

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Tehnoloogiainstituut

Kaarel Siimut

ARMEERIVAD LISANDID AUTOKLAAVITUD POORBETONIS

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Juhendaja: vanemteadur Tarmo Tamm, PhD

Tartu 2019

Infoleht / Abstract

Armeerivad lisandid autoklaavitud poorbetoonis

Töös uuriti nelja erineva armeeriva lisandi - basaltfiibrite, kivivilla, aramiidfiibrite ja metüülselluloosi - mõju autoklaavitud poorbetooni struktuurile ja survetugevusele, eesmärgiga leida seosed survetugevuse, struktuuri ja valmistusprotsessi vahel. Uuritud materjaliproovide sihttihedused olid 230 kg/m^3 ning 320 kg/m^3 .

Töötati välja meetodika survetestiks sobilike katsekehade valmistamiseks ja sooritati survetestid. Proovide mikrostruktuuri uuriti skaneeriva elektronmikroskoobiga ning struktuurielementide koostist energiadiispersiivse röntgenspektroskoopia meetodiga.

Tulemused näitasid, et metüülselluloos ning basaltfiibrid tõstavad materjali survetugevust kuivtiheduse 230 kg/m^3 juures vastavalt 34% ja 23% võrra. Kivivill tekitab minimaalse armeeriva efekti ning aramiidfiibrite sobivust armeeringuna tuleks edasi uurida.

Märksõnad: autoklaavitud poorbetoon (AAC), survetugevus, basaltfiiber, aramiidfiiber, kivivill, metüülselluloos, skaneeriv elektronmikroskoopia (SEM)

CERCS kood: T150 – Materjalitehnoloogia; T152 - Komposiitmaterjalid

Reinforcing Additives in Autoclaved Aerated Concrete

In the thesis, four different reinforcing additives (basalt fiber, rock wool, aramid fiber and methylcellulose) and their effect on the structure and the compressive strength of autoclaved aerated concrete were studied. The aim was to find the connections between the fabrication process, structure and compressive strength of the material. The target density of the samples was 230 and 320 kg/m^3 .

In order to characterize the material, the methodology of preparing the samples suitable for compressive strength measurement was developed and the compressive strength was measured. The microstructure of the samples was studied using scanning electronmicroscopy and the composition of structural elements was studied with energy-dispersive X-ray spectroscopy.

The results revealed that methylcellulose and basalt fibers improved the compressive strength of the samples with dry density of 230 kg/m^3 by 34% and 23%, respectively. Rock wool provides a marginal reinforcing effect. The effect of aramid fibers should be studied further.

Keywords: autoclaved aerated concrete (AAC), compressive strength, basalt fiber, aramid fiber, rock wool, methylcellulose, scanning electronmicroscopy (SEM)

CERCS code: T150 – Material technology; T152 – Composite materials

Sisukord

Kasutatud lühendid, väljendid ja tähistused	5
Sissejuhatus	6
1. Kirjanduse ülevaade	7
1.1. Autoklaavitud poorbetoon	7
1.2. AAC valmistamine	7
1.3. AAC areng ja tänapäev	8
1.4. Betooni tugevus	9
1.5. AAC tiheduse ja survetugevuse seos	10
1.6. Autoklaavitud poorbetooni struktuur	12
1.7. Autoklaavimine	14
1.8. Armeerivate lisandite kasutamine AAC-s	15
1.9. Töös kasutatud armeerivad lisandid	16
1.10. Töö eesmärk	18
2. Eksperimentaalne osa	19
2.1. AAC toorikute laboratoorne valmistamine	19
2.2. AAC survetugevuse määramine	19
2.2.1. Katsekehade valmistamiseks vajalikud seadmed	19
2.2.2. Katsekehade valmistamine	21
2.2.3. Survetestide teostamine	21
2.2.4. Survetugevuse mõõtmise metoodika valideerimine	22
2.3. Proovide mikrostruktuuri uurimine	22
2.3.1. SEM proovide valmistamine	22
2.3.2. Uuringud skaneeriva elektronmikroskoobiga ning EDX analüüs	23
3. Tulemused	24
3.1. Survetugevuse mõõtmise metoodika väljatöötamine	24

3.2. Armeerimata autoklaavitud poorbetoon	24
3.3. Basaltfiibritega armeeritud AAC.....	27
3.4. Kivivillaga armeeritud AAC	30
3.5. Aramiidfiibritega armeeritud AAC	32
3.6. Metüülselluloosiga armeeritud AAC.....	34
3.7. Armeerivate lisandite mõju AAC omadustele.....	38
Kokkuvõte	40
Kasutatud kirjandus.....	41
LISA 1. Fotod.....	45
LISA 2. Skaneeriva elektronmikroskoobi mikrograafid	48
LISA 3. Lisandite mõju katsekehade survetugevusele.....	53
LISA 4. EDX tulemused	54

Kasutatud lühendid, väljendid ja tähistused

AAC – autoklaavitud poorbetoon (ingl *autoclaved aerated concrete*)

SEM – skaneeriv elektronmikroskoop, skaneeriv elektronmikroskoopia

EDX – energiadiispersiivne röntgenspektroskoopia (ingl *energy-dispersive X-ray spectroscopy*)

SDD detektor – räni-triiv detektor (ingl *silicon-drift detector*)

Raskebetoon – tiheda, mittepoorse struktuuriga betoon

Sihttihedus – materjali projekteeritud kuivtihedus. Tähis ρ_{siht} .

Toorik – laboris valmistatud autoklaavitud poorbetoon pärast autoklaavimist

Katsekeha – survetugevuse mõõtmiseks sobiliku kujuga objekt

Proov – skaneeriva elektronmikroskoobiga uurimiseks sobilik objekt

C-S-H – kaltsiumsilikaathüdraat

C/S – CaO ja SiO₂ moolsuhe materjalis

σ – survetugevus [Pa]

A_s – survetugevuse koefitsient, mehaaniline efektiivsus [$\text{Pa} \cdot \text{m}^6/\text{kg}^2$]

Sissejuhatus

Autoklaavitud poorbetoon on levinud ehitusmaterjal, mille areng viimase sajandi vältel on olnud märkimisväärne. Tänapäeval laialdaselt kasutatava betoonmaterjali kuivtihedus on enamasti suurusjärgus $400\ldots 600 \text{ kg/m}^3$, aga valmistatakse ka 300 kg/m^3 kuivtihedusega autoklaavitud poorbetooni, millest ehitatud kuni kolmekorruselised hooned on maailmas standardiks saamas.

2010. aastal välja antud Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv kehtestab, et 2020. aasta 31. detsembrist alates peavad kõik uued hooned olema liginullenergia hooned [1]. Seetõttu suureneb üha enam nõudlus ehitusmaterjalide järele, mis on samaaegselt madala soojusjuhtivusega ja piisavalt tugevad kandekonstruksioonide ehitamiseks. Autoklaavitud poorbetooni korral on tegemist keskkonnasäästliku ja energiaefektiivse materjaliga, mille tootmiseks saab osaliselt kasutada ka tootmisjääke.

Käesolev töö on valminud osana AS Bauroc ning Tartu Ülikooli vahelisest arendusprojektist, mille eesmärgiks oli vähendada ettevõtte pakutavate AAC toodete tihedust, andmata järele materjali survetugevuses. Seeläbi paraneb materjali soojapidavus, kuna autoklaavitud poorbetooni mehaanilised ja soojuslikud omadused sõltuvad põhiliselt kuivtihedusest. Lisaks sellele tähendab väiksem tihedus väiksema koguse lähteainete kasutamist tootmisprotsessis, mis tingib väiksema koguse tootmisjääke ning väiksema energiakulu toote valmistamisel.

Tartu Ülikoolis on 2017. aastal valminud sama arendusprojekti algfaasist bakalaureusetöö, mis kirjeldab lisanditeta autoklaavitud poorbetooni survetugevuse ja struktuuri omavahelisi seoseid [2]. Lisaks on Tallinna Tehnikaülikoolis uuritud Eesti kliima mõju autoklaavitud poorbetooni mahumuutusele ja tugevusnäitajatele ning karakteriseeritud Eestis kasutatavate autoklaavitud poorbetoonmaterjalide soojuslikke ja niiskuslikke omadusi [3, 4].

Käesolevas töös uuriti armeerivate lisandite mõju autoklaavitud poorbetooni omadustele, leidmaks seosed materjali tugevusnäitajate, mikrostruktuuri ja valmistusprotsessi vahel. Armeerivate lisanditena kasutati basaltfiibreid, kivivilla, aramiidfiibreid ja metüültselluloosi. Mõõdeti laboratoorselt valmistatud AACst tehtud katsekehade survetugevus ning uuriti skaneeriva elektronmikroskoobiga proovide mikrostruktuuri. Lõpuks seostati materjali mikrostruktuurist leitud iseloomulike struktuurielementide omadused tugevusnäitajatega ning tehti järeldused lisandite mõju ja sobivuse kohta autoklaavitud poorbetooni armeerimiseks.

1. Kirjanduse ülevaade

1.1. Autoklaavitud poorbetoon

Autoklaavitud poorbetoon on perspektiivikas ehitusmaterjal, mille tootmise põhimõtted arendati välja juba 1920.-ndatel aastatel Rootsis. Selle valmistamiseks kasutatakse vett, peeneksjahvatatud kvartslüüa, tsementi, lupja, kipsi, alumiiniumpulbrit ning pindaktiivseid aineid. Perspektiivikaks muudavad selle lisaks keskkonnasäästlikkusele ja taaskasutatavusele ka hea tulekindlus, madal soojusjuhtivustegur ning suhteliselt väike tihedus, mis tingib väikese energiakulu transpordil. Sõltuvalt tihedusest moodustavad poorid materjali mahust umbes 70-90%. [5–7]

Eestis on AAC suurimaks tootjaks Bauroc AS, mis müüb autoklaavitud poorbetoonist tooteid kaubamärkide „bauroc“ ja „ROCLITE“ all [8]. Ettevõtte kodulehel on tabavalt iseloomustatud AAC parimaid omadusi: *„Lühidalt võibki öelda, et bauroc on puidu parimate omadustega kivi, mis erinevalt puidust ei põle, ei mädane ega karda niiskust.“* [9]

AAC keskkonnasäästlikkus tuleneb peamiselt asjaolust, et selle valmistamisprotsessis saab kasutada tootmisjääke, mis sisaldavad piisavalt vaba SiO_2 , CaO või sobivas vahekorras mõlemat [10, lk 9]. Uuritud on ka AAC tööstusjääkide kasutamist raskebetooni täiteainena, mis tagas betooni sisekihtide küllastatuse veega efektiivsemaks hüdraatumiseks ning vähendas ühtlasi ka materjali keskmist tihedust [11]. Seega on autoklaavitud poorbetoon energiaefektiivne ehitusmaterjal, mille järjest mahukam kasutamine aitab kaudselt kaasa kliimasoojenemise pidurdamisele.

1.2. AAC valmistamine

AS Bauroc on huvitavalt võrrelnud oma toodete valmistamist leiva küpsetamisega:

„Põhimaterjalide ja vee segusse („tainas“) lisatakse reaktsioonitekitajana alumiiniumpulbrit („pärm“), mille tulemusel segu kerkimise ja tardumisega samaaegselt moodustub vesinikugaaside eraldumise käigus materjali suletud pooridega struktuur. Pärast tardumist („taigna kerkimist“) lõigatakse umbes plastiliini tugevuse saavutanud segumassiiv lõikemasinal traatidega õigete mõõtudega toodeteks („leivapätsideks“). Lõpliku tugevuse saavutavad bauroc tooted autoklaavides („leivaahjus“) nende termilisel töötlemisel auruga kõrge temperatuuri ja rõhu režiimil.“

Autoklaavimisprotsessi käigus tekib lähteainetest uus homogeenne mineraal – tobermoriit, mis koos poorse struktuuriga annabki materjalile üheaegselt tema tugevuse ning kerguse. Pärast autoklaavimist pakitakse bauroc tooted puitlustele ja kaetakse kilega.“ [9]

Teisisõnu valmistatakse esmalt liivast, veest ja kipsist liivaslamm (ingl *sand slurry*) ning tootmisjääkidest ja veest jäägislamm (ingl *cutting slurry / return slurry*). Liiva- ja jäägislamm segatakse kokku ning lisatakse veel vett. Seejärel lisatakse tsement ja lubi ning segatakse intensiivselt. Viimaks lisatakse segusse alumiiniumpulbri, sulfanooli ja vee suspensioon, segu segatakse ning valatakse vormi. Segumassiiv asetatakse koos vormiga 40 °C...44 °C kambrisse, kus on suhteline õhuniiskus 70%. Pärast segu eelkivistumist kirjeldatud tingimustel 10...14 tunni vältel eemaldatakse vorm ning materjal lõigatakse traatidega soovitavasse mõõtu. Järgneb veel üks eelkivistumine 70% suhtelise õhuniiskuse ja 52 °C juures ligikaudu kahe tunni vältel. Lõpuks autoklaavitakse saadud segu 9...10 tunni vältel 100% veeauru atmosfääris rõhul 11...12 bar, temperatuuril 200 °C. Pärast jahtumist on toode kasutamiseks valmis. [7]

1.3. AAC areng ja tänapäev

Esimesed avastused autoklaavitud poorbetooni valmistamiseks tehti juba 19. sajandi lõpus. Näiteks patenteeriti Tšehhis süsihappegaasi abil betooni aereerimine ning veidi hiljem õpiti sama tegema Ameerika Ühendriikides kaltsiumhüdroksiidi ning alumiiniumpulbriga [12]. Autoklaavi leiutas britt Charles Chamberlain 1879. aastal esemete steriliseerimiseks. [13, lk 49–50]. Idee kõvendada materjale kuuma auru abil patenteeriti 1880. aastal Saksamaal ning 1923. aastal patenteeris rootslane Axel Eriksson meetodid lubjakivi ja jahvatatud kiltkivi, mis koosneb peamiselt kvartsist, aereerimiseks [12, 14]. Kui ta avastas, et selline õhuline mass kannatab autoklaavimist, olid kõik eeldused autoklaavitud poorbetooni tootmiseks loodud ning juba 1929. aastal avati Rootsis nime Yhxult all esimene tehas [12, lk 2].

Lisaks Yxhultile, mis sai 1940. aastal nimeks Ytong, tekkisid enne teist maailmasõda turule ka Rootsis loodud ettevõtted Durox ja Siporex. Pärast teist maailmasõda loodi ka Hebel, mis sarnaselt Duroxiga keskendus terasega armeeritud poorbetootodete tootmisele. Ytongi tootevalik koosnes põhiliselt tugevdamata AAC plokkidest. Sajandivahetuse paiku kadus Siporex turult ning Ytong, Durox ja Hebel ühinesid, võttes nimeks Xella, mis on tänapäeval

üks tuntumaid ja suuremaid AAC tootmisega tegelevaid kontserne Euroopas. 21. sajandil on kasvanud ka Hiina ja mõningate teiste Aasia riikide osakaal autoklaavitud poorbetooni turul.

2014. aasta seisuga on maailmas umbes 3000 AAC tootmisega tegelevat tehast, mille armeerimata müürikivide kogutoodang on umbes 450 miljonit kuupmeetrit aastas [12, lk 3–4]. Tuntuimad brändid on lisaks Xellale ka Porenbeton Saksamaal, Aercon AAC USAs ja Aircrete Suurbritannias, millest on saanud inglise keeleruumis sünonüüm autoklaavitud poorbetoonile.

AAC tootmistehnoloogia on pidevalt arenenud ning tänapäeval toodetakse juba väga väikese kuivtihedusega tugevaid müürikive. Turul on laialdaselt müürikive kuivtihedusega 300 kg/m^3 ning soojusjuhtivusteguriga alla $0,08 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, mis sobivad kuni kolmekorruseliste kortermajade kandvate seinte ehitamiseks ($\sigma \geq 1,8 \text{ MPa}$) [15]. Xella toodab brändi Multipor nime all autoklaavitud poorbetoonist soojustusmaterjali, mille kuivtihedus on veelgi madalam, kuni 100 kg/m^3 , ning soojusjuhtivustegur alla $0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [16]. Madala survetugevuse tõttu ($\geq 300 \text{ kPa}$) tõttu ei sobi see materjal aga kandvate seinte ehitamiseks.

Plokkide lõikamiseks kasutatakse kahe traadiga kiirlõikurit. Seadme esimene traat lõikab saagimisliigutust imiteerides pehmet betooni ning järgnev traat sulgeb sarnase liigutusega poorid, jättes toote pinna piisavalt siledaks, et seda kas kohe värvida või sellele tapeet paigaldada. [17]

Eelnevast lähtudes oleks järgmine loogiline samm arendada välja selline AAC, mille tihedus on toodud väärtuste vahel, et vähendada soojusjuhtivusteguri väärtust, kuid samas hoida survetugevus piisavalt kõrge, et seda saaks kasutada kandvate seinte ehitamisel. Seda tehes ei ole mõistlik anda järele toote pinna kvaliteedis ega muudes olulistes parameetrites.

1.4. Betooni tugevus

Keemilise koostise järgi liigitatakse betoon keraamiliste materjalide sekka. Sarnaselt teiste keraamiliste materjalidega, on ka betoon rabe ning tema tõmbetugevus on suurusjärgu võrra madalam kui survetugevus. [18, lk 623]

Betooni omaduste kirjeldamisel on survetugevus üks tähtsaim suurus, kuna ehituses, mis on betooni põhiline rakendusvaldkond, kasutatakse betooni just kandvate struktuurielementide valmistamiseks. Survetugevuseks (σ) nimetatakse maksimaalset mehaanilist pinget, mida katsekeha purunemata taluda suudab. Seda arvutatakse valemi (1) järgi:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

kus F on katsekehale mõjuv survejõud ning S katsekeha ristlõikepindala, mis on mõõdetud jõu mõjumise sihiga ristuvalt tasandilt.

Betooni survetugevuse mõõtmiseks kasutatakse maailmas erinevaid standardeid. Peamiselt kasutatakse AAC survetugevuse mõõtmisel sarnaseid protseduure nagu raskebetooni korralgi. Näiteks Ameerika Ühendriikides on laialdaselt kasutusel standard ASTM C39, mille järgi tuleks testideks kasutada silindrilisi katsekehasid, mille $h/d = 2$, kus h on silindri kõrgus ning d selle diameeter, kusjuures levinuimad läbimõõdud on 100 mm ja 150 mm. [19–21] On kasutatud ka selliseid katsekehi, mille diameeter ja kõrgus on võrdsed [22]. Euroopas seevastu kasutatakse survetugevuse mõõtmisel kuubikujulisi katsekehasid, kusjuures kuubi küljepikkuseks valitakse kas 100 mm või 150 mm [10, 22].

Betoonile survetestide sooritamisel tuleb erilist tähelepanu pöörata katsekeha otsapindade paralleelsusele. Selle tagamiseks kasutatakse meetodeid, mis jagatakse kolme rühma: seotud otsakute (ingl *bonded capping*) kasutamine, sidumata otsakute (ingl *unbonded capping*) kasutamine ning mehaaniline töötlemine. Seotud otsakute kasutamisel kaetakse katsekeha otsad väävli- või tsemendipasta kihiga ning lastakse sel kivistuda. Kasutatava otsakumaterjali survetugevus kivistunud peab ületama testitava materjali survetugevust. Sidumata otsakutena kasutatakse tavaliselt patjasid, mille vahele katsekeha testi ajaks asetatakse. Levinuimad otsakumaterjalid on polükloropreen ehk neopreen ning liiv. Sageli asetatakse elastomeeridest otsakud metallist piirava rõnga sisse, mis takistab lateraalsetest jõududest tulenevate tõmbepingete tekkimist katsekeha otsapindadel. Mehaanilisel töötlemisel korrigeeritakse katsekeha otsapindade paralleelsuse kõrvalekaldeid lihvimise teel. [23]

1.5. AAC tiheduse ja survetugevuse seos

Autoklaavitud poorbetooni survetugevust mõjutavad enim selle kuivtihedus ja valmistamise meetoodika. Materjali tihedus sõltub poorsusest ja vaheseinu moodustava materjali tihedusest. Lihtsustatult on pakutud, et survetugevus ja tihedus sõltuvad üksteisest valemi (2) järgi:

$$\sigma = A_s \rho_0^2, \quad (2)$$

kus A_s on survetugevuse koefitsient ehk mehaaniline efektiivsus ($[A_s] = \text{Pa} \cdot \text{m}^6/\text{kg}^2$) ning ρ_0 on tahkete toormaterjalide keskmine eritiheus, mis reeglina on vahemikus 2,25...2,55 g/cm³.

Survetugevuse koefitsiendi lihtsamaks võrdlemiseks kasutatakse selle arvutamiseks üldjuhul valemit (3) [10, lk 77, 79].

$$A_s = \frac{\sigma}{\rho_k^2}, \quad (3)$$

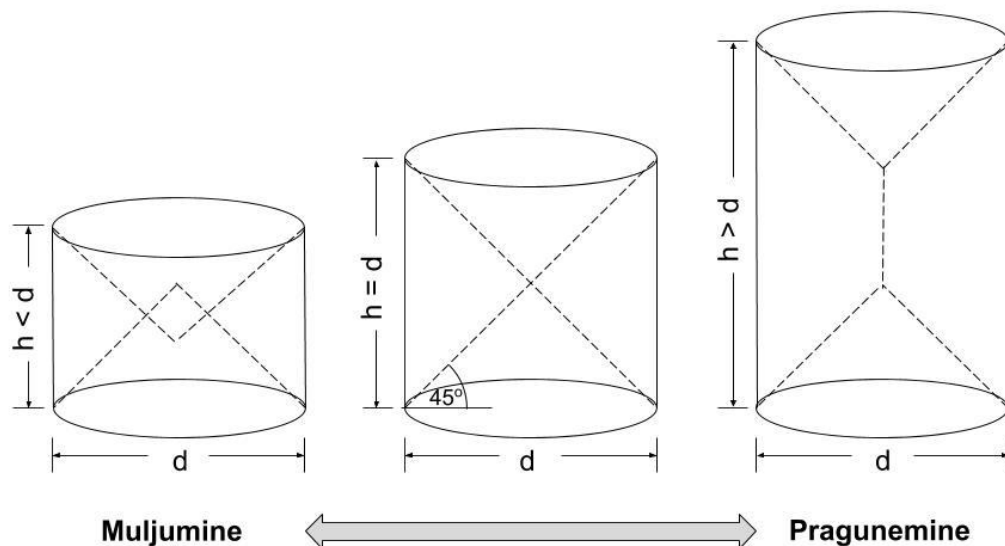
kus ρ_k on autoklaavitud poorbetooni kuivtihedus.

Materjali kuivtiheduse ja kuubi survetugevuse vaheliste seoste kirjeldamiseks on välja pakutud sõltuvused (4) ja (5):

$$\sigma_k^{10} = 10\rho_k^2 - 4,05\rho_k + 1,25, \quad (4)$$

$$\sigma_k^{10} = 12\rho_k^2, \quad (5)$$

kus σ_k^{10} on 10 cm serva pikkusega kuubi survetugevus [10, lk 79–80].



Joonis 1. Silindriliste katsekehade suuruse mõju purunemise mehhanismile [20]. Tõlgitud inglise keelest, KS.

Katsekeha survetugevus sõltub selle suurusest ja geomeetriast. Katsekehade kuju ja survetugevust seostavad uuringud on viidud läbi standardsete mõõtmatega katsekehade, milleks on kuubid küljepikkusega 100 mm ning 150 mm ja silindrid, mille $h/d = 2$ ning diameeter on 100 mm ja 150 mm. Ühe uuringu kohaselt on raskebetooni korral 150 mm diameetriga silindri ja sama küljepikkusega kuubi survetugevuste suhe ligikaudu 0,8 [24]. Sarnase tulemuseni jõuti ka teise uuringu käigus aereeritud ning klaasfiibriga tugevdatud autoklaavimata betooni kohta. Lisaks leiti sama uuringu käigus, et katsekeha survetugevuse absoluutväärtus suureneb mõõtude vähenemisega [20]. Põgusalt käsitleti ka silindri pikkuse

mõju katsekeha purunemise mehhanismile. Leiti, et kui silindri $h / d < 1$, on ülekaalus muljuvad jõud, kui aga $h / d > 1$, puruneb katsekeha survepingest tekkinud pragude tõttu (Joonis 1).

Erineva tihedusega, kuid sama geomeetriaga katsekehade omavahel võrdlemiseks on survetugevuse ja tiheduse sõltuvuse põhjal välja pakutud valem (6):

$$\sigma_s = \frac{\sigma_t \cdot \rho_s^2}{\rho_t^2}, \quad (6)$$

kus σ_s on sihttihedusega AAC survetugevus, σ_t tegeliku tihedusega materjali survetugevus, ρ_s materjali sihttihedus ning ρ_t materjali tegelik tihedus [25].

Valemite (4) ja (5) kehtivust on kontrollitud tiheduste vahemikus 300...1200 kg/m³ ning valemit (6) kasutati kuivtiheduse 500 kg/m³ korral. Sõltuvuste kehtivust piirkonnas 200...300 kg/m³ uuritud pole, kuid kontrollides Multipor soojustusmaterjali omaduste sobivust valemitega (4) ja (5) selgus, et tiheduse langedes väärtuseni 110 kg/m³, on materjali tegelik survetugevus (≥ 300 kPa) valemite pakutavast väärtusest (~ 121 kPa) kaks korda suurem [16]. Seega ei saa sõltuvusi (4) ja (5) survetugevuse otseseks hindamiseks tiheduse 230 kg/m³ korral kasutada. Lisaks muudab segu koostise korrigeerimine ja armeerivate lisandite lisamine materjali omadusi, mistõttu ei oleks saadava materjali sobitamine valemite (4) ja (5) graafikutele korrektne. Eeldades ruutsõltuvust survetugevuse ja tiheduse vahel, on valemi (6) kasutamine erinevat tihedusega katsekehade omavaheliseks võrdlemiseks korrektne, sest valem ei eelda kindlaid konstantide väärtusi ning ei muuda katsekeha survetugevuse koefitsienti.

1.6. Autoklaavitud poorbetooni struktuur

Kõrge survetugevuse saavutamiseks on oluline mõista AAC struktuuri ja selle mõju tugevusele erinevatel tasanditel. Karli Eskussoni poolt publitseeritud kokkuvõtliku uuringu järgi liigitatakse autoklaavitud poorbetooni struktuurielemendid suuruse järgi kolme peamisesse rühma. Makrotasandi struktuuriks loetakse poore läbimõõduga üle 0,1 mm. Edasi liigitatakse struktuur vaheseinte tasandiks (0,1 mm...0,1 μ m) ning kristallstruktuuri tasandiks (0,1 μ m...1 nm). [10, lk 17–39]

Makropooride tasand

Makropooride suurus, kuju, hulk ja suurusjaotus määravad AAC põhilised omadused. On leitud, et mida ühtlasem on pooride ruumiline jaotus, seda suurem on materjali survetugevus ja

väiksem soojusjuhtivustegur [10, lk 18]. Samas täpsustati matemaatiliste mudelite põhjal, et materjali omadused paranevad ka siis, kui vähendada väikeste, 0,2...0,8 mm läbimõõduga pooride hulka. Pooride kuju mängib samuti tugevusomaduste kujundamisel olulist rolli, sest pooride ovaalsuse vähenedes paranevad materjali tugevusnäitajad. Makropooride struktuuri mõjutamiseks tuleb valmistamisprotsessi käigus valida sobivad süsteemi reoloogilised omadused. Liiga viskoosses lähtesegus võivad pooride vaheseintesse tekkida defektid, mis soodustavad pooride ühinemist ja sellest tulenevat korrapäratut kuju. Seevastu liialt vedelast segust võivad vesinikumullid hoopiski väljuda ning tekib vähepoorne struktuur. Makropooride suuruse rolli AAC tugevusele on keeruline üheselt hinnata. Komposiitmaterjalide teooria kohaselt peaks materjali tugevus gaasimullide läbimõõdu vähenedes suurenema, kuid vastavasisuliste uuringute käigus on saavutatud vastupidiseid tulemusi. [10, lk 18–22]

Vaheseinte tasand

Vaheseinte tasandi moodustavad tsementeerunud uusmoodustised ning lähteainete osakesed, mis on uusmoodustiste sünteesimise käigus reageerimata jäänud. Vaheseinad võtavad vastu pinged, mis tekkivad materjali mehaanilisel koormamisel, temperatuuri kõikumisel, niiskuse eraldumisel ja muude protsesside käigus. [10, lk 23]

Tihti käsitletakse pooride vaheseinu peeneteralise betoonina ning järeldatakse, et AAC tugevuse tõstmiseks tuleks maksimeerida vaheseinte tihedus. Selle saavutamiseks on soovitatud vähendada vee ja kuivainete suhet lähtesegus, mis omakorda toob kaasa mitmeid komplikatsioone. Esiteks peab vaheseinte tiheduse suurenemiseks vähenema neis sisalduvate mikropooride maht ning tiheduse säilitamiseks peab selle arvelt kasvama makropooride maht. Selle käigus väheneb aga vaheseinte paksus, mis suurendab defektide hulka vaheseintes. Poorid käituvad autoklaavitud poorbetoonis pinge kontsentraatoritena ning seetõttu vähendavad vaheseinte väike paksus ning suur defektide arv materjali survetugevust. Samuti soodustab selline olukord pragude levikut. Lisaks on leitud, et vee ja kuivainete suhte vähendamine suurendab soojusjuhtivusteguri väärtust. [10, lk 25–26]

Kristallstruktuuri tasand

Autoklaavimise käigus tekkivad uusmoodustised on kristallstruktuuri tasandi kõige iseloomulikumateks elementideks. Suurem osa uusmoodustistest koosnevad kaltsium-silikaat-hüdraadist (C-S-H). Siinkohal on olulised lähtesegu CaO ja SiO_2 moolsuhe (C/S) ning autoklaavimise rõhk ja temperatuur, kuna need määravad nii tekkivate kristallstruktuuride kuju kui ka faasid. AAC struktuuris esineb sidusfaasina tobermoriit ($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ või

1.7. Autoklaavimine

Eelkivistumine		Autoklaavimine	
Aliit $3\text{CaO} * \text{SiO}_2$		Aliit $3\text{CaO} * \text{SiO}_2$	
Beliit $2\text{CaO} * \text{SiO}_2$		Beliit $2\text{CaO} * \text{SiO}_2$	
Tsemendist		Jäägid tsemendist	
$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	$\text{C-S-H} + \text{Ca(OH)}_2$	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{kvarts}$	$\text{C-S-H} + 1,1 \text{ nm tobermoriit}$
		$\text{C-S-H} + \text{kvarts}$	$\text{C-S-H} + 1,1 \text{ nm tobermoriit}$

Optimaalseim C/S suhe tobermoriidi tekkimise jaoks on vahemikus 0,8...1,0. Kui C/S langeb sellest vahemikust allapoole, siis tobermoriidi süntees aeglustub ja lõpuks peatub. Edasisel autoklaavimisel hakkab toimuma tobermoriidi osaline lagunemine ja tekkima ksonotliit. See vähendab materjali survetugevust, kuna uusmoodustiste kontakt reageerimata jäänud

räniosakestega halveneb. [10, lk 30–34, 28] Ühes uuringus leiti, et 1,1 nm tobermoriit hakkab autoklaavis tekkima umbes kahe tunni möödudes ning protsess lõpeb ligikaudu 8 tunniga. Negatiivne mõju kristallstruktuurile ilmneb, kui autoklaavimise aeg ulatub 64 tunnini. [28]

1.8. Armeerivate lisandite kasutamine AAC-s

Kirjanduses käsitletakse portlandtsemendist valmistatud raskebetooni komposiitmaterjalina, mille maatriksi moodustab tsement ning dispergeeritud faasi erinevas suuruses liiva- või kruusaosakesed. Seetõttu liigitatakse betoon keraamiliste materjalide seas suurte osakestega komposiitmaterjaliks (ingl *large-particle composite*). Fiibriliste lisanditega betoon liigitatakse aga fiibertugevdatud komposiitide kategooriasse, järelikult on tegemist komposiidiga, mille maatriks on omakorda komposiitmaterjal. [18, lk 543–545]

Fiibritega tugevdatud komposiitmaterjali tugevus sõltub põhiliselt neljast tegurist: fiibrite kontsentratsioon, suund, suurus (pikkus ja läbimõõt) ning fiibri-maatriksi seostumistugevus [18, lk 546–555]. Autoklaavitud poorbetooni väikesemõõduliste fiibritega armeerides ei ole võimalik tootmisprotsessis kontrollida fiibrite orientatsiooni. Pealegi muudavad orienteeritud fiibrid materjali anisotroopseks. Lisaks sellele halvendab pikkade fiibrite kasutamine toote pinna kvaliteeti ning tolerantse olulisel määral, kuna pikad ja kõvad fiibrid hakkavad eelkivistunud segumassiivi lõikamisel traadi ette kuhjuma. [7]

Fiibri-maatriksi seostumistugevus on suurus, mis määrab maksimaalse jõu, mida maatriks suudab fiibrile üle kanda. Kui piirpinna tugevus on fiibri tõmbetugevusest suurem, puruneb liigse koormuse all fiiber, kui aga madalam, tõmmatakse purunemisel fiiber maatriksist välja. Fiibri maatriksist väljatõmbamise jõud on võrdeline maatriksiga seotud fiibri pindalaga, mis on üldiselt võrdeline fiibri pikkusega. Kiu kriitiliseks pikkuseks nimetatakse suurust, mis näitab kui pikk osa kiust peaks olema seotud maatriksiga, et materjalile purustava jõu avaldamisel puruneks kiud, mitte maatriks. [18, lk 546–547] Kui materjali purunemisel fiibrid katkevad ning jäävad maatriksiga seotuks, on saavutatud antud fiibri kasutamisel komposiitmaterjalis maksimaalne piirpinna tugevus ja fiibrite maatriksiga seotud osa on piisavalt pikk ning edasine piirpinna tugevdamine materjali tugevust oluliselt ei muuda. Fiibrite sisalduse kohta betooni valmistamisel ei ole kirjanduses toodud kindlat reeglit, kuna see sõltub palju fiibrite tüübist ning mõjust vedela segu reoloogilistele omadustele. Leidub uuringuid, kus näiteks basaltfiibreid on lisatud kuni 1% betooni kuivainete massist. [29, 30]

Terasarmatuuriga AAC tooteid on valmistatud juba alates 1935. aastast, kui Siporex tõi turule esimesed tugevdatud lae- ja katusepaneelid [12]. Terasarmatuuri lisamine muudab aga detaili oluliselt raskemaks ning selle tootmise veidi keerukamaks. Lisaks suurendab teras saadava komposiidi soojusjuhtivusteguri väärtust ning korrodeerub ajapikku, piirates materjalist valmistatud toodete eluiga. Selleks, et AAC madal tihedus säilitada ning survetugevust ja soojapidavust tõsta, on uuritud erinevate väikesemõõduliste armeerivate lisandite kasutamist materjalis. Näiteks on leitud, et süsinikkiudude lisamisel suureneb 420 kg/m^3 kuivtihedusega poorbetooni survetugevus 31% võrra ning basaltfiibrite lisamisel ligikaudu 18% võrra. Lisaks uuriti ka polüpropüleen- ja klaasfiibrite mõju materjali survetugevusele ning selgus, et survetugevus tõusis vastavalt 12% ja 5,5% võrra. [29] Sama töögrupi teises uuringus leiti, et süsinikfiibritega AAC armeerimine tõstab oluliselt selle soojusjuhtivust. Veidi väiksema soojusjuhtivuse tõusu tekitasid klaas- ja polüpropüleenfiibrid. Ainus uuritud fiiber, mis soojusjuhtivusteguri väärtust ei mõjutanud, oli basaltfiiber. [31]

On leitud ka, et basaltfiibrite lisamisel koos kvartsi mikrotolmuga suureneb oluliselt materjali survetugevus nii enne kui pärast soojendamis-jahutamistsükleid. Käesoleva töö kontekstis on oluline asjaolu, et sellise komplekslisandi kasutamine AACs suurendas selle survetugevust enne soojuskoormuste rakendamist umbes 17% võrra. [25]

1.9. Töös kasutatud armeerivad lisandid

Projekti käigus valiti autoklaavitud poorbetooni armeerimiseks välja 11 erinevat lisandit, milleks olid basalt- klaas- ja aramiidfiibrid, kivivill, tselluloos, metüülselluloos, terasvill, Al_2O_3 nanofiibrid, polüpropüleenfiibrid, tseoliit ning alginaat. Käesolevas töös keskendutakse basalt- ja aramiidfiibrite, kivivilla ning metüülselluloosiga armeeritud materjali uurimisele, kuna need lisandid eristuvad üksteisest keemilise koostise või armeeringu suuruse poolest ning mõjutasid materjali omadusi erinevalt.

Basaltfiiber

Basalt on peeneteraline musta värvi tardkivim, mis katab suuri alasid maismaal ja ookeani põhjas. Selle põhilisteks koostisosadeks on SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 ning Fe_2O_3 ja FeO . Kivim tekib aluselise magma purskel ning selle põhikomponentideks on plagioklass, augiit ja magnetiit. Basalt on väga inertne kivim ning seda peetakse heaks asendajaks asbestile, isoleerides soojust viimasest kuni kolm korda paremini. [32, lk 61, 33]

Basaltfiibrite tootmiseks sobib ainult happelise iseloomuga ($\text{SiO}_2 \geq 46\%$) basalt [34]. Hoolikalt valitud kivim purustatakse, pestakse ning seejärel sulatatakse temperatuuril 1400 °C...1600 °C. Basaldi kõrge infrapunaneelduvuse tõttu ühtlustub kivimimassiivi temperatuur soojendades aeglaselt, mistõttu hoitakse seda sulamistemperatuuril mitme tunni vältel. Viimaks ekstrudeeritakse sulamass läbi väikeste aukudega matriitside ja saadud fiibrid keritakse poolidele või hakitakse. Kiudude erijäikus on sarnane klaaskiudude sama näitajaga, kuid basaltfiibreid eelistatakse sageli temperatuurikindluse ja mehaanilise püsivuse tõttu. [33]

Aramiidfiiber

Polüarüülamiidideks ehk aramiidideks nimetatakse polümeere, mille struktuurielementideks on amiidrühmade abil seotud aromaatsed rühmad. Kasutusel on kahe erineva struktuuriga materjalid – *para*-aramiidid ning *meta*-aramiidid, millest esimest tuntakse peamiselt kaubamärkide Kevlar™ ja Twaron™ all ning viimast Nomex™ all. [35, lk 194–195]

Aramiidfiibrite tootmisel on lähteaineteks *para*-fenüleendiamiin ja tereftaloüüldikloriid, millest moodustatakse kaltsiumkloriidi juuresolekul N-metüülpürrolidoonis vedelkristalne polümeer. Saadud materjalist kedratakse kiud, mis pestakse ning töödeldakse, saavutamaks kõrge kristallilisuse aste. [35, lk 194–195, 36]

Aramiidid on komposiitmaterjalides levinud fiibrid, kuna nende tugevusomadused ületavad paljude teiste levinud fiibrite näitajaid. Kevlari eritugevus on sarnane süsinikfiibrite ning ülikõrge molekulmassiga polüetüleeniga sama näitajaga, mis vihjab aramiidide väikesele tihedusele ($\sim 1,45 \text{ g/cm}^3$) ning väga kõrgele tõmbetugevusele (3,6...4,1 GPa) [18, lk 556]. Aramiidfiibrite lisamine AAC maatriksisse on uudne ja seda pole varem proovitud. Käesolevas töös valmistati autoklaavitud poorbetooni firma Teijin Aramid GmbH Hollandis toodetud Twaron™ 3091 fiibritega.

Kivivill

Kivivill (ingl *rock wool / slag wool*) on klaasvilla kõrval üks tuntuim mineraalvilla liik. Kivivilla toodetakse reeglina kindlast kivimist – diabaasist, mida tuntakse ka mikrogabro või doleriidina. Diabaas tekib aluselise magma kristalliseerumisel. [32, lk 50, 37, lk 13].

Kivivilla tootmiseks sulatatakse lähtematerjalid ning sulamassist valmistatakse kiud. Levinuimad meetodid kiudude saamiseks on õhujoa suunamine läbi sulamassi või ketramine, mille käigus sulakivim tsentrifugaaljõu mõjul läbi väikeste aukude surutakse. Lõpliku kujuga toodete (plaadid, matid vms) saamiseks seotakse kiud omavahel sünteetiliste vaikudega, mis lagunevad temperatuuridel üle 200°C. [38, 39, lk 216, 40, lk 226]

AAC armeerimist kivivillaga eelnevalt uuritud pole. Ometigi on tegemist tööstuslikult lihtsasti kättesaadava ja majanduslikult sobiva materjaliga ning AAC armeerimiseks sobivad ka piisava puhtusega lammutus- või tööstusjäägid. Mineraalvilla kiudude tõmbetugevus on samas suurusjärgus (≈ 3 GPa) aramiidkiudude tõmbetugevusega [41].

Metüülselluloos

Metüülselluloos (lagunemistemperatuur 308 °C [42]) on tselluloosi derivaat ning puhta aina on ta hallikasvalge pulber. Tegemist on polümeeriga, millel on väga palju erinevaid rakendusi. Seda kasutatakse näiteks veepõhistes värvides, naha parkimisel, tapeediliimide koostises ning ka toiduainetööstuses toidulisandi ja paksendajana. [40, lk 224]

Metüülselluloosi eristab teistest tuntud kemikaalidest erinev lahustumismehhanism. Nimelt lahustub see külmas vees hästi ning kuumas vees hakkab sadenema. Seetõttu soovitatakse tapeediliimi valmistamisel lisada alguses kuuma vett, et pulber hästi lahuses disperseerida ning lasta metüülselluloosil segu jahtudes lahustuda. Külma vee lisamisel tekib aineosakeste ümber geeljas kiht, mis takistab pulbri disperseerumist. [43]

Autoklaavitud poorbetooni armeerimiseks kasutati tapeediliimi Metylan Spezial, milles on peamiseks koostisosaks metüülselluloos. AACsse metüülselluloosi lisamise kohta publikatsioone ei ole ning puudub ka info metüülselluloosi käitumise kohta kõrge vee aururõhuga keskkonnas.

1.10. Töö eesmärk

Käesoleva töö eesmärgiks oli leida seosed armeeritud autoklaavitud poorbetooni valmistamisprotseduuri, mikrostruktuuri ning tugevusomaduste vahel. Eesmärgi saavutamiseks töötati välja meetoodika survetugevuse korratavaks mõõtmiseks, mõõdeti tööruhmade poolt valmistatud materjaliproovide survetugevus ning uuriti proovide struktuuri skaneeriva elektronmikroskoobiga. AAC valmistamisel lähtuti AS Bauroci retseptidest ning lähteainetest, mistõttu võivad esinevad seaduspärasused erineda kirjanduses toodust.

Töö teostati AS Bauroci ja Tartu Ülikooli ühise arendusprojekti osana, mille eesmärgiks oli arendada välja selline autoklaavitud poorbetoon, mille kuivtihedus oleks 230 kg/m³ ning survetugevus võimalikult suur. AS Bauroci poolt andsid juhatare Karmo Kapstas ning tootmisjuht Elina Liepa. Tartu Ülikoolis tegutsenud tööruhmade juhtis Tarmo Tamm ning selle moodustasid lisaks käesoleva töö autorile veel Uno Mäeorg, Artur Kaljo, Markus Otsus.

2. Eksperimentaalne osa

2.1. AAC toorikute laboratoorne valmistamine

Toorikute valmistamisega laboris tegeles põhiliselt Artur Kaljo.

Laboris ning tehases valmistatud AAC erinevuste minimaliseerimiseks kasutati ka laboris samu tooraineid, mida AS Bauroc Kunda tehases. Ettevõttelt saadi nii liiva- kui jäägisamm, tsement, lubi, sulfanool ja kaks erineva peenestusastmega alumiiniumpulbrit.

Laboratoorselt valmistati poorbetooni nii sihttihedusega 230 kg/m^3 kui ka 320 kg/m^3 . Kuna valminud materjali kuivtihedust mõjutavaid tegureid on palju, varieerus materjali reaalne kuivtihedus harilikult sihttihedusest $\pm 20 \text{ kg/m}^3$ piires. Esmalt kohandati valmistamisprotseduur võimalikult sarnaseks AS Bauroci 300 kg/m^3 kuivtihedusega betooni tootmisprotseduuriga [7]. Seejärel suurendati retseptis alumiiniumpulbrite osakaalu, et saada madalama tihedusega materjali. Kuna töögrupil puudus kvantitatiivne info alumiiniumpulbrite koguse ja saadava materjali tiheduse seose kohta, leiti täpne alumiiniumpulbrite kogus ja vahekord katseeksitusmeetodil. Viimase sammuna hakati valmistama materjaliproove, kuhu oli lisatud ka erinevaid armeerivaid lisandeid, kohandades vajadusel retsepte. Lisandite kogus retseptis arvutati tooriku kuivainete kogumassi järgi massiprotsentides. Slammides sisalduva vee ja tahkete ainete osakaalude leidmiseks kasutati ettevõttes väljatöötatud tabelit.

Toorikute maksimaalse suuruse määras autoklaav, mis koosnes 95 mm siseläbimõõduga roostevabast terasest silindrist ning kaanest. Seadmega sai korraga kõvendada kaks toorikut, kasutades eelkivinenud toorikute üksteise kohal hoiustamiseks roostevabast terasest riulit (LISA 1, Joonis 15). Valmistatavad toorikud olid silindrikujulised, läbimõõduga 75 mm ning kõrgusega 90...120 mm.

2.2. AAC survetugevuse määramine

2.2.1. Katsekehade valmistamiseks vajalikud seadmed

Katsekehade maksimaalsed mõõtmed survetestide läbiviimiseks olid määratud survetestide teostamiseks kasutatud seadme mõõtmetega, autoklaavi sisemõõtmetega ning kasutada olnud löikeseadme iseärasustega. Survetestistendi mahtus maksimaalselt 90 mm laiune ja 100 mm kõrgune katsekeha ning autoklaavimise järel oli silindrikujuliste toorikute läbimõõt ligikaudu

75 mm ning kõrgus vähemalt 100 mm. Selliste mõõtmetega toorikust saab ideaaljuhul lõigata ca 50 mm küljepikkusega kuubi. Kuna esimeste survetestide sooritamisel selgus, et olemasolevate tööriistadega on selles mõõdus paralleelsete vastastahkudega kuubi valmistamine aeganõudev ja raskesti korratav, otsustati edasised survetestid läbi viia silindriliste katsekehadega. Silindri kõrgus ja diameeter valiti võrdsed, kuna selline silinder suudab 2015. aastal läbiviidud uuringu kohaselt taluda suuremaid pingeid kui suurema pikkus-laius suhtega silinder.[20]

Silindrikujuliste katseobjektide lõikamiseks kasutati reguleeritava kiirusega treipinki. Selle spindli külge kinnitati lõiketeraks 50 mm sisediameetriga terastorst puur, mille väljapuuritud südamikud sobisid edasiseks töötlemiseks.

Tooriku kinnitamiseks treipingile konstrueeriti sobiv rakis. Kuna kasutatav treipink ei võimaldanud lõiketera vertikaalsihilist liikumist, valmistati rakis sellise kõrgusega, et puuri ja silindrilise tooriku teljed oleksid samal kõrgusel. Rakis (Joonis 3) koosnes 4 mm paksusest alumiiniumplekist alusplaadist, nelinurksest alumiiniumprofiilist, kahest pingutatavast toruklambrist tooriku kinnitamiseks ning kahest plastikust kaitsekestast, mille abil välditi tooriku purunemist, vähendades toruklambrate avaldatavat rõhku toorikule.



Joonis 3. Autoklaavitud poorbetoonist toorik kinnitatuna rakise abil treipingile. Vasakul on näha puuri, mis kinnitus treipingi spindli külge.

2.2.2. Katsekehade valmistamine

Materjali autoklaavimise ja lõikamise vahel oli alati vähemalt 24 tundi selleks, et katseobjektid veidi kuivaksid ning nende temperatuur jõuaks ühtlustuda. Silindriliste katsekehade valmistamiseks kinnitati toorik esmalt joonisel 3 toodud rakisele, millele järgnes lõikamine. Protseduuri ajal pöörles puur kiirusega 110 pööret minutis ning sisenes materjali kiirusega 2 ± 1 mm/s.

Saadud ühtlase diameetriga silindri otsad lõigati nurgasaega pikiteljega ristuvaks ning omavahel võimalikult paralleelseks. Katsekehade kõrgus oli 50 ± 1 mm ning diameeter 49 ± 1 mm.

Pärast lõikamist puhastati katsekehad suruõhuga tolmust ning tähistati. Kuna survetestil usaldusväärsete ja korratavate tulemuste saamiseks tuleb katsekehade niiskustase ühtlustada [7], kuivatati katseobjektid vaakumahjus MEMMERT VO200 temperatuuril 70°C rõhuni 1 mbar. Kuivatamine lõpetati, kui kuivatuskapis oli pikemat aega püsinud rõhk 1 mbar, mis andis tunnistust vee aurustumise aeglustumisest ja niiskustaseme ühtlustumisest. Tavaliselt kulub katsekehade kuivatamiseks 24...48 tundi.

Pärast kuivatamist määrati materjali tihedus. Selleks kaaluti katsekehad analüütilise kaaluga Mettler Toledo AB204-S/PH, mille lahutusvõime on 0,1 mg. Katsekehade ruumala leiti arvutuslikult, mõõtes nihikuga nende kõrguse ning diameetri kolmest erinevast kohast. Andmete töötlemiseks kasutati tabelarvutusprogrammi „Microsoft Excel 2016“.

2.2.3. Survetestide teostamine

Töö autor viis survetestid läbi Tartu Ülikooli Füüsika Instituudis asuval survetesti stendil GUNT, mille jõusensori maksimaalne mõõdetav jõud on 20 kN. Seade ei võimaldanud katset läbi viia automaatselt, seega pidi suruvaid pindu üksteisele lähendama käsitsi. Antud protseduuri kiirus oli keskmiselt $18 \mu\text{m/s}$. Teistide käigus registreeriti mõõtetulemused seadmega ühendatud arvuti abil maksimaalse võimaliku kiirusega, milleks oli üks andmepunkt sekundis.

Enne survetestide teostamist asetati katsekeha mõlemad otsad 3 mm paksustee silikoonpatjade vahele. Survejõu ühtlaseks jaotamiseks disainiti ja telliti alumiiniumist otsaplaadid, millesse oli freesitud süvend silikoonpatjade hoidmiseks (LISA 1, Joonis 16). Silikoonpatju kasutati selleks, et vähendada katsekehade otsapindade võimalikust mitteparalleelsusest ja pooride reljeefist

tingitud pinge ebaühtlast jaotumist ning otsapindadele sattunud tolmu mõju pingete kontsentreerumisele. Kasutatud silikoonmaterjali kõvadust mõõdeti Shore A duromeetriga, tulemuseks saadi 73,6(3) A.

2.2.4. Survetugevuse mõõtmise metoodika valideerimine

Metoodika kontrollimiseks kasutati bauroc ECOTERM+ välisseinaplokki, millest valmistati kuus katsekeha. Katsekehade survetugevus mõõdeti väljatöötatud metoodikat järgides. Materjali tihedus määrati eelnevalt peatükis 2.2.2 toodud metoodikat järgides.

Survetugevuse mõõtmise metoodika valideerimiseks saadeti kaks laboratoorselt valmistatud toorikut (BP-47 ja BP-57) AS Bauroc Kunda tehasesse ning 14 toorikut (BP-31...BP-38 ning BP-41...BP-46) Eesti Maaülikooli, kus määrati nende survetugevus sealse metoodikaga.

2.3. Proovide mikrostruktuuri uurimine

2.3.1. SEM proovide valmistamine

Skaneeriva elektronmikroskoobiga autoklaavitud poorbetooni vaatlemiseks on vaja võimalikult tasast pinda. Sobiva tasasusega pinda on lihtne saada lõikeseadmete abil, kuid saagimine lõhub kristallstruktuurid, mis annavad katseobjekti kohta olulist infot [2]. Piisavalt tasane murdepind saadi, kui enne murdmist saeti materjali sisse pilud, mis käitusid pinge kontsentraatoritena. Pärast murdmist lõigati uuritav objekt 4...5 cm² suuruseks. Proovide kõrgus reguleeriti lihvimise teel üksteisega ligikaudu võrdseks, et oleks võimalik mitme proovi üheaegne sisestamine SEMi kambrisse. Viimaks puhastati objektid suruõhuga ning tähistati.

Kuna skaneerivas elektronmikroskoobis pommitatakse objekti elektronidega, peab vaadeldav pind olema juhtiv, vastasel juhul hakkab see laaduma. Selleks, et objekti pinnale kogunevat laengut maandada, kinnitati proovid juhtiva kahepoolse süsinikeibiga alumiiniumist alusele. Parema juhtivuse saavutamiseks ühendati teibiribade abil ka objekti küljed alusega. Metallist aluste kuju ja suurus oli piiratud valmistusprotsessi järgmise etapi – magnetrontolmustamise (ingl *sputtering*) – poolt. Tolmustamise käigus kanti objekti pinnale 10 nm paksune kullakiht, mille juhtivus oli piisav, et laadumist vältida. Protsessi läbiviimiseks kasutati Leica EM ACE 600 magnetron-tolmustajat.

2.3.2. Uuringud skaneeriva elektronmikroskoobiga ning EDX analüüs

Proove analüüsiti skaneeriva elektronmikroskoobiga Hitachi TM-3000, mis oli varustatud Oxford Instruments SwiftED 3000 energiadiispersiivse röntgenmikroanalüsaatoriga (EDX). Nii SEMi mikrograafide saamiseks kui ka EDX analüüsi sooritamiseks kasutati kiirendavat pinget 15 kV. SEM mikrograafid registreeriti tagasipeegeldunud elektronide detektoriga ning EDX analüüsil tekkinud röntgenkvante tuvastati räni-triiv detektoriga (SDD).

Uuringutulemuste paremaks võrdlemiseks vaadeldi esmalt 40-kordse suurendusega 3 mm × 4 mm suurust osa proovi pinnast. Selle käigus valiti välja rohkem huvi pakkuvad kohad, mida uuriti edasi suurema suurenduse režiimis. Vaatluste käigus tehti süstemaatiliselt märkmeid järgmiste parameetrite kohta:

- Üldine struktuur:
 - Lisandi esinemine ja seostumine (kui materjal oli lisandiga)
 - Pooride kuju ja keskmine läbimõõt
 - Vaheseinte keskmine paksus
- Pooridevaheline ala
 - Monokristallide (reageerimata liivaterade) esinemine
 - Tobermoriidi hulk ja vorm
 - Väikeste pooride esinemine ning jaotus
- Pooride sisepind
 - Monokristallide esinemine
 - Tobermoriidi hulk ja vorm
 - Defektide hulk pooride põhjas, aukude kuju ja suurus

Iga uuritud proovi vaatlemisel jäädvustati materjali struktuurist mikrograafid ning mõõdeti iseloomulike struktuurielementide (poorid, vaheseinad, monokristallid, lisandfiibrid) suurused.

EDX analüüsi kasutati ainult erilist huvi pakkuvate struktuurielementide korral, milleks enamasti olid erineva kujuga monokristallid. Kuna suuremate monokristallide esinemine poorbetoonis (eriti pooride sees) on üldiselt ebasoovitav, oli kristallide röntgenmikroanalüüs vajalik selleks, et leida nende keemiline koostis, mis võimaldas teha oletusi nende tekkepõhjuste või päritolu kohta.

3. Tulemused

3.1. Survetugevuse mõõtmise metoodika väljatöötamine

Survetugevuse mõõtmiseks otsustati silindrilisi katsekehasid kasutada juba töö algfaasis, kui selgus, et piisavalt kvaliteetsete kuubikujuliste katsekehade valmistamine on keeruline ja töömahukas. Otsakute kasutamise vajadus ilmnis samuti esimeste katsete käigus, kui täheldati, et väikene kõrvalekalle otsapindade paralleelsusest vähendab materjali survetugevust oluliselt. Autoklaavitud poorbetooni survetugevuse mõõtmisel osutus optimaalseimaks variandiks sidumata otsakute kasutamine, kuna seotud otsakute kivistumine võtab võrdlemisi kaua aega ega võimalda otsakute taaskasutamist ning eeldab sobivate vormide olemasolu. Samuti oli testi käigus rakendatav jõud nii väike, et ei kahjustanud sidumata otsakute materjali.

Survetugevuse metoodika kontrollimisel selgus, et ploki keskmine tihedus on 334 kg/m^3 (standardhälve 5 kg/m^3) ning survetugevus $1,94 \text{ MPa}$ (standardhälve $0,20 \text{ MPa}$), andeks survetugevuse koefitsiendiks valemi (3) järgi $A_s \approx 17,4$. Saadud survetugevus ületab veidi ettevõtte tagatavat minimaalset survetugevust ($1,8 \text{ MPa}$) [44].

Metoodika valideerimiseks AS Bauroc Kunda tehases ning Eesti Maaülikoolis mõõdetud sarnase koostisega katsekehade survetugevused langesid ligikaudu kokku töös kirjeldatud metoodikaga mõõdetud tulemustega, millest järeldub, et väljatöötatud metoodika sobib autoklaavitud poorbetoonist katsekehade survetugevuse määramiseks.

3.2. Armeerimata autoklaavitud poorbetoon

Survetugevus

Laboris valmistatud armeerimata AAC survetugevused ja tihedused on toodud tabelis 1. Sealt selgub, et laboris valmistatud materjali tihedused ning survetugevused on oluliselt väiksemad kui tehase toodangul. Kui tiheduse reguleerimiseks tuleb segusse doseerida õigesti vahutekitajat ehk alumiiniumpulbrit, siis survetugevus sõltub paljudest erinevatest teguritest.

Suurim erinevus laboris ning tehases valmistatud materjali vahel on toodangu maht, kuna tehases valmib ühe korraga mitu suurusjärku rohkem materjali. Vorm, milles toorik veedab esimese eelkivistumisperioodi, oli laboris silinder läbimõõduga 75 mm , tehases aga risttahukakujuline vagun, mõõtmetega umbes $1 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$. Kõige tõenäolisemalt on

madala survetugevuse põhjustajaks seinafektid (LISA 1, Joonis 17), mille tõttu ei saa vormi seinu lähedal asuvad vesinikumullid samamoodi liikuda nagu sügavamal segumassiivi sees olevad vesinikumullid. Seetõttu seinte läheduses olevad poorid liituvad ning on kehvema liikuvusega, eriti segu eelkivistumise alguses, kus massiiv on vedelam. Lisaks muutustele makroskaalal toimuvad teistsuguse ulatusega muudatused kristallstruktuuri formeerumises ning mehaanilistes tugevusomadustes. Efekti ulatus ja mõju sõltub keskkonna viskoossusest, elastsusest ja muudest omadustest. Mõjutatud kihi paksust autoklaavitud poorbetoonis uuritud pole, kuid tõenäoliselt on see mitme sentimeetri suurusjärgus. Tehastes eemaldatakse eelkivistunud massiivide lõikamisel vormiga kokkupuutes olnud kiht mõne sentimeetri ulatuses ning tekkinud jääke taaskasutatakse järgmiste partiide lähtesegus.

Tabel 1. AAC valmistamise laborimudeli välja töötamisel valmistatud materjaliproovide omadused. Normeeritud survetugevus on arvutatud valemi (6) ning survetugevuse koefitsient valemi (3) abil.

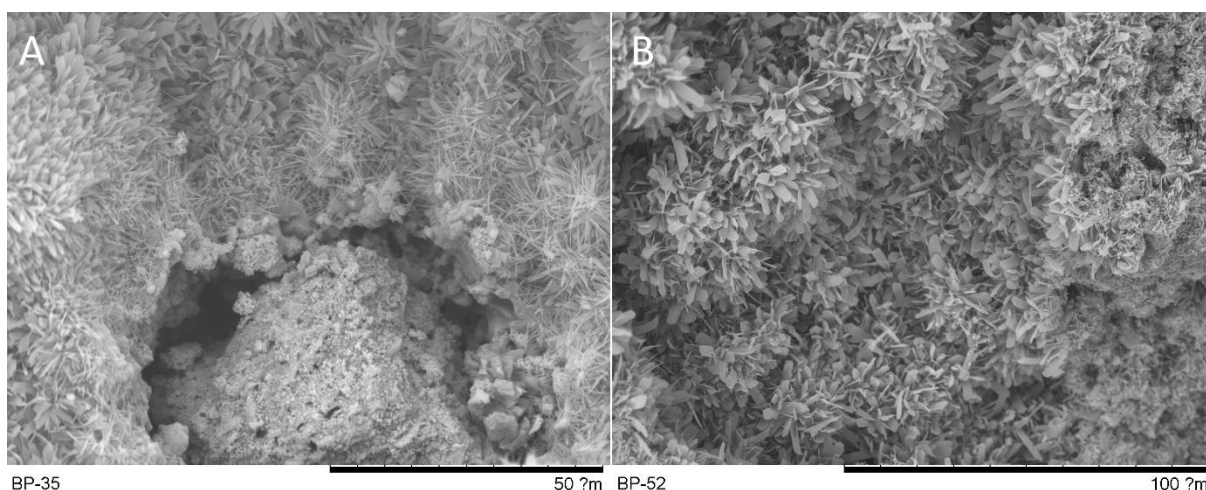
Katsekeha tähis	ρ_{siht} [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]	σ [MPa]	σ_{norm} [MPa]	A_s [Pa·m ⁶ /kg ²]
BP-17	300	284	0,876	0,981	10,9
BP-19	300	286	1,277	1,408	15,6
BP-20	300	283	0,979	1,099	12,2
BP-26	300	273	0,936	1,133	12,6
BP-27	300	282	1,045	1,182	13,1
BP-29	300	280	0,968	1,111	12,3
BP-35	300	309	0,940	0,889	9,9
BP-36	320	331	1,060	0,994	9,7
BP-37	300	319	1,120	0,993	11,0
BP-52	320	293	1,389	1,654	16,1
BP-21	250	231	0,746	0,874	14,0
BP-22	250	245	0,796	0,828	13,3
BP-51	230	238	0,922	0,860	16,3

Sõltumata survetugevuse madalamast absoluutväärtusest saadi korratavad tulemused, mis võimaldasid edaspidi võrrelda survetugevuse muutust armeerivate lisandite mõjul.

Madalama ja kõrgema sihttihedusega armeerimata AAC survetugevuse koefitsiendid on ligilähedased. Seega kaasneb tiheduse vähenemisega proportsionaalne survetugevuse langus. Ka madalama sihttihedusega materjali survetugevus oli seinaeftide tõttu oodatust madalam.

Mikrostruktuur

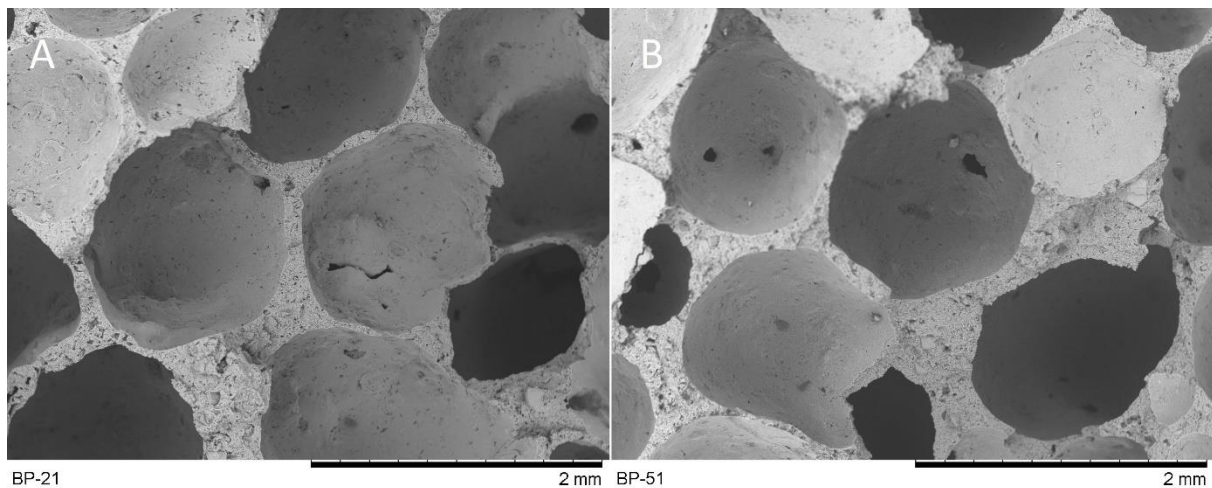
Kõrvutades omavahel kõrgema survetugevusega autoklaavitud poorbetooni ($\rho_{\text{siht}} = 320 \text{ kg/m}^3$) mikrograafid ja madalama survetugevusega materjaliproovide omad, leiti et kuigi pooride kuju kõrgema ja madalama survetugevusega proovide korral märgatavalt ei erine, esineb nõrgemas materjalis oluliselt rohkem reageerimata liivaterasid (LISA 2, Joonis 20), auke pooride põhjades ning erinevaid defekte (LISA 2, Joonis 21 ja Joonis 22). Samuti leiti kõrgema survetugevusega materjalist peamiselt plaatjat, harvem pirdjat tobermoriiti, kuid madalama survetugevusega AACs oli pirdja tobermoriidi osakaal selgelt suurem ning paiguti leidis ka nõeljat tobermoriiti (Joonis 4).



Joonis 4. *Tobermoriidi kristallide erinevad vormid autoklaavitud poorbetoonis. A) Nõeljas tobermoriit; B) Plaatjas tobermoriit.*

Madalama sihttihedusega materjali struktuuri võrreldes selgus, et kõrgeima survetugevusega poorbetoonis (BP-51) olid vaheseinad veidi paksemad ja ühtlasemad kui teistes sarnase kuivtihedusega proovides. Joonisel 5 on näha, et nõrgema materjali (BP-21) pooride põhjades on oluliselt rohkem väikeseid auke kui tugevamal materjalil (BP-51).

Kõigis kolmes madalama sihttihedusega proovis leidis ligikaudu sarnane kogus reageerimata liivaterasid. Proovist BP-21 leiti ühest poorist CaSO_4 monokristalle, mis viitavad väävli kontsentreerumisele mõnedes üksikutes poorides [2]. Kõigist kolmest proovist leiti enamjaolt plaatjat, paiguti ka pirdjat tobermoriiti. Nõeljat tobermoriiti neist proovidest ei leitud.



Joonis 5. Armeerimata AAC ($\rho_{siht}=230 \text{ kg/m}^3$) struktuur. A) BP-21; B) BP-51.

Lähtesegu veesisalduse mõju materjalile täheldati proovide BP-53 ja BP-54 juures (mõlemasse lisati ka 7,5% basaltfiibreid), mis olid valmistatud identse retsepti järgi ning autoklaavitud korraga (katsekehade tugevus- ja tihedusparameetrid on toodud peatükis 3.3), kuid proovis BP-53 oli 20% rohkem vett. Proove skaneeriva elektronmikroskoobiga uurides selgus, et BP-53 pooride põhjad olid ulatuslikult kahjustunud, kuid BP-54 poorid olid ühtlaste ja siledade põhjadega (LISA 2, Joonis 23). Proovis BP-53 leidus kõikides poorides hulgaliselt $\sim 50 \mu\text{m}$ suuruseid korrapäratu kujuga auke ning osade pooride põhi oli veelgi ulatuslikumalt kahjustunud (LISA 2, Joonis 24).

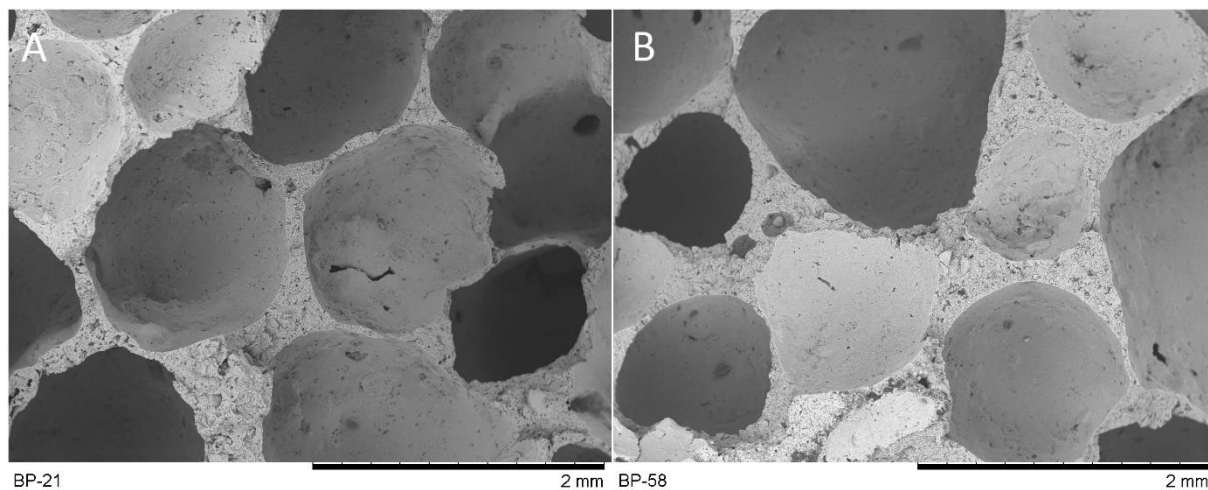
Läbiviidud SEM uuringute tulemused (Joonis 23) ja mõõdetud tihedused (Tabel 2) ühtivad kirjanduse seisukohaga, et vesikuivaineteguri tõstmisel väheneb materjali tihedus, pooride keskmine diameeter suureneb, poorid muutuvad veidi ovaalsemaks ning nende pakketihedus väheneb [10, lk 21]. Katsetes vähenes vesikuivaineteguri suurendamisel materjali tihedus märgatavalt ning pooride läbimõõt oli keskmiselt ligikaudu 0,1 mm suurem. Suuremate pooride tõttu õhemaks jäänud vaheseinte ning suure koguse pooride põhjades leiduvate defektide tõttu on liigse veega materjali survetugevuse koefitsient ligikaudu 10% madalam.

3.3. Basaltfiibritega armeeritud AAC

Käesoleva töö käigus uuriti viite 230 kg/m^3 sihttihedusega basaltfiibritega ($d \sim 30 \mu\text{m}$; $L \sim 8 \text{ mm}$) armeeritud toorikut, milles oli varieeritud fiibrite kogust. Kiud olid segus hästi disperseerunud ega olnud mõjutanud nähtavalt lähtesegu voolamisomadusi.

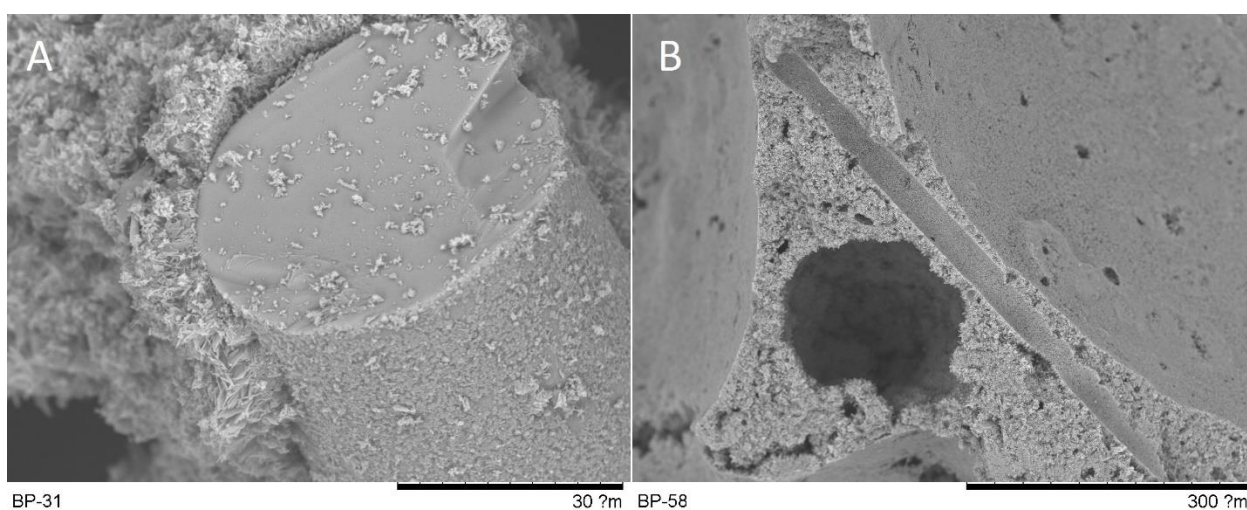
Mikrostruktuur

Poorid olid kõikides basaltfiibritega armeeritud proovides ligikaudu sfäärilised ega erinenud armeerimata materjalist leitud pooridest suuruselt ega kujult (Joonis 6). Järelikult ei mõjutanud fiibrite lisamine lähtesegu moodustamisel ei segu reoloogilisi omadusi ega pooride tekkimise kineetikat negatiivselt.



Joonis 6. A) Armeeringuta AAC tihedusega 231 kg/m^3 ; B) 1,25% basaltfiibrite lisandiga AAC tihedusega 229 kg/m^3 .

Tobermoriidi kristallide sisaldus oli kõigis basaltfiibritega armeeritud proovides sarnane. Valdavalt leiti plaatjaid ja pirdjaid kristalle, mis sarnanesid armeerimata poorbetoonist leitud kristallidega. Seega ei mõjuta fiibrite sisaldus ega koostis tekkiva tobermoriidi hulka ega kristallide kuju märkimisväärselt.



Joonis 7. A) Basaltfiibri karestunud pind betoonimaatriksis; B) Basaltfiibri jälg, millest paistab pooride põhjale iseloomulik tihe tobermoriidivõrgustik.

Armeeringuna kasutatud basaltfiibreid leiti peamiselt pooridevahelisest alast, paiknemas enamjaolt pooride põhja suhtes tangentsiaalselt. Fiibrid olid hästi disperseerunud ning enamasti ühekaupa. Kiudusid uurides selgus, et betoonimaatriksis oli nende pind selgelt karedamaks muutunud ning nende vahetusse lähedusse oli kasvanud palju tobermoriiti (Joonis 7). See kinnitab projekti algfaasis läbi viidud uuringu tulemusi, mille käigus leiti, et aluselises keskkonnas karboniseerub ning seeläbi karestub basaltfiibri pind [2]. Fiibri ja maatriksi vahelise sideme kõrgele tugevusele viitab ka see, et materjali murdumisel on purunenud kiud, mitte maatriks.

Survetugevus

Tabel 2. Basaltfiibritega armeeritud AAC katsekehad.

Katsekeha tähis	Fiibrite sisaldus [%]	ρ_{siht} [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]	σ [MPa]	σ_{norm} [MPa]	A_s [Pa·m ⁶ /kg ²]
BP-32	2,5	230	252	0,96	0,80	15,1
BP-33	5	230	241	0,90	0,82	15,6
BP-53	7,5	230	239	1,04	0,96	18,2
BP-54	7,5	230	269	1,45	1,06	20,0
BP-57	1,25	230	216	0,80	0,91	17,1
BP-58	1,25	230	229	1,04	1,05	19,8
BP-45	2,5	320	355	2,11	1,7	16,7

Basaltfiibritega armeeritud materjali mehaaniline efektiivsus oli selgelt suurem kui armeerimata sarnase tihedusega poorbetoonil, jäädes vahemikku $15,1 < A_s < 20,0$.

Suurem tugevus on erinevate mikrostruktuuris täheldatud tegurite - lisandi karestumine ja seostumine, pooride sfäärilisus, tobermoriidi valdavalt plaatjas kuju – kombineerumisest tulenev omadus. Mida rohkem mikrostruktuuris täheldatud tegureid viitavad korraga kõrgemale tugevusele, seda kõrgem on ka materjali survetugevus.

Kõige suurema survetugevusega materjal sisaldas 7,5% basaltfiibreid. Samas oli BP-58 korral ka 1,25% fiibrite sisaldusega materjali survetugevus peaaegu samaväärne. 2,5% ning 5% basaltfiibrite lisandiga AAC survetugevus oli veidi madalam, kuid selle võis põhjustada näiteks lähtesegu valmistamisel ebapiisav segamine, mis oli valmistamisprotsessi kõige vähem korratav osa. Asjaolu, et fiibrite sisalduse ja survetugevuse vahel ei ole selget seost, viitab sellele, et ka 1,25% lisandi sisaldus on piisav armeeriva efekti saavutamiseks ning katsetada

tasuks veelgi väiksema sisaldusega, et leida survetugevuse tõstmiseks vajalik optimaalne kiudude hulk.

Kõrgema sihttihedusega proove armeeriti basaltfiibritega vaid ühel korral (BP-45). Selle survetugevuse koefitsient on ligilähedane tugevaima armeerimata katsekeha sama näitajaga. Kuna aga madalama sihttiheduse juures saavutati basaltfiibrite abil oluliselt suurem survetugevuse koefitsient, on alust arvata, et BP-45 survetugevus ei ole maksimaalne ning basaltfiibrite armeeriv efekt ei avaldunud antud materjalis täielikult. Seega oleks ammendavate tulemuste saamiseks kuivtiheduse 320 kg/m^3 kohta vaja optimeerida materjali valmistusprotsessi, sooritades täiendavaid korduskatseid. Kuna arendusprojekti eesmärgiks oli seatud sihttihedus 230 kg/m^3 , siis valmistati kõrgema sihttihedusega poorbetooni vähem kui madalama sihttihedusega materjali.

3.4. Kivivillaga armeeritud AAC

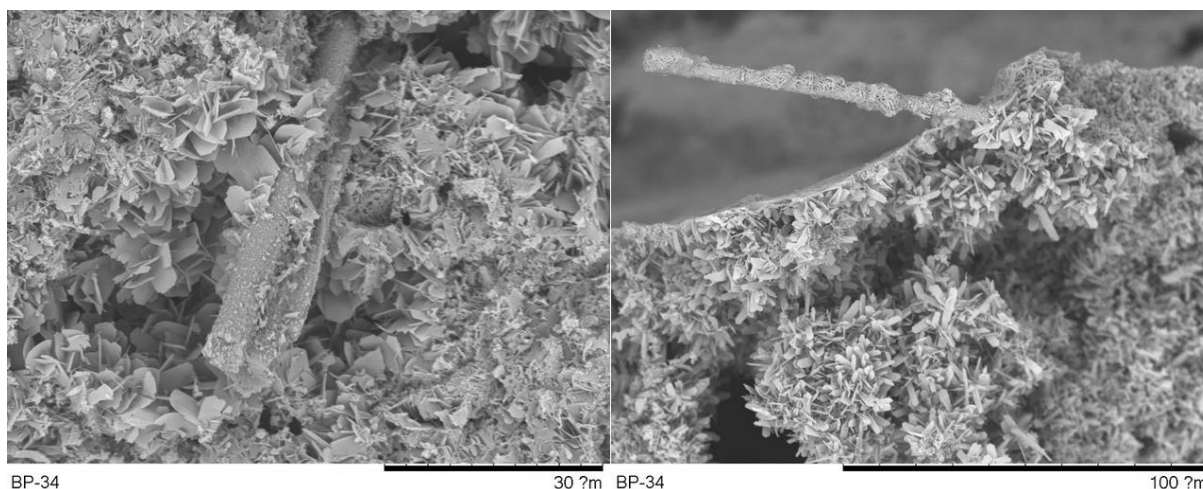
Toorikute valmistamiseks kasutati PAROC eXtra soojustusplaati, millest valmistati käsitsi ette võimalikult vähekoaguleerunud fiibrid. Fiibrid lisati segusse pärast mõlema slammi ja poole ettenähtud koguse vee omavahelist homogeniseerimist. Pärast järgnenud tavalisest veidi pikemat segamist selgus, et kivivilla kiud ei koaguleeru lähtesegus, jaotuvad suhteliselt homogeenselt ning märguvad hästi. Valminud toorikutel ei täheldatud visuaalseid erinevusi armeerimata materjaliga võrreldes.

Mikrostruktuur

Kivivilla armeeriva efekti mikrotasandil uurimiseks võrreldi proove BP-34 (2,5% lisandit) ja BP-42 (5% lisandit) ning armeerimata proovi BP-51. Kõigi nimetatud proovide kuivtihedus oli ligikaudu 240 kg/m^3 ning lähteretsept sama, kui lisand välja arvata.

Joonisel 25 (LISA 2) on näha, et võrreldavates proovides on pooride suurusjaotus suhteliselt sarnane, mõlemas proovis on pooride keskmine diameeter umbes 1,3 mm ning poorid ligikaudu sfäärilised. Vaheseinad on proovides BP-42 ja BP-51 veidi paksemad ja ühtlasemad kui proovis BP-34. Samuti on BP-34 pooride põhjades palju väikeseid auke ning proovis BP-51 on enamikus poorides mõni suurem auk, kuid pooride põhjad on üldiselt siledad ja ühtlased. Materjaliproovide autoklaavimise tingimused olid sarnased, seega ei ole mikrostruktuuri erinevused tõenäoliselt tekkinud autoklaavimise tagajärjel.

Mõlemas kivivillaga proovis leidus suures koguses tobermoriiti, peamiselt plaatjal ning pirdjal kujul. Reageerimata liivaterade kogus ja jaotus ning tobermoriidikihi tihedus pooride põhjades olid uuritud proovidel sarnased.



Joonis 8. Kivivilla kiud AAC maatriksis.

Kivivill seostub autoklaavitud poorbetooniga suhteliselt hästi, kuna on koostiselt sarnane. Kivivillaga armeeritud proovide (BP-34, BP-42, BP-46) murdepindadel leidus lisandit palju ning sageli paiknesid 3-5 µm diameetriga fiibrid kimpudes. Kivivillaga proovid olid ainsad (kui välja arvata üksikud juhtumid aramiidkiududega proovides), milles leidus palju pooride sisse ulatuvaid fiibreid. Kuna pooride sees leiduvate fiibrite pinnale kasvas tihe, kuid õhuke tobermoriidi kiht ning fiibrite pind oli suhteliselt kare, on alust arvata, et kivivill seostub AAC maatriksiga hästi (Joonis 8). Seda kinnitavad ka pooridevahelisest alast leitud kiud, mille ümber oli samuti palju plaatjat tobermoriiti, ning asjaolu, et materjali murdumisel olid kiud purunenud, mitte maatriksist välja libisenud.

Survetugevus

Tabel 3. PAROC eXtra kivivillaga armeeritud katsekehade omadused.

Katsekeha tähis	Lisandi sisaldus [%]	ρ_{siht} [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]	σ [MPa]	σ_{norm} [MPa]	A_s [Pa·m ⁶ /kg ²]
BP-34	2,5	230	239	0,81	0,75	14,1
BP-42	5	230	241	0,98	0,89	16,8
BP-46	2,5	320	353	2,11	1,74	17,0

Võrreldes tabelis 3 leiduvaid andmeid proovi BP-51 andmetega näeme, et BP-34 oli selgelt väikseima survetugevusega. Proovide BP-42 ja BP-51 tugevusnäitajad olid peaaegu identsed,

mis viitab kivivilla minimaalsele armeerivale efektile sihttiheduse 230 kg/m³ korral. BP-34 madalamat survetugevust seletab vaheseinte ebaühtlane ning teistest veidi väiksem paksus ja suurem defektide arv. Samuti viitab madalamale survetugevusele pooride põhjade auklikkus, mis on tõenäoliselt seotud lähtesegu liigse veesisaldusega.

Kivivillaga armeeriti ka üks sihttihedusega 320 kg/m³ toorik (BP-46), mille survetugevuse koefitsiendi väärtus oli veidi kõrgem kui tugevaima armeerimata katsekeha sama näitaja.

Kivivilla lisamine autoklaavitud poorbetooni suurendas materjali survetugevust vaid marginaalselt. Kivivilla, kui armeeriva lisandi, sobivuse kontrollimiseks tuleks läbi viia täiendavaid katseid. Lisandi koguse mõju kohta materjali tugevusomadustele ei saa samuti liialt väikese korduskatsete arvu tõttu ammendavaid järeldusi teha.

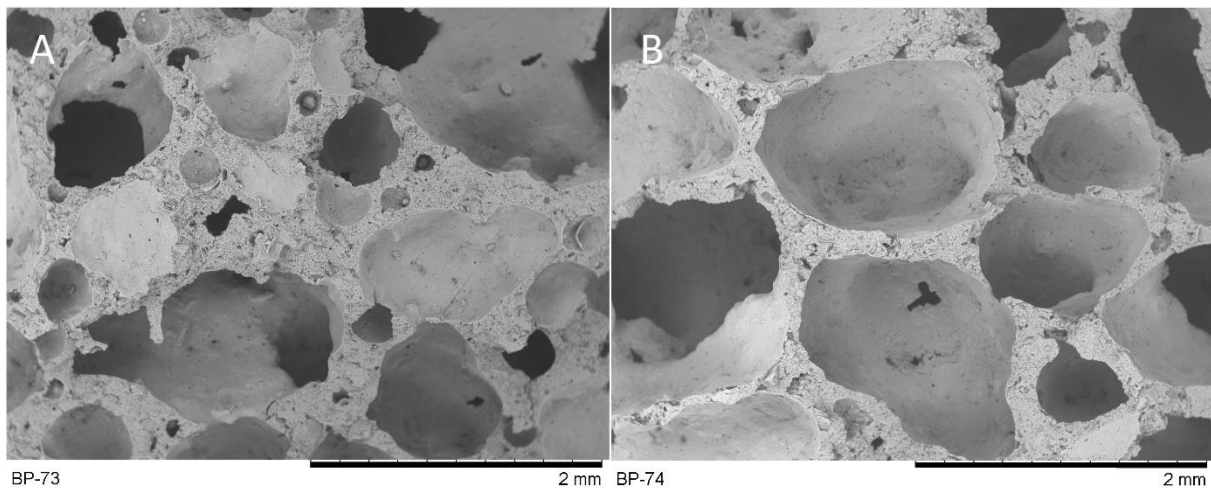
3.5. Aramiidfiibritega armeeritud AAC

Esimese aramiidfiibritega tooriku (BP-71) valmistamisel selgus, et 2,5% fiibrite hulk on liialt suur, sest mõjutab märkimisväärselt lähtesegu reoloogilisi omadusi, takistades oluliselt sfääriliste pooride tekkimist. Seetõttu lisati BP-71 lähtesegusse ligikaudu 60% rohkem vett kui tavaliselt. Järgmiste toorikute valmistamise käigus selgus, et optimaalne aramiidfiibrite sisaldus on alla 0,8%.

Mikrostruktuur

Fiibrite kõrge veeimavuse tõttu muutus toorikute BP-71 ja BP-72 segu juba valmistamise ajal veekoguse suurendamisest hoolimata liialt paksuks ning korrapärasest mullstruktuuri ei tekkinud. Seda kinnitavad ka mikrograafid (LISA 2, Joonis 26), kust on näha, et tekkinud poorid on massiliselt liitunud ja moodustanud kogu materjali läbivaid tunneleid. Pooride kuju on väga ebasümmeetriline ning keskmise diameetri mõõtmine on raskendatud. Moodustunud tühimike läbimõõdud varieeruvad sõltuvalt mõõtmise sihist vahemikus 0,4...2,5 mm.

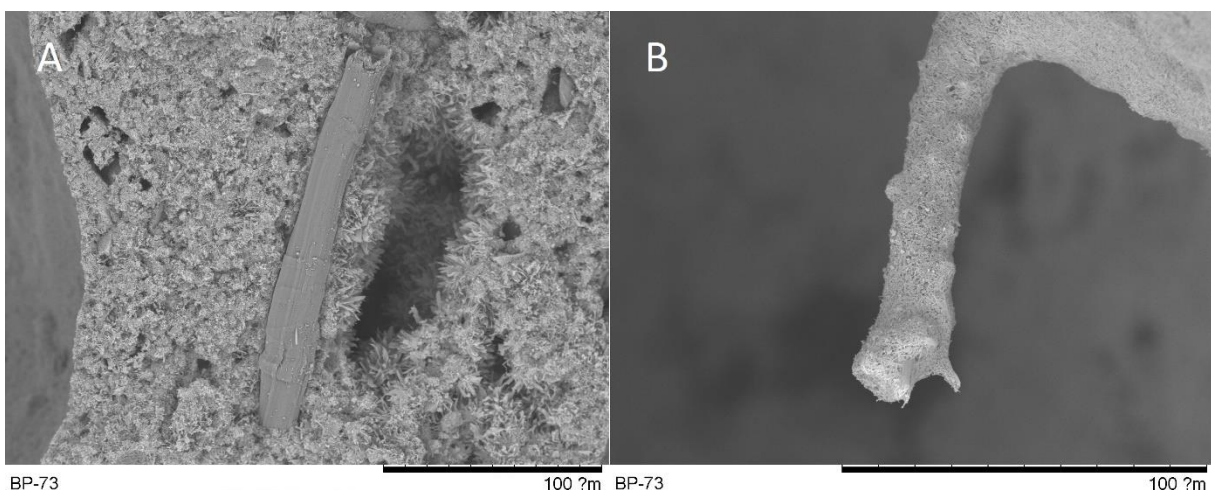
0,8% fiibrisisaldusega proovides (BP-73 ning BP-74) oli pooride kuju korrapärasem ning suuri pooride võrgustikke ei leidunud (Joonis 9). Kuigi materjalis olid poorid enamjaolt vaheseintega eraldunud, leidis nendeski proovides hulgaliselt liitpoore ning tekkinud poorid olid suhteliselt ebakorrapärase kujuga, viidates endiselt liialt viskoossele lähtesegule. Projekti raames väiksema lisandfiibrite sisaldusega autoklaavitud poorbetooni ei valmistatud, kuid poorstruktuuri parandamiseks oleks lisandi sisalduse vähendamine perspektiivikas.



Joonis 9. Aramiidfiibritega (0,8%) armeeritud AAC mikrograafid. A) BP-73; B) BP-74.

Proovides BP-71 ja BP-72 leidis hulgaliselt plaatjat ning vähem pirdjat tobermoriiti, nõeljaid tobermoriidi kristalle ei leitud. Proovidest BP-73 ja BP-74 tuvastati aga suurem kogus pirdjat tobermoriiti, kusjuures plaatjaid kristalle esines minimaalselt. BP-74 sisaldas ka pirdjas-nõeljaid tobermoriidi kristalle (LISA 2, Joonis 28 ja Joonis 29). BP-73 ja BP-74 sisaldasid ka ohtralt reageerimata räniosakesi, mille mõõtmed oli vahemikus 50...100 μm .

Proove BP-73 ja BP-74 autoklaaviti 24 tundi, millest 19 tunni vältel püsis autoklaavis rõhk 13 bar. Tuginedes mikrograafidele, on võimalik, et nende proovide autoklaavimise kestus oli liialt pikk või rõhk liialt kõrge ning tobermoriidi kristallid hakkasid autoklaavimise lõpus lagunema. Kuna ka plaatjad kristallid on tavaliselt veidi pikliku kujuga, on tõenäoline, et lagunedes moodustuvad plaatjatest kristallidest taas pirdja ning nõelja kujuga kristallid.



Joonis 10. Aramiidi kiud autoklaavitud poorbetoonis. A) Murdepinnal paiknev aramiidi kiud; B) Läbi poori seinä kasvanud kiud, mis on kaetud tobermoriidiga.

Aramiidkiudude seostumist betooniga iseloomustab joonis 10A, kust on näha, et murdepinnal paikneva kiu pind ei ole karestunud ning kiu ümber ei ole kasvanud tobermoriiti. Poori seina läbistava kiu pinnale (Joonis 10B) on kasvanud tobermoriit seetõttu, et kiu pinnal leiduvad defektid on käitunud kristallisatsioonitsentritena. Seega ei seostu aramiidfiibrid betooniga keemiliselt ning võimalik armeeriv efekt saavutatakse vaid mehaanilise kontakti kaudu, mis tekib ebakorrapärase kujuga fiibrite lõksustumisel betooni kivilinemise käigus.

Survetugevus

Tabel 4. Aramiidi kiududega armeeritud autoklaavitud poorbetooni katsekehade omadused.

Katsekeha tähis	Fiibrite sisaldus [%]	ρ_{siht} [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]	σ [MPa]	σ_{norm} [MPa]	A_s [Pa·m ⁶ /kg ²]
BP-72	1,25	230	252	0,80	0,67	12,6
BP-74	0,8	230	234	1,02	0,98	18,5
BP-71	2,5	320	281	0,62	0,81	7,9
BP-73	0,8	320	297	1,33	1,53	15,0

Aramiidarmeeringuga katsekehade tugevusomadusi uurides leiti, et 2,5% ning 1,25% lisandi sisaldus vähendab survetugevust oluliselt, nagu võis ebakorrapärase poorstruktuuri tõttu järeldada ka BP-71 ja BP-72 mikrograafidelt (LISA 2, Joonis 26). Katsekeha BP-73 survetugevuse koefitsient oli veidi väiksem armeerimata katsekehade samast näitajast, kuid BP-74, mille sihttihedus oli 230 kg/m³, survetugevuse koefitsient oli selgelt kõrgem kui armeerimata katsekehadel. Seega andis 0,8% aramiidfiibrite lisamine madalama sihttihedusega materjalile märkimisväärse armeeriva efekti. Toorikute BP-73 ja BP-74 mullstruktuur polnud nii korrapärane kui näiteks basaltfiibritega või armeerimata katsekehadel, seega on alust arvata, et saavutatud armeeriv efekt ei olnud maksimaalne ning materjali valmistamistingimuste optimeerimisel on võimalik välja töötada veelgi suurema survetugevuse koefitsiendiga materjal.

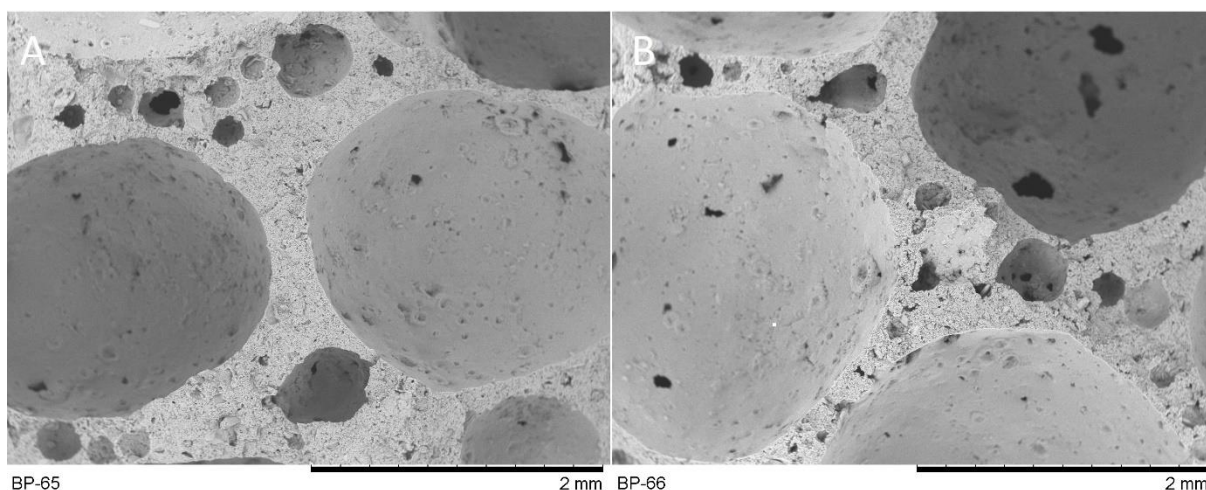
3.6. Metüülselluloosiga armeeritud AAC

Lisandina kasutatav tapeediliim lahustati enne segusse lisamist vees. Järgnes viieminutiline intensiivne segamine, misjärel kulges edasine protseduur tavaliselt. Metüülselluloosiga poorbetooni tekkisid oluliselt suuremad poorid kui teiste lisanditega AACsse. Pooride läbimõõt

võis suureneda kileja kihi tõttu, mis tekkis eelkerkimise ajal materjali pinnale ja takistas vesiniku lahkumist materjalist.

Mikrostruktuur

Kõige silmatorkavamaks erinevuseks metüülselluloosiga armeeritud AAC juures oli pooride suurus. Materjalis leidus hulgaliselt 2 mm suuruseid poore ning materjaliproovides BP-65 ja BP-66 ulatusid suuremate pooride diameetrid isegi üle 3 mm (Joonis 11). Poorid olid kõigis kõnealustes toorikutes sfäärilised, kuid nende suurusjaotus oli väga ebaühtlane. Suurte pooride vahel paiknes hulganisti alla 1 mm läbimõõduga poore. Erinevalt kõigist teistest uuritud proovidest leidus metüülselluloosi sisaldavate AAC proovide vaheseintes vähem korrapäratu kujuga suuremaid tühimikke.

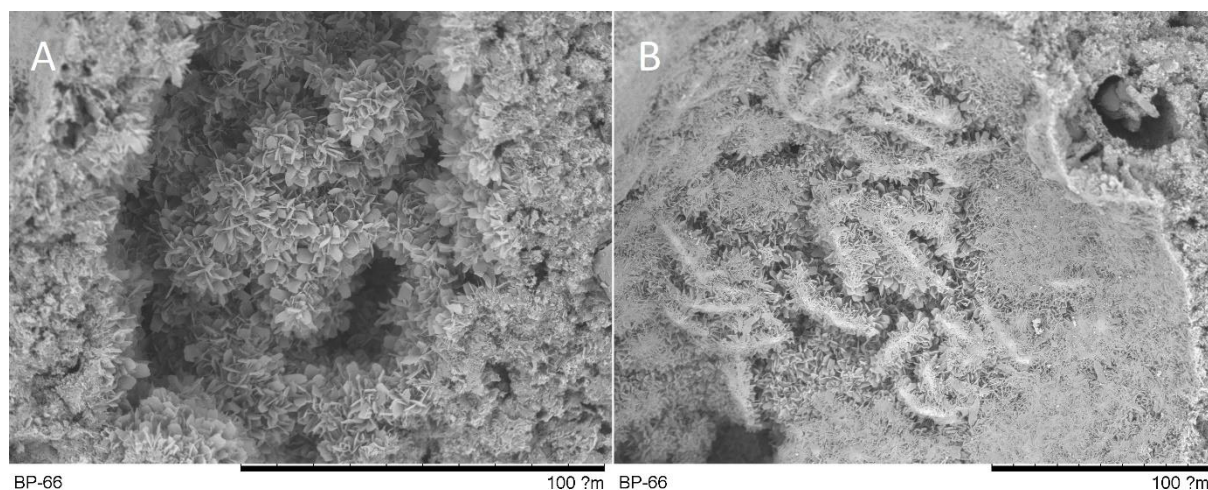


Joonis 11. Metüülselluloosi lisandiga armeeritud AAC struktuur.

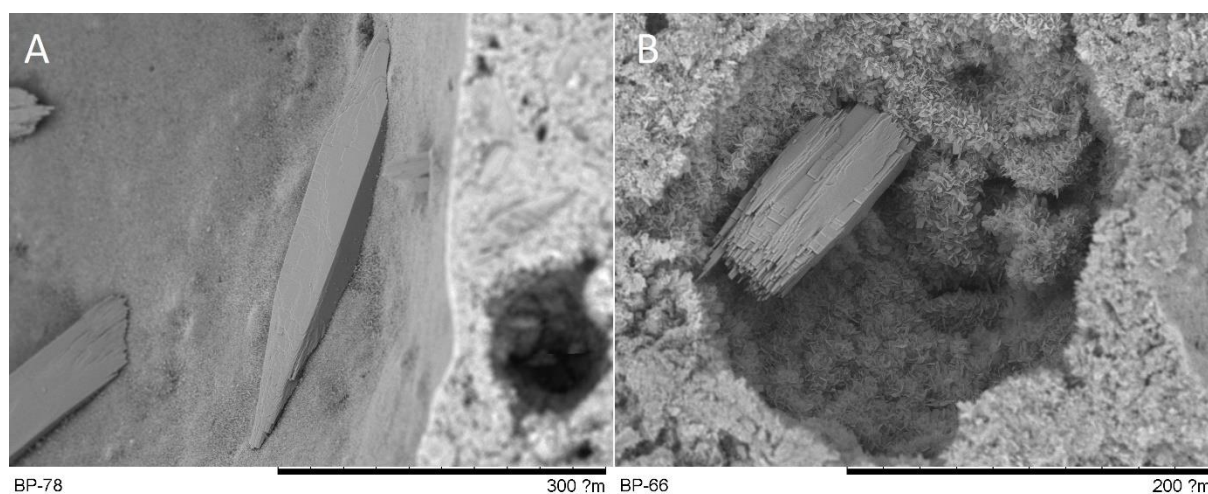
Joonisel 11 on näha ka hulgaliselt auke pooride seintes. Edasisel vaatlemisel selgus, et paljusid selliseid auke ümbritseb tihedamast tobermoriidist võru. Selle põhjuseks võib olla peatükis 1.9 kirjeldatud metüülselluloosi käitumine vees lahustumisel. Kivistumata segus pooride seina läheduses paiknev veega ümbritsetud lisand võis autoklaavis temperatuuri kasvades sadeneda ning tekitada poori seina defekti, millest hiljem kuivades jäi järele auk. Võru augu ümber võis tekkida suuremast vee kogusest lisandiosakese lähedal, mis tagas tobermoriidi tekkeks vajaliku hüdratatsiooni. Sarnase efekti tõttu võisid tekkida joonisel 12B nähtavad piklikud moodustised, mis olid samuti iseloomulikud vaid metüülselluloosiga proovidele.

Metüülselluloos ei mõjuta negatiivselt tobermoriidi kristallide tekkimist. Proovidest BP-65 ja BP-66 leiti ohtralt plaatjat ning vähem pirdjat tobermoriiti (Joonis 12A). Nõeljat tobermoriiti metüülselluloosiga armeeritud proovidest ei leitud.

Pooridevahelises alas leidus kõikides metüütselluloosiga proovides suhteliselt palju reageerimata liivaterasid, mis olid valdavalt kontsentreerunud paksematesse vaheseinte osadesse. Reageerimata liivaterade küllus viitab sellele, et lähteainena kasutatav liiv peaks parema tulemuse saavutamiseks olema peenemalt jahvatatud. Metüütselluloosiga armeeritud toorikute autoklaavimine kestis 23 tundi, millest 17 tunni vältel püsis autoklaavis rõhk 12...13 bar.



Joonis 12. BP-66: A) Plaatjad tobermoriidi kristallid; B) Piklikud moodustised poori põhjas.



Joonis 13. Monokristallid metüütselluloosiga armeeritud AACs.

Kõigis neljas metüütselluloosi sisaldavas materjaliproovis leidus laialdaselt poorisiseseid monokristalle, mille kuju ja tüüpiline asend erinesid paiguti töös [2] kirjeldatud kipsikristallidest. Proovis BP-78 leidus osades poorides joonisel 13A toodud kujuga kristalle, kuid oluliselt suuremaid ja tasapinnalisemaid. Monokristallide olemuse väljaselgitamiseks tehti EDX analüüs nii kasutatud tapeediliimile kui ka proovile BP-77.

Lisandaine EDX tulemused on toodud lisas 4. Leiti, et tapeediliim sisaldab umbes 40 µm suuruseid tädisaine osakesi, mis koosnevad peamiselt kaltsiumist, süsinikust ja hapnikust. Elementkaardistamisel leiti, et väike osa täiteainest sisaldab kaltsiumi asemel magneesiumit. Seega on alust järeldada, et tapeediliim sisaldab täiteainena CaCO₃ ning MgCO₃ osakesi.

Proovist BP-77 leitud monokristallide EDX analüüsil leiti erineva keemilise koostisega kristalle. Tulemustest järeldati, et osa leitud kristallidest sisaldab peamiselt kaltsiumit, hapnikku, süsinikku ja väävli ning osa väävli asemel räni. Kui väävli leidumine viitab selle paigutisele kontsentreerumisele poorides, siis suuremas koguses süsinikku sisaldavad kristallid on suure tõenäosusega tapeediliimi täiteaine osakesed, mille pinnal on õhuke räni sisaldav kiht. Seda kinnitab ka fakt, et paljud AAC mikrograafidelt leitud kristallid olid samuti ligi 40 µm suurusel. Proovidest leitud suuremate monokristallide EDX analüüsi tulemused paiknevad lisas 4.

Survetugevus

Tabel 5. Metüülselluloosiga armeeritud katsekehade omadused.

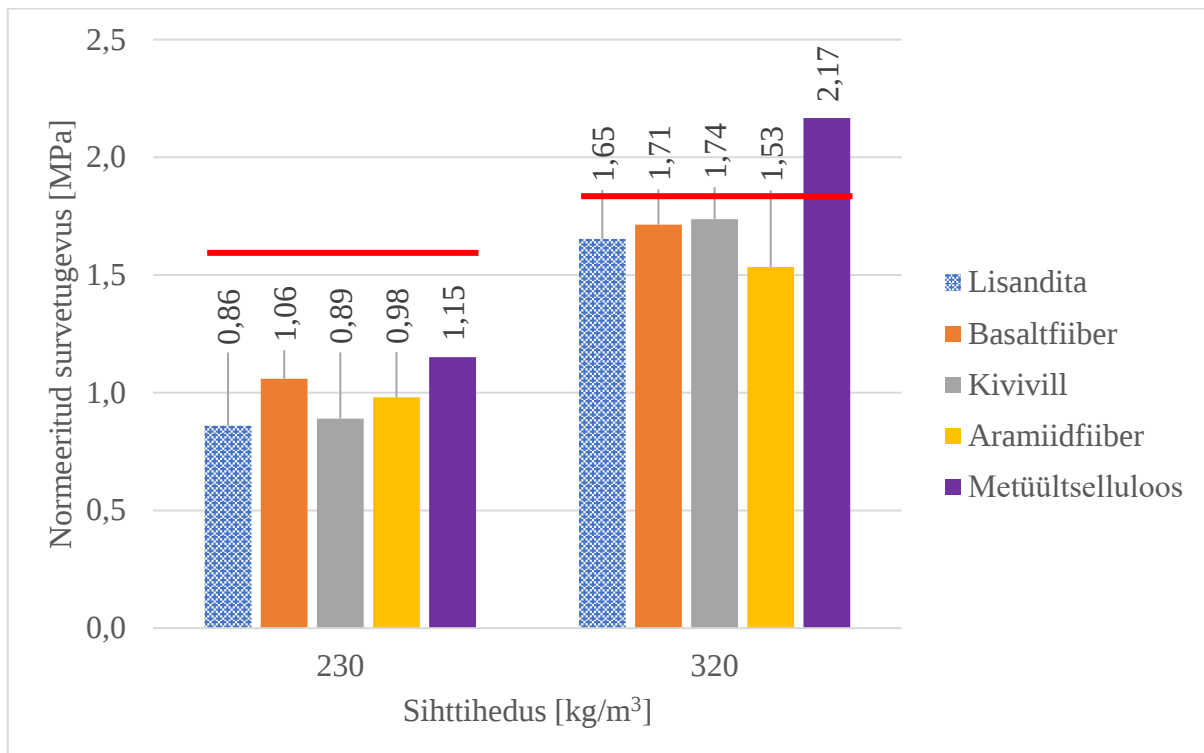
Katsekeha tähis	Lisandi sisaldus [%]	ρ _{siht} [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]	σ [MPa]	σ _{norm} [MPa]	A _s [Pa·m ⁶ /kg ²]
BP-66	1,25	230	212	0,93	1,10	20,7
BP-78	1,25	230	223	1,09	1,15	21,8
BP-65	1,25	320	298	1,88	2,17	21,2
BP-77	1,25	320	276	1,46	1,97	19,3

Kõikide metüülselluloosi lisandiga katsekehade survetugevuse koefitsient oli oluliselt kõrgem kui parimatel armeerimata katsekehadel, olles võrreldav vaid parimate basaltfiibritega armeeritud poorbetooniga. Kõrgele survetugevusele viitavad suured, aga sfäärilised poorid ning vaheseinad, mis materjali madalast tihedusest hoolimata olid suhteliselt paksud ja ühtlased. Kui enamjaolt oli sihttihedusega 230 kg/m³ AAC kuivtihedus sihttihedusest suurem, siis metüülselluloosiga materjaliproovid eristusid selle poolest, et nende tihedus oli sihttihedusest väiksem. Selle põhjuseks võis olla kerkimise ajal segumassiivi peale tekkinud kilejas kiht, mis takistas vesiniku välja difundeerumist materjalist ning suurendas seeläbi saadava materjali poorsust.

Katsekehade tugevusnäitajad on uuritud katsekehadest stabiilseimad ning survetugevuse koefitsient suurim. Lisaks oli metüülselluloosiga armeeritud materjali veidi parem töödelda, sest see tolmas-pudenes vähem.

3.7. Armeerivate lisandite mõju AAC omadustele

Lisandite mõju võrdlemiseks normeeriti uuritud katsekehade survetugevused (valem (6)). Autoklaavitud poorbetooni valmistamine on kapriisne ja täpsust nõudev protsess, mistõttu oli ka sarnase retsepti ja tingimustega valmistatud materjaliproovide omadustes suhteliselt suuri erinevusi. **Nii armeerimata kui ka iga lisandiga materjaliproovide grupi jaoks otsustati tulemuseks lugeda kõrgeima mehaanilise efektiivsusega materjaliproov selles grupis.** Selliselt käitudes on enim arvestatud õnnestunud katsete tulemusi. Madalama survetugevusega katsekehade korral ei olnud valmistusprotsess tõenäoliselt optimaalne, samas kui tugevamate katsekehade korral langes valmistamise käigus kokku rohkem sobivaid tegureid kõrgema survetugevuse saavutamiseks.



Joonis 14. Armeerivate lisanditega katsekehade normeeritud survetugevuse väärtused.

Punaste joontega on märgitud minimaalne tööstuslikul skaalal rahuldav survetugevus vastava tihedusklassi jaoks. Punaste joonte väärtused on vastavalt 1,6 MPa ning 1,8 MPa.

Saavutatud normeeritud survetugevuse väärtused on kujutatud joonisel 14. Baasväärtusteks on võetud vastava tihedusklassi tugevaima armeerimata katsekeha normeeritud survetugevus. Armeerimata katsekehasid valmistati kõrgema sihttihedusega kümme, kuid madalama sihttihedusega kõigest kolm. Seega on kõrgema sihttiheduse korral baasväärtuseks võetud katsekeha korral tõenäoliselt saavutatud teoreetilisele maksimumile lähedasem tulemus kui

madalama sihttiheduse korral, sest korduskatsete hulk on suurem. Absoluutsed survetugevuse väärtused on toodud tulpdiagrammil lisas 3 (Joonis 30).

Basaltfiibritega katsekeha normeeritud survetugevus oli sihttiheduse 230 kg/m³ korral 23% võrra ning kõrgema tihedusklassi korral 4% võrra kõrgem armeerimata katsekeha samast näitajast. Fiibrid seostuvad betooniga keemiliselt ega mõjuta valmistamisprotsessi negatiivselt, seega sobivad basaltfiibrid AAC armeerimiseks. Basaltfiibrite kasutamiseks tööstuses tuleks valmistada tööstuslikul skaalal katsepartiit, leidmaks sobiv kiudude pikkus, mis ei mõjutaks materjali lõikamisel toodete tolerantse ega pinna kvaliteeti.

Kivivill andis materjali survetugevusele mõlema tihedusklassi korral vaid marginaalse efekti, tõstes seda vaid kuni 5%. Kivivilla potentsiaali maksimeerimiseks ja kinnitamiseks armeeriva lisandina autoklaavitud poorbetoonis tuleks läbi viia täiendavaid korduskatseid, kuna joonisel 14 toodud andmed põhinevad vaid üksikutel katsekehadel. Kivivillal on keemilise seostumise tõttu betooniga potentsiaali armeeriva lisandina kasutamiseks.

Aramiidfiibritega armeeritud katsekehade tulemused põhinevad kumbagi tihedusklassi jaoks ühel katsekehal ega ole seetõttu statistiliselt ammendavad. Kuigi madalama sihttiheduse korral oli katsekeha normeeritud survetugevus 14% kõrgem armeerimata katsekeha samast näitajast, ei saavutatud statistiliselt tugevama baasväärtusega kõrgema tihedusklassi juures aramiidfiibrite lisamisega survetugevuse tõusu. Kuna aramiidfiibrid betooniga keemiliselt ei seostu, on nende kasutamise perspektiivikus AACs küsitav, kuid kindlasti väärt edasi uurimist.

Metüülselluloosi lisamine materjali suurendas survetugevust 230 kg/m³ sihttiheduse juures 34% võrra ning 320 kg/m³ katsekehade korral 31% võrra. Metüülselluloos ei ole fiibriline materjal ning on mõõtmelisel suurusjärke väiksem kui kasutatud fiibrilised lisandid. Seetõttu ei leitud SEM mikrograafidelt lisandit ega otseseid vihjeid selle seostumiseks. Leiti, et metüülselluloosi kasutamine muudab materjali poorsust, poorstruktuuri ning selle korrapärasust. Enne tööstuslikul skaalal proovipartiide valmistamist tuleks uurida ka puhta metüülselluloosi mõju autoklaavitud poorbetoonile. Tegemist on uuritud lisanditest tööstuslikul skaalal kasutamiseks enim potentsiaali omava lisandiga, kuna oht toodete pinna kvaliteedi halvendamiseks on madal.

Kokkuvõte

Töö eesmärgiks oli leida seosed armeeritud autoklaavitud poorbetooni valmistamisprotsessi, mikrostruktuuri ja survetugevuse vahel. Selleks uuriti ligi 50 laboris valmistatud autoklaavitud poorbetoonist materjaliproovi, viies läbi survetestid ning uurides neid skaneeriva elektronmikroskoobiga. Survetugevuse tõstmiseks oli valmistamise käigus materjali lisatud basalt- või aramiidfiibreid, kivivilla või metüülselluloosi.

Esmalt töötati välja metoodika survetugevuse korratavaks mõõtmiseks, mis hõlmas vajalike seadmete ja abivahendite valmistamist, silindriliste katsekehade valmistamist ning survetesti ajaks katsekehade otsapindade katmist silikoonist otsakutega. Mõõtmismetoodika valideerimiseks viidi surveteste läbi lisaks ka Eesti Maaülikoolis ja AS Bauroc Kunda tehases.

Toorikutest valmistati skaneeriva elektronmikroskoobiga uurimiseks eraldi proovid. SEM uuringul vaadeldi proovide mikrostruktuuri ning mõõdeti ligikaudsed iseloomulike struktuurielementide (poorid, vaheseinad, monokristallid jne) suurused ja uuriti lisandfiibrite olemasolul nende paiknemist ja seostumist maatriksiga.

Suurima survetugevuse kasvu tekitas metüülselluloos, suurendades survetugevust 230 kg/m^3 sihttihedusega katsekehade korral 34% võrra. Basaltfiibrid suurendasid materjali survetugevust sama sihttiheduse korral 23% võrra. Nii basaltfiibrid kui ka kivivill ei mõjutanud materjali struktuuri kujunemist negatiivselt ning seostusid materjaliga hästi. Kivivill tõstis materjali survetugevust sõltumata sihttihedusest vaid kuni 5% võrra. Aramiidfiibrid tõstsid sihttiheduse 230 kg/m^3 korral materjali survetugevust 14% võrra, kuid 320 kg/m^3 korral langetasid survetugevust 7% võrra. Selle lisandi kasutamine AAC armeerimiseks on küsitav, kuna kiud ei seostunud betooniga keemiliselt ning takistasid valmistamisprotsessi käigus normaalse poorstruktuuri tekkimist. Metüülselluloosiga poorbetoonis täheldati kõige suuremaid poore ning ebaühtlast pooride suurusjaotust. Lisaks olid vaheseinad suhteliselt paksud ning poorid sfäärilised, mis on tõenäoline põhjendus kõigist katsekehdest kõrgeimale ning stabiilseimale survetugevusele. Töö tulemusena seostati omavahel armeerivate lisandite mõju AAC mikrostruktuurile, survetugevusele ja valmistamisprotsessile, seega eesmärk täideti.

Töö lõi head eeldused senisest kõrgema survetugevuse koefitsiendiga (madalama tiheduse ja kõrgema survetugevusega) autoklaavitud poorbetooni tööstuslikuks valmistamiseks. Edasi tuleks uurida täpsemalt töös käsitletud lisandite mõju erinevate AAC toodete kvaliteedile ja pikaajalisele vastupidavusele, samuti optimeerida edasi parimate lisandite jaoks AAC valmistusretsepti.

Kasutatud kirjandus

- [1] (2010). EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV 2010/31/EL, 19. mai 2010, hoonete energiatõhususe kohta.
- [2] Otsus, M., (2017). Bakalaureusetöö. „Autoklaavitud poorbetooni struktuuri ja survetugevuse sõltuvused“, Tartu Ülikool.
- [3] Kivits, S.-L., (2018). Magistritöö. „Eesti kliima mõju autoklaavitud poorbetoonist müürikivide mahumuutustele ja tugevusnäitajatele.“, Tallinna Tehnikaülikool.
- [4] Koitmäe, K., (2015). Magistritöö. „Eestis kasutatavate autoklaavitud poorbetoonide soojuslikud ja niiskuslikud omadused.“, Tallinna Tehnikaülikool.
- [5] Schober, G., (2011). „Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties“, *Cem. Wapno, Bet.*, nr SPEC.ISSUE, lk 39–43.
- [6] (2011). „Mis on poorbetoon?“, *Ajakiri Ehitaja*.
- [7] Tootja poolt antud info projekti läbiviimiseks.
- [8] AS Bauroc, „Firmast - Ehitusplokid ja müüriplokid - Roclite“. <https://roclite.ee/firmast/>. Vaadatud: 05.04.2019.
- [9] „Poorbetooni valmistamine“. <https://bauroc.ee/tooted/materjalist/poorbetooni-valmistamine/>. Vaadatud: 17.11.2018.
- [10] Eskusson, K., (2001). *Autoklaavitud gaasilikaat*. Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus.
- [11] Suwan, T. ja Wattanachai, P., (2017). „Properties and Internal Curing of Concrete Containing Recycled Autoclaved Aerated Lightweight Concrete as Aggregate“, *Hindawi Adv. Mater. Sci. Eng.*, kd 2017.
- [12] van Boggelen, W., (2014). „History of Autoclaved Aerated Concrete: The short story of a long lasting building material“, *Aircrete Europe*. <https://www.aircrete.com/wp-content/uploads/2018/07/W.M.-van-Boggelen-History-of-Autoclaved-Aerated-Concrete.pdf>. Vaadatud: 24.02.2019.
- [13] Rogers, W., (2013). *Healthcare Sterilisation: Introduction and Standard Practices*, 1. tr. Portland: Smithers Rapra Technology.

- [14] Eriksson, J. A., (1923). „Method of manufacturing porous material from portland cement.“, US1819018A.
- [15] AS Bauroc kodulehekülg. <https://bauroc.ee/>. Vaadatud: 30.03.2019.
- [16] Xella Group, (2018). „Multipor Insulation Guide: Sustainable Design and Insulation“. Xella Baustoffe GmbH, lk 36,104.
- [17] „Aircrete - Super Smooth Cutting Line“, *Aircrete Europe*. <https://www.aircrete.com/wp-content/uploads/2018/08/Aircrete-Cutting-Technology.pdf>. Vaadatud: 24.02.2019.
- [18] Callister Jr., W. D. ja Rethwisch, D. G., (2011). *Materials Science and Engineering*, 9. tr.
- [19] „ASTM C39 / C39M - 18 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens“, *astm.org*. <https://www.astm.org/Standards/C39.htm>. Vaadatud: 17.03.2019.
- [20] Hamad, A. J., (2017). „Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres“, *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, kd 29, nr 4, lk 373–380.
- [21] „Size of Test Cylinder“, *American Concrete Institute*. <https://www.concrete.org/tools/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=14>. Vaadatud: 17.03.2019.
- [22] Straube, B., Langer, P., ja Stumm, A., (2008). „Durability of Autoclaved Aerated Concrete“, Istanbul.
- [23] Medeiros, R., Pereira, B. A., Sipp, G., ja Delfino, T., (2017). „Investigation of the influence of different surface regularization methods for cylindrical concrete specimens in axial compression tests“, *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, kd 10, nr 3, lk 568–591.
- [24] Pachero, J. N., de Brito, J., Chastre, C., ja Evangelista, L., (2019). „Probabilistic Conversion of the Compressive Strength of Cubes to Cylinders of Natural and Recycled Aggregate Concrete Specimens“, *MDPI - Mater.*, kd 12, nr 280.
- [25] Sinica, M., Sezeman, G. A., Mikulskis, D., Kligys, M., ja Česnauskas, V., (2014). „Impact of complex additive consisting of continuous basalt fibres and SiO₂ microdust on strength and heat resistance properties of autoclaved aerated concrete“, *Constr. Build. Mater.*, kd 50, lk 718–726.

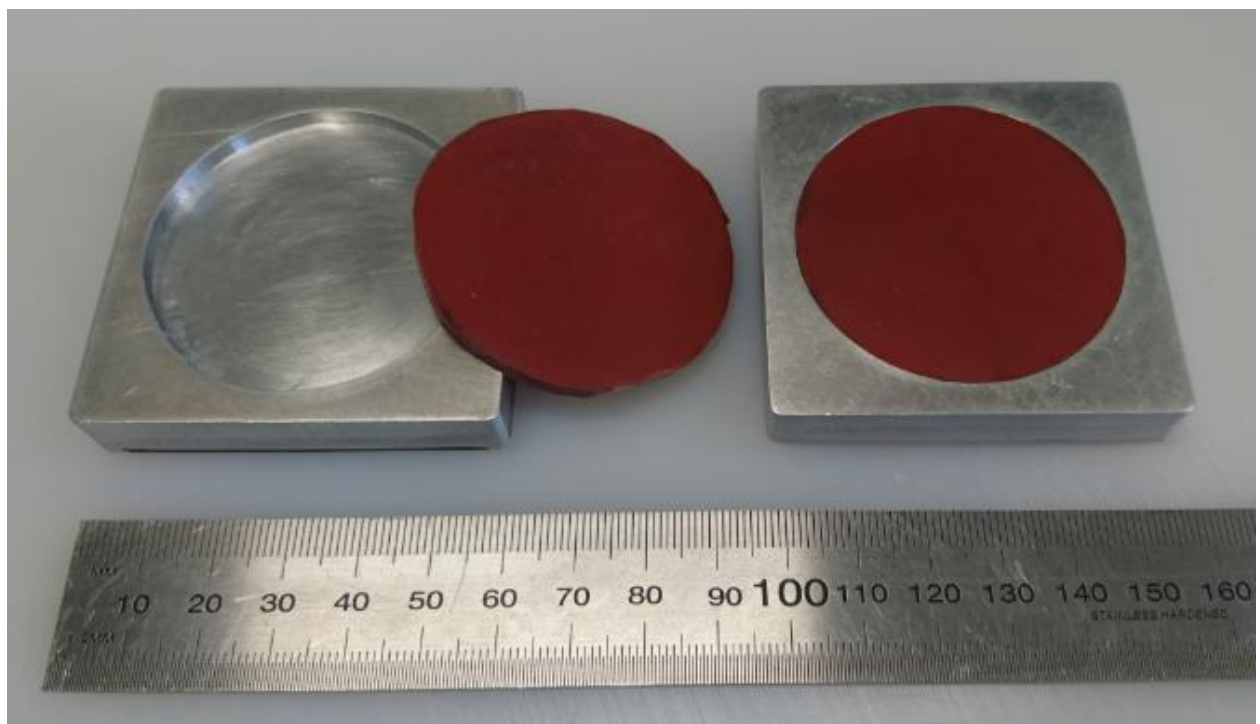
- [26] Merlino, S., Bonaccorsi, E., ja Armbruster, T., (1999). „Tobermorites; their real structure and order-disorder (OD) character“, *Am. Mineral.*, kd 84, nr 10, lk 1613–1621.
- [27] Qu, X. ja Zhao, X., (2017). „Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review“, *Constr. Build. Mater.*, kd 135, lk 505–516.
- [28] Mitsuda, T., Sasaki, K., ja Ishida, H., (1992). „Phase Evolution during Autoclaving Process of Aerated Concrete“, *J. Am. Ceram. Soc.*, kd 75, nr 7, lk 1858–1863.
- [29] Pehlivanlı, Z. O., Uzun, İ., ja Demir, İ., (2015). „Mechanical and microstructural features of autoclaved aerated concrete reinforced with autoclaved polypropylene, carbon, basalt and glass fiber“, *Constr. Build. Mater.*, kd 96, lk 428–433.
- [30] Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B., ja Saradar, A., (2018). „Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC)“, *Constr. Build. Mater.*, kd 162, lk 321–333.
- [31] Pehlivanlı, Z. O., Uzun, İ., Yücel, Z. P., ja Demir, İ., (2016). „The effect of different fiber reinforcement on the thermal and mechanical properties of autoclaved aerated concrete“, *Constr. Build. Mater.*, kd 112, lk 325–330.
- [32] Price, M. ja Walsh, K., (2005). *Looduse taskuraamat - Kivimid ja mineraalid*.
- [33] Sharma, P., (2016). „An Introduction to Basalt Rock Fiber and Comparative Analysis of Engineering Properties of BRF and Other Natural Composites“.
- [34] de Fazio, P., (2011). „Basalt fiber: from earth an ancient material for innovative and modern application“. <http://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/EAI/anno-2011/indice-world-view-3-2011/basalt-fiber-from-earth-an-ancient-material-for-innovative-and-modern-application>. Vaadatud: 09.04.2019.
- [35] Loog, O., Timotheus, H., ja Järv, J., (2012). *Orgaanilised polümeerid*. Tartu Ülikooli Kirjastus.
- [36] „What is Aramid?“, *Teijin Aramid*. <https://www.teijinaramid.com/en/technology/what-is-aramid/>. Vaadatud: 09.04.2019.
- [37] Hemgren, P. ja Wannfors, H., (2003). *Maja ABC*. Sinisukk.
- [38] „Knauf Insulation TS - Manufacture of Mineral Wool Insulation Materials“. <https://www.ki-ts.com/en/our-competences/production/>. Vaadatud: 14.04.2019.

- [39] Raado, L.-M., (2018). *Ehitusmaterjalid*. Tallinn: SA Professor Karl Öigeri Stipendiumifond.
- [40] McGraw-Hill, (2003). *Dictionary of Materials Science*. Mark D. Licker.
- [41] Gorobinskay, V., Kravtchenko, I., ja Zabava, L., (1999). „Continuous Mineral Fibre - A Reinforcing Element for Composites“, *Int. Comm. Compos. Mater.* 12, lk 10.
- [42] Li, X.-G., Huang, M.-R., ja Bai, H., (1999). „Thermal decomposition of cellulose ethers“, *J. Appl. Polym. Sci.*, kd 73, nr 14, lk 2927–2936.
- [43] „Methylcellulose“, *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Methyl_cellulose. Vaadatud: 14.04.2019.
- [44] AS Bauroc tootekataloog (2019).

LISA 1. Fotod



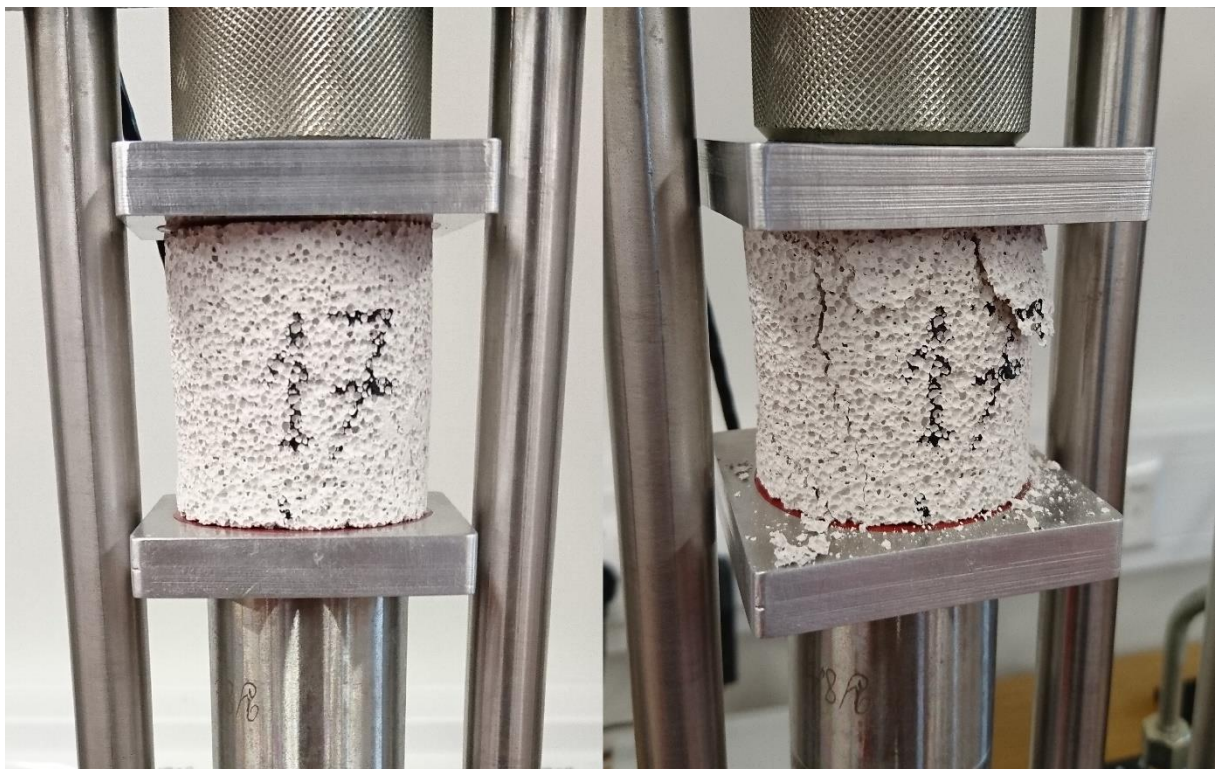
Joonis 15. Autoklaavi kest (paremal) ning kahe tooriku üheaegseks autoklaavimiseks konstrueeritud riiul. Foto: Artur Kaljo



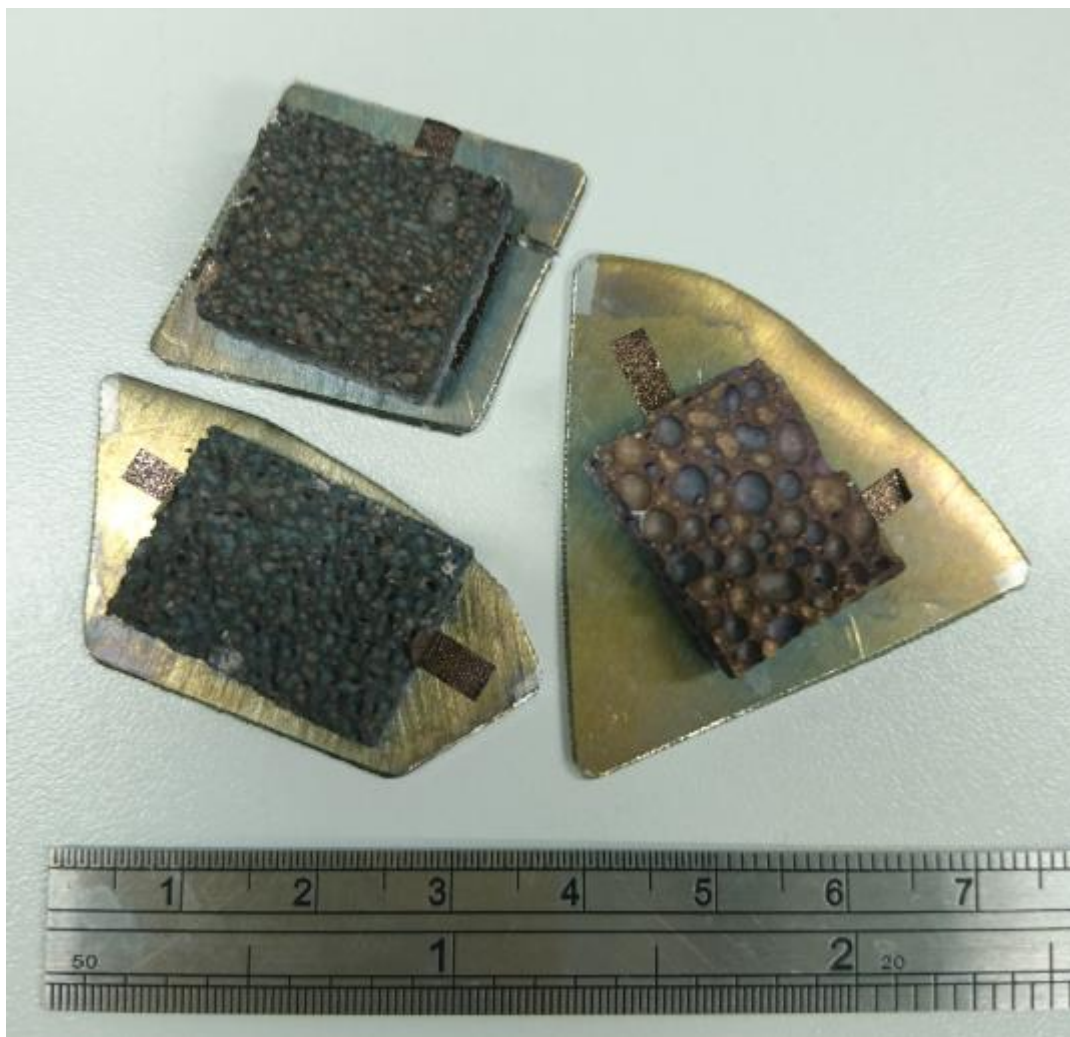
Joonis 16. Survetestide läbiviimiseks kasutatud silikoonist otsakud alumiiniumist vormiga.



Joonis 17. Seinaefekt autoklaavitud poorbetoonis. Vormiga kerkimise ajal kontaktis olnud välispinnale on tekkinud palju suuremad poorid kui sisekihtidesse.

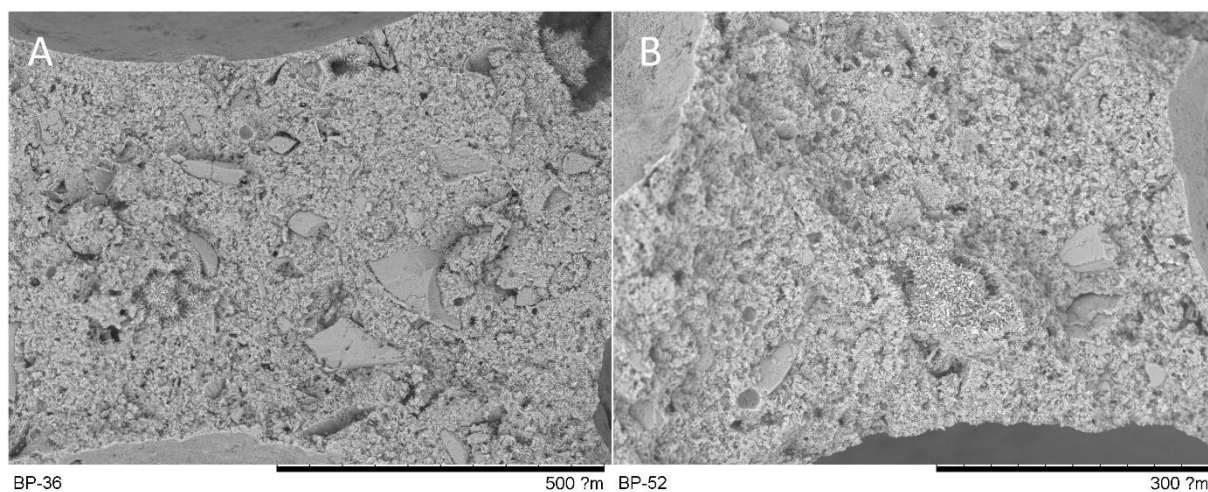


Joonis 18. Katsekeha BP-21 enne ja pärast survetesti teostamist.

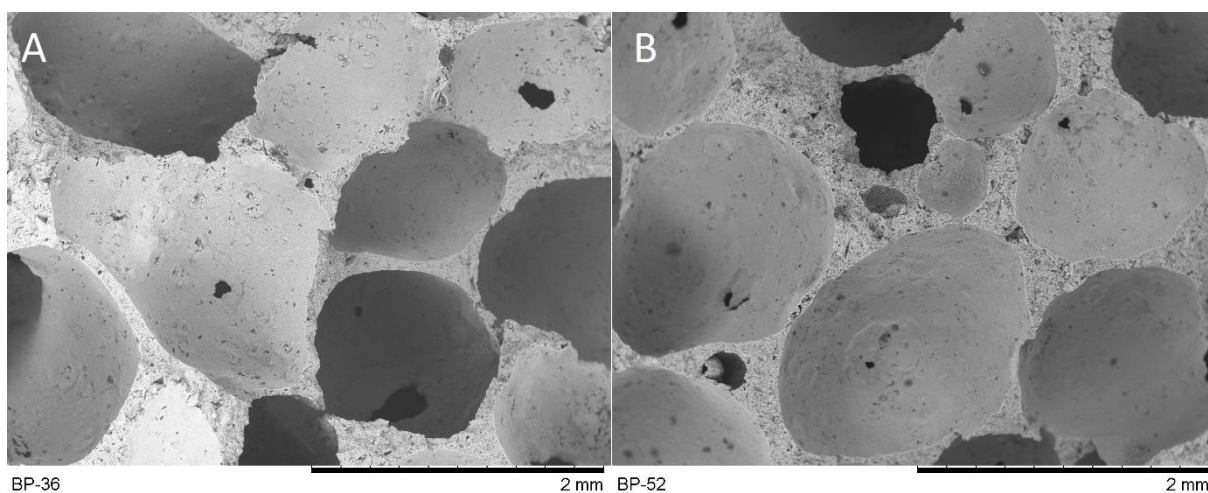


Joonis 19. Skaneeriva elektronmikroskoobiga vaatlemiseks sobilik AAC proov. Proovi pind on violetjas-kuldne, kuna selle pinnale on kantud 10 nm paksune kulla kiht.

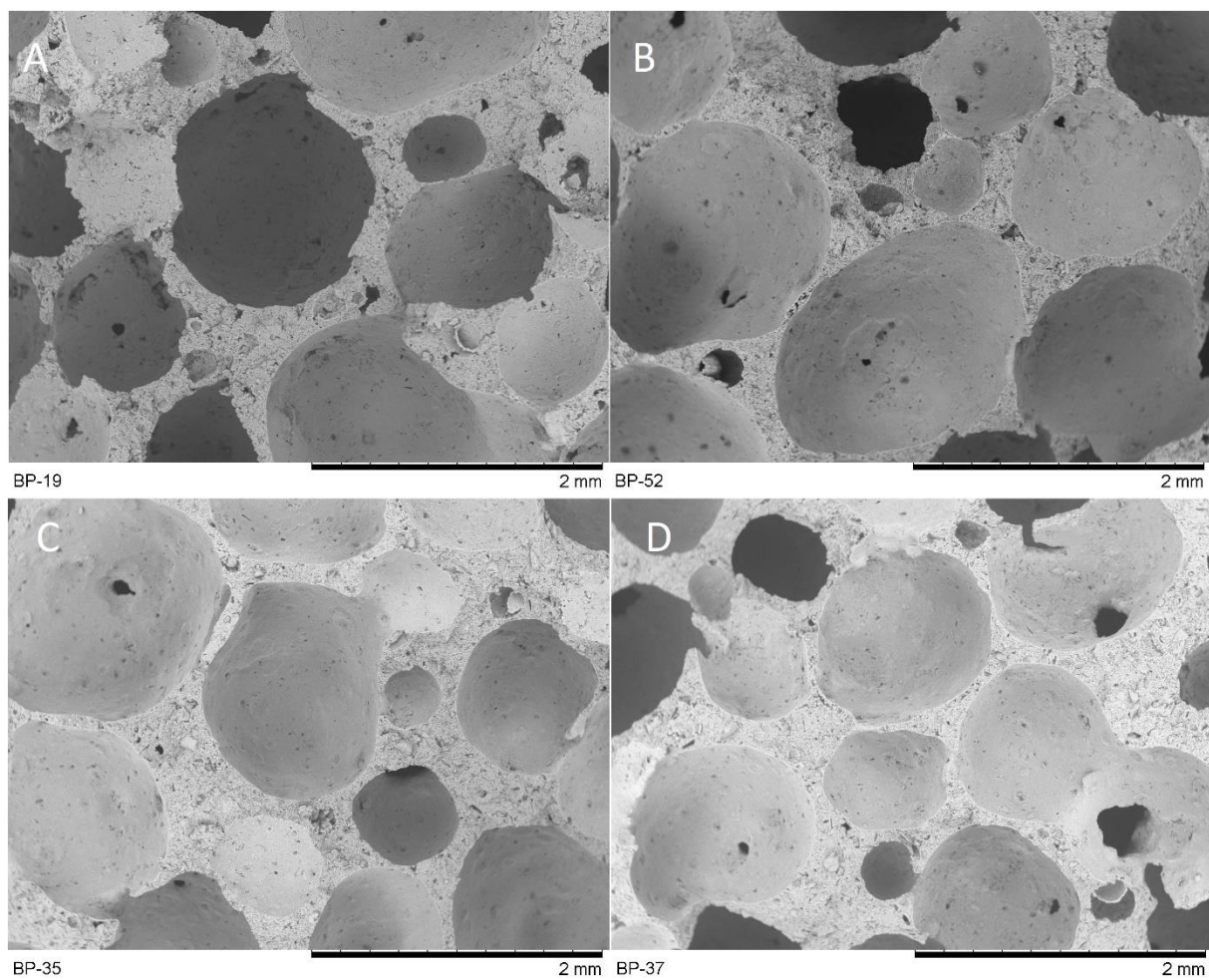
LISA 2. Skaneeriva elektronmikroskoobi mikrograafid



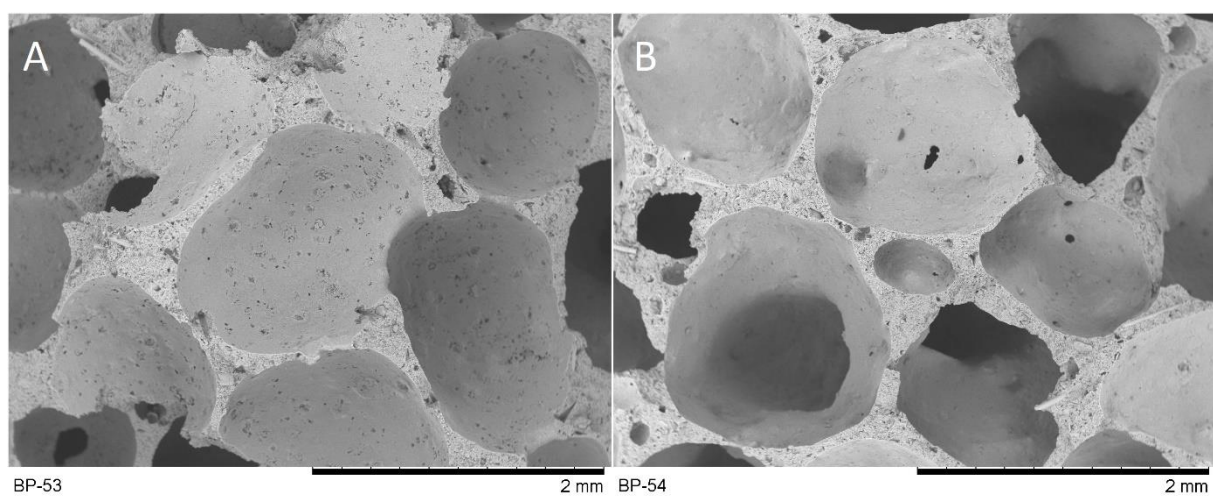
Joonis 20. Reageerimata liivaterade kogus pooridevahelises alas A) madalama survetugevusega materjalis ja B) kõrgema survetugevusega materjalis.



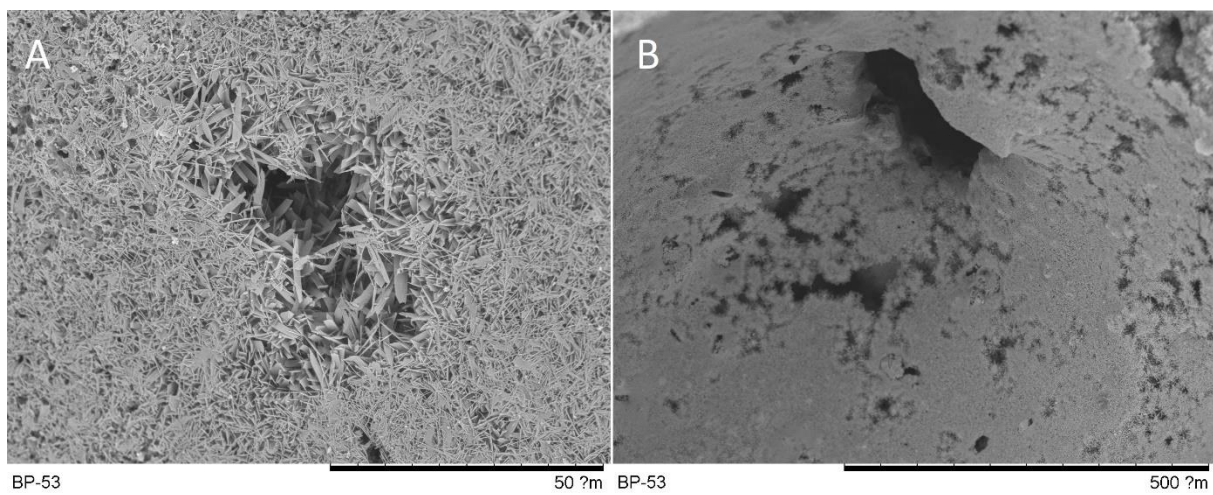
Joonis 21. Üldvaade A) madalama survetugevusega materjali struktuurile ja B) kõrgema survetugevusega materjali struktuurile.



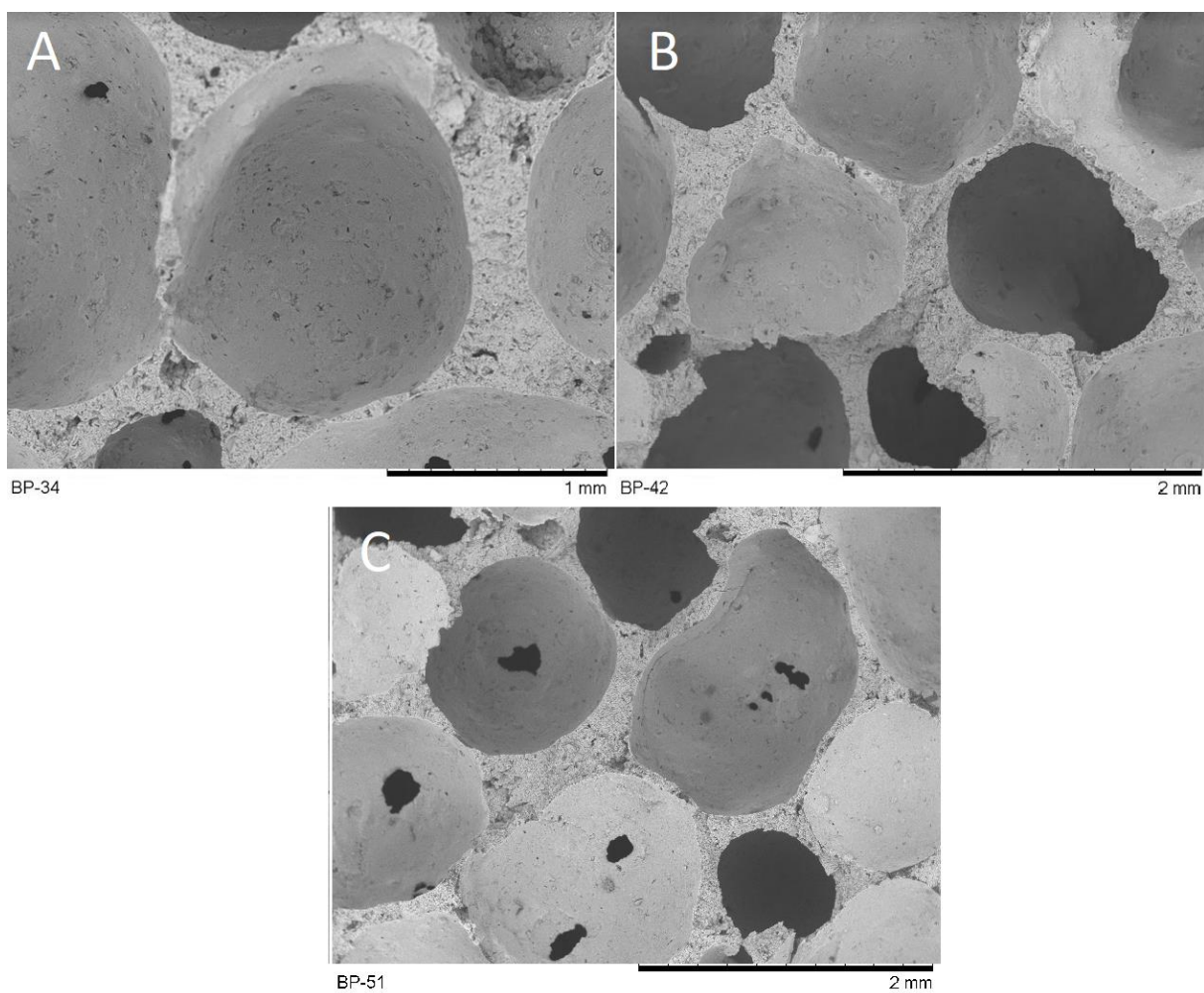
Joonis 22. Poorstruktuur armeerimata proovides ($\rho_{\text{siht}} = 320 \text{ kg/m}^3$). A) ning B) kujutavad kõrgema survetugevusega proove ning C) ja D) madalama survetugevusega materjali. Madalama survetugevusega materjalis on pooride põhjades rohkem väikeseid auke.



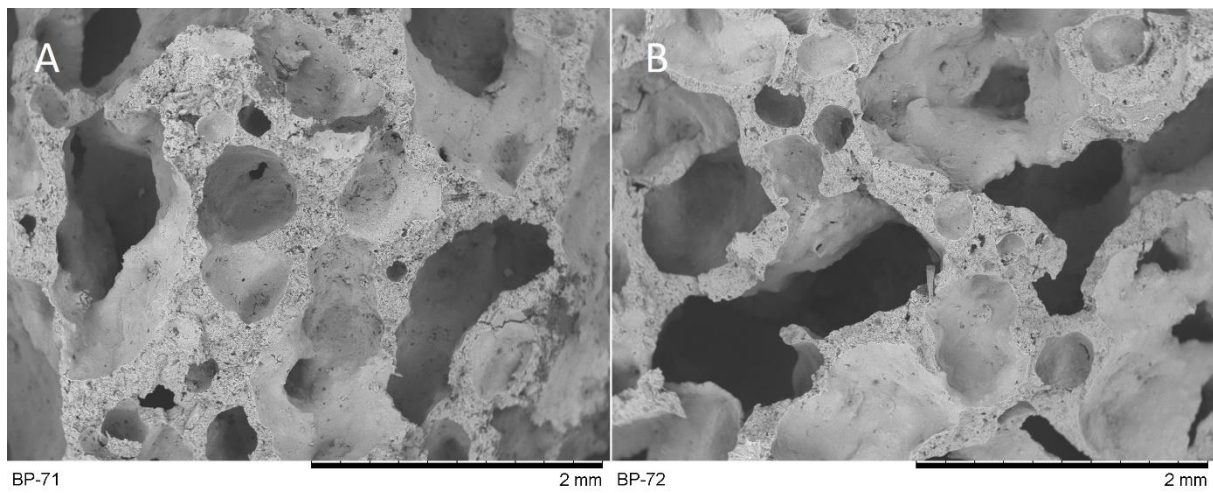
Joonis 23. A) BP-53 B) BP-54



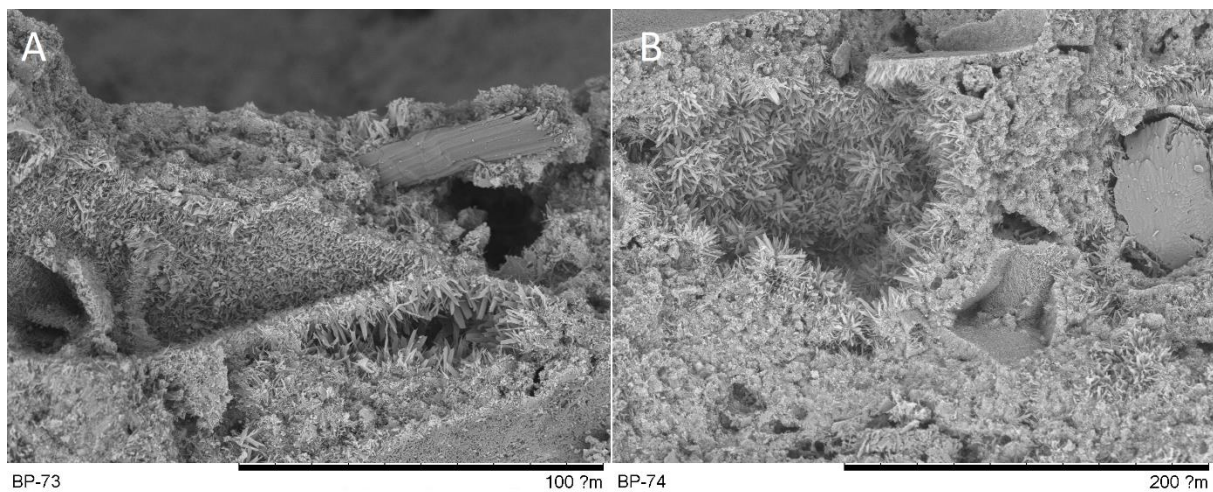
Joonis 24. Proov BP-53. A) Auk poori põhjas. B) Ulatuslikult hävinud põhjaga poor.



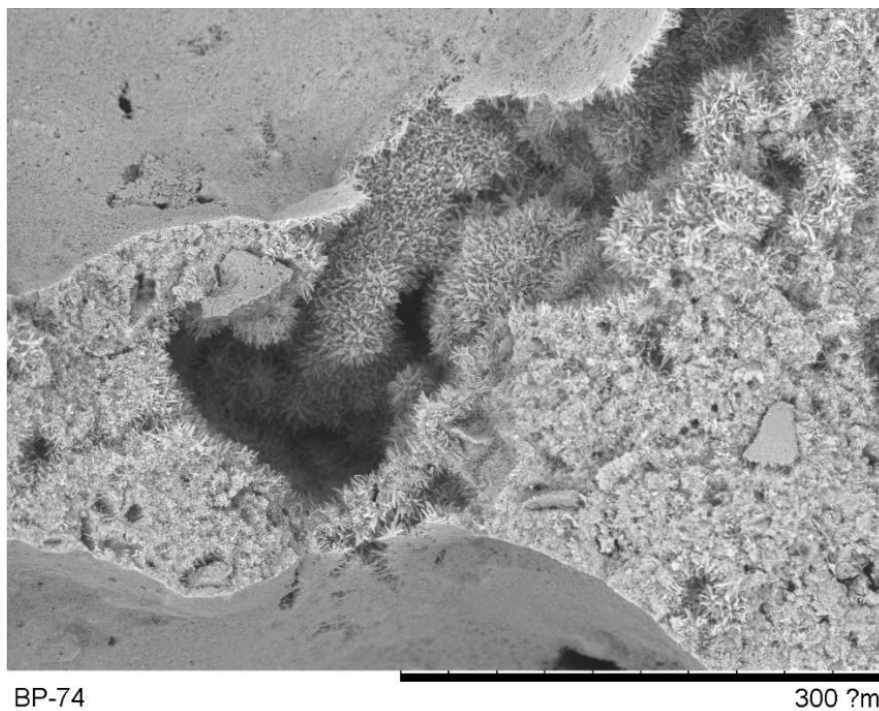
Joonis 25. A) BP-34; B) BP-42; C) BP-51



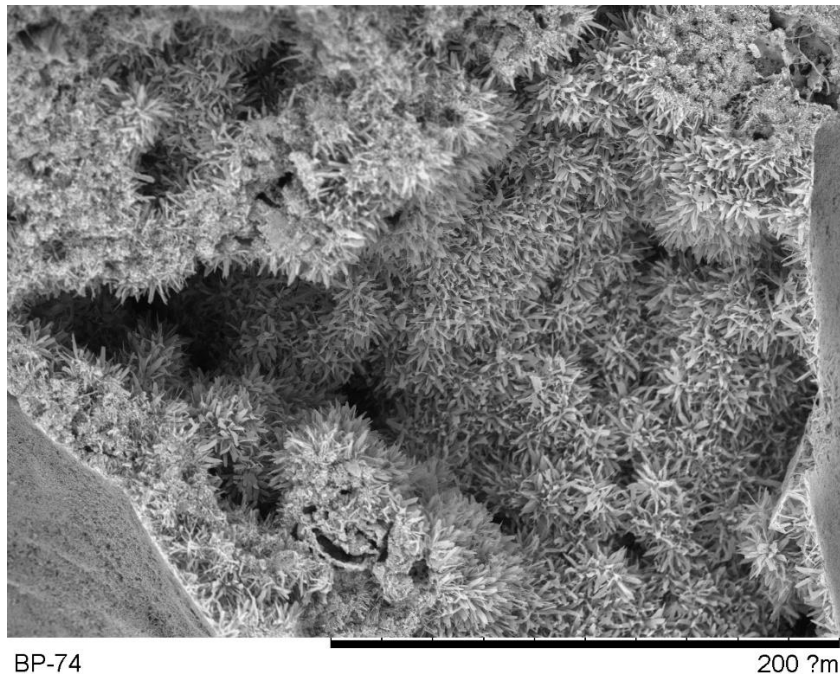
Joonis 26. A) BP-71 (2,5% aramiidfiibreid); B) BP-72 (1,25% aramiidfiibreid).



Joonis 27. Tobermoriidi kristallid proovides BP-73 (A) ja BP-74 (B).

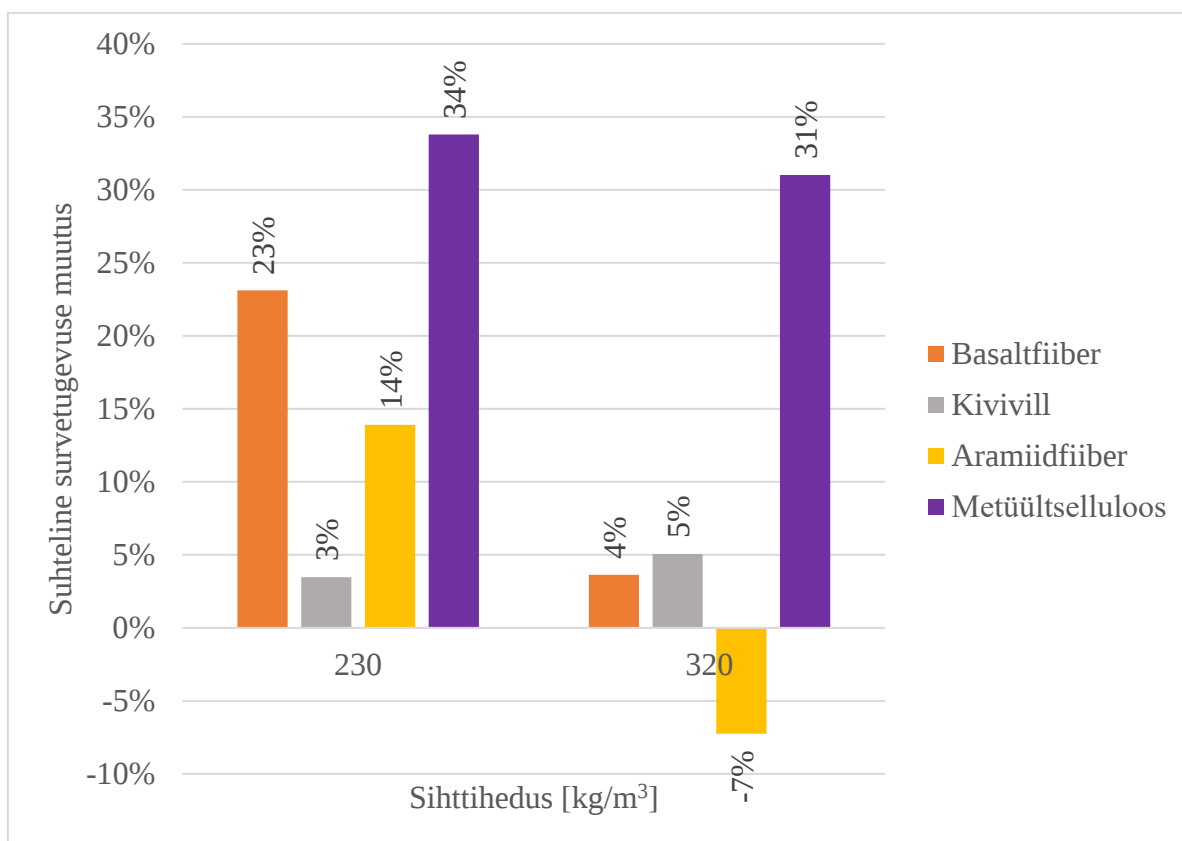


Joonis 28. Pirdjas-nõeljad tobermoriidi kristallid proovis BP-74. Pooridevahelise ala materjalis on näha ka reageerimata liivaterasid.



Joonis 29. Pirdjas-nõeljate tobermoriidi kristallidega kaetud korrapärase kujuga tüümik proovi BP-74 vaheseinas.

LISA 3. Lisandite mõju katsekehade survetugevusele



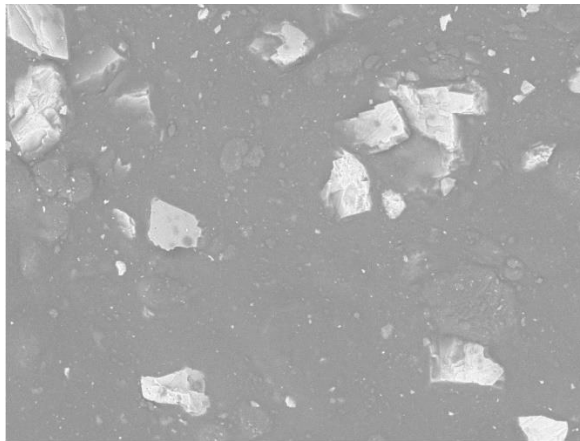
Joonis 30. Suhteline survetugevuse muutus erinevate lisandite korral katsekehadele. Baas-väärtuseks on võetud parima armeerimata katsekeha survetugevus, milleks on 230 kg/m³ korral 0,86 MPa ning 320 kg/m³ korral 1,65 MPa.

LISA 4. EDX tulemused

Uuritav objekt: Tapeediliim Metylan Spezial – elementkaardistamine

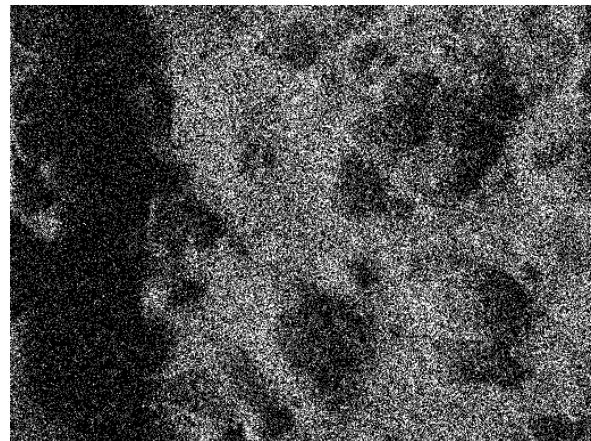
Signaali kogumise aeg: 60,0 s

Kiirendav pinge: 15,0 kV



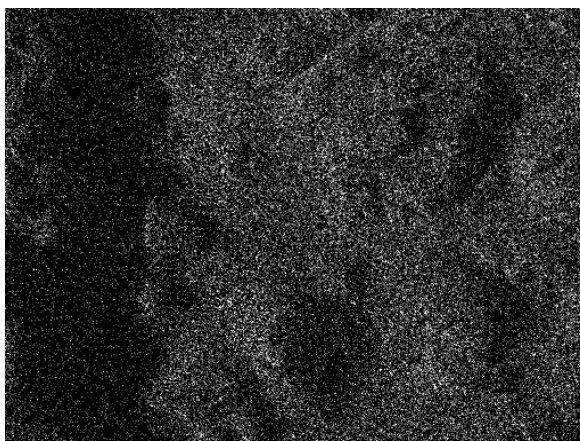
100µm

Mixed



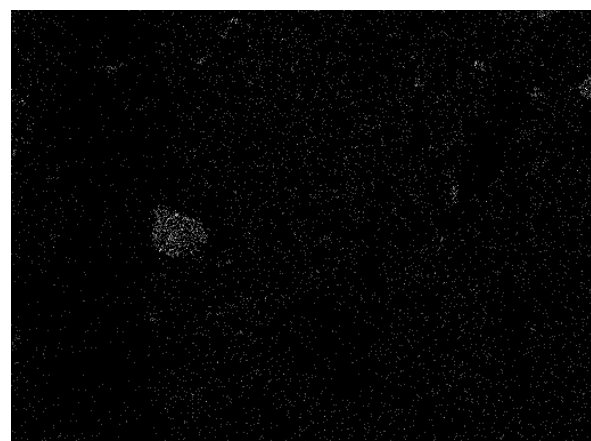
100µm

Carbon Ka1_2



100µm

Oxygen Ka1



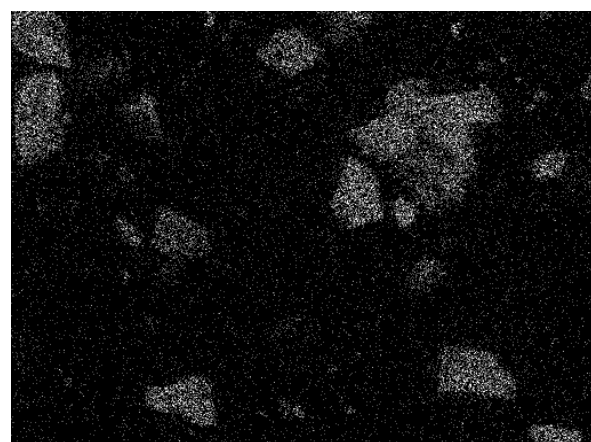
100µm

Magnesium Ka1_2



100µm

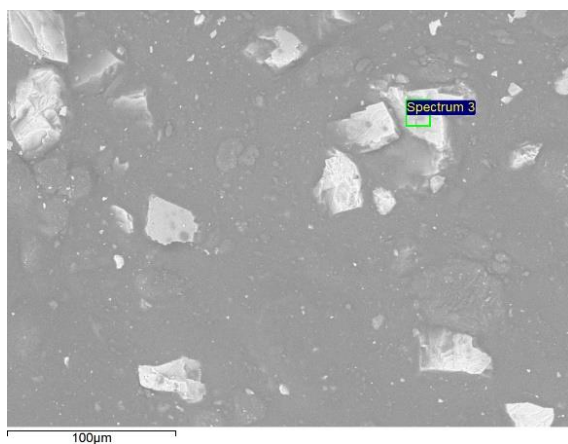
Silicon Ka1



100µm

Calcium Ka1

Uuritav objekt: Täidisaine osake tapeediliimis Metylan Spezial.



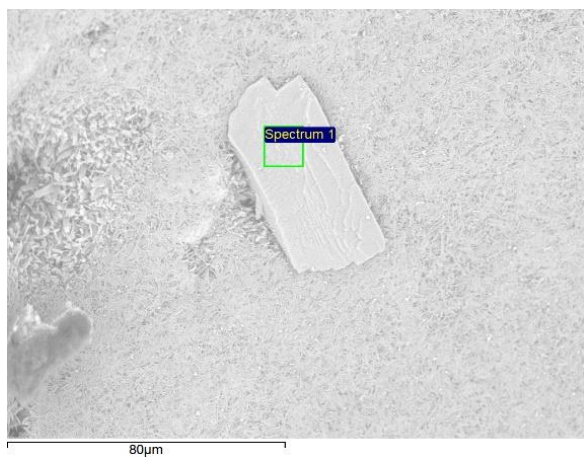
Signaali kogumise tingimused:

Signaali kogumise aeg: 60,0 s

Kiirendav pinge: 15,0 kV

Element	Massiprotsent
Süsinik	32.5
Hapnik	43.9
Magneesium	0.14
Räni	0.31
Kaltsium	23.2

Uuritav objekt: Proovist BP-77 leitud monokristall



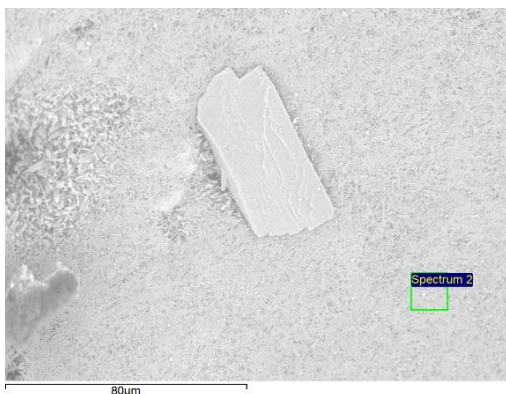
Signaali kogumise tingimused:

Signaali kogumise kestus: 60,0 s

Kiirendav pinge: 15,0 kV

Element	Massiprotsent
Hapnik	49.5
Magneesium	0.47
Alumiinium	0.94
Räni	17.8
Kaltsium	28.8

Uuritav objekt: Proovi BP-77 poori põhi



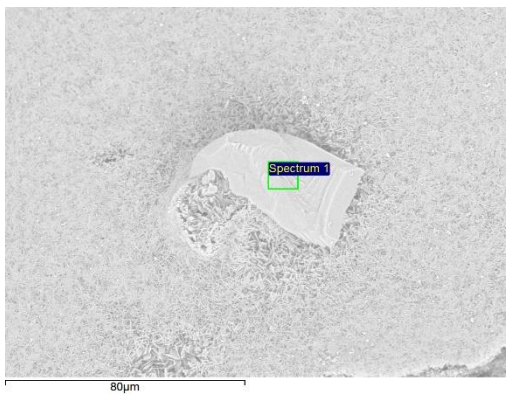
Signaali kogumise tingimused:

Signaali kogumise kestus: 60,0 s

Kiirendav pinge: 15,0 kV

Element	Massiprotsent
Süsinik	9.0
Hapnik	49.2
Alumiinium	1.3
Räni	16.5
Kaltsium	23.9

Uuritav objekt: Proovist BP-77 leitud monokristall_2



Signaali kogumise tingimused:

Signaali kogumise kestus: 60,0 s

Kiirendav pinge: 15,0 kV

Element	Massiprotsent
Süsinik	8.1
Hapnik	35.3
Alumiinium	0.72
Räni	10.12
Väävel	13.6
Kaltsium	30.2

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kaarel Siimut,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
„Armeerivad lisandid autoklaavitud poorbetoonis“,

mille juhendaja on Tarmo Tamm,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, alates **31.05.2022** kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kaarel Siimut

31.05.2019