                                 |
| Opaalsed täitematerjalid                       | 0,020...0,125                               |
| Opaalse koostisega täitematerjali osakesed     | 0,07...0,85                                 |
| Erinevad ränirikad täitematerjalid             | 0,15  |
| Reaktiivsed ränisisaldusega täitematerjalid    | 0,15...0,30                                 |
| Ränisisaldusega lubjakivi                      | 1,25...3,25                                 |
| Alpi päritolu klooririkas kilt (täitematerjal) | 2...4                                       |
| Soodaklaas klaastäitematerjal                  | 1,18...2,36                                 |
| Sfäärilised klaasosakesed (mördiprisma katses) | 2...3                                       |

ASR tekitab visuaalselt nähtavaid kahjustusi konstruktsioonides. Need hõlmavad pikisuunalisi pragusid armatuuri kohal, vuukide lagunemist, servade murenemist (Foto 2) ja pinnapragunemisi (Foto 3). Tõsistel juhtumitel võib leelis-räni reaktsioon põhjustada konstruktsiooni deformatsioone ja kandevõime kaotust. [6]



Foto 2. ASR kahjustused betoonkonstruktsiooni serval [7]

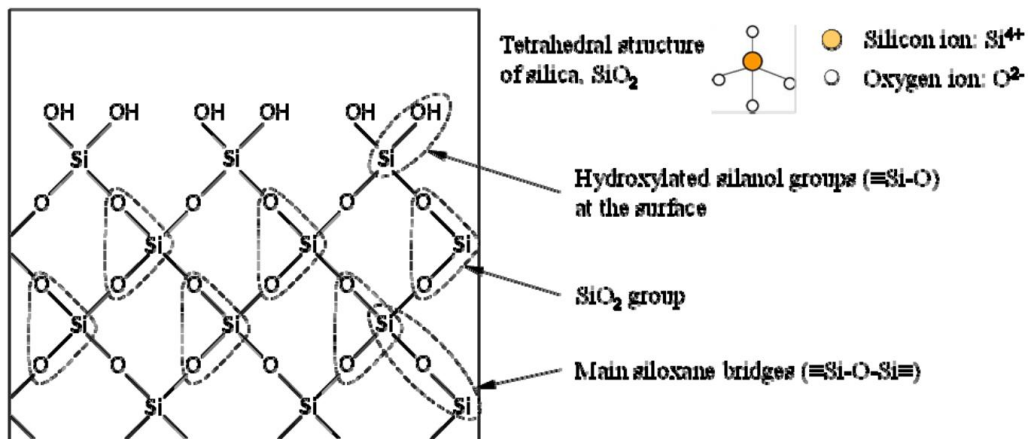
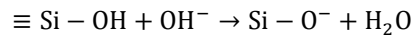


Foto 3. ASR kahjustustega betoonkonstruktsioon iseloomuliku võrkpragunemisega, pragudest väljub ASR-geel [8]

### 1.3 ASR keemilise reaktsiooni kirjeldus

Leelis-räni keemiline reaktsioon algab betooni poorilahuses leiduvate hüdroksiidioonide OH<sup>-</sup> ja ränidioksiidi SiO<sub>2</sub> vahelisest keemisest reaktsioonist täitematerjalis. Ränidioksiid koosneb peamiselt siloksaani rühmadest ≡Si-O-Si≡. Räni pinnakihil esineb ka hüdroksüülrühmasid ≡Si-OH, mida nimetatakse silanoolideks. (Joonis 3) [1]

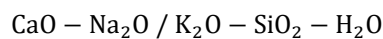
Keemiline reaktsioon kulgeb järgmiselt [1]:



Joonis 3. Räni struktuur [1]

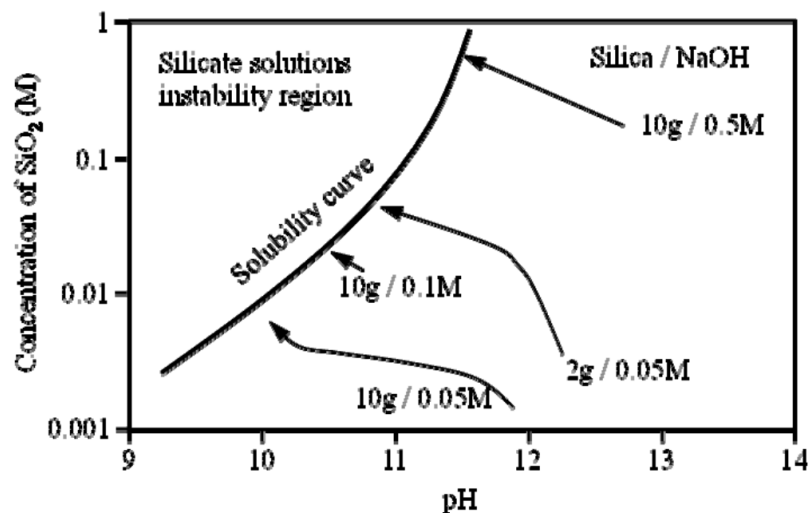
Räni struktuur hakkab lagunema, kui katkevad siloksaan-sidemed. Negatiivselt laetud silikaatioonid seovad ennast betooni poorilahuses positiivsete ionidega (eelkõige naatriumi Na<sup>+</sup> ja kaaliumiga K<sup>+</sup>). Tulemusena moodustub kas leelis-räni lahus või geel, sõltuvalt niiskussisaldusest. [1]

Kaltsiumi olemasolul aga sadestub räni lahusest leelis-räni geelina. Selle keemilises koostises on peamiselt naatrium, kaalium ja räni, väikses koguses ka kaltsium [1]:



Kõrge hüdroksiidioonide kontsentratsiooni korral hakkab räni lahustuma ja silanoolrühmad neutraliseeruvad, seejärel lagunevad siloksaan-sidemed. Selle protsessi käigus purunevad järk-järgult ränistruktuuri sidemed. Tulemusena tekivad negatiivselt laetud silikaatioonid Si-O<sup>-</sup>. [1]

Räni lahustumise protsessis langeb hüdroksiidioonide kontsentratsioon ja vesinikueksponendi ehk pH väärtus. Ideaalsetes tingimistes, kus vaadeldakse ainult leelishüdroksiidi ja räni omavahelist reaktsiooni, jätkub räni lahustumine niikaua kuni saavutatakse tasakaal vastavalt räni ja pH tasakaalukõvera graafikule. Reaktsioonijärgne räni kontsentratsioon sõltub algsest ränidioksiidi  $\text{SiO}_2$  ja naatriumoksiidi NaOH suhtest. (Joonis 4) [1]



Joonis 4. Tasakaaluline lahustuvuse kõver ( $\text{SiO}_2$ -pH) ja koostise muutus erinevate  $\text{SiO}_2$ -NaOH lahuste korral [1]

Betonis on keemiline olukord keerukam, kuna kõrge kaltsiumi sisaldus vähendab räni kontsentratsiooni lahuses. Samuti on see täiendavaks hüdroksiidioonide allikaks. Seetõttu toimub keemilise tasakaalu saavutamine betoonis (ja mördis) aeglasemalt võrreldes ideaalsete tingimustega. [1]

Mitme uuringu tulemused on näidanud, et ASR käigus moodustuva geeli keemiline koostis võib eri segudes oluliselt varieeruda. Samuti erinevad ka geeli enda füüsikalised omadused, sealhulgas paisumisvõime või võimekus avaldada piiratud tingimustes ümbritsevale keskkonnale mehaanilist survet. See omakorda selgitab leelis-räni reaktsiooni tulemusena tekkivate kahjustuste ulatuse ja ka üldise iseloomu suurt varieeruvust betoonkonstruktsioonides. [1]

## 2 ÜLEVAADE KILLUSTIKU ROLLIST LEELIS-RÄNI REAKTSIOONIS

### 2.1 Killustiku rollist üldiselt

Ameerika Ühendriikides välja antud „Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book” raamatus käsitletakse leelis-räni reaktsiooni suhtes vastuvõtlikke täitematerjale ja räni rolli reaktsioonis. ASR-le vastuvõtlikes kivimites leidub ränidioksiidi ( $\text{SiO}_2$ ), kuid kivimi struktuur mängib olulist rolli reaktsiooni tekkel ja kulgemisel. Näiteks opaal on kvartsiga võrreldes leelis-räni reaktsioonile väga vastuvõtlik, samas on laboritingimustes kunstlikult loodud kõrge temperatuuriga keskkonnas ka purustatud kvarts väga reaktiivne, kuid konstruktsioonides on reaktsioon tavaliselt piisavalt aeglane, et sellega ei arvestata. Mõlema mineraali koostises leidub suur kogus ränidioksiidi, kuid opaal muutub kõrgelt leeliselises keskkonnas oma amorfse (korrastamata) struktuuri tõttu ebastabiilseks. Betoonil, mille valmistamisel on kasutatud opaali sisaldusega täitematerjali, võib kõrge pH taseme olemasolu viia ASR-i tekkeni. [1]

ASR-i põhjustatud konstruktsiooni kahjustused ilmnevad korrastama struktuuriga kivimite kasutamisel kiiresti, mõningatel juhtudel ka juba mõne aasta jooksul. Seejuures piisab nende ca 1% sisaldusest täitematerjalis. Kõrge potentsiaalse reageerivustasemega materjalid on näiteks opaal (*opal*), tridümiit (*tridymite*), kristobaliit (*crystalite*), happeline vulkaaniline klaas (*acidic volcanic glass*), ränikivi (*chert*), mikrokristalliline kvarts (*microcrystalline quartz*) ning deformeeritud struktuuriga kvarts (*strained quartz*). Eesti kontekstis võib reageerivaid materjale leiduda liivakivis, lubjakivis ja dolomiidis [9]. [1]

### 2.2 Soome agregaatide uuring

Turu Ülikoolis uuris Leevi Grönlund oma magistritöös Soome agregaatide reaktiivseid komponente, mis põhjustavad betoonis ASR-i. Uuritud jämetäitematerjalina kasutatavad kivimi proovid olid oma koostise poolest Soome geoloogiale iseloomulikud kõrge kvartsi (18,4...43,2%), madala kuni kõrge leelise päevakivi (0,2...53,8%), naatrium-kaltsiumpäevakivi ehk plagioklass (1,2...52,6%), biotiidi (0,2...34,0%) ja madala kuni keskmise (0,0...17,8%) muskoviidi ehk kaaliumvilgu sisaldusega. Samuti leidis ka teiste, enamasti silikaatse koostisega kivimite terasi nagu kloriit, pürokseenid, amfiboolid ja küünekivi. [10]

Katsete käigus uuriti 19 kivimit, mis koguti erinevatest riigi piirkondadest nagu Helsingi, Turu, Tampere ja Kesk-Soome ümbruskond. [10]

Petrograafilise analüüsi jaoks lõigati kivid 3,5×2,5 cm tükkideks, kokku saadi 19 proovi. Leelis-räni reaktsioonivõime hindamine põhines potentsiaalselt reaktsioonivõimeliste komponentide sisaldusel proovides: deformeeritud struktuuriga kvarts (*strained quartz*) ja mikroskoopiliste kristallidega kvarts (*microcrystalline quartz*). [10]

Reaktsiooniklassid määrati järgmiste lävendite abil [10]:

- reaktiivsete komponentide modaalne ehk tegelik sisaldus koostises < 15% ja üldine terasuurus > 0,1 mm - I klass ehk ebatõenäoliselt reaktiivne;
- reaktiivsete komponentide modaalne sisaldus koostises > 15% - II klass ehk potentsiaalselt reaktiivne;
- reaktiivsete komponentide modaalne sisaldus koostises > 15%, milles kvartsi tera suurus on < 0,06 mm - III klass ehk tõenäoline potentsiaalne reaktsioonivõime.

Uuringus leiti, et kõikidest petrograafilise uuringu raames vaadeldud kividest 42% kuulusid II klassi ehk olid potentsiaalselt reaktiivsed. Proovikivimite reageerivaid komponente märgati nii visuaalselt kui ka petrograafilise analüüsi käigus. [10]

Varda pikenemise katse jaoks valiti 10 kivimit, mis purustati viite fraktsiooni järgnevalt [10]:

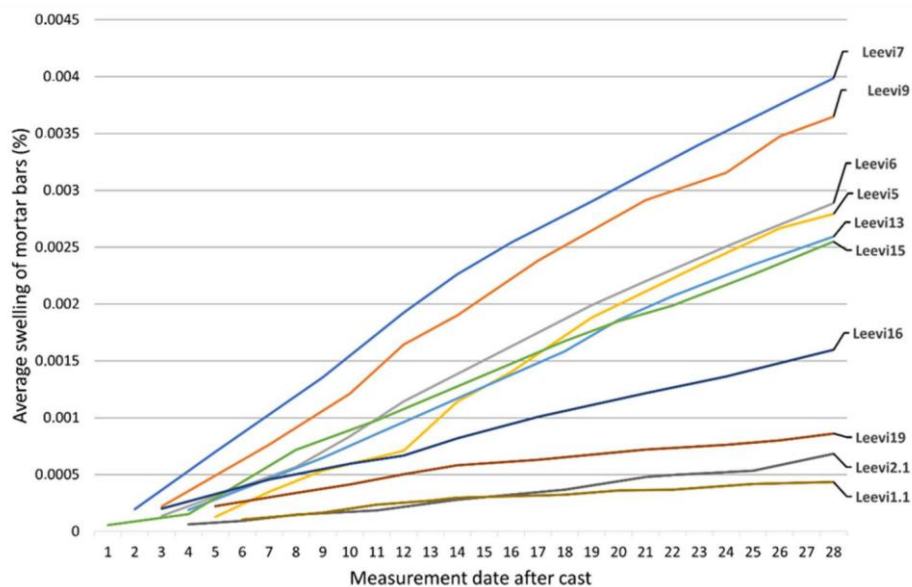
- 2,0...4,0 mm;
- 1,0...2,0 mm;
- 0,5...1,0 mm;
- 0,25...0,5 mm;
- 0,125...0,25 mm.

Katsete jaoks kasutati Soomes toodetud tsementi leelisusega 1,3% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> (naatriumoksiidi ekvivalent) ja terade peensusena 490...570 m<sup>2</sup>/kg. Igast kivimist tehti 3 eraldi katsevarrast mõõtudega 40×40×160 mm. Katse kogukestvus oli 28 päeva. Selle perioodi jooksul mõõdeti varda pikenemist 4 korda 1...13 päeva jooksul, ühe korra 14-ndal päeval, 4 korda 15...27 päeval ning viimane mõõdistus teostati 28. päeval. Kokku teostati katseperioodi jooksul igale mördivardale 10 mõõdistust. [10]

Saadud tulemused liigitati mittereageerivateks ja reageerivateks järgmiselt [10]:

- pikenemine  $\leq 0,08\%$  14 päeva möödudes või  $\leq 0,25\%$  28 päeva möödudes - I klass ehk ebatõenäoliselt reaktiivsed;
- pikenemine  $0,08...0,25\%$  14 päeva möödudes - II klass ehk potentsiaalselt reaktiivne;
- pikenemine  $\geq 0,25\%$  14 päeva möödudes - III klass ehk tõenäoline potentsiaalne reaktsioonivõime.

Katsetatud mördivarda pikenemised olid 14-ndal päeval  $0,0280...0,2262\%$  ja 28-ndal päeval  $0,0435...0,3986\%$  (Joonis 5). Kümnest katsetatud kivimist viis liigitati I ja viis II klassi. Ebatõenäoliselt reaktiivsete jämetäitematerjalide hulka kuulusid graniidiproovid ja üks kvartsi-päevakivi koostisega kivim. Potentsiaalselt reaktiivseteks olid määratud tugevalt deformeerunud gneiss (*strongly deformed gneiss*, Leevi5), madala moondeastmega fülliit (*low grade phyllite*, Leevi6), happeline metavolkaniit (*felsic metavolcanite*, Leevi7), kiltkivi (*felsic schist*, Leevi9), moonduvad graniit (*sheared granite*, Leevi13) ja lehestunud graniit (*foliated granite*, Leevi16). Mördivarda pikenemise katse tulemustele tuginedes oli happeline metavolkaniit (*felsic metavolcanite*, Leevi7) kõige tõenäolisemalt reaktiivne, selle pikenemine 14 päeva pärast oli peaaegu III klassi kuuluv ( $0,2262\%$ ) (Joonis 5). [10]



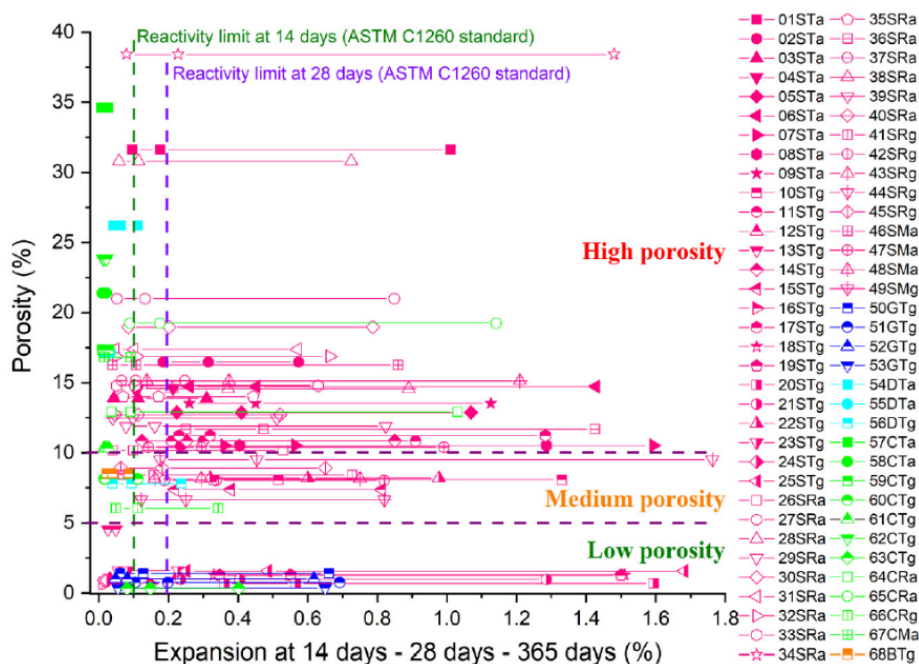
Joonis 5. Mördivarraste pikenemise diagramm 28-päevase perioodi jooksul [10]

Mördivarda pikenemise katse tulemused näitasid petrograafilise analüüsiga veelgi kõrgemat potentsiaalselt reaktiivsete proovide hulka – 70%. Kõrgema reaktiivsuse tõenäosusega olid nõrga kristallilisuse ja erakordselt väikese terasuurusega kivid. [10]

## 2.3 Hispaania killustiku uuring

Hispaanias viidi läbi täitematerjalide uuring, milles kasutati petrograafilist analüüsi vastavalt ASTM C294 standardile ning mõrdivarda pikennemise katset vastavalt UNE 146508 standardile (analoogne standarditega ASTM 1260 ja RILEM AAR-2). Täitematerjali uuringus „Study of the alkali-silica reaction rate of Spanish aggregates. Proposal of a classification based in accelerated mortar bars tests and petrographic parameters“ analüüsiti 68 erineva päritoluga täitematerjali. Uuritavad erineva päritoluga ränilist, lubjakivist ja dolomiitset killustikku. [11]

Petrograafilises analüüsis kasutati kvartsi reaktiivsuseindeksit ( $I_{QR}$ , mis põhineb terade välis- ja siseperimeetri suhtel), kus madalamad  $I_{QR}$  väärtused, alla 0,39 viitavad suuremale reaktiivsusele. Enamik ränilistest täitematerjalidest klassifitseerus potentsiaalselt reaktiivseks, graniidid aga asusid reaktiivsuse piiril, mis kinnitab nende aeglast reaktsioonikiirust. Uuringus leiti, et graniidi väga madal avatud pooride hulk takistab leeliste sisenemist täitematerjali osakestesse, mis selgitab materjali aeglast reaktsiooni kiirust. Lubjakivi ja dolomiitset täitematerjalid, mille poorsus on kõrgem, reageerivad kiiremini, kui nendes esineb reaktiivsed räni osakesi. Madala poorsusega ränilistel täitematerjalidel toimub leelis-räni reaktsioon algselt ainult osakeste pinnalt, mistõttu on mõrdivarraste algne pikennamine väike, kuid 365. katse päevaks ulatub see teiste ränilistele täitematerjalidele omaste väärtusteni. (Joonis 6) [11]

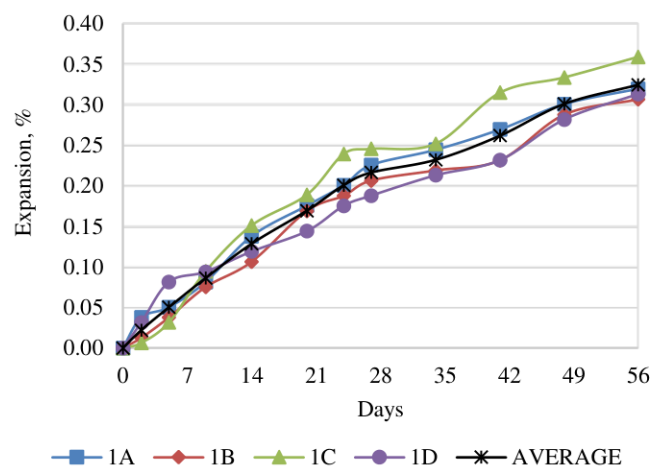


Joonis 6. Killustiku pikennemise ja poorsuse suhe 14, 28 ja 365 päeval [11]

Uuring käsitleb hispaania killustiku aeglast reageerimise protsessi, mille tõttu on seda pikalt käsitletud mittereaktiivsena. Uuringus toodi välja, et paljudes potentsiaalselt reaktiivsetes täitematerjalides ei avastata ASR-i lühikese 28-päevase katseperioodi jooksul, kuna reaktsiooni kulgemise kiirus on sellest aeglasem. Sellised materjalid ei näita leelis-räni reaktsiooni olemasolu standardse ASTM C 1260 klassifikatsiooni järgi [12]. Näiteks ei tuvastatud ASR-i sellistel materjalidel nagu graniidid, ränirikaste lisanditega lubjakivid ja enam kui 25% ränirikastest agregaatidest. 365-päevase katseaja jooksul aga ilmnes nende potentsiaalne reaktiivsus. Uuringus toodi välja, et killustiku reaktiivsuse hindamisel ei piisa standardsest lühiajalisest katsest ning aeglaselt reageerivate materjalide tuvastamiseks on vaja läbi viia pikaajalised katsed koos petrograafilise analüüsiga. [11]

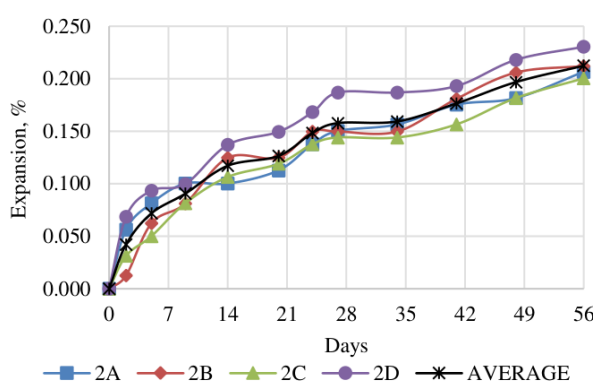
## 2.4 Leedu kruusakarjääri täitematerjalide uuring

Gediminase-nimelises Vilniuse Tehnikaülikoolis uuriti 2017. aastal Leedu kruusakarjääridest saadud täitematerjalide leelis-räni reaktsioonivõimet. Katsed viidi läbi kahe 4/16 mm fraktsiooni killustiku ja ühe 0/4 mm fraktsiooni liiva täitematerjaliga. Uuringu tulemusel leiti, et need täitematerjalid liigituvad AAR-2 meetodika (mördivarda piknemise katse) kohaselt potentsiaalselt reaktiivseteks ehk II klassi materjalideks piknemisega 0,10...0,20%. Killustiku ehk jämetäitematerjali piknemine 14 päeva möödumisel oli 0,11...0,12% ning liiva ehk peentäitematerjali piknemine oli sama katseaja jooksul keskmiselt 0,13% (Joonis 7). Igast täitematerjalist kasutati mõõtmisteks 4 katsekeha mõõtudega 40×40×160 mm. Katsekehad säilitati 80°C 1 M NaOH (~40 grammi naatriumhüdrosiidi 1 liitri kohta) lahuses. Kuigi AAR-2 meetod näeb ette 14-päevast katseaega, pikendati antud uuringus katseperiood 56. päevani, eesmärgiga tuvastada aeglaselt reageerivad proovid. [13]

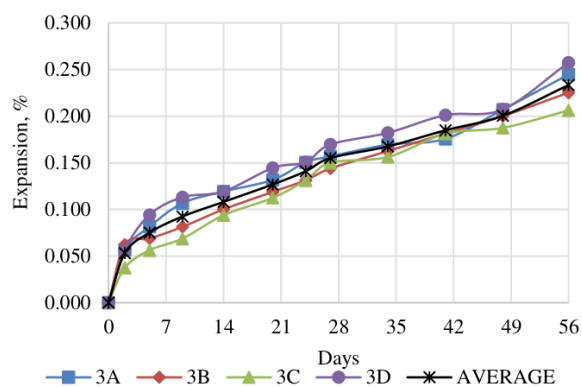


Joonis 7. Liivaga valmistatud mördiprismade piknemine (Segu I) [13]

Killustikuga valmistatud katsesegude II ja III AAR-2 katsed näitasid märkimisväärset pikenemist leeliselises keskkonnas, mis viitab täitematerjali reaktiivsusele. Segu II prismade keskmine pikenemine oli 14 päeva möödumisel 0,12% ja kasvas 56 päevaga kuni 0,21%-ni (Joonis 8). Segu III puhul oli märgatud pikenemise kiiruse kasvu peale 14-ndat katsepäeva. Segu III pikenemise dünaamika on analoogne Hispaania uuringus kirjeldatud aeglaselt reageerivate täitematerjalide käitumisele, kus pikenemine kiirenes peale 14. päeva [11]. 14 päeva möödumisel oli keskmine pikenemine 0,11%. 56. päevaks kasvas see tulemus 0,23%-ni (Joonis 9). Katse tulemusest nähtub, et mõlemad katsetatud killustikud on suure tõenäosusega reaktiivsed. Katsekehade pinnal esines 56 päeva möödumisel ASR-le iseloomulikke pinnakahjustusi (Foto 4, Foto 5) [13].



Joonis 8. Mördiprismade pikenemine (Segu II) [13]



Joonis 9. Mördiprismade pikenemine (Segu III) [13]

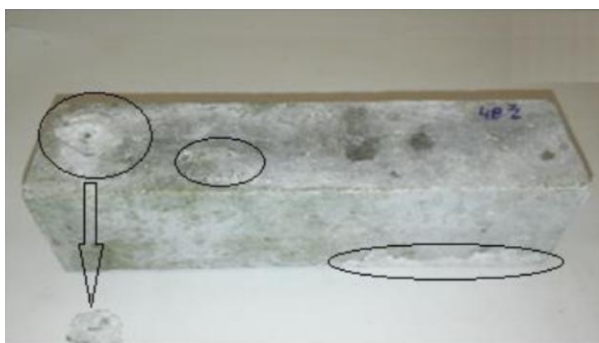


Foto 4. Proovi (Segu II) pildid pärast 56 päevast säilitamist 1 M NaOH lahuses [13]



Foto 5. Proovi (Segu III) pildid pärast 56 päevast säilitamist 1 M NaOH lahuses [13]

Katsekehade valgusmikroskoopiga uurimine näitas karedat ja pragunenud pinda leelis-räni reaktsiooni tekkimise kohtades. Reageerinud osakesed olid piltidel selgelt eristatavad, ASR-i saadused olid valget värvi. Vaatlused kinnitasid, et leeliseline materjali korrosioon põhjustas prismade ulatuslikku kahjustumist, mis oli eriti märgatav segudes II ja III. Jämetäitematerjal sai reaktsiooni käigus kahjustada. ASR-i tunnustega piirkond on ümbritsevaga võrreldes poorem. Leelis-räni reaktsiooni kulgemise alade ümber leidis ASR-i saadustega kivilinenud tsemendipastat. (Foto 6, Foto 7, Foto 8, Foto 9) [13]

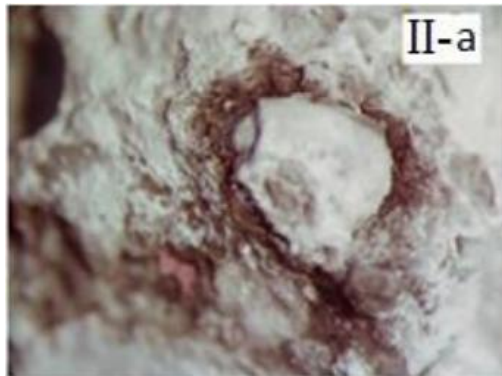


Foto 6. Katsekeha pragunemise fragment  
(Segu II) [13]

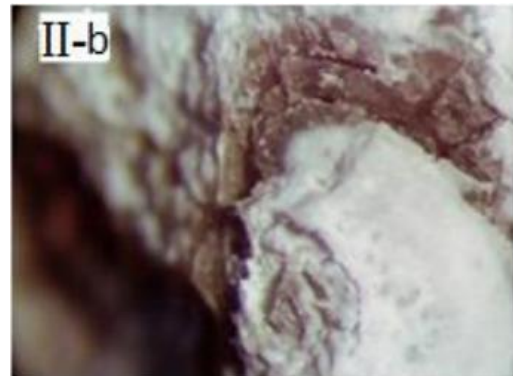


Foto 7. Katsekeha pragunemise fragment  
(Segu II) [13]

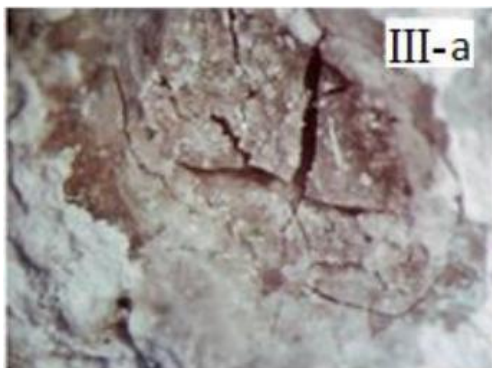


Foto 8. Katsekeha pragunemise fragment  
(Segu III) [13]

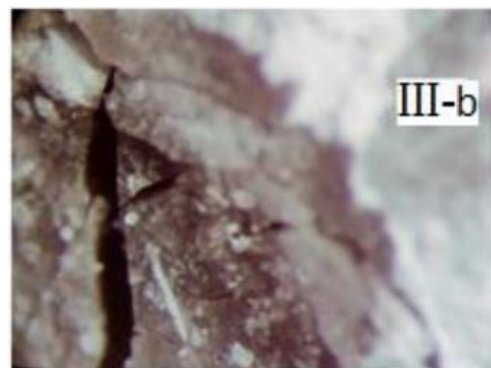


Foto 9. Katsekeha pragunemise fragment  
(Segu III) [13]

## **3 KONSTRUKTSIOONID, MILLEL ON TUVASTATUD ASR**

### **3.1 Sillad Soomes**

Soomes ei ole konstruktsioone pikalt ASR suhtes uuritud, kuna oli levinud arusaam, et leelis-räni reaktsiooni Soomes ei esine. Seisukoht tulenes arvamusest, et ehitustöodes jämetäitematerjalina kasutatav kohalik graniitkillustik on väga kõrge kvaliteediga. Samuti meenutavad ASR-le iseloomulikud pragunemised Soome kliimale iseloomulikke külmakahjustusi. Kusjuures külm kliima aeglustab reaktsiooni kulgemist ja kahjustuste teket. 21. sajandil aga tuvastati ASR Soomes rohkem kui 50 juhtumil. Suur osa taristust rajati 1970. aastatel ja konstruktsioonide vananemisega hakkasid nendes ilmema leelis-räni reaktsiooni tunnused. [14]

ASR-i on Soomes kõige sagedamini tuvastatud sildadel ja väiksemas ulatuses ka elamutel. Leelis-räni reaktsiooni olemasolu avastati ligikaudu kümnel eri piirkonnas asuval sillakonstruktsioonil, millest enamik paikneb Lõuna-Soomes ja suuremate linnade läheduses. Kahjustused esinesid peamiselt sillatekkides. Kõrge niiskustase, jäätõrjesoolade kasutamine talvel ja vee kogunemisest põhjustatud kõrge niiskus loovad reaktsiooniks soodsaid tingimusi. Enamik sildu, kus on avastatud ASR, on vanemad kui 40 aastat, uuemates konstruktsioonides ei ole veel leelis-räni reaktsioonile iseloomulikke tunnuseid avastatud. Paljudel juhtudel puuduvad täpsed andmed betoonisegu koostise ja täitematerjali päritolu kohta, mis omakorda raskendab kahjustuste tekkepõhjuste analüüsi. Uuringud viitavad ASR juhtumite arvu kasvule Soomes, mis on osaliselt seotud konstruktsioonide vananemisega. [14]

2004. aasta konstruktsiooni ülevaatuses tuvastati Paltanmäki sillal leelis-räni reaktsioonile iseloomulikud kahjustused sillatekiplaadis (Foto 10, lk 21). Silla suhteline niiskus oli uuringute läbiviimise hetkel 97...99%. Kokki sillal Tampereles tuvastati ASR ainult konstruktsiooni servaprussidel (Foto 11, lk 21). Sild lammutati ja ehitati ümber 2012. aastal. [14]



Foto 10. Paltanmäki silla ASR kahjustused [14]



Foto 11. Tamperes Kokki silla servaprusside võrkpragunemine [14]

### 3.2 Elgeseter sild Norras

Elgeseteri sild ehitati Trondheimis aastatel 1949...1951. Tegemist on ligikaudu 200 m pikkuse monoliitsest raudbetoonist talasillaga, millel on 9 sillet pikkusega kuni 22,5 m. Sillatekki kannavad neli pikisuunalist raudbetoonist tala, mis toetuvad 800 mm läbimõõduga ümmargustele raudbetoonpostidele. Postide alumised osad on kaitstud roostevabast terasest jääkaitsehülssidega. Sillatekk ja talad on valdavalt valatud monoliitselt ning sillateki paksus varieerub on 150...380 mm. [15]

Leelis-räni reaktsiooni olemasolu avastati Elgeseteri sillal 1990. aastal pärast pragude teket sillatekis ja postide ülemiste osade deformatsioonide ilmnemist (Foto 14, lk 22). Seejärel jälgiti konstruktsiooni olukorda, keskendudes pragude arengule ja betooni niiskustingimustele. Kahjustuste pidurdamiseks rakendati mitmeid meetmeid, sealhulgas hüdrofoobset immutust (1995. ja 1999. aastal), CFRP-tugevdust (*carbon-fiber reinforced polymer* ehk süsinikkiuga tugevdatud polümeerid) ja elastsete tsementpõhiste pinnakatete kasutamist. 2014. aasta renoveerimistöõde käigus viidi läbi ulatuslikud uuringud nii laboris kui ka välitingimustes. Eesmärgiks oli hinnata ASR kahjustuste mõju konstruktsiooni kandevõimele. Mõõdeti pragude suurust sillatekis ja postides ning teostati konstruktsioonist võetud suurkehade analüüs. [15]

Aastatel 1995...1998 teostatud uuringutes mõõdeti postides suhtelist niiskust mitmel sügavusel. Vihmale ja päikesele avatud pindadel ületas suhteline niiskus (RH) 97...99%-ni. 2014. aastal määrati postidest ja sillatekist võetud suurkehade põhjal kapillaarse küllastatuse aste (*Degree of Capillary Saturation* ehk DCS), mis ulatus väliskeskonna tingimustele enim avatud postides ja sillateki kahjustunud piirkondades 98...99%. ASR-i poolt vähem mõjutatud piirkondades oli RH ligikaudu 70...75%. Kõrge niiskussisaldusega

aladel märgati ulatuslikku pragunemist, mis kinnitab, et püsiv niiskus oli Elgeseteri silla ASR kahjustuste arenemisel määrav tegur (Foto 12). [15]



Foto 12. Sillateki alumise osa ASR-ist tingitud kahjustused [15]

2014. aastal teostatud uuringus vaadeldi kolme posti ning mõõdeti nende pragude laiust kahel kõrgusel. Nende postide praod olid laiuses 0,8, 1,4 ja 4,0 mm, kuid suurim pildidel jäädvustatud pragu ulatus laiuses 7 mm-ni (Foto 13). Praod olid enamasti postiga pikisuunaliselt. ASR tuvastati konstruktsioonil 1990. aastal, mil postide nihe oli esmakordsel dokumenteerimisel 110 mm. Enne 2003. aastal teostatud parandustöid oli nihe suurenenud 150 mm-ni. (Foto 14). 2026. aasta seisuga ei ole konstruktsiooni lammutatud. [15], [16]



Foto 13. Posti 7 mm laiusega pragunemine [15]

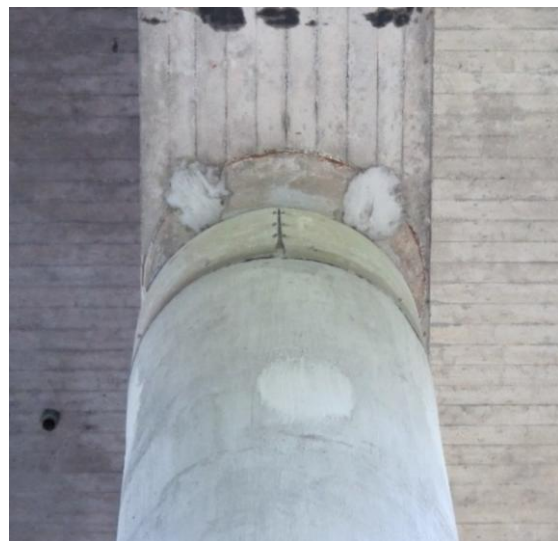


Foto 14. Posti nihe 150 mm [15]

### 3.3 Alto Ceira pais Portugalis

Alto Ceira pais ehitati aastatel 1940...1949 (Foto 15). Konstruktsiooni ehitamiseks kasutati ca 7000 m<sup>3</sup> betooni. Ehitustöodes kasutati betooni täitematerjalina purustatud kvartsiidi plokkide ja piirkonna jõeallikate peenemaid settekivimeid, mis suure tõenäosusega kutsusid esile ASR-i tekke, kuna sisaldasid leelis-räni reaktsiooniks vajalikku ränidioksiidi. [17]



Foto 15. Alto Ceira pais [17]

1980. ja 1990. aastatel läbi viidud konstruktsiooni uuringud näitasid paisu keskosas ja kandvates tsoonides märkimisväärse pragunemise ja lekete olemasolu. Avastatud pragunemine oli tüüpiline ASR-le ehk võrgu mustriks (Foto 16, Foto 17). [17]

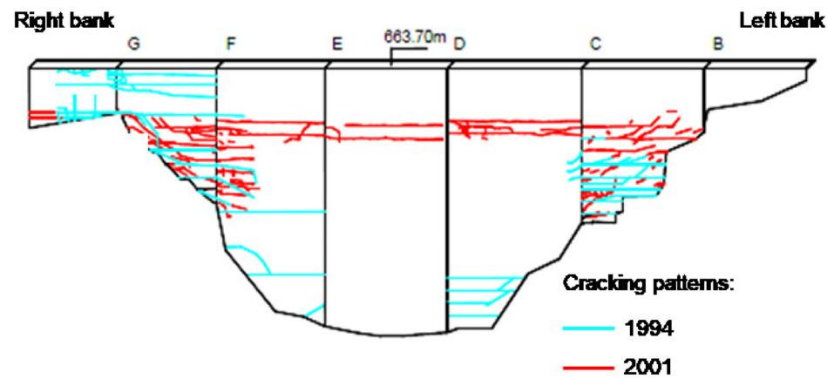


Foto 16. Pragunemise muster harjal [17]



Foto 17. Pragunemise muster allavoolu pinnal [17]

2001. aastal tehtud uuringus selgus, et konstruktsiooni pragunemine on veelgi edasi arenenud (Joonis 10). Konstruktsiooni kandevõime kadu ei tuvastatud, kuid ulatusliku pragunemise tõttu muutus konstruktsioon vett mittepidavaks. Suurimad praod olid 1...3 mm laiad ja kuni 600 mm sügavad. [17]



Joonis 10. Allavoolse külje pragunemise areng aastatel 1994...2001 [17]

Alto Ceira pais lammutati 2014. aastal ulatusliku konstruktsiooni pragunemise ja sellest tulenevate veelekete tõttu. Uus pais ehitati demonteeritud konstruktsiooni lähedale jõest allavoolu. [17]

## 4 JÄMETÄITEMATERJALIDE KATSETAMINE

### 4.1 Metoodikad

#### 4.1.1 Petrograafiline uuring

Euroopas enim kasutatud RILEM (analoog Ameerika Ühendriikides kasutatavale ASTM C295 standardile [18]) juhendmaterjali kohaselt on petrograafiline (AAR-1) analüüs ettenähtud ASR testimise esimese sammuna. AAR-1 eesmärgiks on eelkõige määrata eri täitematerjalide reageerivusklass leelis-räni reaktsiooni suhtes. Meetodit kasutatakse täitematerjalides sisalduvate kivimite ja mineraalide reaktsioonivõimelisuse hindamiseks. AAR-1 meetodi abil saab tuvastada ja kvantifitseerida mineraale ja kivimeid, mis on võimelised reageerima tsemendis sisalduvate hüdroksüülioonidega (leelistega). [3], [19]

AAR-1 uuringute meetodi puhul käsitletakse kahte tehnikat. Neist esimene ehk makroskoopiline petrograafia (*macroscopic petrography*) on rakendatav eelkõige jämedateraliste täitematerjalidell terasuurusel  $> 4$  mm ning võimaldab üksikute osakeste koostise selget ja üheselt mõistetavat määramist visuaalse vaatluse alusel. Keemiliseks tuvastamiseks kasutatakse lahjendatud soolhapet, mille abil eristatakse karbonaatmineraale. Teine tehnika ehk õhikute petrograafia (*thin-section petrography*) on suunatud täitematerjalis esinevate mineraalide kindlakstegemisele ja nende osakaalu määramisele punktloendusmeetodil kasutades mikroskoobi all uuritavaid õhikuid (25...30  $\mu\text{m}$ ) täitematerjalide terasuurusel  $< 4$  mm. Petrograafilisel uurimisel kasutatakse lainepikkuse läbipääsfiltrit paremaks osakeste eristamiseks. Punktloenduse teostamiseks kasutatakse spetsiaalset loendusset. Tavapäraselt kasutatakse elektromehaanilist aluslauda (*electromechanical stage*), mis on ühendatud loendussetmega ning mille puhul iga loenduse registreerimine liigutab õhikut automaatselt kindla sammu võrra edasi mööda etteantud trajektoori. Alternatiivse lahendusena kasutatakse mikroskoobi okulaaris paiknevat loendusvõret (*graticule*), mis võimaldab punktloendust teostada visuaalse võrdluse alusel ilma automaatse aluse liigutamiseta. [3], [19]

Mõlema tehnika rakendamisel saadakse uuritavas materjalis sisalduvate kivimite ja mineraalide tüüp ja osakaal koostises petrograafiliselt iseloomustatuna (Foto 18). Juhtudel, kus kõiki mineraalseid koostisosi ei ole võimalik kummagi tehnika abil kindlaks teha või kui esineb kahtlus reaktsioonivõimeliste komponentide suhtes, on soovitatav kasutada täiendavaid analüüsimeetodeid. Nendeks on keemiline analüüs, röntgen difraktsioonanalüüs ja värvimismeetodid. [19]



Foto 18. Väga suure tõenäosusega reaktiivne Rootsi peenteraline müloniit (*fine-grained mylonite*) [14]

AAR-1 meetod ei pruugi siiski alati tagada reageerivate mineraalide piisavalt usaldusväärset tuvastamist. Uurimistulemuste kvaliteet ja nende tõlgendamine sõltuvad olulisel määral petrograafi kogemusest. Lisaks ei võimalda ei makroskoopiline petrograafia ega õhikute petrograafia hinnata, kas tuvastatud reageerivad komponendid põhjustavad tegelikkuses kahjulikku paisumist betoonis. Seetõttu on ASR-i hindamiseks ja saadud tulemuste kinnitamiseks vajalik ka muude katsete läbiviimine. [6], [20]

#### **4.1.2 Mördivarda pikenemise katse (AAR-2, AAR-3 ja AAR-4.1)**

RILEM AAR-2, AAR-3 ja AAR-4.1 katsemeetodid on välja töötatud täitematerjalide või nende kombinatsioonide potentsiaalse leelis-räni reaktsioonivõime hindamiseks kiirendatud tingimustes. Meetodites kasutatakse mördist või betoonist valmistatud katsekehi ja jälgitakse nende pikenemist kõrge leelisuse ja temperatuuri juures. AAR-2 keskendub peamiselt üksikute täitematerjalide hindamisele, AAR-3 ja AAR-4.1 võimaldavad hinnata täitematerjalide koosmõju. [3], [21]

AAR-2 meetod on sarnane Ameerika Ühendriikides välja töötatud ASTM C 1260 testile. Katsetes jälgitakse mördipulkade pikenemist tugevalt leeliselises keskkonnas. Katsekehad valmistatakse (purustatud) täitematerjaliga, mille terasuurus on maksimaalselt 4 mm. Mördivardad kivinevad 24 tundi vormides, seejärel asetatakse need 24-ks tunniks 80°C ahju veega täidetud anumasse. 24 tunni möödumisel võetakse katsekehad veest välja ja möödetakse nende esialgset pikkust. Seejärel asetatakse need koheselt 80°C ahju 1 M NaOH lahusesse ja hoiustatakse seal 14 päeva, ning möödetakse nende pikenemist kindlatel ajavahemikel. Kasutusel on kaks tehnikat: AAR-2.1, kus katsekehadeks on pikad ja peened mördivardad mõõtudega 25×25×285 mm, ning AAR-2.2, kus uuritakse lühemaid ja jämedamaid vardaid mõõtudega 40×40×160 mm. AAR-2 on laialdaselt levinud leelis-räni reaktsiooni uurimise meetod, kuid killustiku purustamise ja agressiivsete katsetingimuste tõttu võib see anda valenegatiivseid või -positiivseid tulemusi. [3], [21], [22]

AAR-3 (Euroopa analoog Ameerika Ühendriikide ASTM C 1293-le) meetoodika järgi teostatakse pikaajalised katsed 75×75×250 mm betoonprismadega. Katsete kestvus on 12 kuud, mille jooksul hoitakse katsekehasid temperatuuril 38°C. AAR-3 meetodil on 2 haru – AAR-3.1 ja AAR-3.2. Esimese meetodiga määratakse täitematerjalide kombinatsioonide potentsiaalne reaktiivsus leelise vastu. Betoonprismad valmistatakse kindlaks määratud täitematerjalide kombinatsioonist ning kasutatakse kõrge leelise sisaldusega tsementi. AAR-3.2 abil tehakse kindlaks leelise sisaldus, mille juures käivitub ASR-i areng. Selleks valmistatakse mitu betoonisegu sama täitematerjali kombinatsiooniga, kuid erineva Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> (naatriumoksiidi ekvivalent ehk *sodium oxide equivalent*) tasemega, mis jääb vahemikku 2...5 kg/m<sup>3</sup>. Mõlemal juhul möödetakse katsekehade pikenemist aasta jooksul perioodiliselt, et hinnata leelis-räni reaktsioonist põhjustatud pikenemist. [3], [21]

AAR-4 meetodil valmistatakse katsekehad analoogselt AAR-3 meetodiga ja samuti kasutatakse täitematerjalide kombinatsioone leelis-räni reaktiivsuse hindamiseks. Erinevuseks võrreldes eelneva meetodiga on see, et leelis-räni reaktsiooni kiirendamiseks hoitakse prismsid ahjus 60°C juures vähemalt 20 nädalat. Samuti kasutatakse tsementi 5,5 kg/m<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> tasemega. [3], [21]

RILEM meetoodika järgi klassifitseeritakse täitematerjalid kolme klassi [3]:

- I klass – ebatõenäoliselt reageeriv;
- II klass – potentsiaalselt reageeriv (täitematerjalid vajavad edaspidiseid uuringuid);
- III klass – väga suure tõenäosusega reageeriv.

## 4.2 Jämetäitematerjali purustamise protsessi ja meetodi mõju katsetulemustele

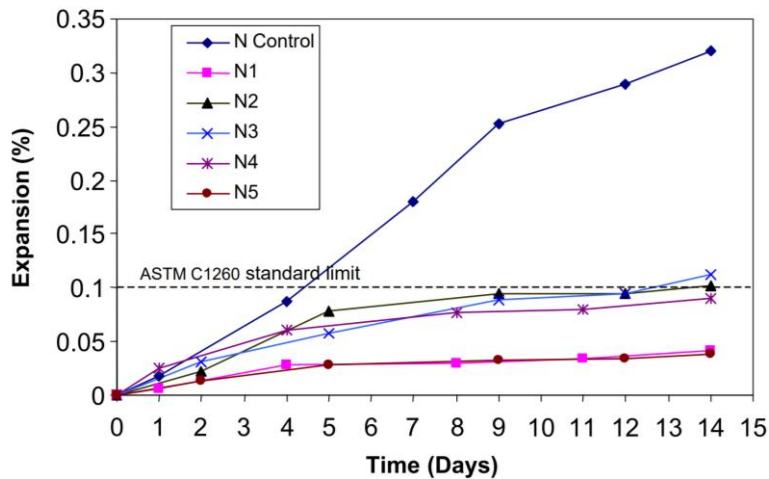
Leelis-räni reaktsiooni hindamisel jämetäitematerjalidel näeb RILEM meetodika ette nende purustamist peenematesse fraktsioonidesse [3]. Selleks saab kasutada erinevaid purusteid, näiteks lõug-, rootor- või rullpurustit. Kõik purustamise meetodid muudavad täitematerjali terade morfoloogiat.

Türgis teostatud jämetäitematerjali terade kuju uuringus leiti, et purustatud jämetäitematerjaliga tehtud katsekehadel oli suurem pikenemine, mis on põhjustatud purustamisest tingitud terade morfoloogia muutustest. Seejuures purustamise meetodikat ja purusti tüübi valikut uuringus välja ei toodud. Uuring teostati kiirendatud mördiprisma katse meetodil (ASTM C1260 järgi). Täitematerjali fraktsioonid asendati reaktiivse materjaliga, et hinnata erinevate terasuuruste individuaalset mõju pikenemisele. Tulemuste võrdluseks viidi katsed läbi väga sarnase keemilise koostisega loodusliku peentäitematerjali ning purustatud jämetäitematerjaliga. Kõik mitte uuritavad fraktsioonid asendati mitte reaktiivse lubjakiviga. [23]

Katsekehad valmistati järgmise reaktiivse peentäitematerjali (N) või purustatud jämetäitematerjali (C) sisaldusega [23]:

- N *control* ja C *control* – kontrollproov, valmistatud ainult reaktiivse peen- või jämetäitematerjaliga;
- N1 ja C1 – 10% reaktiivse 4...2 mm peen- või jämetäitematerjali sisaldusega;
- N2 ja C2 – 25% reaktiivse 2...1 mm peen- või jämetäitematerjali sisaldusega;
- N3 ja C3 – 25% reaktiivse 1...0,5 mm peen- või jämetäitematerjali sisaldusega;
- N4 ja C4 – 25% reaktiivse 0,5...0,25 mm peen- või jämetäitematerjali sisaldusega;
- N5 ja C5 – 15% reaktiivse 0,25...0,125 mm peen- või jämetäitematerjali sisaldusega.

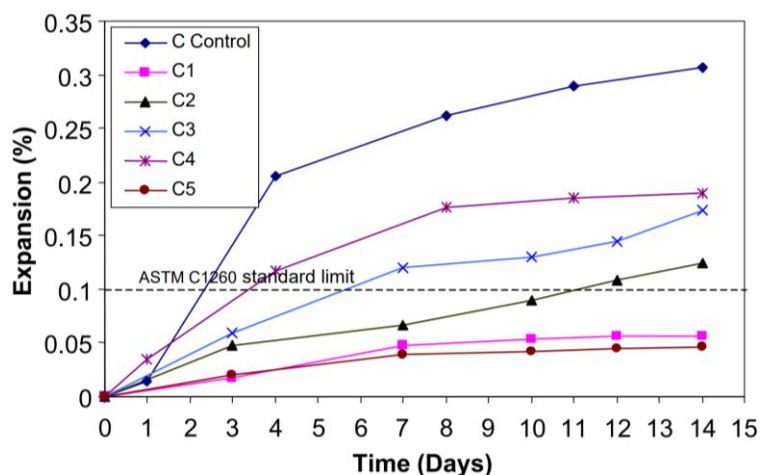
Purustamisel saadud fraktsioonid olid võrreldes loodusliku peentäitematerjaliga nurgelisemad ja omasid suuremat eripinda. Seejuures oli kõrgem reaktiivsus keskmise suurusega osakestel 0,25...2 mm, nende leelis-räni reaktiivsusele avaldas terade nurgelisus suurimat mõju (Joonis 11, Joonis 12, lk 29). Purustamine ei suurendanud oluliselt väga peenikese, terasuurusega alla 0,125 mm ja ka suurima 2...4 mm fraktsiooni reaktiivsust. [23]



Joonis 11. Peentäitematerjaliga tehtud katsekehade pikenemine vastavalt reageeriva täitematerjali fraktsioonile ja sisaldusele [23]

ASTM C1252 meetodil määratud loodusliku peentäitematerjali N poorsus (*uncompacted void content*) oli võrreldes purustatud jämetäitematerjalide proovidega C ja L väiksem, mis viitab peentäitematerjali osakeste ümarale kujule. [23]

Sarnase koostisega purustatud jämetäitematerjaliga valmistatud katsekehade pikenemine oli loodusliku peentäitematerjaliga võrreldes suurem (Joonis 12). Selgus, et ka purustatud jämetäitematerjali puhul olid leelis-räni reaktsioonile vastuvõtlikumad 0,25...2 mm osakesed. Suuremat pikenemist võisid mõjutada ka purustamise käigus tekitatud mehaanilised kahjustused terade pinnale, kuid määravam faktor oli terade suurem nurgelisus. [23]



Joonis 12. Purustatud jämetäitematerjaliga tehtud katsekehade pikenemine vastavalt reageeriva täitematerjali fraktsioonile ja sisaldusele [23]

Brasiilias uuriti purustamise meetodi mõju mõrdivarda pikenemise katse tulemustele. Katsetes kasutati ASR-reaktiivset ja mittereaktiivset killustiku. Reageeriv killustik kaevandati Vitoria de Santo Antao linna karjäärist, mitte reageeriv killustik kaevandati Jaboatao dos Guararapes karjäärist. Mõlemast jämetäitematerjalist valmistati 2 proovi, millest esimene purustati lõug- ja teine rullpurustiga. Reageerivust hinnati Brasiilia ABNT NBR 15577-4 standardi järgi, mis erineb ASTM C 1260 standardist katse kestvuse ja mõrdivarda pikenemise hindamisega. Reageerivateks loetakse materjale, mille pikenemine on 30 päeva juures < 0,19%. [22]

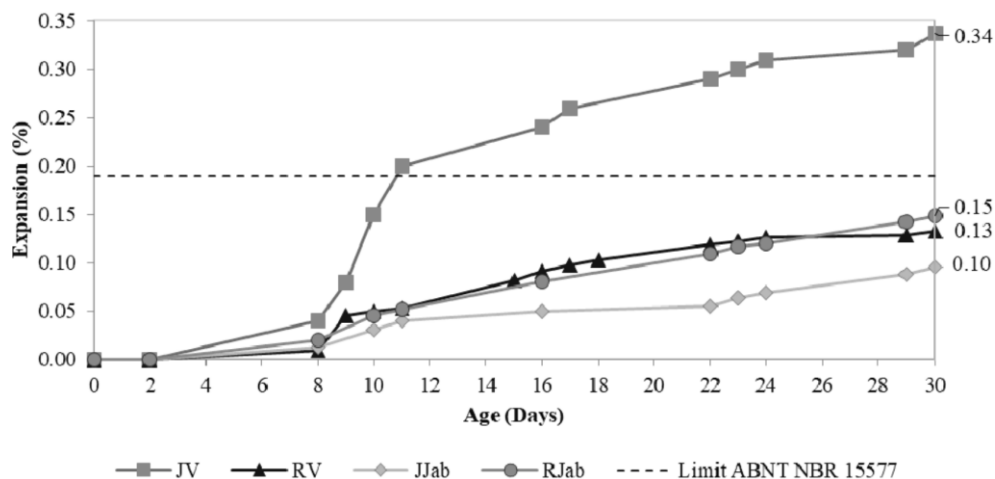
Purustamisel märgati, et lõugpurustiga purustatud reageeriva Vitoria jämetäitematerjali terad olid piklikumad. 0,3 mm fraktsioonil oli laiuse ja pikkuse suhe (*aspect ratio*) kõrgeim ning ulatus 1,94-ni (Tabel 3). Rullpurustiga peenestatud killustiku laiuse ja pikkuse suhe oli väiksem kõigi fraktsioonide juures, mis viitab terade kuubikulisemale kujule. Nii Vitoria kui ka Jaboatao killustiku *aspect ratio* kasvas fraktsiooni vähenedes – mida väiksem oli fraktsioon, seda lapikumad olid purustatud terad. Mitte reageeriva Jaboatao killustiku purustamisel olid nii lõug- kui ka rullpurustiga valmistatud proovid piklikuma kujuga ning laiuse ja pikkuse suhe oli Vitoria killustikuga võrreldes kõrgem. *Aspect ratio* erinevused võisid tuleneda ka kasutatud materjalide mineraloogilisest koostisest. [22]

Tabel 3. Terade laiuse ja pikkuse suhte (*aspect ratio*) sõltuvus purustamise meetodist [22]

| Fraktsioon, mm | Vitoria killustik |             | Jaboatao killustik |             |
|----------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|
|                | Lõugpurusti       | Rullpurusti | Lõugpurusti        | Rullpurusti |
| 2,4            | 1,72              | 1,28        | 1,62               | 1,55        |
| 1,2            | 1,82              | 1,52        | 1,88               | 1,75        |
| 0,6            | 1,88              | 1,57        | 2,12               | 1,82        |
| 0,3            | 1,94              | 1,65        | 2,13               | 2,07        |

Purustatud jämetäitematerjali morfoloogilised uuringud näitasid, et lõugpurustiga peenestatud reageeriva Vitoria ja rullpurustiga peenestatud mitte reageeriva Jaboatao killustikud olid lamedad ja piklikumad. Leelis-räni reaktsioonile vastuvõtliku Vitoria materjali puhul võib see soodustada ASR-i teket, sest lamedate ja piklikute osakeste vahel tekib rohkem tühimikke, kuhu võib koguneda niiskus ning tekivad ASR-i arengule soodsad tingimused. [22]

Mördivarda pikenemise katse tulemused näitasid 30 päeva möödumisel reageerivuse sõltuvust kasutatud purusti tüübist (Joonis 13). Leelis-räni reaktsioonile vastuvõtliku Vitoria killustiku pikenemine lõugpurusti proovi (JV) puhul oli 30 päeva möödumisel 0,34%, samas kui rullpurustiga valmistatud segu RV pikenemine ei jõudnud 0,19% reageeriva klassi miinimumini, jäädes 0,13% juurde. ASR-le mitte vastuvõtliku Jaboatao killustiku segud klassifitseerusid mitte reageerivateks. Jaboatao lõugpurustiga valmistatud proov (JJab) pikenes 30 päeva möödumisel 0,10% ning lõugpurustiga valmistatud proov 0,15%. [22]



Joonis 13. Mördivarda pikenemise katse tulemused, kus JV – lõugpurustiga peenestatud Vitoria killustik, RV – rullpurustiga peenestatud Vitoria killustik ja JJab – lõugpurustiga peenestatud *Jaboatao* killustik, RJab – rullpurustiga peenestatud *Jaboatao* killustik [22]

Katsed tõestasid purustamise meetodi mõju ASR reaktsioonile Vitoria reageerival jämetäitematerjalil. Purustamise meetod mõjutas oluliselt mördivarda pikenemise katse tulemusi. Lõugpurustiga töödeldud Vitoria killustikuga tehtud katsekehad pikenesid ligikaudu 2,6 korda rohkem kui rullpurustiga töödeldud materjali kasutades. [22]

Mördivarraste skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) analüüs näitas ulatuslikke ASR kahjustusi RV proovis (Foto 19, lk 32), mis viitab mördivarda pikenemise katse valenegatiivsele tulemusele. Lõugpurustiga peenestatud killustiku terad olid võrreldes rullpurustiga töödeldud jämetäitematerjaliga karedamad ja nurgelisemad ning seetõttu suurema eripinnaga, mis soodustab leelis-räni reaktsiooni arengut (Foto 19, Foto 20, lk 32). Rullpurustiga töödeldud Vitoria killustikul leiti SEM analüüsi käigus suures koguses poore, kuhu võis koguneda ASR geel. Kõrgem poorsus võis samuti aeglustada leelis-räni reaktsiooni arengut (aeglustab pikenemist) ja põhjustada valenegatiivset katsetulemust. [22]

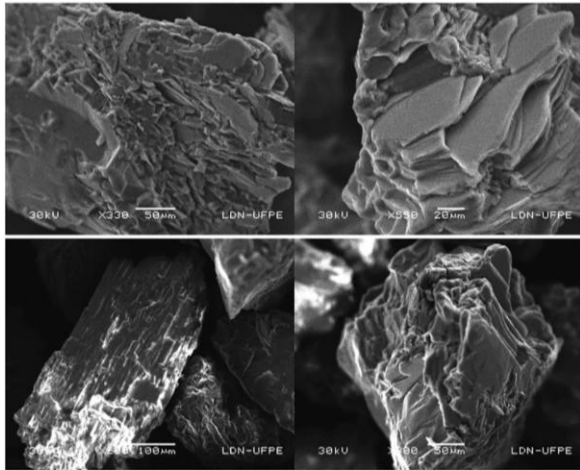


Foto 19. Lõugpurustiga töödeldud Vitoria killustiku (JV) 0,15 mm fraktsiooni mikrofond [22]

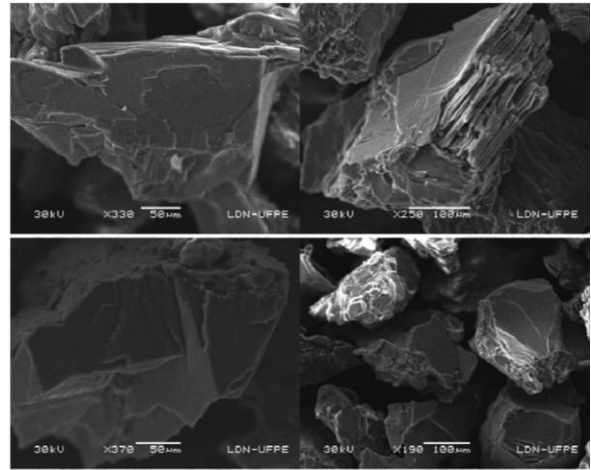


Foto 20. Rullpurustiga töödeldud Vitoria killustiku (RV) 0,15 mm fraktsiooni mikrofond [22]

### 4.3 Katsed jämetäitematerjalidega

#### 4.3.1 Katseplaan

Lõputöö raames teostati jämetäitematerjalide katsed viie Eestis kaevandatud killustikuga ning võrdluseks Soomest tarnitud graniitkillustikuga. Katsete eesmärgiks oli välja selgitada, kas ja mis määral on Eestis toodetavad jämetäitematerjalid leelis-räni reaktsioonile vastuvõtlikud. Uuritavad jämetäitematerjalid tarniti Vão, Lõuna-Aru, Harku, Anelema ja Sopimetsa II karjääridest (Joonis 14). Võrdluseks viidi katsed läbi ka Soome graniitkillustikuga, mis pärineb Parainen karjäärist. Graniitkillustikul on ASR sertifikaat – mitte reaktiivsus on määratud RILEM AAR-1 petrograafilisel meetodil ja AAR-2.2 mördivarda piknemise katse meetodil [24], [25].



Joonis 14. Uuritava killustiku karjääride asukohad [26]

Lõputöös loobuti petrograafilise analüüsi teostamisest, kuna Eestis RILEM AAR-1 kohast petrograafilist uuringut ei tehta. Varasemas Tallinna Tehnikakõrgkooli peentäitematerjali katsetamises ei teostatud petrograafilist analüüsi analoogsel põhjusel [2]. Lõputöös teostati vastavalt RILEM AAR-2 metoodikale lühiajaline mördivarda pikenemise katse kestvusega 14 päeva. Meetod sai valitud selle suhteliselt lühikese katseaja tõttu ning seetõttu, et katset oli võimalik teostada Tallinna Tehnikakõrgkooli laboris.

#### 4.3.2 Ettevalmistused

Mördivarda pikenemise katse esimese sammuna purustati jämetäitematerjal, et saavutada ettenähtud terastikuline koostis (Tabel 4) [3]. Purustamiseks kasutati lõugpurustit Retsch MBB100 Mangan. Esmasel purustamisel valiti maksimaalseks terade läbimõõduks 4 mm, kuid sõelumisel tuli peenema fraktsiooniga materjali liiga vähe. Terade läbimõõtu otsustati vähendada alla 4 mm, et purustamisel tekiks suuremas koguses peenema fraktsiooniga killustiku. Fraktsiooni vähendades tekkis materjali purustamisel väga palju peenikest tolmu (terasuurus alla 63 µm).

Tabel 4. Purustamise nõuded RILEM AAR-2 juhendi järgi koos kogustega [3]

| Sõela ava suurus |              | Mass, % |
|------------------|--------------|---------|
| Läbinud          | Peale jäänud |         |
| 4 mm             | 2 mm         | 10      |
| 2 mm             | 1 mm         | 25      |
| 1 mm             | 500 µm       | 25      |
| 500 µm           | 250 µm       | 25      |
| 250 µm           | 125 µm       | 15      |

Jämetäitematerjali sõelumiseks kasutati seadet Controls Tamiz De Ensayo. Purustatud killustik defraktsioneeriti erinevatesse anumatesse 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 µm, 250 µm ja 125 µm (Foto 21).



Foto 21. Purustatud ja sõelutud jämetäitematerjal

Pärast katsekehade valmistamiseks vajamineva jämetäitematerjali kaalumist, pesti see jooksva vee all, et eemaldada peenike tolmu (osakesed terasuurusega < 125 µm)

(Foto 22). Igat fraktsiooni pesti sellele vastava sõela peal. Pärast pesemist paigutati killustik ca 100°C juures ahju kuivama 16 ± 1 tunniks. Purustatud ja fraktsioneeritud killustikku säilitati eraldi hermeetilistes kottides kuni katseajani (Foto 23).



Foto 22. Purustatud killustiku pesemine jooksva vee all



Foto 23. Purustatud ja fraktsioneeritud killustiku säilitamine

Jämetäitematerjalidele määrati ka veeimavus „Terade tiheduse ja veeimavuse määramine“ EVS-EN 1097-6:2022, peatükk 9, lisa F meetodil [27]. Lähtudes veeimavusest sai katsesegude valmistamisel vajadusel vett juurde lisada, et saavutada vajalik segu valgumine. Killustiku veeimavus jäi sõltuvalt karjäärist vahemikku 0,5...1,63%.

#### 4.3.3 Katsekehade valmistamine

Enne katsesegu valmistamist pandi kokku ja õlitati katsekehade kivinemise vormid. Lõputöös kasutati Controls Two Gang Prism mould 25×25×285 mm to ASTM vorme

(Foto 24). Vastavalt RILEM AAR-2.1 meetodikale on kasutatavad vormid ettenähtud 25×25×285 katsekehade valmistamiseks [3].



Foto 24. Katsekehade 25×25×285 mm vormid

Ühe kolmest mördivardast koosneva katsekehade komplekti valmistamiseks kasutati 900 g jämetäitematerjali ja 400 g CEM I 42,5 N tsementi. Vett lisati vajalikus koguses 0,47 vesitsementteguri saavutamiseks, milleks on AAR-2.1 meetodika järgi 188 g [3]. Segu ettenähtud valgumise diameeter on 205...220 mm [3]. Piisava valgumise saavutamiseks on lubatud lisada segule killustiku veemavuse koguses vett juurde. Seejuures peab arvesse võtma ka plastifikaatoris sisalduvat vett (juhul kui seda kasutatakse). Anelema ja Lõuna-Aru jämetäitematerjalidega ei õnnestunud saavutada ettenähtud valguvust säilitades 0,47 vesitsementtegurit (Tabel 5, lk 36) [3]. Samuti hoiduti ka liigest plastifikaatori kasutamist, et vältida selle potentsiaalset mõju katsetulemustele. Kuigi RILEM AAR-2 meetodika määrab ära minimaalse ja maksimaalse valgumise diameetrid, mida Anelema ja Lõuna-Aru karjäärade killustikud ei saavutanud, otsustati segude valmistamisel pidada kinni eelkõige vesitsementteguri jälgimisest.

Tabel 5. Jämetäitematerjalide veeimavus, kasutatud plastifikaatori ja vee kogus ning segu valgumise diameeter

| Karjäär          | Veeimavus, % | Plastifikaatori kogus, g | Vesi kokku, g | Valgumise diameeter, mm |
|------------------|--------------|--------------------------|---------------|-------------------------|
| Väo              | 1,52         | 1,5                      | 200,18        | 204/206                 |
| Sopimetsa II     | 1,44         | 1,5                      | 199,85        | 220/220                 |
| Anelema          | 1,62         | 2,7                      | 200,60        | 189/188                 |
| Parainen (Soome) | 0,50         | 1,0                      | 191,75        | 209/211                 |
| Lõuna-Aru        | 1,63         | 3,0                      | 200,42        | 195/196                 |
| Harku            | 0,98         | 1,7                      | 195,55        | 210/207                 |

Segu valmistamisel segati kokku 400 g tsementi ja vajalik vee kogus (188 g + killustiku veeimavuse vesi). Seejärel lisati segule 900 g purustatud jämetäitematerjali ja segati vastavalt standardile EVS-EN 196-1:2016 [28].

Saadud segu valgumine määrati vastavalt standardis EVS-EN 1015-3:2004 kirjeldatud meetodikale [29]. Mõrdisegu valati raputuslauale paigutatud 60 mm kõrguse, 100 mm põhja- ja 70 mm ülemise läbimõõduga vajumiskoonusesse. Segu valati koonusesse ja tihendati kahes võrdses osas. Kasutatud tihendamispulk vastas standardile EVS-EN 1015-3:2004. Valgumise diameetrit mõõdeti pärast 30-t raputuslaua kukkumist. Enamasti ei õnnestunud esimese korraga saavutada vajalikku valgumist ja protsessi korrati Carboxyment L4 plastifikaatori lisamisega.

Sobiva segu valgumise saavutamisel valati see 25×25×285 mm vormidesse kahes kihis (Foto 25), mõlemad kihid tihendati. Tihendatud katsekeha pinnalt eemaldati liigsed segu jäägid, kuni saavutati sile pind.



Foto 25. Tihendamata segu 25×25×285 mm vormides

Katsekehasid säilitati kividemise ajal  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  ja 90...100% RH juures suletud plastkarpides  $24 \pm 2$  h (Foto 26). Seejärel võeti katsekehad ettevaatlikult vormidest välja. Katsekehad olid väga lühikese kividemise perioodi tõttu väikse tugevusega, mille tõttu tuli nende käsitlemisel olla äärmiselt ettevaatlik. Mördipulkade edaspidiseks identifitseerimiseks, need nummerdati.

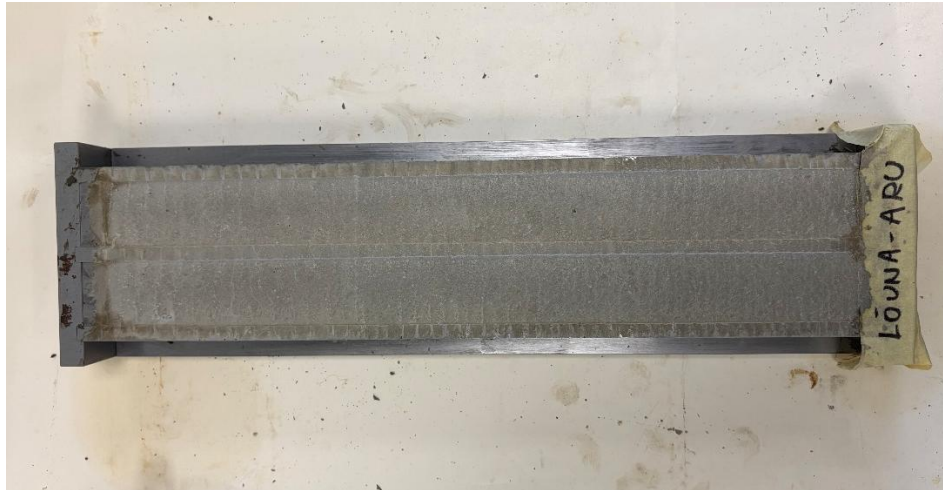


Foto 26. Kividunud katsekehad enne vormist eemaldamist

#### 4.3.4 Katsetamine

Katsekehade eemaldamisel vormidest mõõdeti nende pikkus. Saadud mõõteseadme näidu põhjal arvutati nende esialgne gabariitpikkus  $L_i$  täpsusega 0,001 mm järgmiselt (1):

$$L_i = R_v - (R_m - K_m) - 2 \times T_p, \quad (1)$$

- kus  $L_i$  - katsekeha pikkus vormist välja võtmisel, mm;  
 $R_v$  - referentsvarda pikkus, mm;  
 $R_m$  - referentsvarda mõõt (mõõteseadme näit), mm;  
 $K_m$  - katsekeha pikkus (mõõteseadme näit), mm;  
 $T_p$  - tifti pikkus, mm.

Mördipulkade mõõtmiseks kasutati seadet Controls Length Comparator koos SPC MCP105 kaabliga (Foto 27, lk 38). SPC kaablit kasutades laekusid mõõdistuste andmed otse arvutiprogrammi Microsoft Excel. Enne ja pärast iga katsekehade komplekti mõõdistust kontrolliti mõõteseadet 295 mm referentspulgaga.



Foto 27. Controls Length Comparator mõõteseade koos SPC MCP105 kaabli ning referentspulgaga

Esmakordselt mõõdetud katsekehad paigaldati toatemperatuuril destilleeritud veega täidetud anumasse selliselt, et vesi kataks katsekehad tervikuna ära ja et need ei puutuks ei omavahel ega konteineri põhjaga kokku. Katsekehasid hoiti veevannis ahjus temperatuuril 80°C ligikaudu 24 tundi. Järgmise sammuna võeti mõrdipulgad ahjust välja, kuivatati pindmisest niiskusest ja arvutati algpikkus  $L_0$  valemi (1) järgi.

Mõõdetud mõrdivardad paigutati seejärel koheselt eelsoojendatud 1 M NaOH lahusesse, hermeetiliselt sulguvasse konteinerisse, ning asetati tagasi 80°C temperatuuril ahju. Ühes anumal oleva kolme katsekeha kohta kasutati 5 liitrit 1 M NaOH lahust.

Edaspidi mõõdeti katsekehade pikkust 3., 6., 9., 12. ja 14. päeval samal kellaajal (erinevusega maksimaalselt 1 tund). Lisaks otsustati katset pikendada kuni 28. päevani, et vaadelda jämetäitematerjalide käitumist pikema perioodi jooksul. Mõõtmistega jätkati

3-päevase perioodilisusega. Igal mõõtmise järgselt arvutati katsekehade pikenemine  $L_n$  (2). Mõrdivardaid mõõdeti 0,001 mm täpsusega. [3]

Pikenemine arvutati protsentides järgmise valemi järgi (2) [3]:

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

- kus  $L_n$  - iga naatriumhüdroksiidi lahuses hoiustamise perioodi jooksul mõõdetud näit, kus  $n$  on nullmõõtmisest loendatud päevade arv, mm;  
 $L_0$  - katsekeha pikkus vahetult enne 1 M NaOH lahusesse panemist (nullmõõtt), mm;  
 $L$  - gabariitpikkus, tihvtide sisemiste otsate vaheline kaugus, mm.

#### 4.3.5 Katsetulemused

Pärast 14 päeva 1 M NaOH lahuses paiknemist mõõdeti AAR-2 meetodika järgi lõplikku katsetulemust. Mõrdipulkade pikenemist tõlgendati RILEM AAR-2 juhiste kohaselt järgmiselt [3]:

- pikenemine < 0,10% - I klass, ebatõenäoliselt reaktiivne;
- pikenemine 0,1...0,2% - II klass, potentsiaalselt reaktiivne;
- pikenemine > 0,2% - III klass, tõenäoliselt reaktiivne.

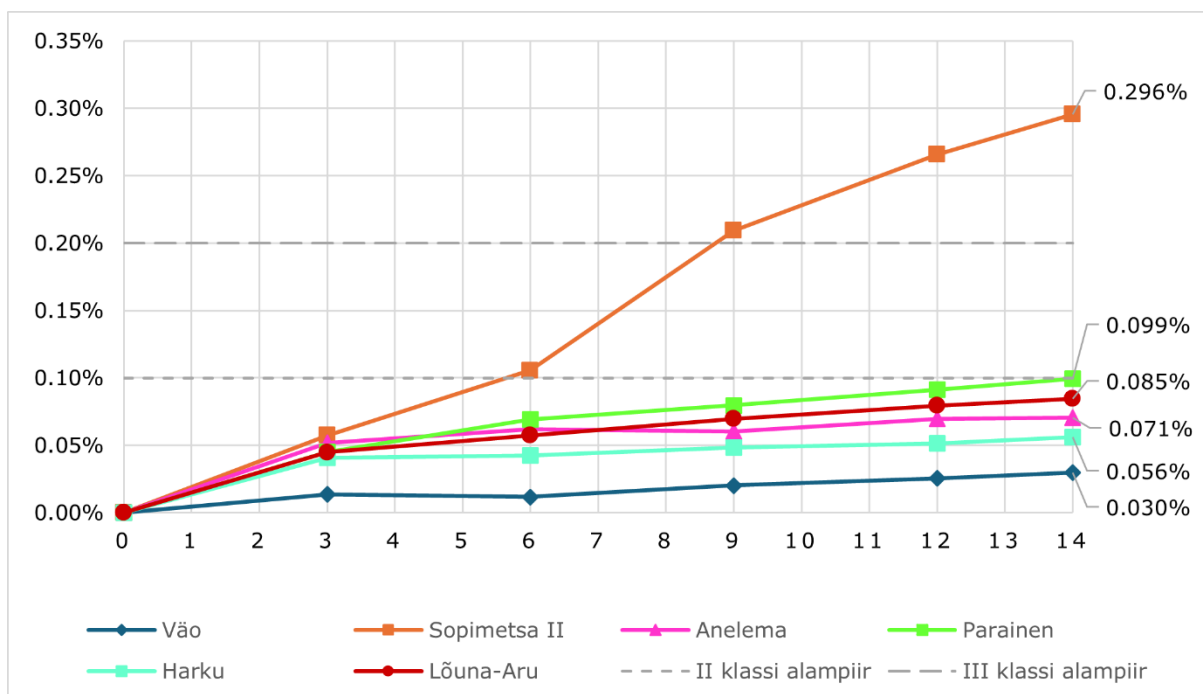
Seejuures loetakse 0,1...0,2% pikenemist ebamääraseks ning see vajab täiendavaid uuringuid teiste RILEM meetodikate järgi. 0,1...0,2% pikenemisega katsekehades kasutatud täitematerjalid vajavad erilist tähelepanu nende kasutamisel konstruktsioonides. Juhul, kui täiendavad betoonprisma katsed ei kinnita II klassi kuuluva täitematerjali ohutust, tuleb rakendada meetmeid leelis-räni reaktsioonist tingitud kahjustuste vältimiseks. ASR tõrjumise meetoditest võib loobuda ka juhul, kui olemasoleval konstruktsiooni puuduvad leelis-räni reaktsiooni tunnused. [3]

Katsetulemuste kehtivust hinnatakse sõltuvalt pikenemisest. Kui keskmine pikenemine ületab 0,10%, peetakse tulemusi usaldusväärseteks juhul, kui üksikute proovikehade pikenemine ei erine keskmisest rohkem kui  $\pm 10\%$ . Kui keskmine pikenemine on vähem kui 0,10%, ei tohi iga proovikeha mõõtetulemus erineda keskmisest rohkem kui 0,01%. Väiksema kui 0,10% pikenemisega katsekehade puhul arvestatakse fikseeritud absoluutset hälvet  $\pm 0,01\%$ . Mõõtmistulemuste kehtivust tõendavad tabelid on esitatud lisades (Lisa 2). [3]

AAR-2 katse 14. päeva mõõtmiseks oli Sopimetsa II karjääri jämetäitematerjalist valmistatud katsekehade keskmine pikenemine 0,296% ja ületas reageerivuse III klassi alampiiri (Joonis 15 ja Tabel 6, lk 40). II klassi alampiiri (0,10%) ületasid Sopimetsa II katsekehad juba 6. päeval ning III klassi alampiiri (0,20%) 9. mõõtmiste päeval.

Ülejäänud katsekehad ei ületanud 14. päevaks II klassi piirmäära ja klassifitseeruvad mitte reageerivateks. Seejuures näitas Vão ja Harku karjääride killustik kõige väiksemat pikenemist olles vastavalt 0,030% ja 0,056%. Soome Parainen karjääri graniitkillustik omab ASR sertifikaati ning kuulub I reageerivuse klassi, kuid sellega valmistatud katsekehad pikenesid katseperioodi lõpuks 0,099%, mis on väga lähedal II klassi alampiirile.

Saadud tulemuste juures on ka tähtis purustamise meetodi valik – lõugpurustiga töödeldud jämetäitematerjalil on kõrge laiuse ja pikkuse suhe (*aspect ratio*). *Aspect ratio* võib mõjutada mördivarda pikenemise katse tulemust, kuna muudab oluliselt jämetäitematerjali terade morfoloogiat suurendades nende eripinda [22]. Siiski on tulemuse kinnitamiseks vajalik teostada korduskatsed teiste purustamise meetoditega.



Joonis 15. Katsekehade keskmine pikenemine 14. päevaks

Tabel 6. Mördivarraste keskmine pikenemine kuni 14. päevani

| Karjäär      | Katsekehade keskmine pikenemine mõõtepäeval $L_n$ , % |       |       |       |       |
|--------------|---|-------|-------|-------|-------|
|              | 3   | 6     | 9     | 12    | 14    |
| Vão          | 0,014   | 0,012 | 0,020 | 0,026 | 0,030 |
| Sopimetsa II | 0,057   | 0,106 | 0,209 | 0,266 | 0,296 |
| Anelema      | 0,052   | 0,062 | 0,060 | 0,070 | 0,071 |
| Parainen     | 0,045   | 0,069 | 0,080 | 0,091 | 0,099 |
| Harku        | 0,041   | 0,042 | 0,048 | 0,052 | 0,056 |
| Lõuna-Aru    | 0,045   | 0,057 | 0,070 | 0,080 | 0,085 |

RILEM AAR-2 metoodika järgi tuleb uuringuid jätkata katsekehade kuulumisel II klassi, kuid III klassi pikenemisel üle 0,20% täpsed juhised edasisteks tegevusteks puuduvad [3]. Sellegipoolest vajavad Sopimetsa II karjääri jämetäitematerjaliga valmistatud katsekehade tulemused edaspidist uurimist. Ühe tegevusena ei määratud lõputöös näiteks täpset killustiku mineraloogilist koostist. Siinkohal tasub aga ka mainida, et RILEM AAR-2 metoodika on ebasobilik ränikivi (*chert*) uurimiseks, mille konkretsioonide esinemine Eesti lubjakivis on võimalik [9]. [3]

Katsekehade visuaalsel vaatlusel märgati Sopimetsa II karjääri mördivarraste erinevust teistest katsekehadest. Sopimetsa II mördivarraste pinnale tekkisid 3. katsepäeval ASR-le iseloomulikud eritused (Foto 28) – need olid erineva värvuse, kuju ja suurusega ning nende hulk katsekeha pinnal suurenes katseperioodi jooksul. Märgati tume- ja helehalle laiike, mis paiknesid katsekeha pinnal jämetäitematerjali terade ümbruses. 21. päeval katsekehade eemaldamisel leelisest oli kuulda pragunemist. Visuaalsel vaatlusel märgati ulatuslikku pragunemist kõigil Sopimetsa II mördivarrastel. Võib eeldada, et pragunemine on põhjustatud ASR geelist, mille kiirest paisumisest tekitatud sisejõud ületasid katsekeha tõmbetugevuse.

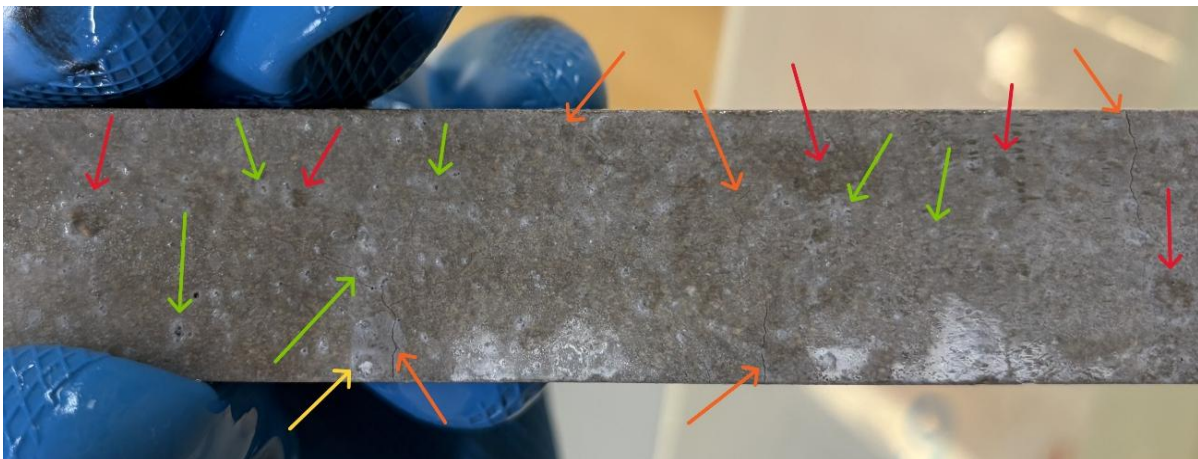


Foto 28. Sopimetsa II katsekeha 21. päeval leelises. Punased nooled – tumedad laigud pinnal, oranžid nooled – pragunemised, kollane nool – helehall laik, rohelised nooled – valged täpid pinnal, tõenäoliselt täitematerjali ümbritsev ASR-geel

Väo karjääri katsekehad pikenesid oli AAR-2 katseperioodi 14. päevaks kõike vähem – 0,030%. Katse pikendamisel 21. mõõtmispäevani märgati mördipulkadel pinnal tumedaid laike (Foto 29). Jäljed olid sümmeetrilised, kaootilise paigutuse ja erineva suurusega. Värvimuutuste tõlgendamise juhised RILEM metoodikas puuduvad [3] .



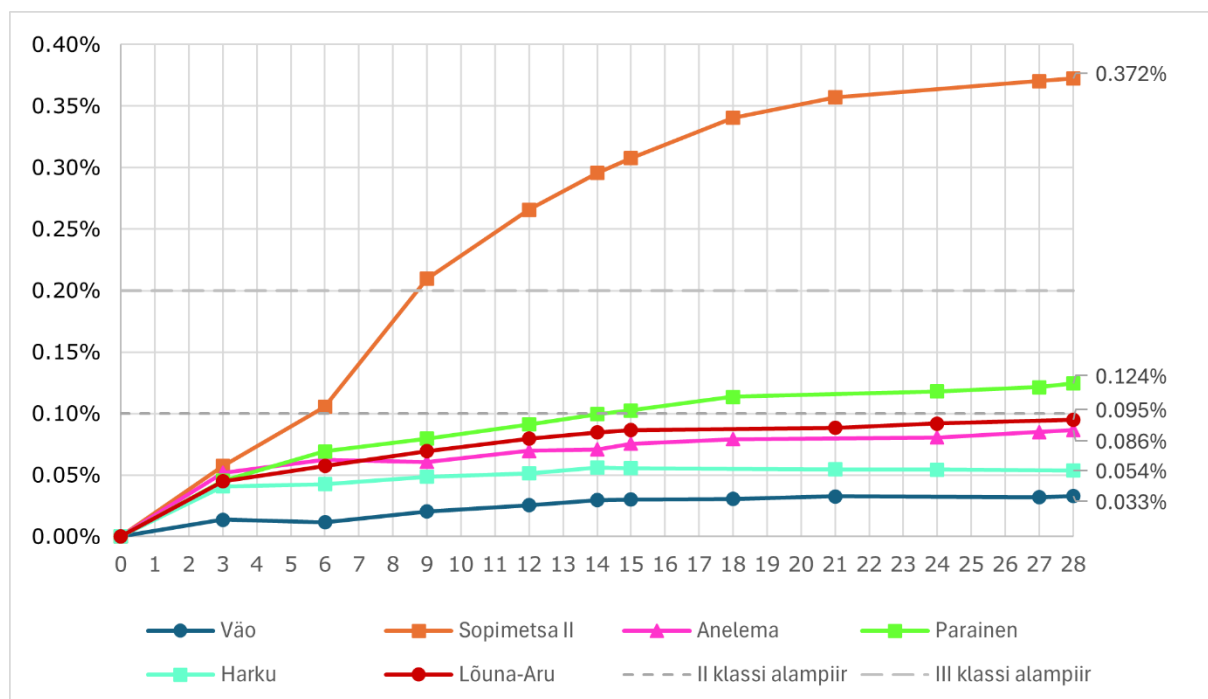
Foto 29. Väo katsekeha 21. päeval, nooled viitavad tumedatele laikudele katsekeha pinnal

Edaspidiseks mördivarraste piknemise vaatluseks otsustati jätkata mõõtmistega kuni 28. päevani 1 M NaOH lahuses eesmärgiga tuvastada aeglaselt reageerivad jämetäitematerjalid. Siiski katkes katse ootamatult ahju rikke tõttu. Katsekehad paigutati teise ahju ja soojendati 80°C-ni. Kuigi ootamatu temperatuuri kõikumine on RILEM metoodikast kõrvalekalle, otsustati vaadelda katkestuse mõju katsekehade piknemisele.

Temperatuuri ajutine langus ei avaldanud üldjuhul märkimisväärset mõju katsekehade piknemisele ning mõõtetulemuste trend jäi valdavalt muutumatuks. Erandiks olid Harku karjääri jämetäitematerjaliga valmistatud mördivardad, mille puhul täheldati negatiivset piknemist (Tabel 7, lk 43). Harku karjääri katsekehadel olid mördivardad 21., 24. ja 28. päeval ca 0,002 mm võrra lühemad võrreldes 15. päeva mõõtetulemusega (viimane mõõtmine enne temperatuuri langust). Sopimetsa II katsekehad pikenesid 28. päevaks keskmiselt 0,372%. Graafikult on nähtav piknemise aeglustumine katseaja pikendamisel (Joonis 16, lk 43). Parainen graniitkillustikuga valmistatud mördivardad ületasid 15. päeval II klassi piirmäära ning jõudsid 28. päeval piknemiseni 0,124%. Ülejäänud katsekehad ei jõudnud 28. päevase katseperioodi lõpuks II klassi piirmäärani.

Tabel 7. Mõrdivarraste keskmine pikenemine kuni 28. päevani

| Katsekehade keskmine pikenemine mõõtepäeval $L_n$ , % |       |              |         |          |       |           |
|---|-------|--------------|---------|----------|-------|-----------|
| Päev  | Väo   | Sopimetsa II | Anelema | Parainen | Harku | Lõuna-Aru |
| 3   | 0,014 | 0,057        | 0,052   | 0,045    | 0,041 | 0,045     |
| 6   | 0,012 | 0,106        | 0,062   | 0,069    | 0,042 | 0,057     |
| 9   | 0,020 | 0,209        | 0,060   | 0,080    | 0,048 | 0,070     |
| 12  | 0,026 | 0,266        | 0,070   | 0,091    | 0,052 | 0,080     |
| 14  | 0,030 | 0,296        | 0,071   | 0,099    | 0,056 | 0,085     |
| 15  | 0,030 | 0,308        | 0,075   | 0,102    | 0,056 | 0,086     |
| 18  | 0,031 | 0,340        | 0,079   | 0,114    | -     | -         |
| 21  | 0,033 | 0,357        | -       | -        | 0,054 | 0,088     |
| 24  | -     | -            | 0,080   | 0,118    | 0,054 | 0,092     |
| 27  | 0,032 | 0,370        | 0,085   | 0,121    | -     | -         |
| 28  | 0,033 | 0,372        | 0,086   | 0,124    | 0,054 | 0,095     |



Joonis 16. Katsekehade keskmine pikenemine 28. päevaks

Katsete käigus otsustati purustatud jämetäitematerjalide morfoloogiat lähemalt uurida. Selleks kasutati Tallinna Botaanikaia stereomikroskoopi. Kuigi käesolevas lõputöös ei uuritud lähemalt purustatud jämetäitematerjali omadusi ja mineraloogilist koostist, on mikrofotode dokumenteerimine aluseks edaspidisteks uuringuteks. Jämetäitematerjalide mikrofotod on esitatud lisas (Lisa 1).

## 5 ASR TUVASTAMINE OLEMASOLEVATEL KONSTRUKTSIOONIDEL

Lõputöö teiseks eesmärgiks oli uurida olemasolevaid betoonkonstruktsioone. Uuritavad objektid valiti nähtava võrkpragunemisega konstruktsioonide hulgast, mis on tüüpiline ASR-i tunnus. Olemasolevate konstruktsioonide uurimiseks kasutati komplekti ASR Detect, mis võimaldab hinnata nii reaktsiooni olemasolu kui ka selle arenguetappi. Katsed viidi läbi kuuel konstruktsioonil – 5 katset teostati objektidel kohapeal ning üks katse viidi läbi lammutatud konstruktsiooni osal, mis asus Tallinna Tehnikakõrgkooli laboris. Katsed viidi läbi James Instrumets ASR Detect komplektiga, mis võimaldab kiiresti hinnata konstruktsiooni seisundit kohapeal. Kiirtesti kasutamisel on oluline ASR-positiivseid tulemusi kontrollida näiteks AAR-1 petrograafilise analüüsiga või skaneeriva elektronmikroskoopiaga (SEM). Kiirtesti saab kasutada vaid esmase hinnangu andmiseks.

### 5.1 Metoodikad

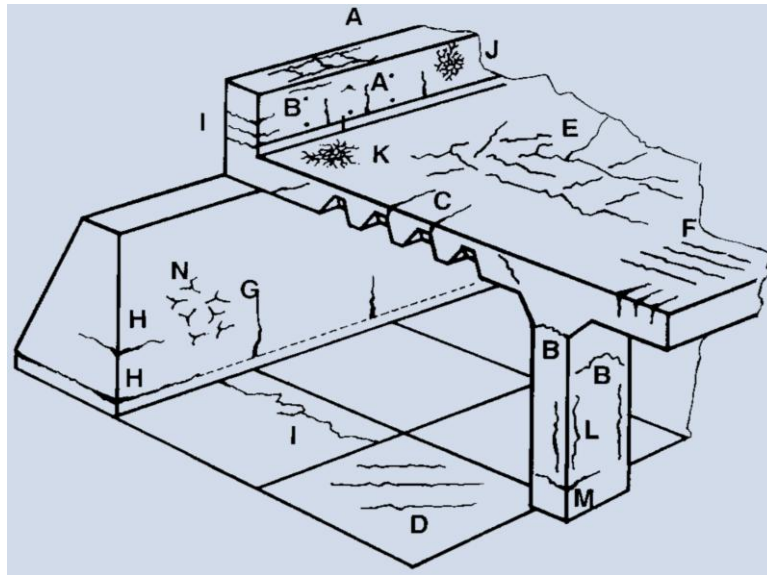
Esmane objektide valik põhines võrkpragunemise olemasolul, kuid betooni pragunemine ei pruugi viidata üksnes leelis-räni reaktsioonist tekitatud kahjustustele. Oluline on hinnata pragunemise asukohta, mustrit, sügavust ja kuju, väliskeskkonna mõju konstruktsioonile ja võtta arvesse betooni vanus. [30]

Betoon praguneb, kui selles tekkinud tõmbepinged ületavad betooni tõmbetugevuse. Enim levinud pragunemise liigid ja nende tekkimise põhjused on järgmised (Joonis 17, lk 46). [30], [31]:

- Plastiline vajumine (tähis joonisel: A, B, C) – praod tekivad kuni 3 tunni jooksul peale betooni valamist siis, kui vee pinnale kerkimine põhjustab betoonisegu vajumist. Tekib peamiselt tugevast vee eraldusest ja kiirest varajasest kuivamisest. Enamasti paikneb pragunemine armatuuri kohal, konstruktsiooni servades ja kohtades, kus muutub betoonikihi paksus.
- Plastiline kahanemine (tähis joonisel: D, E, F) – praod ilmnevad betooni pinnale juba viimistlemise perioodil, kui niiskuse aurustumise kiirus ületab vee eralduse kiirust (eriti soojas ja tuulises ilmas). Praod paiknevad diagonaalselt või juhusliku muustrina.
- Varane termiline kahanemine (tähis joonisel: G, H) – pragunemine ilmneb vahemikus 1 päev kuni 3 nädalat pärast valamist. Kivinemisel eralduv soojus põhjustab betooni esmase paisumise ning hilisem jahtumine põhjustab betooni kokku tõmbumise. Pragunemine tekib, kui temperatuurimuutustest põhjustatud deformatsioon on takistatud. Esineb peamiselt paksudes seintes ning õhukestes

plaatides liiga suure soojaeralduse, suurte temperatuurigradientide ja kiire jahtumise tõttu.

- Pikaajaline kuivamiskahanemine (tähis joonisel: I) – pragunemine tekib nädalate või kuude pärast betooni paigaldamist. Protsess, mille käigus betoon kaotab vett pooridest ja kahaneb mahus. Peamiseks põhjuseks on vee kaotus tsemendipasta peenikestest pooridest ja sellest tulenev mahu vähenemine, mida süvendab liigne veehulk segus ja puudulik hooldus. Tüüpilisteks asukohtadeks on õhukesed plaadid ja seinad, kus puuduvad efektiivsed vuugid.
- Võrkjas pragunemine (tähis joonisel: J, K) – pragunemine on seotud pinnakihi kahanemisega, sageli valede töövõtete tulemusena. Võimalikeks põhjusteks on veetihe raketis, liigne terashõõrutiga töötlemine, tsemendirikkad segud või halb hooldus. Esineb plaatide pinnal ja raketise vastas olevatel pindadel tüüpilise heksagonaalse muustrina.
- Armatuuri korrosioon (tähis joonisel: L, M) – pragunemine ilmneb tavaliselt 2 aastat pärast betooni paigaldamist. Tekib armatuuri korrodeerumisel tekkiva mahupaisumise tõttu, mis lõhub ümbritseva betooni kaitsekihi. Peamised põhjused on puudulik kaitsekiht, madalakvaliteediline betoon või kaltsiumkloriidi kasutamine; esineb sagedasti sammastel, postidel ja piilaritel.
- Leelis-täitematerjali reaktsioon ehk AAR (tähis joonisel N) – AAR on pikaajaline betooni kahjustav protsess, mis avaldub betoonkonstruktsioonides tavaliselt vähemalt 5 aastat pärast konstruktsiooni valmimist. AAR jaguneb kaheks leelis-karbonaatseks reaktsiooniks (ACR) ja leelis-räni reaktsiooniks (ASR), millest viimane on tunduvalt levinum. ACR on haruldane protsess, mis on seotud dolomiitsete kivimite või dolomiitse lubjakivi rekristalliseerumisega täitematerjalis, mis omakorda põhjustab betooni paisumist. ASR-i põhjustab täitematerjalis esineva ränidioksiidi reaktsioon leelistega. Reaktsiooni tulemusena moodustub leelis-räni geel, mis paisub niiskust imades ja tekitab sisepingeid betoonis. Iseloomulikud konstruktsiooni pragunemised ilmnevad keskmiselt 5...20 aasta jooksul.



Joonis 17. Levinud pragunemised betoonkonstruktsioonides ja nende tekepõhjused [30]

ASR-le visuaalselt sarnast pragunemise mustrit põhjustab hiline etringiidi teke (*Delayed Ettringite Formation, DEF*) juba kivilenud betoonis (Foto 30, Foto 31). Selle teket põhjustab kuumutamine kivilenemise ajal. Etringiidi teke on normaalne protsess betooni kivilenemise ajal, kuid kõrge temperatuur (vähemalt 70...80 °C) kivilenemise ajal lükkab selle teket edasi. Sulfaatide sisaldus tsemendis langeb aeglasemalt ja need hakkavad reageerima tsemendisegus kaltsiumi ja alumiiniumiga. Reaktsiooni käigus hakkab sulfaat paisuma, mis tekitab tühimikke täitematerjali terade ümber põhjustades sisepingete kasvu kivilenud betoonis. Praktikas esineb etringiidi kahjustusi sageli kombinatsioonis ASR-ga. Samuti soodustab see külmumistsüklist tingitud kahjustuste ja pragude teket. [32], [33]



Foto 30. Tala pragunemine sekundaarse etringiidi tekke tõttu [32]



Foto 31. Etringiidi tekest põhjustatud pragunemine [32]

## 5.2 ASR Detect

James Instruments ASR Detect komplekt on mõeldud välitingimustes leelis-räni reaktsiooni olemasolu tuvastamiseks betoonkonstruktsioonides (Foto 32). Komplekti kasutatakse eelkõige olemasolevate konstruktsioonide seisundi esmaseks kohapealseks hindamiseks. ASR Detect võimaldab tuvastada ASR-i ka selle varases arenguetapis. [34]



Foto 32. James Instruments ASR *Detect* komplekt [34]

Enne komplekti kasutamist puhastatakse kontrollitav konstruktsiooni osa ja betooni pinnalt avatakse väike ala näiteks lihvimise teel. Testi käigus kantakse ettevalmistatud pinnale kaks reagenti, mis kutsuvad ASR-i olemasolul esile värvimuutuse. Esimesena kantakse betoonpinnale kollast värvi naatriumheksanitritokobaltaat(III) baasil värvaine, mis reageerides ASR geelis sisalduva liitiumiga, muudab pinna erkkollaseks (Foto 33, lk 48). Seejärel pestakse reagent maha destilleeritud veega ja pind kuivatatakse. Leelis-räni reaktsiooni esinemisel jäävad pinnale kollased jäljed. Järgnevalt kantakse betoonpinnale roosa rodamiinainetega vedelik, mis reageerib ASR geelis sisalduva kaltsiumiga. Roosa värvaine pestakse seejärel samuti destilleeritud veega maha. Ulatuslike leelis-räni reaktsiooni kahjustustega betoonil jäävad pinnale eredad roosad jäljed (Foto 33, lk 48). Uuring viiakse läbi kohapeal ning tulemused ilmnevad mõne minutiga. Meetodi kasutamiseks ei ole vaja eraldi väljaõpet ega katsete läbiviimist laboritingimustes. [34], [35], [36]



Foto 33. Vasakult paremale: ainult roosa reageeriva ainega testitud betoonpind ulatuslikke ASR kahjustustega, ainult kollase reageeriva ainega testitud betoonpind algaasis ASR-ga, kollase ja roosa värvainega testitud betoonpind nii algaasis kui ka arenenud ASR-ga [35]

### 5.3 Sõpruse sild

Tartu Sõpruse sild valmis 1981. aastal. Tegemist on ligikaudu 480 m pikkuse raudbetoonist talasillaga, millel on kokku 4 sõidurada. Konstruktsiooni vananemise tõttu alustati 2024. aastal silla ümberehitustöödega, mille käigus leiti, et mõned talad on niivõrd kehvasti seisukorras, et neist vähemalt üks on praeguseks demonteeritud. Selle ühe meetri pikkune ning ligikaudu 7-tonnine sillatala tükk tarniti Tallinna Tehnikakõrgkooli laborisse konstruktsiooniuringuteks (Foto 34). Konstruktsioonil ei esinenud ASR-le iseloomulikku võrkpragunemist, kuid siiski otsustati sellel läbi viia ka ASR katse eesmärgiga läbida katseprotseduur ning näha, milline on tõenäoliselt negatiivne katsetulemus. [34], [37]



Foto 34. Sõpruse silla tükk nähtavate konstruktsiooni kahjustustega

Kuna tala lõigati vesilõikuse abil, siis ei vaja see edasist pinna avamist. Esimese sammuna puhastati sillatala vesilõikuse pind tolmust ja muust mustusest ning seejärel pesti destilleeritud veega puhtaks (Foto 35).



Foto 35. Destilleeritud veega puhastatud Sõpruse silla tala uuritav sektsioon

Järgnevalt kanti pestud pinnale 5 ml kollast värvainet (Foto 36), pesti destilleeritud veega maha ja kuivatati. Pinnal ei esinenud erkkollaseid jälgi, mis viitab algfaasis leelis-räni reaktsiooni puudumisele (Foto 38, lk 50). Seejärel kanti pinnale 5 ml roosat värvainet (Foto 37), pesti maha destilleeritud veega ning kuivatati. Roosa värvaine ei jätnud samuti eredaid jälgi uuritava silla osal (Foto 39, lk 50), mis tõendab, et konstruktsioonil puuduvad ka arenenud ASR tunnused. Fotol nähtavad erksamad roosad piirkonnad on tingitud värvaine kogunemisest mõradesse ja pinna nõgusustesse, kust oli värvainet keerulisem maha pesta.



Foto 36. Kollase värvaine peale kandmine Sõpruse silla fragmendile



Foto 37. Roosa värvaine peale kandmine Sõpruse silla fragmendile



Foto 38. Kollasest värvainest puhastatud Sõpruse silla tala fragment, millel puuduvad algvaasis ASR-le iseloomulikud värvimuutused



Foto 39. Roosast värvainest puhastatud Sõpruse silla tala fragment, millel puuduvad arenenud ASR-le iseloomulikud värvimuutused

## 5.4 Objekt 1

Objekt 1 on tegemist betoonpostidega. Konstruktsiooni kohta ei ole saadaval piisavas mahus dokumentatsiooni ning puuduvad andmed betooni koostise kohta. Betoonpostid valati hinnanguliselt 1950...1960. aastatel, seega on tegemist vana konstruktsiooniga.

Betoonposti pind oli pragunenud ja ebaühtlase värvusega (Foto 40). Pind on ASR-le iseloomuliku võrkpragunemise mustriga. Lisaks pragunemisele oli pinnal märgata väikeseid poore ja õhutaskuid ning kohati paljastunud täitematerjali terasid. Arvestades leelis-räni reaktsioonile iseloomuliku võrkpragunemise mustriga, eeldati et konstruktsioonil võib esineda ASR. Kuigi pragunemine võib tekkida ka betoonitööde käigus, ei ole see antud juhul tõenäoline, arvestades konstruktsiooni vanusega. Sellisel juhul oleks pragude kaudu konstruktsiooni imbuva vesi ja külmumis-sulamistsüklid juba viinud betoonpinna kahjustumiseni.



Foto 40. Betoonposti pind enne ASR katset

Katsealune betoonposti pind lihviti, puhastati ja pesti destilleeritud veega. Ka lihvitud pinnal esines võrkpragunemise mustrit. Järgnevalt kanti peale kollane värvaine, mille maha pesemisel jäid pinnale selgelt eristatavad eredad jäljed, mis viitavad algfaasis leelis-räni reaktsioonile konstruktsioonis (Foto 41). Seejärel kanti samale kohale roosat värvainet, mis pesti destilleeritud veega maha. Uuritavale pinnale jäid eredad roosad jäljed, mis ümbritsesid lihvimisel paljastatud jämetäitematerjali terasid (Foto 42). Ere roosa pigment viitab arenenud ASR-le ja leelis-räni reaktsiooni käigus tekkiva kaltsiumirikka geeli olemasolule konstruktsioonis. Positiivsel ASR Detect katse tulemusel tuleb viia läbi täiendavad laboratoorsed uuringud, kuna komplekt on mõeldud eelkõige esmase hinnangu andmiseks välitingimustes.

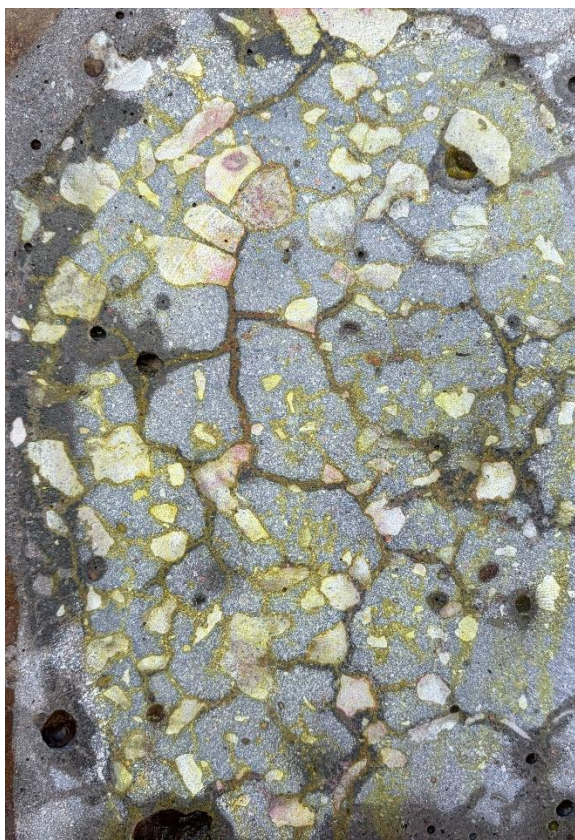


Foto 41. Kollase värvaine jäljed  
betoonpostil, mis viitavad algfaasis  
ASR-le



Foto 42. Roosa värvaine jäljed  
betoonpostil, mis viitavad arenenud  
ASR-le

Betoonposti uuritava pinnal märgati jämetäitematerjali terade pragunemist, mis võib olla põhjustatud ASR geeli paisumisest tingitud sisepingete kasvust (Foto 43). Terade ja pragunemiste läheduses oli kollase pigmendi kogus kõige suurem. Mõningate terade ümber on selgelt eristatav kollane kontuur. Katse tulemus viitab sellele, et leelis-räni reaktsioonile oli vastuvõtlik jämetäitematerjal, kuna peentäitematerjali osas iseloomulikku värvimuutust ei esinenud.



Foto 43. Kollase ja roosa värvaine jäljed betoonpostil, märgata on nii kollase kui ka roosa värvaine jälgi pragudes ja terade kontuuril

## 5.5 Objekt 2

Objektiks 2 on tunneli tugisein, millel esines ASR-le iseloomulikku võrkpragunemise mustrit (Foto 44). Betoopinna lihvimisel märgati pragunemist ka ligikaudu 3 mm sügavusel välispinnast. Paljastunud terade värvusest järeldati, et täitematerjalina on kasutatud graniitkillustiku.



Foto 44. Objekt 2 tugiseina võrkpragunemine

Kollase värvaine peale kandmisel uuritavale pinnale värvusid pragunemise piirkonnad, samuti on eristatav värvimuutus jäme- ja peentäitematerjali terade kontuurides (Foto 45). Roosa pigment värvis enamjaolt samu piirkondi mis kollane, mis viitab arenenud faasis ASR-le (Foto 46). Visuaalsel hinnangul võib tegemist olla nii peen- kui ka jämetäitematerjali ASR-ga, kuid vajab kindlasti edasist uurimist.



Foto 45. Kollase pigmendi jäljed pragunemise kohtades ning peen- ja jämetäitematerjali terade ümbruses

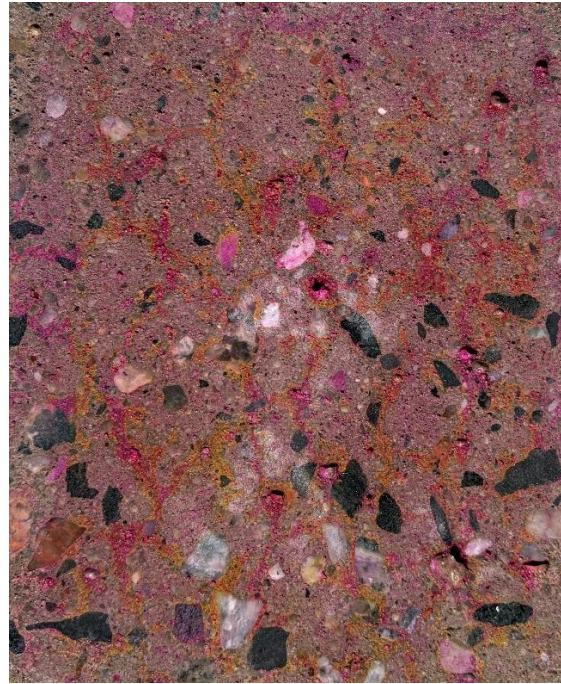


Foto 46. Roosa pigmendi jäljed pragudes, ning peen- ja jämetäitematerjali terade ümbruses

Katsealuse pinna uurimisel märgati mõningate jämetäitematerjalide terade võimalikku pragunemist, mis jälgib ümbritseva betoonpinna pragunemise mustrit (Foto 47) – tegemist võib olla ASR geeli paisumisest põhjustatud sisepingete kasvuga. Kohapealne visuaalne hinnang ei anna täielikku ülevaadet betooni seisukorra kohta. Võimalik, et tegemist on ka graniitkillustiku loomuliku morfoloogiaga, mistõttu on oluline esmase ASR-positiivse tulemuse saamisel jätkata uuringuid laboritingimustes.

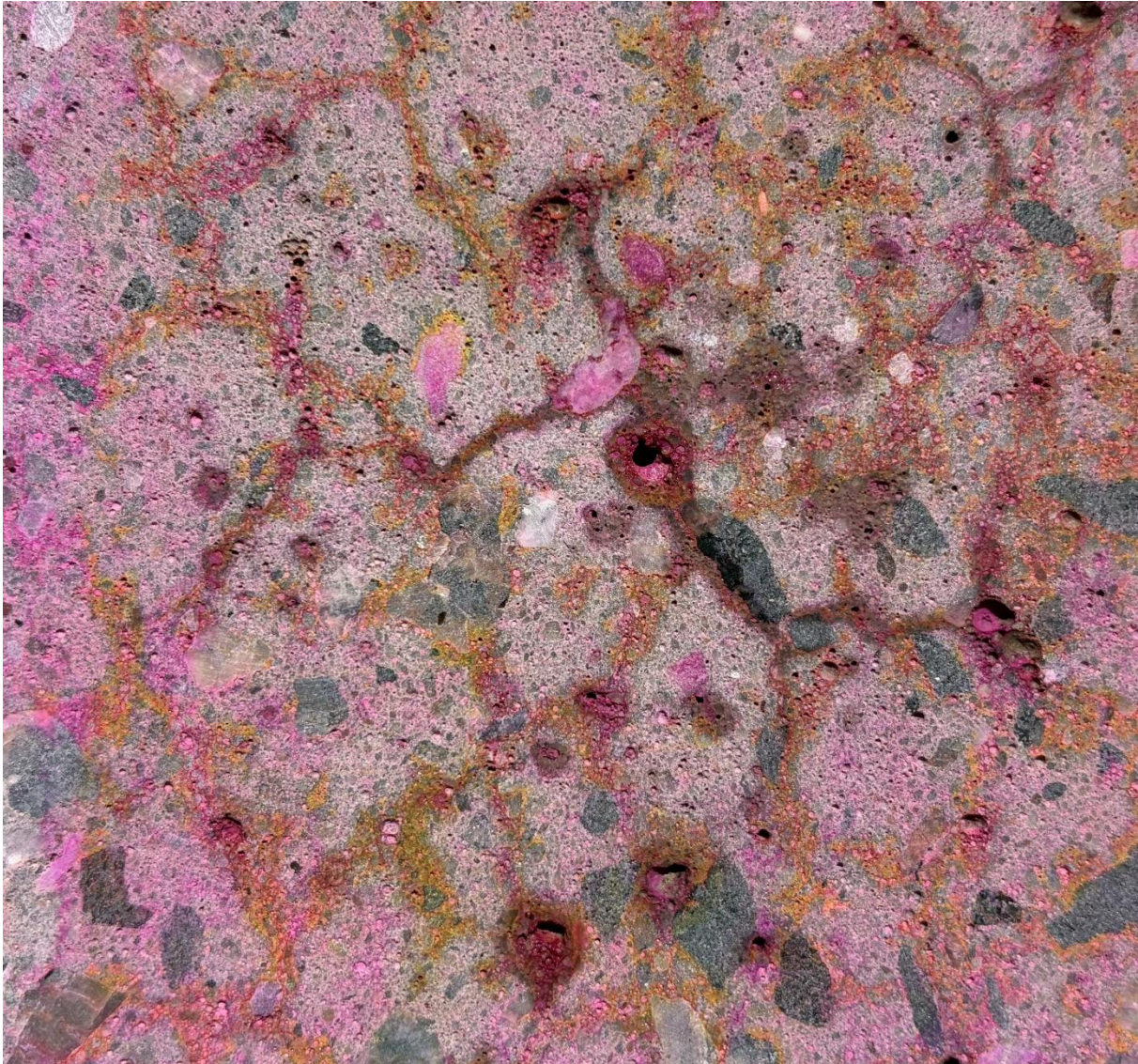


Foto 47. Objekt 2 uuritav pind, kollast ja roosat pigmenti on näha niipeen- ja jämetäitematerjalide terade ümber kui ka pragudes

## 5.6 Objekt 3

Kolmandaks objektiks on viadukti servapruss, mille pinnal esines ühtlast peent võrkpragunemise mustrit (Foto 48). Betoonpinna lihvimise käigus tuvastati, et betooni täitematerjalina on kasutatud graniitkillustikku, mis on eeldatavasti pärit Soomest. Pragunemist esines nii servaprussi ülemisel osal kui ka selle küljel, samuti ka tugiseina peal. ASR Detect katseks valiti 2 piirkonda, millest üks paiknes viadukti servaprussi pealmisel pinnal (Foto 48) ja teine selle küljel (Foto 49).



Foto 48. Objekt 3 servaprussi ülemise osa uuritav pind, millel täheldati võrkpragunemist

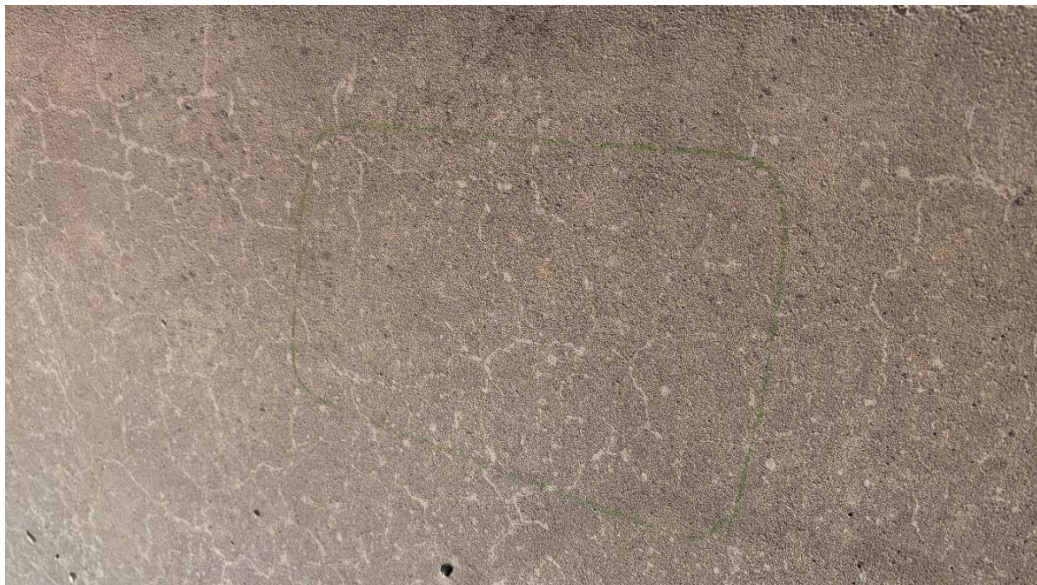


Foto 49. Objekt 3 servaprussi külje uuritav pind, millel täheldati võrkpragunemist

Betooni lihvimisel paljastunud pind oli üsna poorne ja imas sisse vedelikku. Teostatud ASR Detect katse andis pigem negatiivse tulemuse, seega on vähetõenäoline, et võrkpragunemine on seotud leelis-räni reaktsiooniga. Kollase värvaine maha pesemisel tala ülemisest osast jäi pigment osaliselt pragudesse ja peentäitematerjali ümbrusesse (Foto 50) kuid värvimuutus ei olnud nii ere kui Objekt 1 ja Objekt 2 korral. Servaprussi küljel kogunes roosa pigment ühtlaselt pooridesse (Foto 52, lk 59) ning värvaine maha pesemisel jäi selle pigment kogu katsealuse pinna peale (Foto 51 ja Foto 53, lk 59), mis on tingitud betooni poorsusest. Roosa värvaine kogunemist jäme- ja peentäitematerjali ümbruses ei esinenud.



Foto 50. Objekt 3 servaprussi ülemise osa pind pärast kollase pigmendi maha pesemist, pigem ei esine algaasis ASR-i



Foto 51. Objekt 3 servaprussi ülemise osa pind pärast roosa pigmendi maha pesemist, pigem ei esine arenenud ASR-i



Foto 52. Objekt 3 servaprussi külje pind pärast kollase pigmendi maha pesemist, algfaasis ASR-i ei tuvastatud

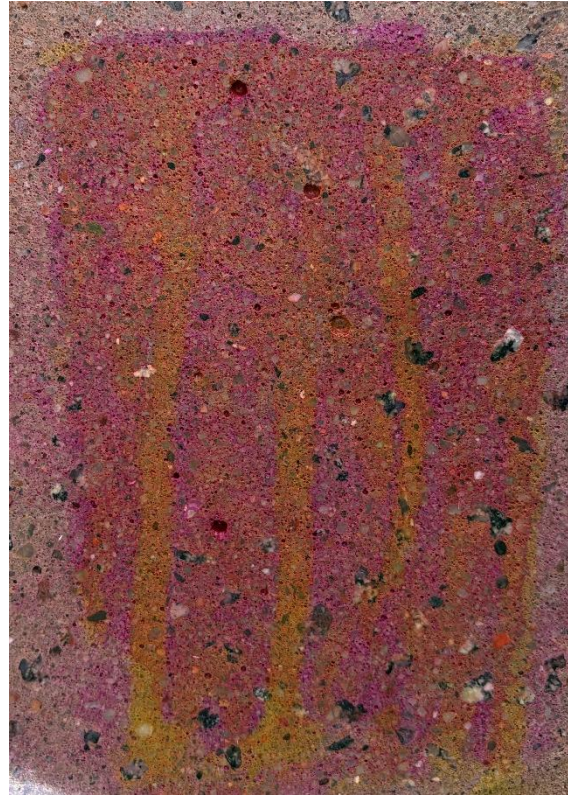


Foto 53. Objekt 3 servaprussi külje pind pärast roosa pigmendi maha pesemist, arenenud ASR-i ei tuvastatud

Pragunemine võib olla põhjustatud betooni pinnakihi liiga kiirest kahanemisest, mis on pigem esteetiline probleem ja pragunemine ei mõjuta konstruktsiooni kandevõimet, kuna praod ulatuvad vaid mõne millimeetri sügavale. Samuti võib võrkja pragunemise teket betooni pinnal soodustada ka kõrgem vesitsement tegur, kõrge tsemendi sisaldus betoonis ja betoonpinna liigne töötlus terashõrutiga. [30],[31], [38]

ASR Detect katse ei tuvastanud ASR-i, kuid siiski jäi lihvitud betoonpinnale üsna suures koguses värvainet, mis võib olla tingitud betooni kõrgemast poorsusest. Antud objektil võiks läbi viia täiendavad uuringud pragunemise põhjuste tuvastamiseks.

## 5.7 Objekt 4

Objekt 4 korral on tegemist samuti tunneli tugiseinaga, millel märgati erinevates kohtades betooni pragunemist piirkondades, mis on keskkonnamõjudele enam avatud (Foto 54). Tegemist on pinnapealse võrkpragunemisega. Pragunemise võis esile kutsuda kiire betooni plastiline kahanemine [30], [31], samas ei saa välistada ka leelis-räni reaktsioonist tingitud kahjustusi, kuna betoonpinna pragunemise muster siiski meenutab ASR-le iseloomulikku võrkpragunemist.



Foto 54. Objekt 4 tugiseina pragunemine

ASR Detect katse tulemused ei viita betoonkonstruktsioonis leelis-räni reaktsiooni esinemisele. Tegemist on suhteliselt uue konstruktsiooniga, mille pinnakihi ca 3 mm eemaldamisel paljastusid graniitkillustiku terad. Tegemist on tõenäoliselt Soome päritolu materjaliga, mida katsetatakse tänapäeval ASR-le. Juhul, kui tegemist on sertifitseeritud täitematerjaliga, võib eeldada väga madalat vastuvõtlikkust leelis-räni reaktsioonile ning seega ka madalat ASR tekke riski.

Katse käigus täheldati pragunemiskohtades vähesel määral destilleeritud vee kogunemist, kuid need piirkonnad olid visuaalselt nõrgalt eristatavad. Eeldatakse, et pragunemine ei ole seotud ASR-geeli paisumisega, mis oleks iseloomulik arenenud ASR-le. Nii kollase kui ka roosa värvainete maha pesemisel ei ilmnenud uuritava pinnal pigmendi jääke (Foto 55, Foto 56). Nende puudumine viitab sellele, et konstruktsioonil ei esine ASR-i



Foto 55. Uuritav pind pärast kollase pigmendi maha pesemist, ASR-negatiivne tulemus



Foto 56. Uuritav pind pärast roosa pigmendi maha pesemist, viitab arenenud ASR puudumisele

## 5.8 Objekt 5

Viiendaks ja viimaseks uuritavaks objektiks on ühe viadukti samba pind, mis on võrkpragunemise mustriga ja poorne. Pinnal esineb kollakat ja oranži tooni värvimuutust, mille võimalikuks põhjuseks võib olla ka keskkonnamõju (soolad, sademed).

ASR Detect kiirkatseks valiti sügavam horisontaalne pragu, mis algas deformatsioonivuugist ja ulatus ca 50...60 cm valusektsiooni sisse (Foto 57). Pragu oli tumehalli värvi ja selle keskosas täheldati valget sadet, mis võib olla seotud kustutatud lubja ehk kaltsiumhüdroksiidi ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) leostumisega pinnale niiskuse mõjul [39]. Kustutatud lubja tungimine pinnale ei kahjusta konstruktsiooni ja on esteetiline probleem [39]. Tegemist võib olla ka varasest termilisest kahanemisest tingitud praoga [31]. Kuna pragu asub deformatsioonivuugi kõrval, siis on võimalikuks põhjuseks vuugi ebapiisav efektiivsus [31]. Samas ei saa üksnes visuaalse vaatluse põhjal välistada ka kristalliseerunud valge ASR-geeli võimalikku esinemist.



Foto 57. Uuritav pragu Objekt 5 sambal

Katse ettevalmistuseks lihviti betoonpind ligikaudu 3...4 mm sügavuseni. Lihvitud pinnal olid praod selgelt eristatavad ning paljastus nende võrkjas kuju (Foto 58). Pinna ettevalmistamisel märgati graniitkillustiku kasutamist konstruktsioonis – tegemist on tõenäoliselt Soomest tarnitud täitematerjaliga.



Foto 58. Lihvitud samba katsealune pind

ASR Detect kiirkatses kasutati nii kollast kui ka roosat pigmenti. Uuritava pinna peale ei jäänud eredat värvipigmenti, mis viitaks algaasis või arenenud ASR-le (Foto 59 ja Foto 60, lk 64). Roosa värvaine maha pesemisel täheldati pinna ühtlast värvumist, kuid see on selgitatav betooni kõrge poorsusega.



Foto 59. Objekt 5 samba katsealune pind pärast kollase pigmendi kasutamist, algaasis ASR-i ei tuvastatud



Foto 60. Objekt 5 samba katsealune pind pärast roosa pigmendi kasutamist, arenenud ASR-i ei tuvastatud

Arvestades ASR Detect katse negatiivse tulemusega, tuleb pragunemise selgitamiseks käsitleda teisi põhjuseid. Üheks võimalikuks teguriks on hiline etringiidi teke, mis võib põhjustada betooni sisemist paisumist ja pragunemist [32]. Samuti võib pragunemine olla seotud külmumis-sulamistsükliga, mille käigus pooridesse imunud vee jäätumine ja paisumine tekitab sisemisi pingeid.

## 6 ETTEPANEKUD EDASISTEKS UURINGUTEKS

Lõputöö tulemustele tuginedes on otstarbekas jätkata uuringuid, mis käsitlevad täitematerjalide rolli leelis-räni reaktsiooni kujunemisel. Edasistes töödes on soovitatav põhjalikumalt uurida Eesti jämetäitematerjali käitumist AAR-2 meetodika alusel, pöörates erilist tähelepanu erinevate purustamismeetodite mõjule täitematerjali omadustele ja reaktsioonivõimele. Oleks vaja viia läbi võrdlevad katsed, kasutades erinevaid purustamise meetodeid (näiteks lõugpurusti, rullpurusti ja rootorpurusti) ja hinnata nende mõju nii lühikui ka pikaajaliste katsete tulemustele. Samuti oleks vajalik uurida Ida-Eestis toodetavat killustiku, kuna see jäi käesolevast lõputööst välja.

Täiendavate uuringute raames tuleks läbi viia petrograafiline analüüs Eesti peen- ja jämetäitematerjalile, et täpsustada nende mineraloogilist ja morfoloogiat koostist ning hinnata potentsiaalselt reaktiivsete komponentide esinemist. Jämetäitematerjalide puhul tuleb uurida ka purustatud terade morfoloogiat. Erilist tähelepanu tuleks pöörata AAR-2 katse tulemuste järgi II ja III klassi kuuluvatele materjalidele. Morfoloogia ja mineraloogilise koostise täpsemaks analüüsiks on soovitatav kaasata kogunud geoloog.

Samuti on vajalik teostada pikaajalisi katseid vastavalt AAR-3 ja AAR-4 meetodikatele, kasutades erinevate purustamismeetoditega valmistatud täitematerjale. See võimaldaks hinnata reaktsiooni arengut pikema aja jooksul ning anda usaldusväärsema hinnangu materjali tegelikule käitumisele betoonis. Oluliseks uurimissuunaks on kiirendatud (AAR-2 mördivarda pikenemise katse) ja pikaajaliste (AAR-3 ja AAR-4 betoonprisma katse) katsete tulemuste võrdlev analüüs, et hinnata kiirendatud meetodi sobivust Eesti täitematerjalide uurimises. Mujal Euroopas läbi viidud katsed näitavad, et paljud jämetäitematerjalid, mis sisaldavad potentsiaalselt leelis-räni reaktsioonile vastuvõtlikke kivimeid, ei arenda leelis-räni reaktsiooni piisavalt kiiresti, et neid saaks AAR-2 katse alusel klassifitseerida II või III klassi kuuluvateks [13], [11]. Antud olukord võib esineda ka Eesti jämetäitematerjalide uuringu raames, mistõttu on ilmselt mõistlik edaspidistes uuringutes teostada samadele materjalidele ka RILEM AAR-3 ja AAR-4 pikaajalisemate meetodikate järgsed katsed.

Lisaks laboratoorsetele uuringutele on soovitatav teostada ulatuslikumaid välikatsed erinevatel objektidel Eestis, kus esineb ASR-le iseloomulikke pinnakahjustusi. Olemasolevatele konstruktsioonidele esmase hinnangu andmiseks soovitatakse kasutada ASR Detect komplekti, kuid saadud tulemuste kontrolliks on oluline jätkata uuringuid laboritingimustes. Sellised uuringud võimaldaksid siduda laboratoorsed tulemused tegelikku konstruktsioonide käitumisega ning anda terviklikum hinnang ASR-i mõjule Eesti ehituspraktikas.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas lõputöös anti ülevaade leelis-räni reaktsioonist (ASR) ning selle enim levinud uurimise meetoditest. Samuti tutvustati mujal maailmas avastatud ASR-i juhtumeid olemasolevatel konstruktsioonidel ning käsitleti jämetäitematerjali purustamise protsessi ja meetodika mõju RILEM AAR-2 katse tulemustele. Teistes riikides teostatud uuringud toovad välja, et purustatud jämetäitematerjaliga valmistatud katsekehad näitavad suuremat pikenemist, kusjuures lõugpurustiga töödeldud jämetäitematerjaliga valmistatud mördivardad pikenevad rohkem kui rullpurustiga valmistatud katsekehad.

Lõputöö teises osas tutvustati ASR uurimiseks valitud RILEM AAR-2 meetodikat, kirjeldati läbi viidud katseid ja saadud tulemusi. Mördivarda pikenemise katsetes selgus, et üks lõugpurustiga purustatud Eesti jämetäitematerjal on leelis-räni reaktsioonile vastuvõtlik. Kuuest uuritud jämetäitematerjalist, viis Eesti ja üks Soome päritolu, ületasid Eesti Sopimetsa II karjääri killustikuga valmistatud mörddipulgad reaktiivsuse II klassi piirmäära 14-päevase katseperioodi jooksul, jõudes pikenemiseni 0,296%. Katseperioodi pikendamisel 28 päevani pikenesid Sopimetsa II katsekehad 0,372%-ni. Teiste karjääride katsekehad ei ületanud 14 päeva jooksul I klassi alampiiri ning klassifitseerusid mitte-reageerivateks. Olemasoleva ASR sertifikaadiga Soome Parainen karjääri jämetäitematerjaliga valmistatud mörddipulgad pikenesid 14 päeva jooksul 0,099% ning 28 päeva jooksul 0,124%, jõudes I reaktiivsusklassi. Lisaks dokumenteeriti purustatud jämetäitematerjali morfoloogiat, mis võib olla aluseks edasistele võrdluskatsetele erinevate purustamismeetoditega.

Olemasolevate konstruktsioonide esmases uuringus teostati välikatsed ASR Detect komplektiga viiel objektil ning ühel konstruktsiooni tükil Tallinna Tehnikakõrgkooli laboris. Võimalik leelis-räni reaktsioon tuvastati kahel objektil, kusjuures mõlemal juhul viitas tulemus nii algfaasis kui ka arenenud ASR-le. Saadud tulemuste põhjal ei ole võimalik teha lõplikke järeldusi ilma täiendavate laboratoorsete analüüsideni – tulemused vajavad kinnitamist petrograafilise analüüsiga.

Lõputöö tulemuste põhjal järeldati, et leelis-räni reaktsioon võib esineda Eesti jämetäitematerjalidel ja olemasolevatel konstruktsioonidel, kuid selle täpsemaks hindamiseks on vaja edaspidiseid uuringuid. Katsetulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada, et kasutatud lõugpurusti võis mõjutada katsekehade pikenemist. Järgnevates uuringutes on vajalik laiendada jämetäitematerjalide proovide hulka, teostada võrdluskatsed erinevate purustamismeetoditega ning viia läbi pikaajalised katsed RILEM AAR-3 ja AAR-4 meetodikate järgi. Täiendavalt on vajalik viia läbi välikatsed muudel objektidel, et saada täpsem ülevaade leelis-räni reaktsiooni esinemisest Eestis. Töö

tulemused on kasulikud ehitusinseneridele, ehitiste omanikele ja betoonitootjatele. Need võimaldavad teha teadlikumaid otsuseid jämetäitematerjalide valikul ja hinnata võimalikke leelis-räni reaktsiooni riske betoonkonstruktsioonide ehitamisel ja eksploatatsioonis.

## SUMMARY

### *Phase II of the Experimental Study of Alkali-Silica Reaction*

The aim of this graduation thesis is to evaluate the potential for alkali-silica reaction (ASR) in Estonian aggregates and to provide an initial assessment of the presence of ASR in both its beginning and advanced stages in existing structures. The graduation thesis is composed of six chapters. Chapters 1 through 3 provide background information on alkali-silica reaction, the role of aggregates in ASR, and describe existing structures in other countries where ASR has been detected. Chapters 4 and 5 describe the testing methodology used and present the results obtained. Chapter 6 outlines further testing recommendations based on the findings of this thesis.

Aggregates from five Estonian and one Finnish quarry were tested using the RILEM AAR-2 accelerated mortar-bar methodology using 25×25×285 mm bars, with expansion monitored over 28 days. After 14 days in 1 M NaOH solution, specimens containing Estonian Sopimetsa II aggregate exceeded both the 0,1% and 0,2% expansion limits, reaching 0,296%, classifying them as likely reactive. By 28 days, expansion had increased further to 0,372%. All other Estonian aggregates remained below the 0,1% limit at 14 days, classifying them as likely non-reactive. The Finnish aggregate exceeded the 0,1% limit at 15 days reaching 0,102% and measured at 0,114% on day 28, though existing AAR-1 petrographic and AAR-2 reports confirm its non-reactivity. This elevated expansion may be related to fine particle morphology produced by the jaw crusher and warrants further investigation. The shape of crushed aggregates was also documented to support future studies.

For the assessment of existing structures, the James Instruments ASR Detect kit was used under both laboratory and field conditions across six structures. Both beginning and advanced stages of ASR were identified in two cases. These results represent an initial assessment only, and further laboratory testing is required to confirm the findings.

Reliable assessment of ASR requires consideration of multiple factors, including mineral composition and crushed particle shape. It is recommended to conduct further aggregate studies using petrography and longer duration tests such as AAR-3 and AAR-4, and to expand structural testing beyond the six structures examined in this thesis. The main aim of the thesis was partially achieved, establishing a baseline for further ASR research in Estonia.

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] „Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book“.
- [2] M. Pädam, „LEELIS-RÄNI REAKTSIOONI ÜLEVAADE JA KATSELINE UURIMINE“, Lõputöö, Tallinna Tehnikakõrgkool, Tallinn, 2025.
- [3] P. J. Nixon ja I. Sims, *RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by AlkaliAggregate Reactions in New Concrete Structures*, kd 17. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, 2016. doi: 10.1007/978-94-017-7252-5.
- [4] 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.
- [5] C. Lucero, „Aggregate and SCM Alkali Release“, 2016.
- [6] J. Lahdensivu, A. Köliö, ja D. Husaini, „Alkali-silica reaction in Southern-Finland’s bridges“, *Case Stud. Constr. Mater.*, kd 8, lk 469–475, juuni 2018, doi: 10.1016/j.cscm.2018.03.006.
- [7] „A Practical Approach to ASR Mitigation in Existing Structures“. Vaadatud: 19. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://www.structuremag.org/article/a-practical-approach-to-asr-mitigation-in-existing-structures/>
- [8] D. Werner, A. Gardei, S. Simon, ja B. Meng, „Microscopic investigation of building materials affected by alkali-silica reaction“, BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Division 7.1 ‘Building Materials’, Berlin, Germany. [Online]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/283012696\\_Microscopic\\_and\\_microchemical\\_investigation\\_of\\_building\\_materials\\_affected\\_by\\_alkali-silica\\_reaction](https://www.researchgate.net/publication/283012696_Microscopic_and_microchemical_investigation_of_building_materials_affected_by_alkali-silica_reaction)
- [9] „Geology and Mineral Resources of Estonia“. Vaadatud: 7. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://geoloogia.info/geology/index.html>
- [10] L. Grönlund, „Reactive components of Finnish aggregates causing alkali-silica reaction in concrete and evaluation of petrographical examination and accelerated mortar bar test as assessment methods“, [Online]. Available at: <https://www.utupub.fi/server/api/core/bitstreams/0cbd7750-32b5-48c6-b1d4-6d06ae19cb55/content>
- [11] E. Menéndez, R. García-Roves, B. Aldea, E. Puerto, ja H. Recino, „Study of the alkali-silica reaction rate of Spanish aggregates. Proposal of a classification based in accelerated mortar bars tests and petrographic parameters“, *Mater. Constr.*, kd 71, nr 344, lk e263, dets 2021, doi: 10.3989/mc.2021.13421.

- [12] „Microsoft Word - A-I-1.doc“. Vaadatud: 27. jaanuar 2026. [Online]. Available at: [http://awards.acpa.org/products/APPENDIX%20-%20C%20\(Interim%20Test%20Protocol\).pdf](http://awards.acpa.org/products/APPENDIX%20-%20C%20(Interim%20Test%20Protocol).pdf)
- [13] „(PDF) Identification of Reactivity Level in Aggregates from Lithuanian Gravel Quarry“, *ResearchGate*, aug 2025, doi: 10.2478/cons-2017-0008.
- [14] „ALKALI AGGREGATE REACTIONS (AAR) IN CONCRETE“. Vaadatud: 20. veebruar 2026. [Online]. Available at: [https://nordicconcrete.net/wp-content/uploads/2016/06/Workshop-proceeding-No-11\\_nov2013-Riga.pdf](https://nordicconcrete.net/wp-content/uploads/2016/06/Workshop-proceeding-No-11_nov2013-Riga.pdf)
- [15] E. Rodum, B. M. Pedersen, ja R. H. Relling, „FIELD AND LABORATORY EXAMINATIONS OF AN ASR-AFFECTED BRIDGE – VARIATION IN CRACK EXTENT AND WATER CONTENT“.
- [16] „Elgeseter Bridge“, *Wikipedia*. 29. oktoober 2024. Vaadatud: 12. veebruar 2026. [Online]. Available at: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Elgeseter\\_Bridge&oldid=1254031447](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Elgeseter_Bridge&oldid=1254031447)
- [17] J. Custódio *et al.*, „Insights into the Diagnosis and Prognosis of the Alkali–Silica Reaction (ASR) in Concrete Dams, Highlighting the Case of the Demolished Alto Ceira Dam in Portugal“, *Buildings*, kd 15, nr 3, veebr 2025, doi: 10.3390/buildings15030460.
- [18] 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.
- [19] I. Sims ja P. Nixon, „RILEM recommended test method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates—Petrographic method“, *Mater. Struct.*, kd 36, nr 7, lk 480–496, aug 2003, doi: 10.1007/BF02481528.
- [20] O. Omar, H. A. Hatailah, ja A. Nanni, „Advances and Perspectives in Alkali–Silica Reaction (ASR) Testing: A Critical Review of Reactivity and Mitigation Assessments“, *Designs*, kd 9, nr 3, juuni 2025, doi: 10.3390/designs9030071.
- [21] „nchrp\_rpt\_1083A.pdf“. Vaadatud: 20. veebruar 2026. [Online]. Available at: [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_1083A.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_1083A.pdf)
- [22] Y. Coutinho, L. Montefalco, ja A. Carneiro, „Influence of aggregate crushing on the results of accelerated alkali-silica reactivity tests“, *Constr. Build. Mater.*, kd 325, lk 126737, märts 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126737.
- [23] K. Ramyar, A. Topal, ja Ö. Andiç, „Effects of aggregate size and angularity on alkali–silica reaction“, *Cem. Concr. Res.*, kd 35, nr 11, lk 2165–2169, nov 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.03.010.
- [24] „Testing of aggregates“, RISE Research Institutes of Sweden AB, Sweden, 1182306–01, mai 2023.

- [25] „Testing of aggregates”, RISE Research Institutes of Sweden AB, Sweden, O100634-1182306-03, sept 2023.
- [26] „X-GIS 2.0 [ehitusgeoloogia]”. Vaadatud: 26. veebruar 2026. [Online]. Available at: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/ehitusgeoloogia>
- [27] *EVS-EN 1097-6:2022 Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 6: Terade tiheduse ja veeimavuse määramine*, aprill 2022. Vaadatud: 3. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=141389&language=EstonianLanguage>
- [28] *EVS-EN 196-1:2016 Tsemendi katsetamine. Osa 1: Tugevuse määramine*, juuni 2017. Vaadatud: 3. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=55552&language=EstonianLanguage>
- [29] *EVS-EN 1015-3:2004 Müürimörtide katsemeetodid. Osa 3: Mördisegu konsistents määramine (raputuslaual)*, 2004. Vaadatud: 3. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=32295&language=EstonianLanguage>
- [30] A. Nilsen, „IDENTIFYING CONCRETE CRACKS & HOW TO FIX THEM”, WS Remedial Group. Vaadatud: 13. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://wsrg.au/identifying-concrete-cracks-how-to-fix-them/>
- [31] E. UUSTALU, „BETOONI PRAGUNEMINE”, Ehitaja, lk 59, 2001.
- [32] „Cracks due to delayed ettringite formation”, CivilDigital. Vaadatud: 17. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://civildigital.com/significance-delayed-ettringite-formation-damage-mechanisms/>
- [33] N. Lindman, E. Lahdensivu, J. Lahdensivu, ja T. Pakkala, „Delayed ettringite formation (DEF) and its effect on freeze-thaw damage in Finnish concrete façades”, *J. Build. Eng.*, kd 73, lk 106659, aug 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106659.
- [34] „Datasheet ASR-Detect”. Vaadatud: 26. märts 2026. [Online]. Available at: <https://www.ndtjames.com/v/vspfiles/templates/neon/images/DataSheets/ASR-Detect.pdf>
- [35] „James Cat.” Vaadatud: 2. aprill 2026. [Online]. Available at: [https://www.promat.hk/ClientFolder/Promat/Library/Tree/Catalog\\_and\\_Manual/Construction/NDT/Corrosion\\_Testing/ASR\\_Carbo\\_Detect.pdf](https://www.promat.hk/ClientFolder/Promat/Library/Tree/Catalog_and_Manual/Construction/NDT/Corrosion_Testing/ASR_Carbo_Detect.pdf)
- [36] „TSPWG M 3-250-04.06-2 Alkali-Aggregate Reaction In Portland Cement Concrete (PCC) Airfield Pavements”, 2019.
- [37] „Sõpruse sild”. Vaadatud: 11. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://tartu.ee/et/soprusesild>

- [38] „(PDF) Cracks in Concrete Structures Causes And Treatments: A Review”, *ResearchGate*, doi: 10.26682/csjuod.2023.26.2.16.
- [39] A. jonnyhough, „Lime leaching | Concrete Society”. Vaadatud: 17. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://www.concrete.org.uk/fingertips/lime-leaching/>

**Lisa 1. Jämetäitematerjalide mikrofotod**

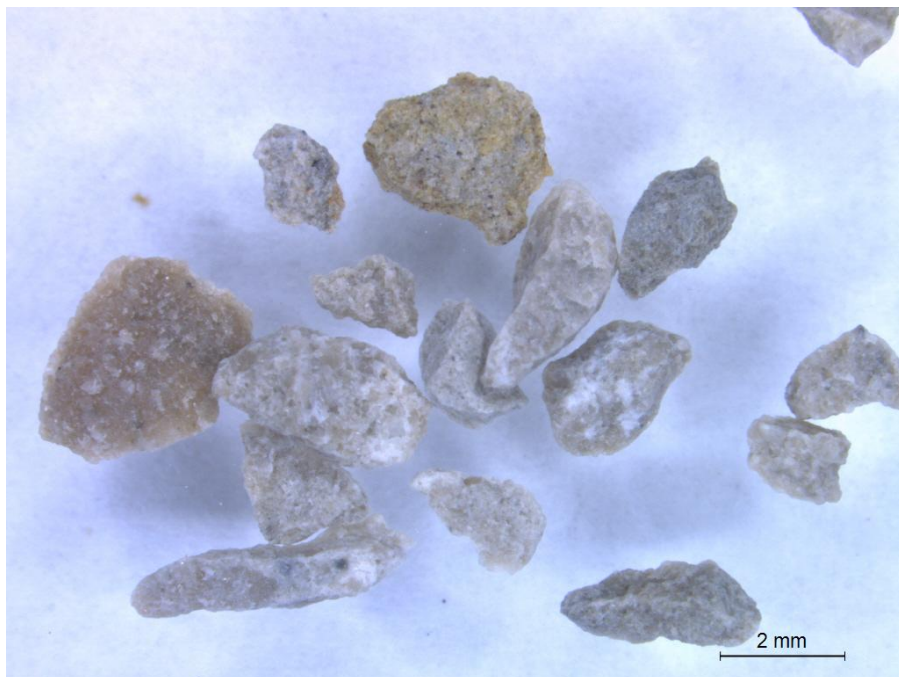


Foto 61. Lõugpurustiga purustatud Väo karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 2...1 mm

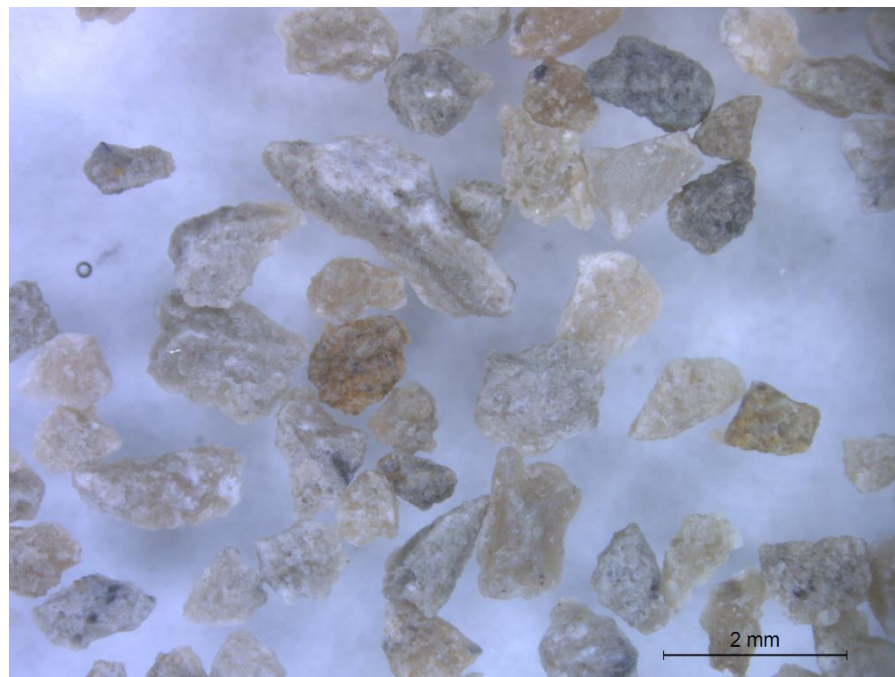


Foto 62. Lõugpurustiga purustatud Väo karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 1,0...0,5 mm

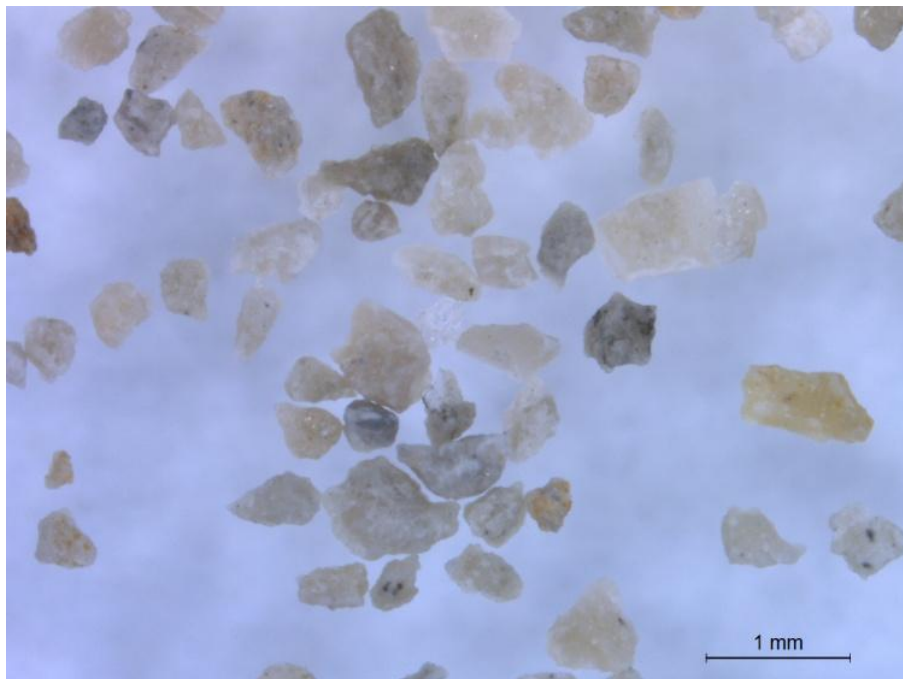


Foto 63. Lõugpurustiga purustatud Vão jämetäitematerjal,  
fraktsioon 0,5...0,25 mm

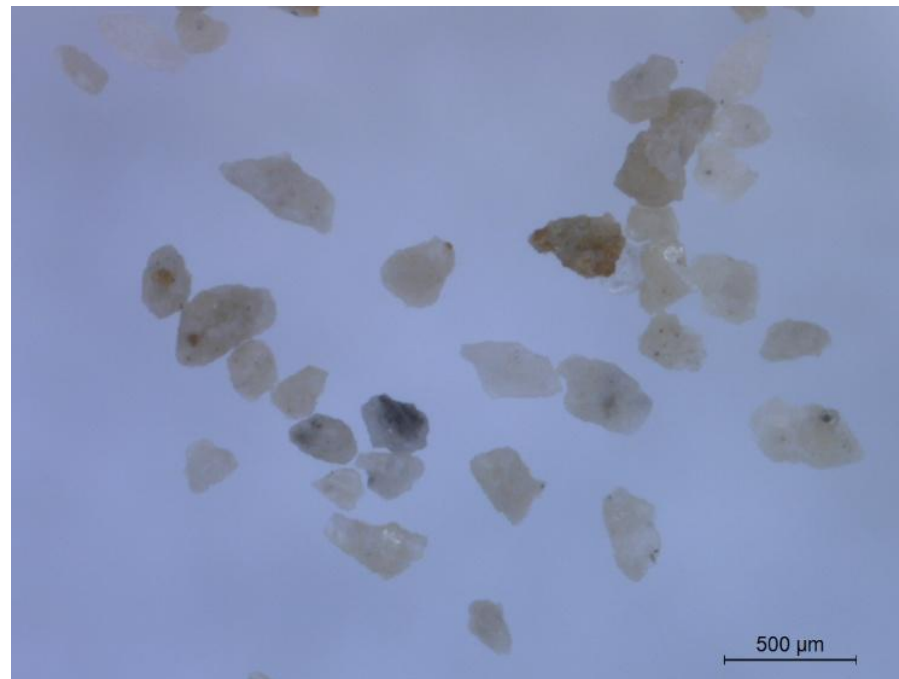


Foto 64. Lõugpurustiga purustatud Vão karjääri jämetäitematerjal,  
fraktsioon 0,250...0,125 mm

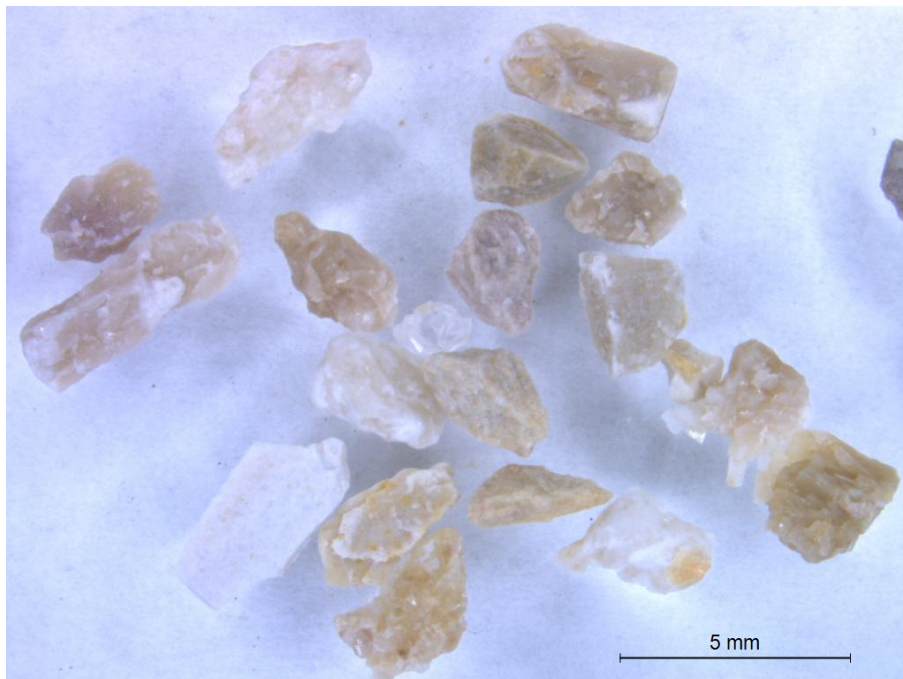


Foto 65. Lõugpurustiga purustatud Sopimetsa II karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 2...1 mm

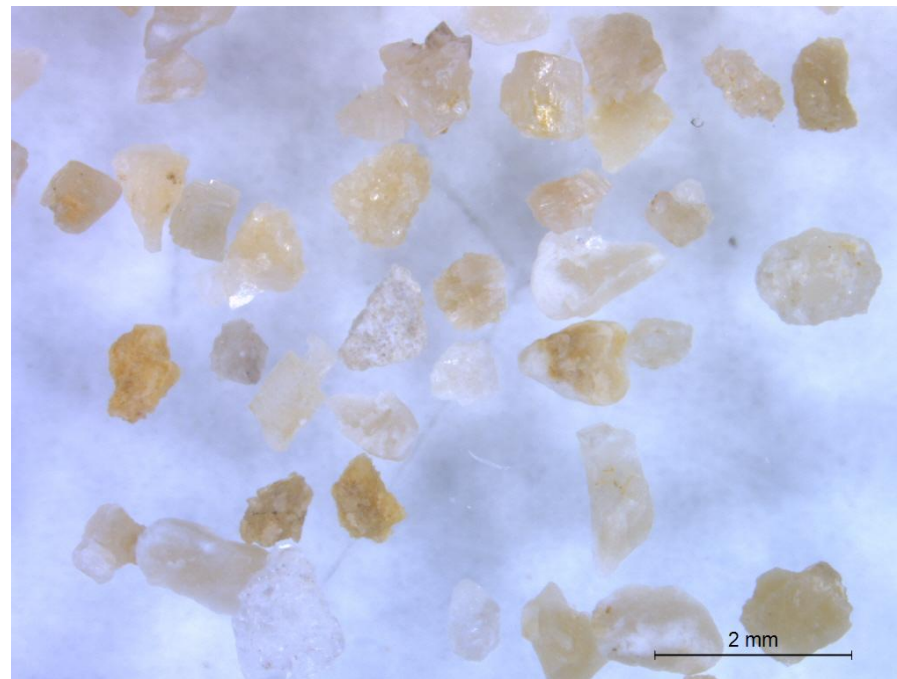


Foto 66. Lõugpurustiga purustatud Sopimetsa II karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 1,0...0,5 mm

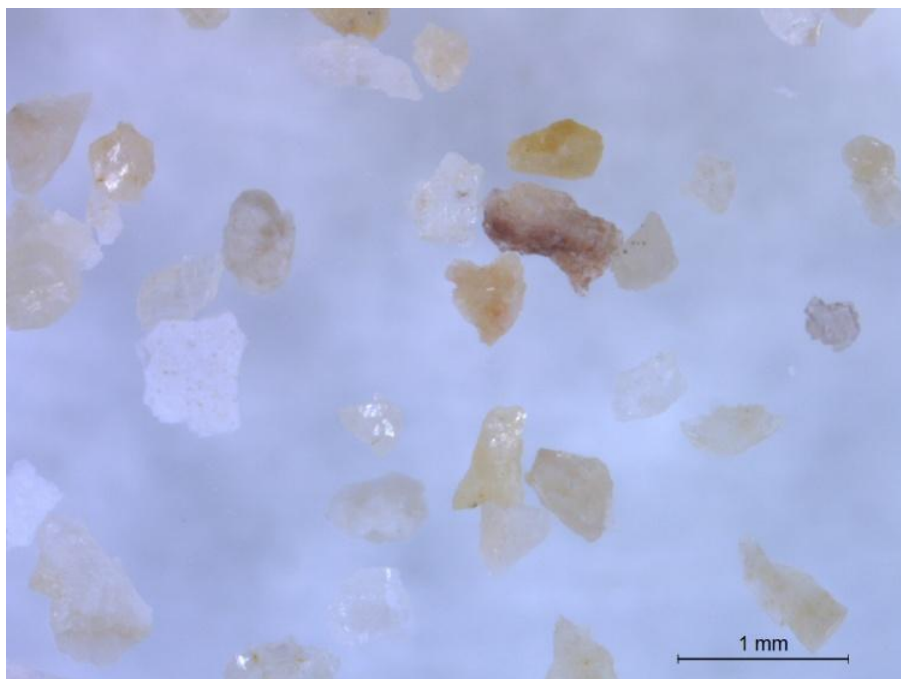


Foto 67. Lõugpurustiga purustatud Sopimetsa II karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,50...0,25 mm

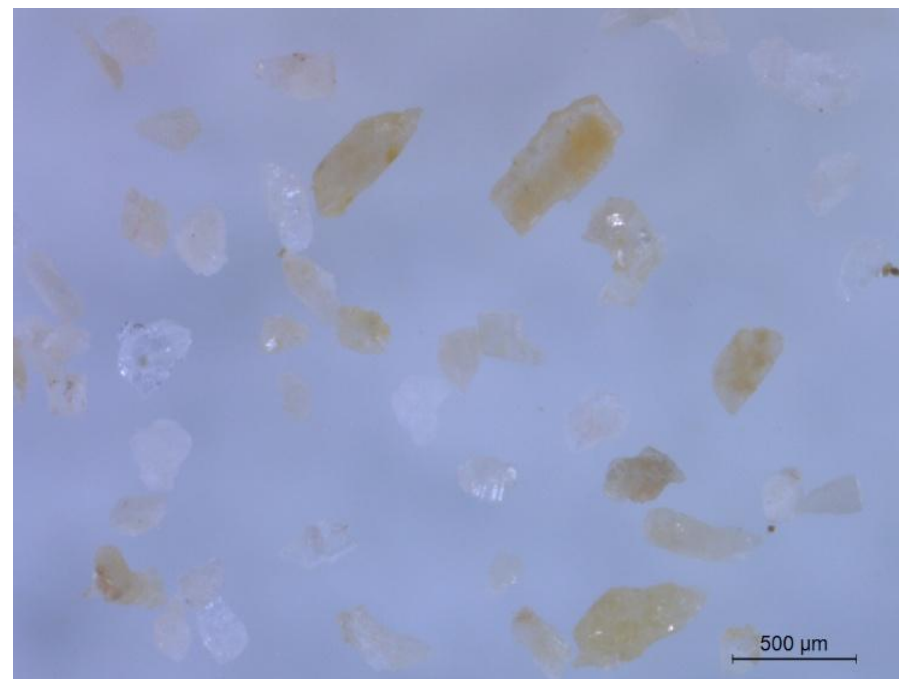


Foto 68. Lõugpurustiga purustatud Sopimetsa II karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,250...0,125 mm

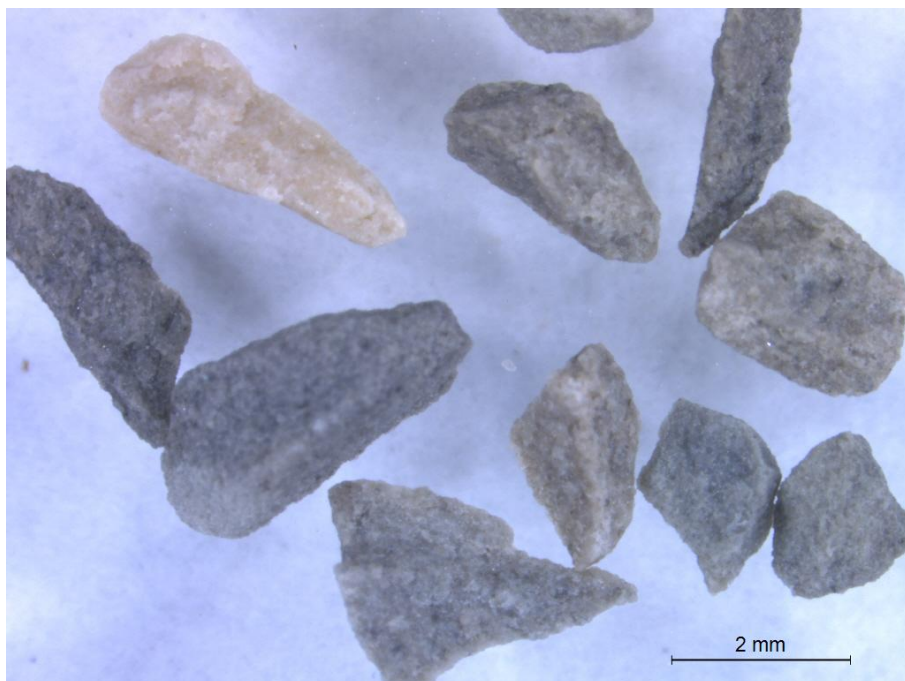


Foto 69. Lõugpurustiga purustatud Anelema karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 2...1 mm

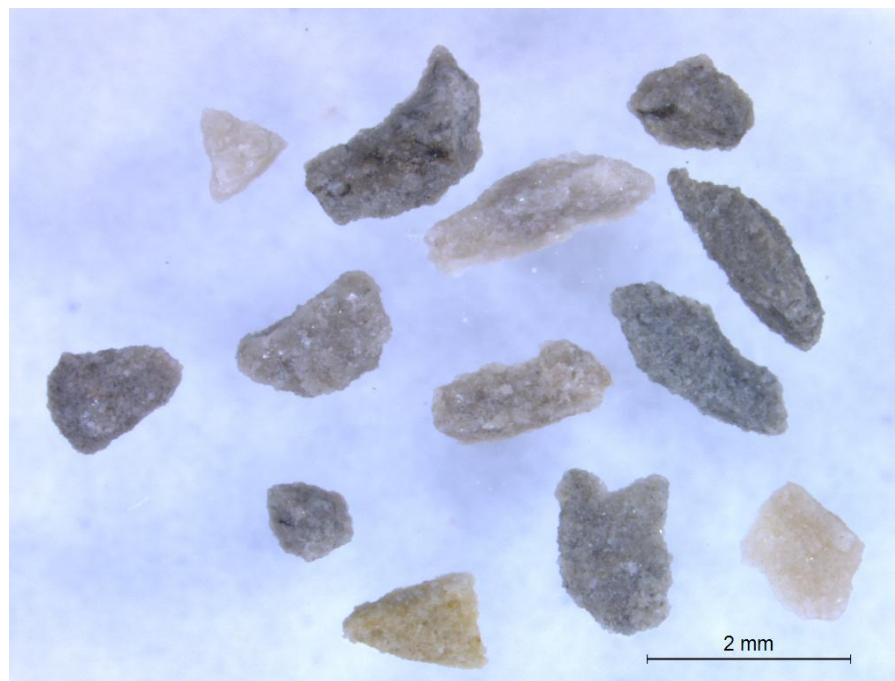


Foto 70. Lõugpurustiga purustatud Anelema karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 1,0...0,5 mm



Foto 71. Lõugpurustiga purustatud Anelema karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,50...0,25 mm

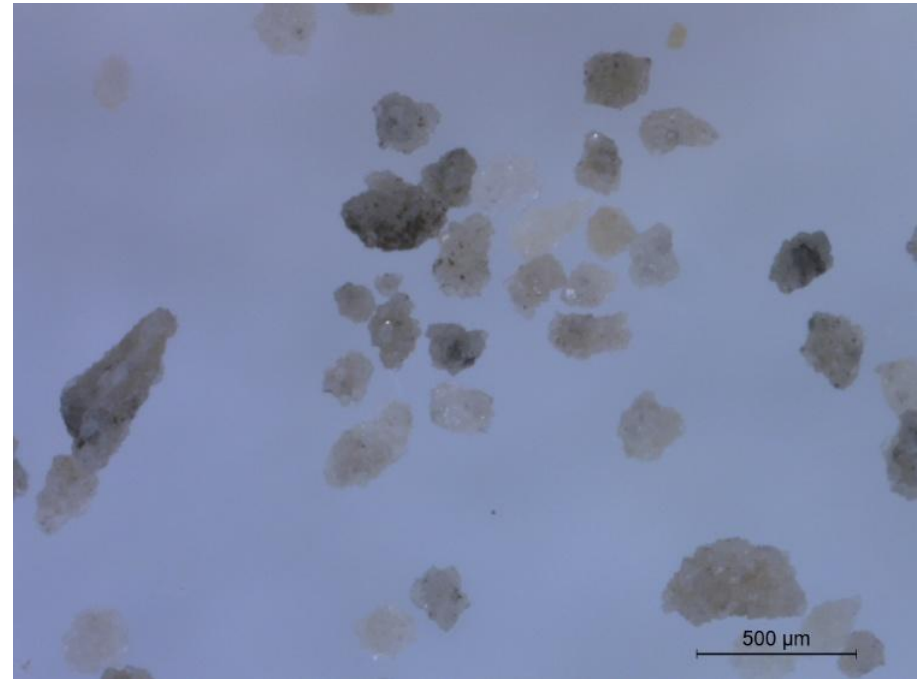


Foto 72. Lõugpurustiga purustatud Anelema karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,250...0,125 mm



Foto 73. Lõugpurustiga purustatud Parainen karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 2...1 mm

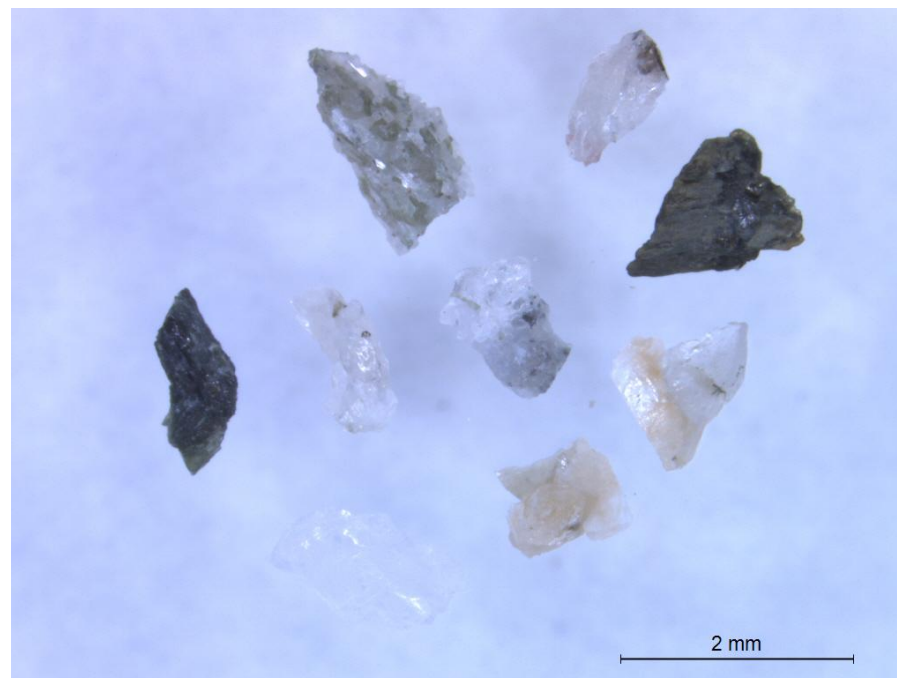


Foto 74. Lõugpurustiga purustatud Parainen karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 1,0...0,5 mm

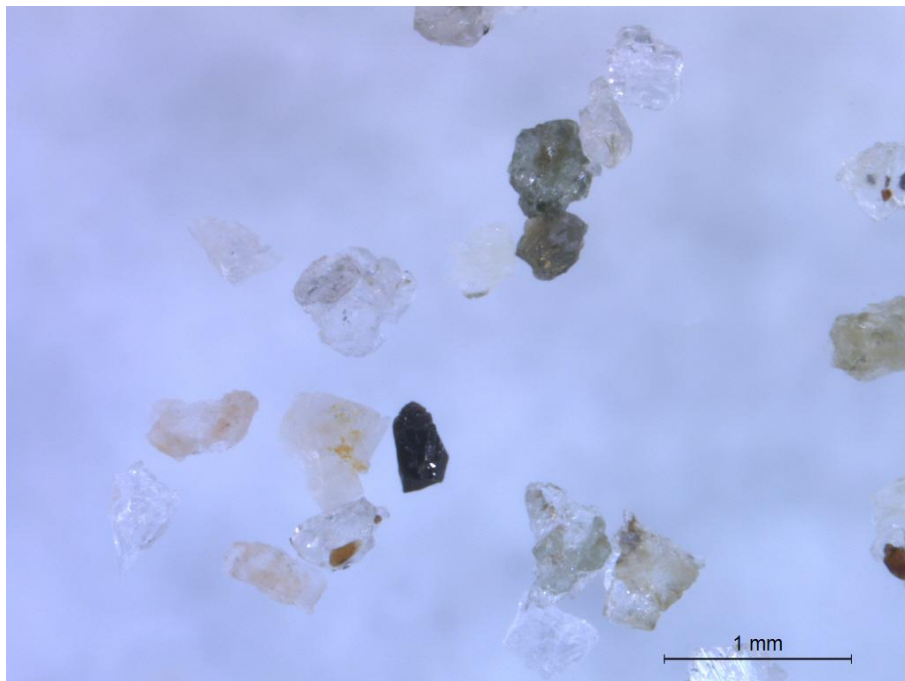


Foto 75. Lõugpurustiga purustatud Parainen karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,50...0,25 mm

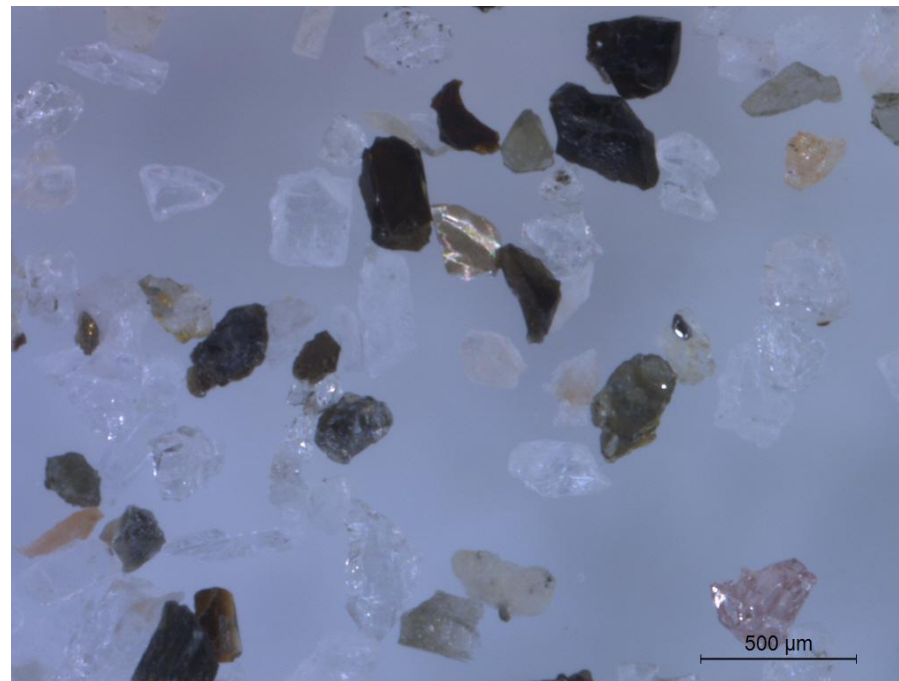


Foto 76. Lõugpurustiga purustatud Parainen karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,250...0,125 mm



Foto 77. Lõugpurustiga purustatud Harku karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 2...1 mm



Foto 78. Lõugpurustiga purustatud Harku karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 1,0...0,5 mm

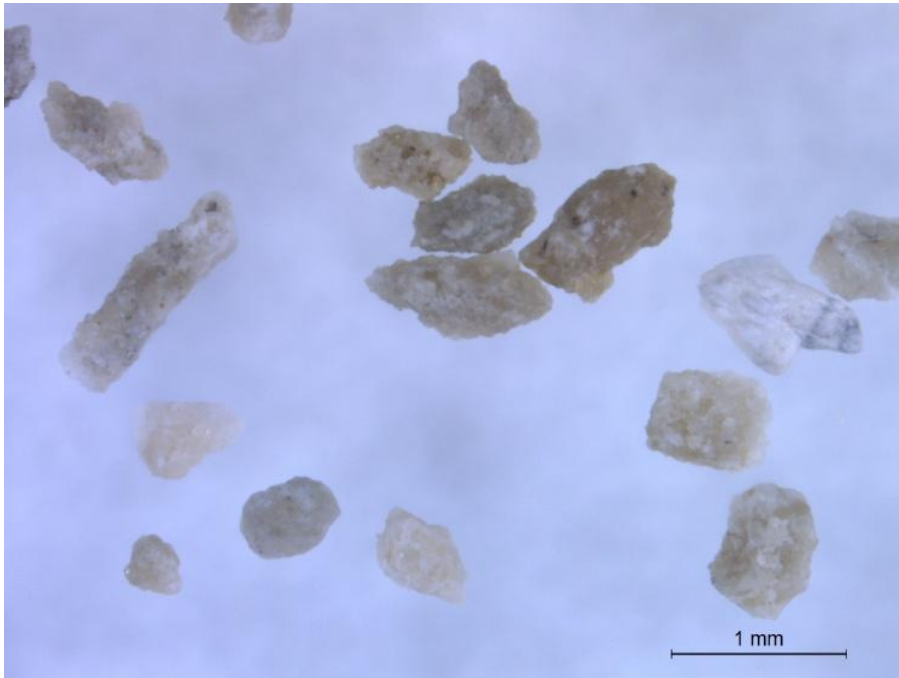


Foto 79. Lõugpurustiga purustatud Harku karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,50...0,25 mm

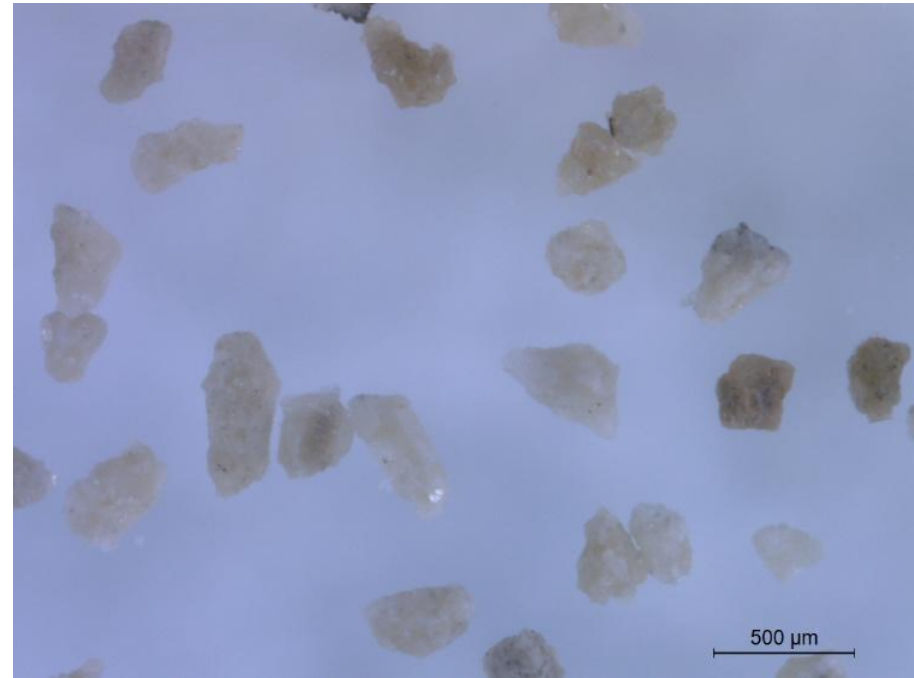


Foto 80. Lõugpurustiga purustatud Harku karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,250...0,125 mm

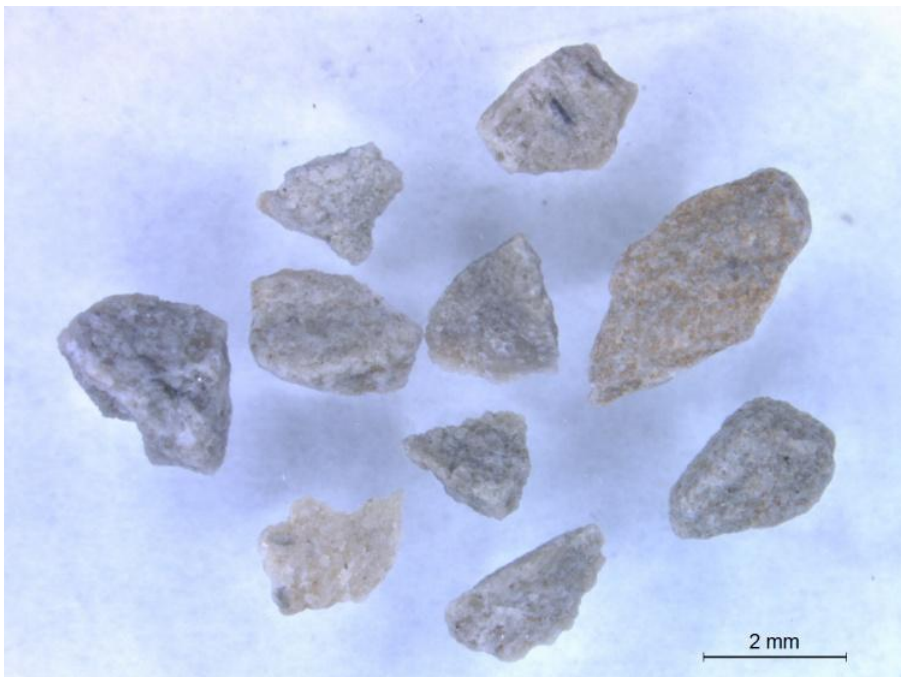


Foto 81. Lõugpurustiga purustatud Lõuna-Aru karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 2...1 mm



Foto 82. Lõugpurustiga purustatud Lõuna-Aru karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 1,0...0,5 mm

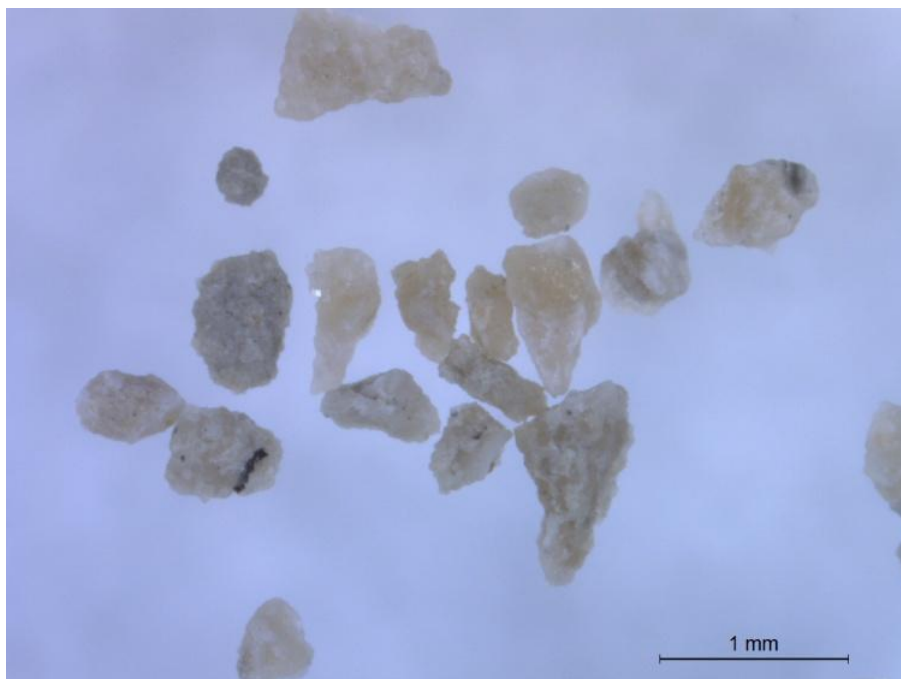


Foto 83. Lõugpurustiga purustatud Lõuna-Aru karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,50...0,25 mm

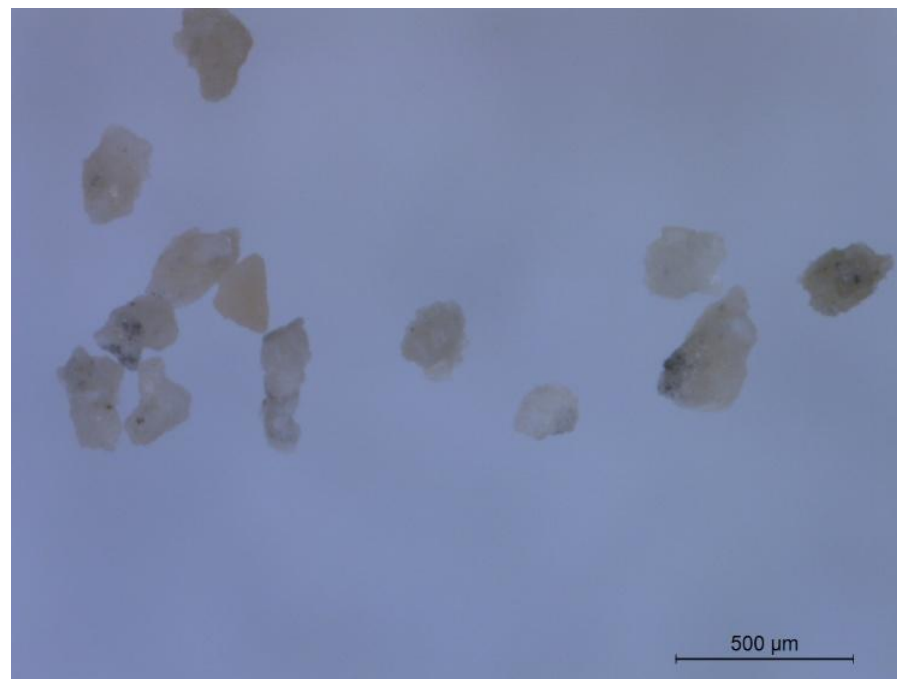


Foto 84. Lõugpurustiga purustatud Lõuna-Aru karjääri jämetäitematerjal, fraktsioon 0,250...0,125 mm

## Lisa 2. Katsekehade mõõtetulemuste kehtivuse kontroll

Tabel 8. Sopimetsa II karjääri jämetäitematerjali pikenemise mõõtetulemused ning nende kehtivuse kontroll katsekehade keskmisel pikenemisel üle 0,10 %

| Mõõdistamise päev | Katsekeha 02.1 pikenemine, % | Katsekeha 02.3 pikenemine, % | Keskmine pikenemine, % | Vähim lubatud väärtus, % | Suurim lubatud väärtus, % |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 3                 | 0,061                        | 0,054                        | 0,057                  | 0,052                    | 0,063                     |
| 6                 | 0,112                        | 0,099                        | 0,106                  | 0,095                    | 0,116                     |
| 9                 | 0,214                        | 0,205                        | 0,209                  | 0,189                    | 0,230                     |
| 12                | 0,268                        | 0,264                        | 0,266                  | 0,239                    | 0,292                     |
| 14                | 0,295                        | 0,296                        | 0,296                  | 0,266                    | 0,325                     |
| 15                | 0,307                        | 0,308                        | 0,308                  | 0,277                    | 0,338                     |
| 18                | 0,342                        | 0,338                        | 0,340                  | 0,306                    | 0,374                     |
| 21                | 0,360                        | 0,355                        | 0,357                  | 0,321                    | 0,393                     |
| 24                | -                            | -                            | -                      | -                        | -                         |
| 27                | 0,372                        | 0,368                        | 0,370                  | 0,333                    | 0,407                     |
| 28                | 0,374                        | 0,371                        | 0,372                  | 0,335                    | 0,410                     |

02.2 katsekeha mõõtmistes esines olulisi kõrvalekaldeid normist, mille tõttu selle mõõtetulemustena ei arvestatud ega kasutatud keskmise pikenemise arvutamisel. 3. ja 6. päeva mõõtmised näitasid negatiivset pikenemist.

Tabel 9. Väo karjääri jämetäitematerjali pikenemise mõõdistuste kehtivuse kontroll katsekehade keskmisel pikenemisel alla 0,10 %

| <b>Mõõdistamise päev</b> | <b>Katsekeha 01.1 pikenemine, %</b> | <b>Katsekeha 01.2 pikenemine, %</b> | <b>Katsekeha 01.3 pikenemine, %</b> | <b>Keskmine pikenemine, %</b> | <b>Vähim lubatud väärtus, %</b> | <b>Suurim lubatud väärtus, %</b> |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 3                        | 0,018                               | 0,013                               | 0,010                               | 0,014                         | 0,004                           | 0,024                            |
| 6                        | 0,017                               | 0,010                               | 0,008                               | 0,012                         | 0,002                           | 0,022                            |
| 9                        | 0,025                               | 0,017                               | 0,018                               | 0,020                         | 0,010                           | 0,030                            |
| 12                       | 0,030                               | 0,024                               | 0,024                               | 0,026                         | 0,016                           | 0,036                            |
| 14                       | 0,034                               | 0,028                               | 0,027                               | 0,030                         | 0,020                           | 0,040                            |
| 15                       | 0,034                               | 0,030                               | 0,027                               | 0,030                         | 0,020                           | 0,040                            |
| 18                       | 0,035                               | 0,030                               | 0,027                               | 0,031                         | 0,021                           | 0,041                            |
| 21                       | 0,038                               | 0,031                               | 0,029                               | 0,033                         | 0,023                           | 0,043                            |
| 24                       | -                                   | -                                   | -                                   | -                             | -                               | -                                |
| 27                       | 0,037                               | 0,031                               | 0,028                               | 0,032                         | 0,022                           | 0,042                            |
| 28                       | 0,038                               | 0,032                               | 0,029                               | 0,033                         | 0,023                           | 0,043                            |

Tabel 10. Anelema karjääri jämetäitematerjali pikenemise mõõdistuste kehtivuse kontroll katsekehade keskmisel pikenemisel alla 0,10 %

| <b>Mõõdistamise päev</b> | <b>Katsekeha 03.1 pikenemine, %</b> | <b>Katsekeha 03.2 pikenemine, %</b> | <b>Katsekeha 03.3 pikenemine, %</b> | <b>Keskmine pikenemine, %</b> | <b>Vähim lubatud väärtus, %</b> | <b>Suurim lubatud väärtus, %</b> |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 3                        | 0,052                               | 0,053                               | 0,050                               | 0,052                         | 0,042                           | 0,062                            |
| 6                        | 0,063                               | 0,062                               | 0,062                               | 0,062                         | 0,052                           | 0,072                            |
| 9                        | 0,060                               | 0,060                               | 0,060                               | 0,060                         | 0,050                           | 0,070                            |
| 12                       | 0,070                               | 0,069                               | 0,070                               | 0,070                         | 0,060                           | 0,080                            |
| 14                       | 0,070                               | 0,070                               | 0,072                               | 0,071                         | 0,061                           | 0,081                            |
| 15                       | 0,075                               | 0,075                               | 0,076                               | 0,075                         | 0,065                           | 0,085                            |
| 18                       | 0,076                               | 0,080                               | 0,081                               | 0,079                         | 0,069                           | 0,089                            |
| 21                       | -                                   | -                                   | -                                   | -                             | -                               | -                                |
| 24                       | 0,080                               | 0,080                               | 0,082                               | 0,080                         | 0,070                           | 0,090                            |
| 27                       | 0,085                               | 0,085                               | 0,085                               | 0,085                         | 0,075                           | 0,095                            |
| 28                       | 0,087                               | 0,086                               | 0,086                               | 0,086                         | 0,076                           | 0,096                            |

Tabel 11. Parainen karjääri jämetäitematerjali pikenemise moodsustuste kehtivuse kontroll katsekehade keskmisel pikenemisel alla 0,10 %

| <b>Moodsustamise päev</b> | <b>Katsekeha 04.1 pikenemine, %</b> | <b>Katsekeha 04.2 pikenemine, %</b> | <b>Keskmine pikenemine, %</b> | <b>Vähim lubatud väärtus, %</b> | <b>Suurim lubatud väärtus, %</b> |
|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 3                         | 0,045                               | 0,045                               | 0,045                         | 0,035                           | 0,055                            |
| 6                         | 0,070                               | 0,068                               | 0,069                         | 0,059                           | 0,079                            |
| 9                         | 0,081                               | 0,078                               | 0,080                         | 0,070                           | 0,090                            |
| 12                        | 0,093                               | 0,090                               | 0,091                         | 0,081                           | 0,101                            |
| 14                        | 0,102                               | 0,097                               | 0,099                         | 0,089                           | 0,109                            |
| 15                        | 0,107                               | 0,098                               | 0,102                         | 0,092                           | 0,112                            |
| 18                        | 0,117                               | 0,111                               | 0,114                         | 0,104                           | 0,124                            |
| 21                        | -                                   | -                                   | -                             | -                               | -                                |
| 24                        | 0,123                               | 0,113                               | 0,118                         | 0,108                           | 0,128                            |
| 27                        | 0,126                               | 0,117                               | 0,121                         | 0,111                           | 0,131                            |
| 28                        | 0,130                               | 0,119                               | 0,124                         | 0,114                           | 0,134                            |

04.3 katsekeha moodsustustes esines olulisi kõrvalekaldeid normist, mille tõttu selle moodsustulemustena ei arvestatud ega kasutatud keskmise pikenemise arvutamisel. 3. päeva moodsustamine näitas keskmisest 3 korda suuremat pikenemist ning 15. päeva moodsustamine näitas keskmisest 1,5 korda väiksemat pikenemist.

Tabel 12. Harku karjääri jämetäitematerjali pikenemise mõõdistuste kehtivuse kontroll katsekehade keskmisel pikenemisel alla 0,10 %

| <b>Mõõdistamise päev</b> | <b>Katsekeha 05.1 pikenemine, %</b> | <b>Katsekeha 05.2 pikenemine, %</b> | <b>Katsekeha 05.3 pikenemine, %</b> | <b>Keskmine pikenemine, %</b> | <b>Vähim lubatud väärtus, %</b> | <b>Suurim lubatud väärtus, %</b> |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 3                        | 0,039                               | 0,042                               | 0,042                               | 0,041                         | 0,031                           | 0,051                            |
| 6                        | 0,042                               | 0,041                               | 0,044                               | 0,042                         | 0,032                           | 0,052                            |
| 9                        | 0,048                               | 0,046                               | 0,052                               | 0,048                         | 0,038                           | 0,058                            |
| 12                       | 0,052                               | 0,050                               | 0,053                               | 0,052                         | 0,042                           | 0,062                            |
| 14                       | 0,056                               | 0,053                               | 0,059                               | 0,056                         | 0,046                           | 0,066                            |
| 15                       | 0,056                               | 0,052                               | 0,059                               | 0,056                         | 0,046                           | 0,066                            |
| 18                       | -                                   | -                                   | -                                   | -                             | -                               | -                                |
| 21                       | 0,054                               | 0,053                               | 0,056                               | 0,054                         | 0,044                           | 0,064                            |
| 24                       | 0,053                               | 0,053                               | 0,057                               | 0,054                         | 0,044                           | 0,064                            |
| 27                       | -                                   | -                                   | -                                   | -                             | -                               | -                                |
| 28                       | 0,050                               | 0,055                               | 0,056                               | 0,054                         | 0,044                           | 0,064                            |

Tabel 13. Lõuna-Aru karjääri jämetäitematerjali pikenemise moodsustuste kehtivuse kontroll katsekehade keskmisel pikenemisel alla 0,10 %

| <b>Moodsustamise päev</b> | <b>Katsekeha 06.1 pikenemine, %</b> | <b>Katsekeha 06.2 pikenemine, %</b> | <b>Katsekeha 06.3 pikenemine, %</b> | <b>Keskmine pikenemine, %</b> | <b>Vähim lubatud väärtus, %</b> | <b>Suurim lubatud väärtus, %</b> |
|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 3                         | 0,044                               | 0,044                               | 0,046                               | 0,045                         | 0,035                           | 0,055                            |
| 6                         | 0,054                               | 0,059                               | 0,059                               | 0,057                         | 0,047                           | 0,067                            |
| 9                         | 0,066                               | 0,071                               | 0,072                               | 0,070                         | 0,060                           | 0,080                            |
| 12                        | 0,076                               | 0,081                               | 0,082                               | 0,080                         | 0,070                           | 0,090                            |
| 14                        | 0,083                               | 0,084                               | 0,087                               | 0,085                         | 0,075                           | 0,095                            |
| 15                        | 0,083                               | 0,087                               | 0,089                               | 0,086                         | 0,076                           | 0,096                            |
| 18                        | -                                   | -                                   | -                                   | -                             | -                               | -                                |
| 21                        | 0,086                               | 0,089                               | 0,091                               | 0,088                         | 0,078                           | 0,098                            |
| 24                        | 0,090                               | 0,090                               | 0,096                               | 0,092                         | 0,082                           | 0,102                            |
| 27                        | -                                   | -                                   | -                                   | -                             | -                               | -                                |
| 28                        | 0,091                               | 0,098                               | 0,095                               | 0,095                         | 0,085                           | 0,105                            |

**Lisa 3. Katsekehade pikenemise mõõdistuste andmed**

Tabel 14. Vão, Sopimetsa II, Anelema, Parainen, Harku ja Lõuna-Aru karjääride katsekehade pikenemise mõõdistuste andmed

| Päev |                     | Vão karjäär |         |         | Sopimetsa II karjäär |         |         | Anelema karjäär |         |         | Parainen karjäär |         |         | Harku karjäär |         |         | Lõuna-Aru karjäär |         |         |
|------|---------------------|-------------|---------|---------|----------------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|------------------|---------|---------|---------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|
|      |                     | 01.1        | 01.2    | 01.3    | 02.1                 | 02.2    | 02.3    | 03.1            | 03.2    | 03.3    | 04.1             | 04.2    | 04.3    | 05.1          | 05.2    | 05.3    | 06.1              | 06.2    | 06.3    |
| -1   | Referents ( $R_m$ ) | 3,872       | 3,872   | 3,872   | 3,873                | 3,873   | 3,873   | 6,268           | 6,268   | 6,268   | 6,260            | 6,260   | 6,260   | 6,261         | 6,261   | 6,261   | 6,261             | 6,261   | 6,261   |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 3,871       | 4,086   | 4,213   | 4,700                | 3,951   | 4,294   | 5,863           | 6,200   | 5,914   | 6,004            | 6,362   | 6,087   | 6,054         | 5,969   | 5,999   | 5,875             | 5,832   | 6,007   |
|      | $L_i$               | 249,999     | 250,214 | 250,341 | 250,827              | 250,078 | 250,421 | 249,595         | 249,932 | 249,646 | 249,744          | 250,102 | 249,827 | 249,793       | 249,708 | 249,738 | 249,614           | 249,571 | 249,746 |
| 0    | Referents ( $R_m$ ) | 6,270       | 6,271   | 6,271   | 6,268                | 6,268   | 6,268   | 6,263           | 6,263   | 6,263   | 6,263            | 6,263   | 6,263   | 6,261         | 6,261   | 6,261   | 6,257             | 6,257   | 6,257   |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,064       | 6,312   | 6,461   | 6,872                | 6,463   | 6,455   | 6,013           | 6,344   | 6,054   | 6,103            | 6,473   | 6,188   | 6,148         | 6,064   | 6,092   | 5,977             | 5,931   | 6,100   |
|      | $L_0$               | 249,794     | 250,041 | 250,190 | 250,604              | 250,195 | 250,187 | 249,750         | 250,081 | 249,791 | 249,840          | 250,210 | 249,925 | 249,887       | 249,803 | 249,831 | 249,720           | 249,674 | 249,843 |
| 3    | Referents ( $R_m$ ) | 6,261       | 6,261   | 6,261   | 6,261                | 6,261   | 6,261   | 6,251           | 6,251   | 6,251   | 6,252            | 6,252   | 6,252   | 6,255         | 6,255   | 6,255   | 6,252             | 6,252   | 6,252   |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,101       | 6,335   | 6,475   | 7,017                | 6,220   | 6,584   | 6,132           | 6,465   | 6,166   | 6,205            | 6,575   | 6,293   | 6,239         | 6,163   | 6,190   | 6,082             | 6,037   | 6,210   |
|      | $L_3$               | 249,840     | 250,074 | 250,214 | 250,756              | 249,959 | 250,323 | 249,881         | 250,214 | 249,915 | 249,953          | 250,323 | 250,041 | 249,984       | 249,908 | 249,935 | 249,830           | 249,785 | 249,958 |
|      | Pikenemine, %       | 0,018       | 0,013   | 0,010   | 0,061                | -0,094  | 0,054   | 0,052           | 0,053   | 0,050   | 0,045            | 0,045   | 0,046   | 0,039         | 0,042   | 0,042   | 0,044             | 0,044   | 0,046   |
| 6    | Referents ( $R_m$ ) | 6,253       | 6,253   | 6,253   | 6,252                | 6,252   | 6,252   | 6,257           | 6,257   | 6,257   | 6,257            | 6,257   | 6,257   | 6,252         | 6,252   | 6,252   | 6,250             | 6,250   | 6,250   |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,090       | 6,319   | 6,463   | 7,138                | 6,334   | 6,686   | 6,163           | 6,494   | 6,202   | 6,273            | 6,637   | 6,570   | 6,243         | 6,158   | 6,194   | 6,106             | 6,070   | 6,241   |
|      | $L_6$               | 249,837     | 250,066 | 250,210 | 250,886              | 250,082 | 250,434 | 249,906         | 250,237 | 249,945 | 250,016          | 250,380 | 250,313 | 249,991       | 249,906 | 249,942 | 249,856           | 249,820 | 249,991 |
|      | Pikenemine, %       | 0,017       | 0,010   | 0,008   | 0,112                | -0,045  | 0,099   | 0,063           | 0,062   | 0,062   | 0,070            | 0,068   | 0,155   | 0,042         | 0,041   | 0,044   | 0,054             | 0,059   | 0,059   |
| 9    | Referents ( $R_m$ ) | 6,257       | 6,257   | 6,257   | 6,257                | 6,257   | 6,257   | 6,253           | 6,253   | 6,253   | 6,251            | 6,251   | 6,251   | 6,249         | 6,249   | 6,249   | 6,247             | 6,247   | 6,247   |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,114       | 6,341   | 6,493   | 7,398                | 6,608   | 6,957   | 6,154           | 6,485   | 6,195   | 6,294            | 6,656   | 6,386   | 6,255         | 6,167   | 6,209   | 6,132             | 6,098   | 6,269   |
|      | $L_9$               | 249,857     | 250,084 | 250,236 | 251,141              | 250,351 | 250,700 | 249,901         | 250,232 | 249,942 | 250,043          | 250,405 | 250,135 | 250,006       | 249,918 | 249,960 | 249,885           | 249,851 | 250,022 |
|      | Pikenemine, %       | 0,025       | 0,017   | 0,018   | 0,214                | 0,062   | 0,205   | 0,060           | 0,060   | 0,060   | 0,081            | 0,078   | 0,084   | 0,048         | 0,046   | 0,052   | 0,066             | 0,071   | 0,072   |
| 12   | Referents ( $R_m$ ) | 6,254       | 6,254   | 6,254   | 6,254                | 6,254   | 6,254   | 6,249           | 6,249   | 6,249   | 6,248            | 6,248   | 6,249   | 6,256         | 6,256   | 6,256   | 6,256             | 6,256   | 6,256   |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,122       | 6,354   | 6,503   | 7,529                | 6,765   | 7,102   | 6,173           | 6,503   | 6,215   | 6,320            | 6,682   | 6,402   | 6,272         | 6,183   | 6,220   | 6,166             | 6,132   | 6,303   |
|      | $L_{12}$            | 249,868     | 250,100 | 250,249 | 251,275              | 250,511 | 250,848 | 249,924         | 250,254 | 249,966 | 250,072          | 250,434 | 250,153 | 250,016       | 249,927 | 249,964 | 249,910           | 249,876 | 250,047 |
|      | Pikenemine, %       | 0,030       | 0,024   | 0,024   | 0,268                | 0,126   | 0,264   | 0,070           | 0,069   | 0,070   | 0,093            | 0,090   | 0,091   | 0,052         | 0,050   | 0,053   | 0,076             | 0,081   | 0,082   |
| 14   | Referents ( $R_m$ ) | 6,251       | 6,251   | 6,251   | 6,252                | 6,252   | 6,252   | 6,256           | 6,256   | 6,256   | 6,259            | 6,259   | 6,259   | 6,253         | 6,253   | 6,253   | 6,252             | 6,252   | 6,252   |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,129       | 6,363   | 6,509   | 7,597                | 6,827   | 7,180   | 6,181           | 6,512   | 6,227   | 6,353            | 6,712   | 6,439   | 6,280         | 6,189   | 6,232   | 6,178             | 6,135   | 6,313   |
|      | $L_{14}$            | 249,878     | 250,112 | 250,258 | 251,345              | 250,575 | 250,928 | 249,925         | 250,256 | 249,971 | 250,094          | 250,453 | 250,180 | 250,027       | 249,936 | 249,979 | 249,926           | 249,883 | 250,061 |
|      | Pikenemine, %       | 0,034       | 0,028   | 0,027   | 0,295                | 0,152   | 0,296   | 0,070           | 0,070   | 0,072   | 0,102            | 0,097   | 0,102   | 0,056         | 0,053   | 0,059   | 0,083             | 0,084   | 0,087   |
| 15   | Referents ( $R_m$ ) | 6,247       | 6,247   | 6,247   | 6,249                | 6,249   | 6,249   | 6,257           | 6,257   | 6,257   | 6,256            | 6,256   | 6,256   | 6,249         | 6,249   | 6,249   | 6,249             | 6,249   | 6,249   |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,125       | 6,362   | 6,505   | 7,624                | 6,858   | 7,207   | 6,194           | 6,526   | 6,237   | 6,362            | 6,712   | 6,344   | 6,275         | 6,183   | 6,227   | 6,177             | 6,140   | 6,314   |
|      | $L_{15}$            | 249,878     | 250,115 | 250,258 | 251,375              | 250,609 | 250,958 | 249,937         | 250,269 | 249,980 | 250,106          | 250,456 | 250,088 | 250,026       | 249,934 | 249,978 | 249,928           | 249,891 | 250,065 |
|      | Pikenemine, %       | 0,034       | 0,030   | 0,027   | 0,307                | 0,166   | 0,308   | 0,075           | 0,075   | 0,076   | 0,107            | 0,098   | 0,065   | 0,056         | 0,052   | 0,059   | 0,083             | 0,087   | 0,089   |
| 18   | Referents ( $R_m$ ) | 6,255       | 6,255   | 6,255   | 6,256                | 6,256   | 6,256   | 6,250           | 6,250   | 6,250   | 6,250            | 6,250   | 6,250   | -             | -       | -       | -                 | -       | -       |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,136       | 6,370   | 6,513   | 7,719                | 6,939   | 7,290   | 6,190           | 6,531   | 6,243   | 6,381            | 6,737   | 6,459   | -             | -       | -       | -                 | -       | -       |
|      | $L_{18}$            | 249,881     | 250,115 | 250,258 | 251,463              | 250,683 | 251,034 | 249,940         | 250,281 | 249,993 | 250,131          | 250,487 | 250,209 | 250,000       | 250,000 | 250,000 | 250,000           | 250,000 | 250,000 |
|      | Pikenemine, %       | 0,035       | 0,030   | 0,027   | 0,342                | 0,195   | 0,338   | 0,076           | 0,080   | 0,081   | 0,117            | 0,111   | 0,114   | 0,045         | 0,079   | 0,068   | 0,112             | 0,131   | 0,063   |
| 21   | Referents ( $R_m$ ) | 6,251       | 6,251   | 6,251   | 6,250                | 6,250   | 6,250   | -               | -       | -       | -                | -       | -       | 6,255         | 6,255   | 6,255   | 6,257             | 6,257   | 6,257   |
|      | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,139       | 6,370   | 6,514   | 7,756                | 6,979   | 7,325   | -               | -       | -       | -                | -       | -       | 6,277         | 6,190   | 6,227   | 6,191             | 6,152   | 6,327   |
|      | $L_{21}$            | 249,888     | 250,119 | 250,263 | 251,506              | 250,729 | 251,075 | 250,000         | 250,000 | 250,000 | 250,000          | 250,000 | 250,000 | 250,022       | 249,935 | 249,972 | 249,934           | 249,895 | 250,070 |
|      | Pikenemine, %       | 0,038       | 0,031   | 0,029   | 0,360                | 0,214   | 0,355   | 0,100           | -0,032  | 0,084   | 0,064            | -0,084  | 0,030   | 0,054         | 0,053   | 0,056   | 0,086             | 0,089   | 0,091   |

|    |                     |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 24 | Referents ( $R_m$ ) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | 6,253   | 6,253   | 6,253   | 6,255   | 6,255   | 6,255   | 6,260   | 6,260   | 6,260   | 6,261   | 6,261   | 6,261   |
|    | Mõõt ( $K_m$ )      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | 6,203   | 6,533   | 6,248   | 6,402   | 6,748   | 6,473   | 6,280   | 6,195   | 6,233   | 6,205   | 6,159   | 6,344   |
|    | $L_{24}$            | 250,000 | 250,000 | 250,000 | 250,000 | 250,000 | 250,000 | 249,950 | 250,280 | 249,995 | 250,147 | 250,493 | 250,218 | 250,020 | 249,935 | 249,973 | 249,944 | 249,898 | 250,083 |
|    | Pikenemine, %       | 0,082   | -0,016  | -0,076  | -0,241  | -0,078  | -0,075  | 0,080   | 0,080   | 0,082   | 0,123   | 0,113   | 0,117   | 0,053   | 0,053   | 0,057   | 0,090   | 0,090   | 0,096   |
| 27 | Referents ( $R_m$ ) | 6,252   | 6,252   | 6,252   | 6,257   | 6,257   | 6,257   | 6,259   | 6,259   | 6,259   | 6,261   | 6,261   | 6,261   | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|    | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,138   | 6,370   | 6,513   | 7,795   | 7,017   | 7,366   | 6,221   | 6,552   | 6,262   | 6,415   | 6,764   | 6,487   | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|    | $L_{27}$            | 249,886 | 250,118 | 250,261 | 251,538 | 250,760 | 251,109 | 249,962 | 250,293 | 250,003 | 250,154 | 250,503 | 250,226 | 250,000 | 250,000 | 250,000 | 250,000 | 250,000 | 250,000 |
|    | Pikenemine, %       | 0,037   | 0,031   | 0,028   | 0,372   | 0,226   | 0,368   | 0,085   | 0,085   | 0,085   | 0,126   | 0,117   | 0,120   | 0,045   | 0,079   | 0,068   | 0,112   | 0,131   | 0,063   |
| 28 | Referents ( $R_m$ ) | 6,260   | 6,260   | 6,260   | 6,260   | 6,260   | 6,260   | 6,262   | 6,262   | 6,262   | 6,264   | 6,264   | 6,264   | 6,260   | 6,260   | 6,260   | 6,263   | 6,263   | 6,263   |
|    | Mõõt ( $K_m$ )      | 6,149   | 6,381   | 6,522   | 7,803   | 7,024   | 7,375   | 6,230   | 6,558   | 6,268   | 6,429   | 6,771   | 6,500   | 6,271   | 6,201   | 6,232   | 6,211   | 6,181   | 6,344   |
|    | $L_{28}$            | 249,889 | 250,121 | 250,262 | 251,543 | 250,764 | 251,115 | 249,968 | 250,296 | 250,006 | 250,165 | 250,507 | 250,236 | 250,011 | 249,941 | 249,972 | 249,948 | 249,918 | 250,081 |
|    | Pikenemine, %       | 0,038   | 0,032   | 0,029   | 0,374   | 0,228   | 0,371   | 0,087   | 0,086   | 0,086   | 0,130   | 0,119   | 0,124   | 0,050   | 0,055   | 0,056   | 0,091   | 0,098   | 0,095   |