

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituut

**Männiku karjääri liivast poorbetooni
disain ja karakteriseerimine**

Siim Koor
Bakalaureusetöö (6 EAP)
Materjaliteadus

Juhendaja: Tarmo Tamm, PhD

Tartu 2021

Infoleht/ Abstract

Männiku karjääri liivast poorbetooni disain ja karakteriseerimine

Käesolevas töös uuriti Männiku karjääri liiva kui räniallika mõju autoklaavitud poorbetooni survetugevusele, tihedusele ja kristallstruktuurile. Eesmärgiks oli leida seoseid liiva töötlustest tulenevate eripärade ja mainitud poorbetooni omaduste vahel ning valideerida Männiku karjääri liiv kui autoklaavitud poorbetooni räniallikas. Lisaks karakteriseeriti töötlemata Männiku liiva.

Töö raames töötati välja retsept poorbetooni laboratoorseks valmistamiseks, kus üheks lähteaineks oli erineva töötlusega uuritav liiv. Liiva ja poorbetooni uuriti peamisel SEM, EDX ja sõel-kaskaad analüüside abil. Leiti, et töötlemata (jahvatamata) liiv poorbetooni valmistamiseks ei sobi, kuid vähesel määral täiendavalt peenestatud liivast on võimalik valmistada paljudeks rakendusteks sobiva kvaliteediga ning mõõdukal kuni suurel töötlusel kvaliteetset poorbetooni.

Märksõnad: autoklaavitud poorbetoon (AAC), räniallikad, tobermoriit, kaltsium-silikaathüdraat (C-S-H), sõel-kaskaad analüüs, looduslik liiv, mineraalkoostis

CERCS: T150 Materjalitehnoloogia; T152 Komposiitmaterjalid

Design and characterisation of porous concrete based on sand from Männiku quarry

In this thesis, the effects of Männiku quarry sand as the silica source on autoclaved aerated concrete compressive strength, density and crystal structure were studied. The intention was to find connections between differently processed sand and abovementioned properties, also to validate Männiku quarry sand as a suitable silica source for aerated concrete. In addition, the Männiku sand as a raw material was characterised.

As part of the thesis, a recipe for porous concrete laboratory production was developed, in which one of the components was Männiku sand with different processing. The main study methods were SEM, EDX and sieve-cascade analyses. It was found that the unprocessed sand is not suitable for porous concrete production, but sand with minor processing produced satisfactory results, while average to major processing yielded high quality autoclaved aerated concrete.

Keywords: autoclaved aerated concrete (AAC), silica sources, tobermorite, calcium silicate hydrate (C-S-H), sieve-cascade analysis, natural sand, mineral composition

CERCS: T150 Material technology; T152 Composite materials

Sisukord

Lühendite loetelu.....	5
Sissejuhatus	6
1. Kirjanduse ülevaade	7
1.1 Autoklaavitud poorbetoon	7
1.2 Valmistamine.....	8
1.2.1 Tootmine	8
1.2.2 Kristallstruktuurid ja 1,1 nm ühikkihi paksusega tobermoriit.....	9
1.3 Räni allikad.....	10
1.3.1 Kvartslüiva jaotumine terade suuruse järgi.....	10
1.3.2 Lähteainete asendamine potsolaansete materjalidega	12
1.3.3 Kvartslüiva elementkoostis	12
1.4 Betoonelemendid	13
1.5 Mehaanilised omadused	14
1.5.1 Survetugevus ning selle seos tihedusega.....	14
1.5.2 Tulekindlus, soojus- ja helijuhtivus	15
1.6 Pooride struktuur	16
1.6.1 Kristallstruktuuri tasand	16
1.6.2 Vaheseinte tasand.....	17
1.6.3 Makropooride tasand.....	17
1.8 Töö eesmärk	18
2. Metoodika ja eksperimentaalne osa.....	19
2.1 Männiku karjääri liiva analüüsid	19
2.1.1 Liiva jahvatamine	19
2.1.2 Sõel-kaskaad analüüs	19
2.1.3 Struktuuri ja koostise uuringud SEM ja EDX abil.....	20
2.2 Lubja aktiivsuse määramine	20
2.3 AAC katsekehade valmistamine.....	20
2.4 AAC katsekehade uurimine.....	21
2.4.1 Kuivtiheduse ja survetugevuse määramine	21
2.4.2 SEM ja EDX uuringud	22
3. Tulemused ja arutelu	23
3.1 Männiku liiva karakteriseerimine	23

3.1.1 Jahvatamine ja uuritavate fraktsioonide omadused.....	23
3.1.2 Elementkoostis	24
3.2 Retsepti arendus.....	26
3.3 Autoklaavitud poorbetooni karakteriseerimine	27
3.3.1 Töötlemata liiva poorbetoon	27
3.3.2 280 µm liiva poorbetoon	29
3.3.3 210 µm liiva poorbetoon	31
3.3.4 90 µm liiva poorbetoon	32
3.3.5 54 µm liiva poorbetoon	33
3.5.6 Seosed erinevate liivafraktsioonide poorbetoonide vahel	35
Kokkuvõte	37
Kasutatud kirjandus.....	38
Lisa 1. Katseseadmete fotod.....	41
Lisa 2. Sõel-kaskaad analüüsi andmed.....	42
Lisa 3. Skaneeriva elektronmikroskoobi mikrograafid	44

Lühendite loetelu

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

SEM – skaneeriv elektronmikroskoop

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

W/S tegur – vesi-tahkis massisuhe

C/S tegur – Ca ja Si molaarsuhe

C-S-H – kaltsiumsilikaathüdraat

AP – alumiiniumi pulber

Sissejuhatus

Euroopa Liit on viimased aastakümned olnud maailmas ökonoomsema ja keskkonnasäästlikuma mõõde- ja eluviisi eestvedajaks. Seejuures on üheks suurimaks kõneallikaks kasvuhoonegaaside, eesotsas CO₂, soovimatu tootmise vähendamine. Mootorsõidukite heitgaaside kõrval on üheks suurimaks süsihappegaasi allikaks hoonete sobiva temperatuuri tagamine. Lisaks ka ehitusmaterjalide tootmine. Sellest tulenevalt on Euroopa Liidus direktiividega sätestatud pürgimine võimalikult energiatõhusa hoonefondi poole.

Ökonoomsema hoonefondi saavutamine on avanud ehitusturu uutele energiatõhusatele materjalidele. Selliste materjalide eesotsas on autoklaavitud poorbetoon ehk AAC. Autoklaavitud poorbetoon konkureerib klassikalise betooniga eelkõige eramute ja väikeste kortermajade ehituses. Seal avalduvad AAC eelised ehk madalam tihedus ja hea soojusisolatsioonivõime samas kui survetugevus, aspekt, milles AAC tavabetooniga konkureerida ei suuda, oma mõju veel ei avalda. Eeliseks on ka madalam hind. Kuigi poorbetooni tootmisprotsess on keerukam, kompenseerib kulud vähesem lähteainete tarbimine ja lihtsam transport.

Autoklaavitud poorbetooni lähteainete vähesem kulu tagab ka materjali kasutamise ökonoomsuse. AAC valmistamisel kulub sama toodetud ruumala juures oluliselt vähem tsementi kui tavabetooni puhul. Nagu ka tavabetooni tootmises on võimalik AAC-l asendada lähteained metalli-, ehitus- ja teiste tootmisjääkidega. Seejuures on aga optimaalne asendusmäär enamasti kordades kõrgem ning autoklaavitud poorbetooni enda jääke on võimalik kasutada selle tootmisel.

Poorbetooni üheks põhiliseks lähteaineiks on kvartslüü, mille olulisus protsessi kontekstis seisneb selle võimes õigel töötlemisel asendada tsementi. Käesoleva töö eesmärk oli uurida Eesti Männiku karjääri liiva kui potentsiaalset räniallikat AAC tootmisel. Uuriti nii töötlemata liiva omadusi nagu keemiline koostis ja osakeste suuruse järgi jaotumine kui ka erinevalt jahvatatud liivadest valmistatud autoklaavitud poorbetooni. Seejuures viimase uurimisel pöörati erilist tähelepanu AAC-le karakteristiklike uusmoodustiste leidumisele ja omadustele eesmärgiga leida seoseid nende ja kasutatud liiva omaduste vahel. Lõppeesmärgiks oli valideerida Männiku karjääri liiv kui AAC tootmiseks sobilik räniallikas.

1. Kirjanduse ülevaade

1.1 Autoklaavitud poorbetoon

Autoklaavitud poorbetoon on madala tihedusega materjal, mida kasutatakse peamiselt kandvate seinaelementide, universaalsete ehitusplokkide või muude müüritise elementide tootmiseks. Lisaks unikaalsetele tihedusomadustele iseloomustab AAC-d üldiselt hea soojus-isolatsioonivõime, tulekindlus ning suur suhteline survetugevus. Poorbetooni vaadatakse enamasti kui loodussõbralikku materjali ja kui tooraine- ning energiasäästlikumat alternatiivi tavabetoonile. Võrreldes tavabetooni ja telliskiviga võib poorbetooni valmistamine olla vastavalt kuni 70% ja 40% energiasäästlikum. [1] Samas sisaldab AAC, nagu paljud teised konkureerivad keraamilised ehitusmaterjalid, tsementi, mille tootmise käigus vabaneb süsihappegaasi. Vastavalt direktiivile 2010/31/EL peavad alates 2021. a kõik Eesti uusehitised olema ligi nullenergiahooned ning direktiiv (EL) 2018/844 suunab 2050. aastaks renoveerima kõiki hooneid energiatõhusaks, et saavutada „väga energiatõhus ja vähese CO₂-heitega hoonefond“. [2], [3] Poorbetoonist toodetud ehituselemendid sobivad potentsiaalselt selliste hoonete püstitamisel kasutatavateks ehitusmaterjalideks.

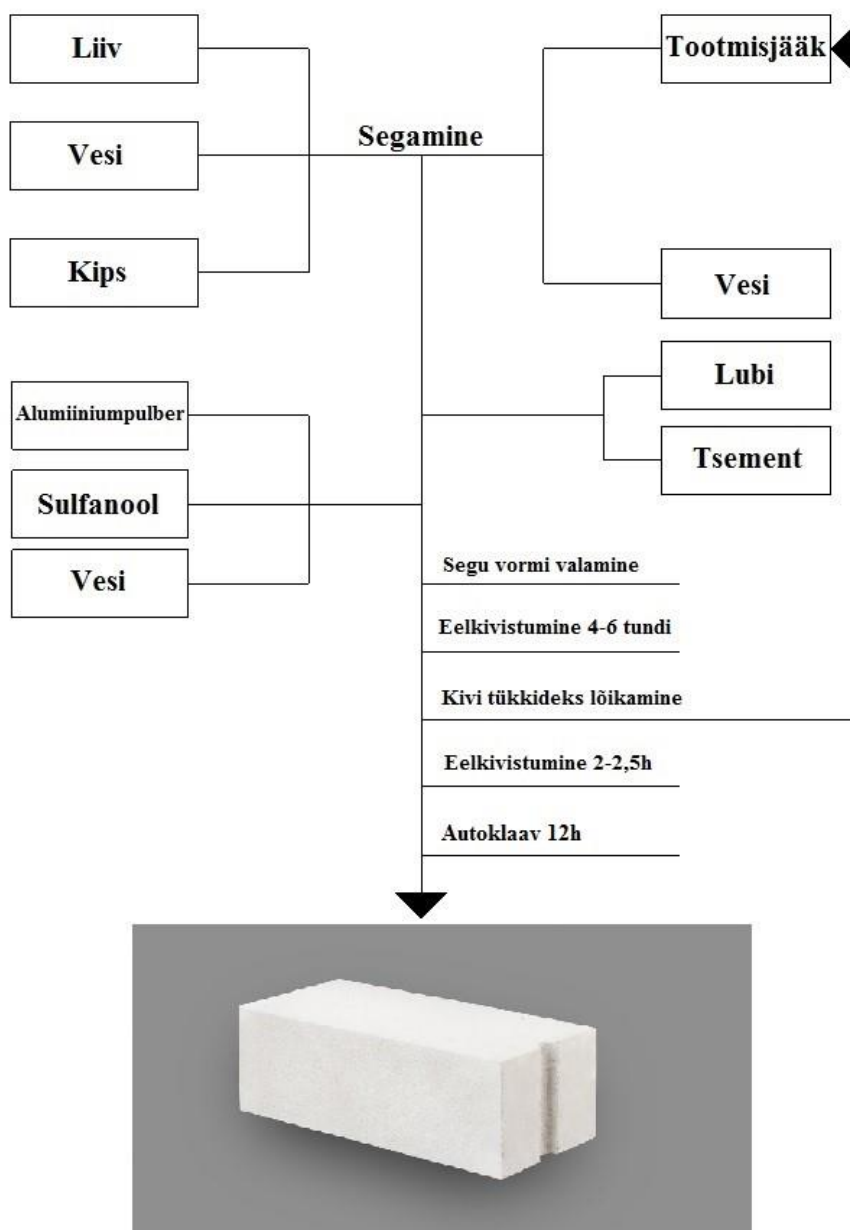
Poorbetooni „juured“ ulatuvad 19. ja 20. sajandi vahetusse. Esimene oluline patent anti 1880. aastal Saksamaal betooni auruga kõvendamise tehnoloogia eest, see on meetod, mida kasutatakse tänapäevalgi. See tehnoloogia andis tõuke betooni gaasidega töötlemise ideele ja edasist poorbetooni arengut võib vaadelda paralleelselt rea patentide välja andmisega sajandivahetusel ja järgneval perioodil. 1889. aastal patenteeris tšehh Hoffman betooni aereerimise süsihappegaasiga ning 1914. aastal võtsid ameeriklased Aylsworth ja Dyer patendi alumiiniumi pulbri betooni viimise abil saadava poorse struktuuri valmistamise tehnoloogia eest. Rootslane Eriksson arendas välja ja patenteeris 1920. aastal betooni aereerimise, kasutades lisaks lähteainena lubjakivi ning kolm aastat hiljem, 1923. aastal, avastas ta, et sellised segud ei tõmbu kõvenemise käigus kokku ja kõvenemine toimub palju kiiremini, kui see toimub suurendatud rõhu, temperatuuri ja kontrollitud niiskuse keskkonnas ehk autoklaavides. Selle sündmusega võib lugeda autoklaavitud poorbetooni avastatuks ning 1929. aastal algas Rootsis nime Yxhult all esimene AAC kommertsiaalne tootmine. [4]

Tartu Ülikoolis on autoklaavitud poorbetooni varem uurinud Markus Otsus ja Kaarel Siimut AS Bauroci ning arukate materjalide ja süsteemide labori vahelise koostöö raames. [5], [6]

1.2 Valmistamine

1.2.1 Tootmine

AAC põhikomponentideks on kvartsi-rikas liiv, kustutamata lubi (edaspidi lubi), tsement, kips ja vesi ning levinud reagent pooride tekitamiseks on alumiiniumi pulber. Siiski on võimalik peaaegu kõiki lähteaineid asendada sarnaste omadustega looduslike materjalide või tööstusjääkidega. Liiva on võimalik asendada selliste jääkmaterjalidega nagu söe põletamisel tekkiv lend- või põhjatuhk ning suhkrusetete jäätmed, mis lisaks taaskasutuse aspektile võimaldavad tihti saavutada paremaid mehaanilisi omadusi. [7]



Joonis 1. Poorbetooni valmistamise üldskeem [5]

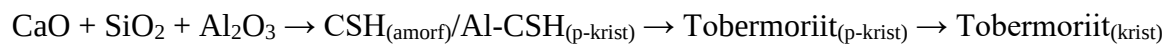
Esmalt valmistatakse liivašlamm, mis koosneb veest, liivast ja kipsist ning lõikešlamm, mis koosneb eelneva toodangu (lõike)jääkidest ja veest. Šlammid segatakse omavahel, lisades vajadusel täiendavat vett. Seejärel lisatakse segu massile sideained ehk lubi ja tsement, seejuures siin määratakse W/S tegur, mis määrab hiljem komposiidi tiheduse ja survetugevuse (joonis 1). Liiga madal W/S tegur tähendab viskoosset šlammi ning kiiret tahenemist, mis põhjustab suurenenud siduvaid jõude struktuuris ja seeläbi madalat poorsust ja paisumist. Kõrge W/S tegur põhjustab liiga aeglast tahenemist ning poore tekitava gaasi H_2 kiiret eraldumist, mis omakorda tähendab ebaühtlast pooride jaotumist ja madalat paisumist. [1] Lisaks põhjustab kõrge vee sisaldus lähteainete kihistumist.

Saadud segule lisatakse alumiiniumi pulbrit ning vedel mass valatakse vormidesse. Lubja kustumine tekitab massis aluselise keskkonna, mis võimaldab alumiiniumi pulbril reageerida $Ca(OH)_2$ ja veega andes saadusena gaasilise vesiniku, mille mullid põhjustavad komposiidi jahtumisel õõnsuste ehk pooride teket. Viiakse läbi esmane kivistumine kõrgendatud temperatuuri (40...45 °C) ja õhuniiskusega (70% RH) keskkonnas, mis võib kesta alates 4 tunnist kuni 60 tunnini, kuid enamasti jääb protsessi kestus vahemikku 10...14 tundi. Peale kivistumist toimub vormide eemaldamine ja pooltahke massi lõikamine soovitud suurusega plokkidesse. Tihti toimub seejärel teisene kivistumine esimesega sarnastel tingimustel 2...3 tunni jooksul, millele järgneb autoklaavimine. Autoklaavimine toimub rõhul ligi 12 bar ligi 8...10 tunni jooksul. [8] Eelpool kirjeldatu on üldlevinud valmistamisprotseduur. Olenevalt toormaterjali eripäradest, tehase võimalustest ja mehaanilistest sihtomadustest võib tootmisprotseduur tavapärasest oluliselt erineda.

1.2.2 Kristallstruktuurid ja 1,1 nm ühikkihi paksusega tobermoriit

Valmistamisprotseduuri käigus tekivad erinevad kristallfaasid ja toimub nende transformeerumine. Tsemendis leiduvad mittepuhtad mineraalid aliit (Ca_3SiO_5), mis sisaldab tüüpiliselt 71,6% CaO ja 25,2% SiO_2 ning beliit (Ca_2SiO_4), mis sisaldab 63,5% CaO ja 31,5% SiO_2 . Vee lisamisel tekib hüdratatsiooni reaktsiooni tulemusena kristalliline kaltsium hüdroksiid ehk kustutatud lubi ehk portlandiit, mis sobivates hüdrotermilistes tingimustes annab koos räni allika ja veega C-S-H faase. Tavapäraselt on tsemendi lahustumine suhteliselt aeglane protsess ning 28 päevaga on reageerinud ligi 70% ja 1 aastaga 100% kogu aliidist. Beliidi puhul on samade perioodide peale reageerinud vastavalt 30% ja 90%. Seetõttu seostatakse tavabetooni puhul aliiti betooni algse ja beliiti hilisema tugevnemisega. [9]

Amorfne C-S-H võib autoklaavimise käigus moodustada kümneid erinevaid kristallfaase olenevalt valmistamise tingimustest, eelkõige autoklaavimise ajast ja Ca/Si (või ka Ca/(Si+Al)) tegurist. Levinumad faasid on ksonoliit, jenniit ja tobermoriit, viimase tekkimiseks on oluline Ca/Si teguri täpne kontroll. Optimaalne Ca/Si tegur sõltub temperatuurist, aga on leitud, et selleks on väärtusel $T=90^{\circ}\text{C}$ $C/S=0,83$ ning väärtusel $T=180^{\circ}\text{C}$ $C/S=0,55$. [10] Tobermoriit moodustub stabiilselt temperatuuridel $80\ldots150^{\circ}\text{C}$, kõrgematel temperatuuridel moodustuvad faasid on metastabiilsed. Moodustumise reaktsiooni on kirjeldatud kui kolme astmelist üleminekut: amorfse C-S-H moodustumine, poolkristallilise tobermoriidi kasvamine ja selle ümberkristalliseerumine kristalliliseks tobermoriidiks (võrrand 1). Stabiilsed faasid on rombilised 0,9 nm, 1,1 nm või 1,4 nm tobermoriit, eristavaks teguriks on vee molekulide sisaldus. [11]



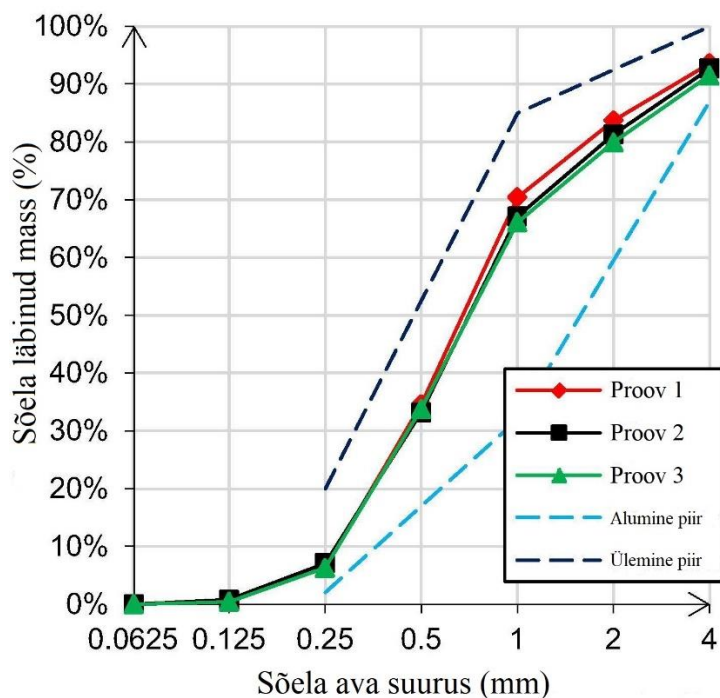
Võrrand 1. Kristallilise tobermoriidi moodustumine [11]

Tobermoriidi 1,1 nm polütüüpi ($[\text{Ca}_4(\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{H}_2)]\text{Ca}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) seostatakse poorbetooni parimate mehaaniliste omadustega. Struktuur on selgelt kihiline, kus sisekiht koosneb seitsme hapniku aatomiga Ca polüeedritest ning väliskiht nelja hapniku aatomiga tetraeedritest. Tetraeedrid seovad sisekihte, andes ühe polüeedriga sideme kas läbi ühe või kahe hapniku aatomi. 1,1 nm notatsioon viitabki sellise kihi paksusele. [12]

1.3 Räni allikad

1.3.1 Kvartsi liiva jaotumine terade suuruse järgi

Ülekaalukalt enim levinum ja ennast praktikas kehtestanud räni allikas poorbetooni (ja betooni üldiselt) tootmises on kvartsi liiv. Uddeni-Wentworthi skaala defineerib liiva tera suuruse järgi kui $0,063\ldots2$ mm teraläbimõõduga purdsette (joonis 2). Enamasti sisaldab selline räni allikas aga väiksema läbimõõduga kvartsi fraktsioone nagu möll ehk aleuriit ($0,002\ldots0,063$ mm) ja savi ($<0,002$ mm).



Joonis 2. Tüüpiline loodusliku jõeliiva jaotumine sõel-kaskaad analüüsis [13]

Sarnaste agregaatide puhul on savi osakaal üldiselt tühiselt madal, kuid mölli sisaldus võib küündida 10...20%-ni, seejuures erineb ka jaotumine looduslike ja jahvatatud agregaatide vahel, kus esimeste puhul on mass kandunud pigem peenemate ja viimaste puhul jämedamate mölli osakeste poole. On leitud, et looduslikes agregaatides on domineerivaks eriti väiksed, alla 10 μ läbimõõduga osakesed, kus nende osakaal on jahvatatud agregaatide omast kuni 15% suurem. Lisaks on looduslikud mölli osakesed kompaktsema kujuga ning seeläbi suurema eripinnaga. [14] Need kaks asjaolu on olulised, kuna sellise suuruse ja kujuga osakestel avalduvad juba märgatavad potsolaansed omadused. Suur kvartsiosakese eripind võimaldab hüdratatsiooni käigus suurendada reageerivate räni osakeste hulka, mis tähendab C-S-H faaside kiiremat teket. Reaktsioon liigub tsemendiosakestelt pigem räniosakeste pinnale, mis vähendab aliidi ja beliidi osakesi ümbritsevate Ca^{2+} ionide hulka, mis omakorda vähendab tsemenditerade lahustuvust algusfaasis. Reaktsioon on palju kiirem kui tavapärane tsemendi lahustumine ning tulemuseks on madalama C/S teguriga C-S-H kristallid ja kiire OH^- ionide optimumi saavutamine. Sellele järgneb tavapärasest oluliselt kiirem aliidi ja beliidi lahustumine kõrge OH^- ionide kontsentratsiooni tõttu ning tekivad kõrgema C/S teguriga C-S-H kristallid. Kui kogu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on osakeste pinnalt ära reageerinud, võib toimuda reaktsioon reageerimata kvartsi ja madalama C/S teguriga C-S-H vahel moodustades väga madala C/S teguriga polümeersed C-S-H faasid. [15], [16] Nähtavasti toimib potsolaane räni tsemendi asendajana, kuid ei pruugi anda ideaalseid tobermoriidi tekkimiseks vajalikke C-S-H kristalle.

1.3.2 Lähteainete asendamine potsolaansete materjalidega

Üldjuhul mõeldaks potsolaanse ränni all siiski nano-skaalas väga peent kvartssavi ehk pürogeenset ränidioksiidi (*fumed silica*), mille osakeste keskmine suurus jääb üldiselt 0,1...0,3 µm vahemikku. Teised levinud potsolaanid on aluminosilikaadid nagu lendtuhk (*fly ash*), peengranuleeritud ahjuräbu (*blast furnace slag* [BFS]), looduslik tseoliit ja tehisklik metakaoliniit. On tähendatud, et mõõdukas tsemendi asendamine potsolaanidega mõjutab oluliselt paljusid mehaanilisi omadusi. Näiteks survetugevust on õnnestunud 21% tseoliidi asenduse juures suurendada kaks korda. Samas uuringus suurenesid sellise asenduse juures räniauru ja BFS survetugevused vastavalt 82% ja 72%. Tõmbetugevused suurenesid kõigi kolme potsolaani 7% asenduse juures umbes 25%, seejuures edasise sisalduse suurendamine ei tõstnud oluliselt tõmbetugevust. [17] Tavabetonis on optimaalsed potsolaanide asendused oluliselt madalamad, enamasti 5...15 % tsemendi asenduse juures. [18] See muudab poorbetooni komponentide kulu suhtes veelgi säästlikumaks tavabetoniga võrreldes.

Tseoliidil avalduvad lisaks potsolaansetele omadustele ka märkimisväärsed aereerivad omadused. Uuringus, kus kasutati tavapärasemaga võrreldes jämedamat tseoliiti (0,5...1 mm) leiti, et optimaalne kvartšliiva asendusemäär on 50% surve- ja paindetugevuse aspektist. Samas väiksemate osakestega tseoliidi (100 µm) puhul jäi kõrgeim survetugevus 25% juurde. Mõlemal juhul aga vähenes tihedus tseoliidi hulga suurendamisel, mis viitab selle aereerivale omadusele. [19]

BFS toimib lisaks räniallika asendajana ka lubjaallika asendajana. On leitud, et kuni 100% lupja on võimalik asendada BFS ja vase tootmisjäädide seguga, seejuures saavutati laboratoorselt tihedusega ligi 600 kg/m³ AAC survetugevusega 4,0 MPa, kus kokku 65% lähteainetest olid metalli tootmisjäädid. [20] Tööstuslikust vaatenurgast on BFS eelis ka kergem hoiustamine, kuna erinevalt kustutamata lubjast reageerib BFS õhus leiduva veega minimaalselt.

1.3.3 Kvartšliiva elementkoostis

Isegi tüüpilise kvartšliiva koostisest rääkides on keeruline märkida konkreetseid suhtelisi elementide sisaldusi, kuna kvartšliiva koostis varieerub palju piirkondade ja isegi karjäärade piires. Lisaks ei ole ka alati teada liiva tekkeviis ehk kas tegu on jõe-, mere- või mingi muu setteviisil tekkinud liivaga. Siiski kõikide kvartšliivade ühiseks jooneks on suur SiO₂ sisaldus, mis jääb üldiselt 90...99% vahemikku. [13] Olulisimad lisandid on Al ja Mg (tabel 1). Al ühendid käituvad sarnaselt potsolaanse ränniga ning seda seostatakse autoklaavimisel toimuva

C-S-H faasi kiirendatud muundumisega tobermoriidiks, mis võib aidata autoklaavimise aja lühendamisel. [21] Levinud soovimatud lisandid on Na, K ja Fe, neist viimane võib anda betoonile ebasobiva punaka tooni.

Tabel 1. Jõeliiva (Madalamaad) keemiline koostis vastavate oksiididena [13]

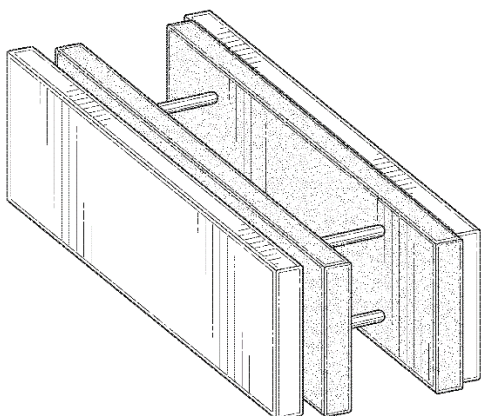
Frakts.	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃
0...0,25	93,6	1,1	2,5	0,2	0,5	0,9	0,2	0,9	0,04
0,25...4	95,6	0,9	1,7	0,1	0,2	0,7	0,1	0,5	0,08
0...4	96,0	0,5	1,8	0,1	0,2	0,7	0,1	0,5	0,05

1.4 Betoonelemendid

AAC madala survetugevuse probleemi üheks oluliseks lahenduseks on materjali armeerivate kiudude viimine. Näiteks metüülselluloosi ja basaltfiibriga sarrustamine võib suurendada AAC survetugevust vastavalt üle 30% ja üle 20%. [6] Teine, eelmainituga tihti kooskäiv lähenemine on läbi betoonelementide valmistamise, ehk valmistades makrotasandil komposiite, mille üheks komponendiks on poorbetoon. Sellistesse elementidesse on võimalik juba tootmise käigus sisse viia elektri- ja veevärgi ning ventilatsiooni osad. Klassikalise betooni puhul on elementide valmistamine juba kindlalt väljakujunenud metoodika keerulisemate ja esteetiliselt nõudlikumate ehitiste lihtsamaks tootmiseks. Tänapäevane tavabetooni elementide tootmise metoodika pärineb 1980. aastatest, kuid sarnaseid betooni valmistamise viise, ehk kivistumata betooni vormi valamine, kasutati juba kuuekümnendatel. [22] Sellised metoodikad aga ei sobi käesoleval ajal poorbetooni tootmiseks materjalide põhimõttelise erinevuse pärast. Nimelt, nagu eelpool välja toodud, poorbetoon omandab lõpliku kuju alles tahkes faasis ning materjali paisumist on keeruline arvestada vormi valamisel. Seetõttu tavabetooni keerukuse tasemel metoodikaid poorbetooni elementide valmistamiseks siiani kasutatud ei ole.

Senini on lähenemine olnud universaalsete AAC osade viimine keerulisema ehitusega elementide sisse ühe lisakomponendina. Seda on kõige lihtsam ilmetada konkreetsete näidete alusel. Näiteks soojustatud betoonvormi seinaelemendile (*insulated concrete form*) AAC väliskihi lisamine. Tegu on „võileib“-tüüpi elemendiga, kus ehitatakse soojust ja heli isoleerivast polüstüreenist struktuur, mis täidetakse tavabetooniga. Üldiselt jääb sellise lahenduse korral seina pealmiseks kihiks polüstüreen, kuid poorbetooni lisamisel on võimalik soodsalt saavutada tulekindel, struktuurselt tugevam ja esteetiliselt kõrgetasemelisem väliskihit.

Lisaks lihtsustab see sisemise betoonikihi valu, kuna AAC kihi lisamisel ei ole vaja valu ajaks täiendavat struktuuri stabiliseerimist (joonis 3). [23]



Joonis 3. „Võileib“-tüüpi ehituselement, kus välimisteks kihtideks on poorbetoon [23]

Lisaks saab poorbetooni kasutada „võileib“-tüüpi elemendis ka suuremal määral kandva osana. Näiteks lisades kahe AAC paneeli vahele polüuretaani kiht, mis isoleerib soojuslikult kaks kandvat seiniosa. [24] Sellised lihtsaid poorbetooni struktuure kasutavad meetodid on aga arhitektuurselt väga piiravad ning tavabetooni elementide keerukuse tasemele ei küündi.

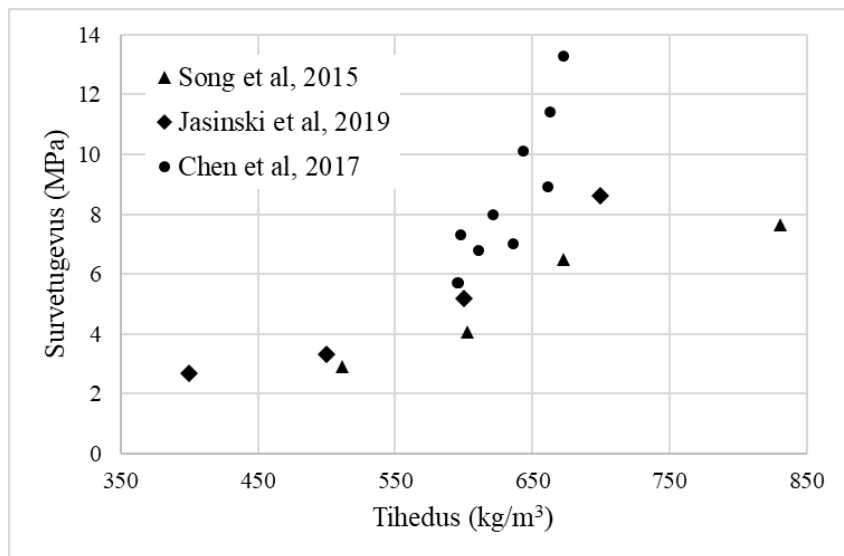
1.5 Mehaanilised omadused

Võrreldes tavabetooniga on AAC-l küllaltki erinevad mehaanilised omadused. Esmases lähenduses võib pooride vahelist ala vaadelda kui peeneteralist tavabetooni, kuid see tähendaks tugevuse kasvamist makropooride vaheseinte tiheduse kasvamisega. Erinevad uuringud aga tõestavad vastupidist: poorsed vaheseinad tagavad suurema survetugevuse, lisaks parema niiskusjuhtivuse ja madalama soojusjuhtivuse. [25]

1.5.1 Survetugevus ning selle seos tihedusega

Survetugevus on poori vaheseinte võime vastu panna struktuurile avaldatavale survele. Siit lähtuvalt on survetugevusele suurimat mõju avaldav tegur AAC poorsus. Kõrgem poorsus ja madalam tihedus on seotud madalama survetugevusega (joonis 4). Poorbetooni survetugevus jääb enamasti 2 kuni 8 MPa vahele, kuid W/S tegur 0,7 juures on õnnestunud ka saavutada survetugevusi ligi 13 MPa. Poorsuse ja survetugevus sõltuvadki kõige enam W/S teguri õigest valikust. Näiteks on W/S teguri 0,6 juures on saadud tihedus 1000 kg/m^3 , kuid samas uuringus teguri tõstmisel väärtuseni 1,0 saadi tiheduseks 300 kg/m^3 . Teised mõju avaldavad aspektid on

alumiiniumi pulbri hulk ja autoklaavimise aeg. Selgub, et alumiiniumi pulbri kontsentratsiooni suurendamisel 0,25 massiprotsendilt 0,5 massiprotsendile väheneb tihedus kuni 13%. [26], [27]



Joonis 4. Survetugevuse sõltuvus AAC tihedusest [26]–[28]

1.5.2 Tulekindlus, soojus- ja helijuhtivus

Autoklaavitud poorbetoon on mittepõlev materjal. Tänu kõrgele homogeensusele ei ole AAC paisumine temperatuuri järsu tõusu tõttu, erinevalt tavabetoonist, tihti katastroofiline ning kuuma tõttu pragunemist esineb harvem. Üldiselt loetakse poorbetooni tavabetooniga sama heaks või marginaalselt paremaks tulekindlaks materjaliks. [29] Samas ei ole poorbetoon otseselt kuumakindel ning kõrge temperatuuri juures võivad pikema ajaga toimuda mikropragunemised, mille tõttu omakorda võivad struktuurilelemendi mehaanilised omadused oluliselt halveneda. [30]

AAC-d iseloomustab hea soojus- ja heliisolatsiooni võime. Piirkondades, kus aasta lõikes esinevad ka madalamad õhutemperatuurid, on ehitusmaterjali paremad soojusisolatsiooni omadused olulised, nagu ka heliisolatsiooni tähtsus kõrgema rahvastikutihedusega piirkondades. Soojusjuhtivus sõltub keskkonna temperatuurist ja niiskussisaldusest. Neist viimane on väga tähtis, sest niiskussisaldusel 1 kg/kg on soojusjuhtivus 6 korda suurem võrreldes kuiva poorbetooniga. Samas keskkonna temperatuuri tõusmisel vahemikus 2...40 °C suurenes soojusjuhtivus kuni 50%. [31] Siiski on ehitusel kasutatava AAC juures temperatuurist tulenev juhtivus võib-olla isegi olulisem tegur muutuja suurema ja pideva variatsiooni tõttu. Poorbetooni helijuhtivus ja akustilised omadused on lai teema, mida ei ole

ülemäära palju uuritud. Siiski peetakse isegi spetsiaalselt töötlemata poorbetooni keskmiseks kuni heaks heliisolaatoriks. [32]

1.6 Pooride struktuur

AAC peamine üldine karakteristik aspekt on selle kõrge poorsus, mis võib ulatuda kuni 80 mahuprotsendini. Selle all mõistetakse enamasti summaarset tühimike hulka maatriksis, mis hõlmab poore tekitavast reagentist pärinevaid poore, vahemikke kristallide vahel ning ka deformatsioonidest tulenevaid pragusid ja tühimikke. [7], [33]

Üldiselt jagatakse poorid suuruse ja olemuse järgi kolmeks: mikro-, meso- ning makropoorid, millele vastavalt eristatakse struktuuris mikro, meso ja makro tasandeid. Eesti keelses kirjanduses on Karli Eskussoni poolt kutsutud neid ka vastavalt kristallstruktuuri, vaheseinte ja makropooride tasanditeks, viidates rohkem nende olemusele kui suhtelisele suurusele. [1], [25]

1.6.1 Kristallstruktuuri tasand

Kristallstruktuuride tasandi juures vaadeldakse enamasti autoklaavimise käigus tekkinud uusmoodustisi, mis on selle tasandi juures lõpp-produktile enim mõju avaldavad elemendid. AAC struktuuris puuduvad suured korrastatud piirkonnad, seega ei saa rääkida ühtsest kristallstruktuurist, vaid pigem kristalsetest nanostruktuuridest. Neist olulisimad on kaltsiumsilikaathüdraadid. Need tekivad eelkõige tsemendis leiduvate kaltsiumsilikaatide aliidi (mittepuhas trikaltsiumsilikaat) ja beliidi (mittepuhas dikaltsiumsilikaat) tõttu, seejuures aliiti seostatakse tsemendi sisaldavate kivististe esmase kiire tugevnemisega ja beliiti nende edasise pikkajalise tugevnemisega. Lisaks sisaldavad aliit ja beliit teisi oksiide, peamiselt Al_2O_3 ja Fe_2O_3 . Teiste oksiidide sisaldus jääb üldiselt 5% ligi. Poorbetoon sisaldab ideaalsel näitel nanostruktuuridest peamiselt 1,1 nm tobermoriiti ning vähesel määral vältimatuid kõrvalprodukte nagu poolkristallilised C-S-H(I) ning C-S-H(II). Viimased on H.F.W. Taylor defineerinud vastavalt kui ebatäiuslikud vormid 1,4 nm tobermoriidist ja jenniidist. Nanostruktuuride omavahelist paiknemist vaadeldakse kui gloobulite süsteemi. Gloobuli tsentriks on enamasti reageerimata lähteainete jääkosakesed, millest kasvavad välja uusmoodustiste kristallid, millest mõned on omakorda läbipõimunud teiste gloobulite kristallidega, moodustades terviku. Olulist rolli struktuuri omaduste juures mängivad eelkõige leiduvate kristallide tüübid, sisedefektid ning nende omavaheline paigutus ja jaotus. Lisaks ka lisandite hulk. Sihilik lisandite siseseviimine võib tagada materjali omaduste paranemise läbi kristallide modifitseerimise. Üldiselt on tõestatud nanostruktuuride kuju ja suuruse suurt mõju

AAC makroskaalas mehaanilistele omadustele. Näiteks põhjustab nõeljamate kristallide olemasolu nanotasandil eripinna suurenemist ja seeläbi mõjutab AAC deformatiivseid omadusi. Siiski on konkureerivaid seisukohti teatud aspektides, nagu milline on survetugevuse sõltuvus kristallide omadustest. [9], [25]

1.6.2 Vaheseinte tasand

Meso ehk vaheseinte tasandi juures vaadeldakse makropooride vahele jäävat tsementeerunud maatriksit, seejuures huvipakkuvateks aspektideks on uutmoodustised ning nende tekkimise juures reageerimata jäänud lähteainete osakeste suurus ja jaotus. Näiteks ühe enim leitava lähteaine – liiva – suuremat hulka ja tihedamat klastrites leidumist seostatakse komposiidi suurema soojusjuhtivusega. Vaheseinte roll on võtta vastu struktuurile avaldatavaid mehaanilisi koormusi ning ka keskkonna muutumisest, niiskuse eraldumisest ja ka teistest protsessidest tekkivaid pingeid ning anda need edasi kandvatele elementidele. [25]

Vaheseinte tasandis leiduvateks poorideks on deformatsioonidest tingitud praod ja tühimikud, mis võivad olla täitunud tobermoriidi kristallidega, mis üldjuhul on suuremad kui maatriksis leiduvad kristallid. Nende pooride mõju kogupoorsusele loetakse aga suhteliselt tühiseks. Oluline on nende juures võime ühendada omavahel makropoore ja seeläbi mõjutada niiskusujuhtivust. [34]

1.6.3 Makropooride tasand

Kõige laiem vaadeldav struktuuritasand on makropooride tasand. Makropoor ei ole üheselt defineeritud, kuid tihti loetakse nendeks poore vähemalt raadiusega 0,1 mm. Teisalt rangelt tekkeviisi järgi vaadates võib makropoorideks lugeda ka palju väiksemaid poore (10 μm), kuid sellisel juhul eristatakse omaduste kirjeldamisel väiksemaid suurematest. Makropoorid moodustuvad reaktsioonis tekkivate H_2 mullide ümberpaigutumise tõttu. Eskusson nimetab seda nähtust vesisuspensioon-gaasifaas iseoptimeeruvaks käitumiseks. Aereeriva reagendi ehk alumiiniumi pulbri pinnale tekkivad väikesed mullid üritavad vähendada oma pinnaenergiat läbi optimaalse paigutumise maatriksis. Mullide liikumine on võimalik gaasi paisumisest tekkivate sisepingete tõttu ning õigete reoloogiliste tingimuste korral ühinevad väikesemõõdulised mullid suurteks makropoorideks, mis saavutavad teineteise suhtes vähima energiakuluga saavutatava paigutuse ehk maksimaalse pakituse. Makropooride parameetritest, nagu jaotus ja läbimõõt, sõltuvad paljud komposiidi omadused, eelkõige tihedus ja tugevus, kuid pooride ovaalsusest ehk elliptilisest tegurist ka näiteks omaduste isotroopsus. [1], [25]

1.8 Töö eesmärk

Käesoleva töö eesmärk oli uurida Männiku karjääris kaevandata liiva sobivust autoklaavitud poorbetooni valmistamisel. Seejuures tuvastada liiva eripäradest tulenevaid kõrvalekaldeid AAC Eestis ja vähesemal määral ülemaailmselt kindlaks kujunenud normidest, lõppeesmärgiga valideerida Männiku karjääri liiv kui sobilik AAC lähteaine ning määrata selle kvaliteet. Uuriti nii betooni makroskaalas mehaanilisi omadusi, nagu survetugevus ja tihedus kui ka kristallstruktuuri tasandit, kus pöörati tähelepanu pooride omadustele, monokristallidele ning defektide esinemisele.

Lisaks oli töö ülesandeks kaardistada räniallika osakeste keskmise suuruse mõju autoklaavitud poorbetooni omadustele, eelkõige tihedusele ja survetugevusele, kuid ka mikrostruktuuridele ning poorsusele.

2. Metoodika ja eksperimentaalne osa

2.1 Männiku karjääri liiva analüüs

2.1.1 Liiva jahvatamine

Töös kasutatavad erinevad peenestusastmega liivad jahvatati kuulvesikiga Retsch PM100. Lisaks jahvatamata liivale valmistati ja uuriti nelja erineva jahvatusmääraga liiva, kus terade suurust reguleeriti töötlemise ajaga. See jäi 1...9 min vahele. Jahvatamisel kasutati kuulveskis ZrO_2 sisuga 200 ml uhmrit, millesse lisati 15 tk 20 mm läbimõõduga ZrO_2 kuuli ning 100 ml ehk umbes 162,4 g proovi. Uhmri pöörlemiskiirus oli 500 rpm.

2.1.2 Sõel-kaskaad analüüs

Sõel-kaskaad analüüs teostati kasutades erinevate silma suurustega sõelasid vahemikus 0,063 mm kuni 6,30 mm (foto 1). Korruga lisati seadmesse 200 g liiva, kuna suuremate koguste sõelumine näitas fraktsioonide kuhjumist ühele sõelale, mis omakorda takistas edasist fraktsioneerumist ning andis ebatäpseid tulemusi. Liiva raputamine seadmes koosnes seitsmest raputustsüklist, mis omakorda koosnesid 15 s intensiivsest raputamisest ja 2 s pausist.

Uuriti erinevate suurustega terade jaotumist massi järgi. Selleks kaaluti erinevate jahvatusastmetega liivades eraldunud fraktsioonid ning arvutati protsentuaalne- ja logaritmnormaaljaotus.



Foto 1. Sõel-kaskaad analüüsi seade

2.1.3 Struktuuri ja koostise uuringud SEM ja EDX abil

Liiva SEM uuringud viidi läbi Hitachi TM-3000 elektronmikroskoobiga, mis oli varustatud Oxford Instruments SwiftED 3000 EDX analüsaatoriga. Kasutatav elektrone kiirendav pinge oli kõigil juhtudel 15 kV. SEM-i detektor tuvastas tagasipeegeldunud elektrone ning EDX töötab räni-triiv detektori ehk SDD abil. SEM-i uuringuteks kaeti katsekehad plaatina kilega.

Uuringu abil määrati liiva osakeste keskmine suurus ning elementkoostis erinevate jahvatusastmete juures. Osakeste suuruse määramiseks kasutati 100 kuni 200 kordset suurendust ja mõõdeti juhuslikult valitud (v.a anomaalse kujuga) tera läbimõõt juhuslikult valitud suunas. Igas jahvatusastmes mõõdeti 18 kuni 20 liivatera läbimõõt. Elementkoostis mõõdeti 50 kordse suurenduse juures iga jahvatusastme puhul kolmest proovist, igaühel vähemalt viiest erinevast kohast kogu vaadeldava ala ulatuses ning saadud info keskmistati. Liiva omaduste suure varieerumise tõttu on oluline võtta uuritavaid proove palju ja võimalikult erinevatest kohtadest, vastasel juhul on saadav info lokaalne ja ei pruugi kirjeldada räniallikat tervikuna.

2.2 Lubja aktiivsuse määramine

Nagu kirjanduse ülevaate peatükis kirjeldati, on kasutatava lubja aktiivsus oluline C/S teguri määramisel. Aktiivsuse all mõeldakse lubja kustumise protsessi kiirust, mis käesolevas töös määrati Eesti ehitusstandardi EVS-EN 459-2:2010 järgi. Katseseade koosnes olmekäibe termosest, mis oli termiliselt kaanega suletav. Läbi kaane ulatus termomeeter, mis mõõtis magnetsegajaga segatavat massi. Kuna katseseade erines oluliselt standardis kirjeldatavast, valideeriti see ka esmalt ekvivalentsuse määramisega.

Aktiivsuse määramiseks viidi termosesse $150 \pm 0,5$ g toatemperatuuril CaO, millele lisati 600 ± 1 g H₂O temperatuuriga $20 \pm 0,5$ °C. Jälgiti temperatuuri muutumist ajas kuni väärtuseni 95 °C.

2.3 AAC katsekehade valmistamine

Kuna töö eesmärgiks oli uurida räniallika mõju AAC omadustele ja struktuurile, ei olnud ülemäära olulised absoluutsed survetugevused ja tihedused, vaid nende sõltuvus liiva omadustest. Pigem oli oluline, et poorbetooni pooride struktuur, kerkimine ja üleüldine makrotasandil käitumine oleksid ootuspärased ja mitte anomaalsed. Seega seati retsepti sihtsurvetugevuseks vähemalt 1 MPa ja sihttiheduseks kuni 1000 kg/m³.

Katsekehad valmistati isekoostatud retsepti järgi. Retsepti koostamisel lähtuti AS Bauroc ja Riigiressursside Keskus OÜ retseptidest ning teaduskirjanduses leiduvatest andmetest. Üldine toorainete sisaldus on leitav tabelis 2. AAC valmistamisel kasutati Männiku puurkaevu vett, Nordkalk R5 lupja, Knauf Baugips ehituskipsi ja EVS-EN 197-1:2002 standardile vastavat Portlandi ehitustsementi. Liiva- ja jäägišlammi ei kasutatud, kuna nende olemasolu ei ole käesoleva töö raames oluline ning nendega kaasnevad täiendavad muutujad ja retsepti keerukus. Retsepti jaoks määrati ka optimaalne W/S tegur, milleks osutus 0,7. AAC tihedust reguleeriti alumiiniumi pulbri (AP) koguse abil, optimaalseks sisalduseks leiti 0,2 (w/w)% sideainest.

Tabel 2. Lähteainete suhe katsekehade valmistamisel

Lähteaine	Liiv	Lubi	Tsement	Kips	AP	Vesi
Kogus (w/w)%	54,4 %	4,7 %	38,9 %	2 %	0,2 % sideainest	70 % kuivainest

Lähteainetest kokku segatud šlamm valati silindrilistesse vormidesse, mis olid kliimakambris 12 tundi temperatuuril 42 °C suhtelisel õhuniiskusel 70%. Seejärel toimus katsekehade vormidest eemaldamine ja autoklaavimiseks sobivaks kujuks lõikamine. Lisaks olid katsekehad kambris ilma vormita 2 tundi tingimustel vastavalt 52 °C ja 70% RH. Autoklaavimine toimus veeaurus rõhul 12 bar 10 tunni jooksul (lisa 1). Tavapärasel tootmises on tavaks veeauru autoklaavi sisestamine düüside abil samal ajal õhku eemaldades. Töös kasutatav seade oli oluliselt lihtsam ning veeaur tekkis varem kambris viidud vee kuumutamisel. Õhk eemaldati kambrist 105 °C juures avades kambri kraani kuni õhu eraldumise lõppemiseni.

2.4 AAC katsekehade uurimine

2.4.1 Kuivtiheduse ja survetugevuse määramine

Ääreefektide vähendamiseks lõigati autoklaavimise läbinud poorbetooni kehadest välja silindrilised toorikud diameetriga 48 mm ja kõrgusega 50 mm. Kuigi poorbetoonist toodetud elemendid on enamasti risttahuka kujulised ning kuubikujulised toorikud oleksid informatiivsemad, tuli need kasutatavatest seadmetest lähtuvalt valmistada silindrilised. Kuivtiheduse määramiseks kaaluti toorikud kohe peale vaakumahjust välja võtmist ning mõõdeti ruumala, mille põhjal arvutati tihedus. Iga jahvatusastme kohta valmistati kolm toorikut ning saadud tulemused keskmistati.

Toorikutele määrati 28-päevane survetugevus, registreerides digitaalselt iga ühe sekundi tagant katseandmed ehk avaldatava jõu ja katsekeha pikkuse muutuse ning nende põhjal arvutati

survetugevus ja suhteline deformatsioon. Kokkusuruvaid pindu lähendati teineteisele manuaalselt kuni purunemiseni. On oluline märkida, et lisaks esmasele purunemisele võib mõnedel juhtudel poorbetooni katsekehal esineda ka teine, kõrgema survetugevusega purunemine, kuid selleks ajaks on struktuur juba piisavalt hävinenud, et niisugusest poorbetoonist tehtud element ei oleks ehituseks kõlblik. Seetõttu arvutatakse selles töö katsekeha survetugevus alati esimese purunemise juures mõõdetud jõu põhjal.

2.4.2 SEM ja EDX uuringud

Autoklaavitud poorbetooni uurimisel kasutati samu seadmeid samadel töörežiimidel, mis liiva uurimise puhul (vt 2.1.3).

SEM ja EDX uuringute proovid lõigati välja survetestis tekkinud tükkide murdepindadest. Iga jahvatusastme kohta uuriti kolme proovi. Mikrograafide abil struktuuri uurimisel lähtuti Kaarel Siimuti süstemaatikast [6], mis on antud tööle kohandades järgnev:

- Üldine struktuur
 - Pooride kuju ja keskmine läbimõõt
 - Vaheseinte keskmine paksus
 - Anomaalsete pooride esinemine
- Pooridevaheline ala
 - Monokristallide esinemine
 - Vaheseinte pooride ja pragude esinemine
 - Tobermoriidi hulk ja vorm
- Pooride sisepind
 - Monokristallide esinemine
 - Aukude ja pragude esinemine poori seintel
 - Tobermoriidi hulk ja vorm

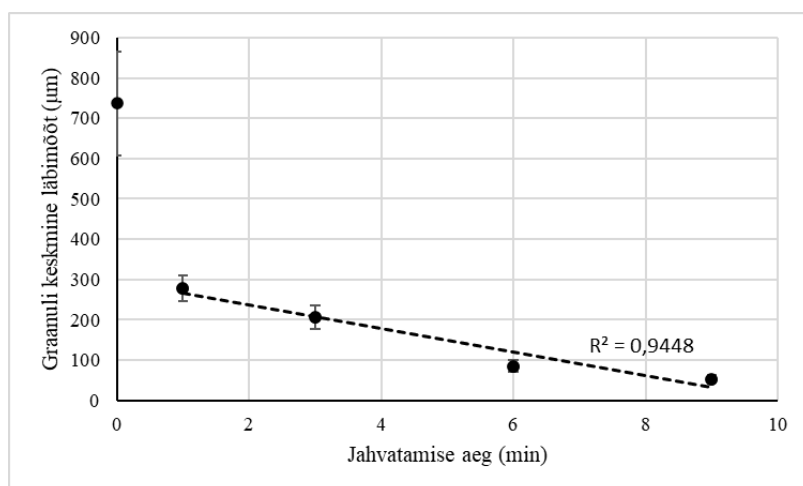
EDX analüüsi kasutati monokristallide tuvastamiseks. Pooride läbimõõtu ja vaheseinte määramiseks mõõdeti iga katsekeha kohta neli normaalset poori ja vaheseina vähemalt kolmelt erinevalt mikrograafilt.

3. Tulemused ja arutelu

3.1 Männiku liiva karakteriseerimine

3.1.1 Jahvatamine ja uuritavate fraktsioonide omadused

Tööstusliku tootmise vaatenurgast on vaja tagada võimalikult väike energiakulu lähteainete töötlemisel ehk võimalikult madal räniallika jahvatamise aeg. Seejuures on oluline, millise funktsiooni järgi vähenemine toimub. Vahemikus jahvatamata kuni jämedaim jahvatatud liiv ehk 280 µm liiv oli graanuli läbimõõdu vähenemine kiire. Peenemad liivad jahvatamise aegadega vahemikus 1...9 min (280...54 µm liivad) näitasid graanuli vähenemise ja jahvatamise aja vahel suhteliselt lineaarset seost. See tähendab, et esimeses lähenduses on ka energiakulu kasv peenema liiva saamisel uuritud vahemikus samuti lineaarne. Graanuli läbimõõdu sõltuvus jahvatamise ajast on toodud joonisel 5. Võrreldes üks minut jahvatatud liivaga oli peenima ehk üheksa minutit jahvatatud liivatera keskmine läbimõõt 81% väiksem.



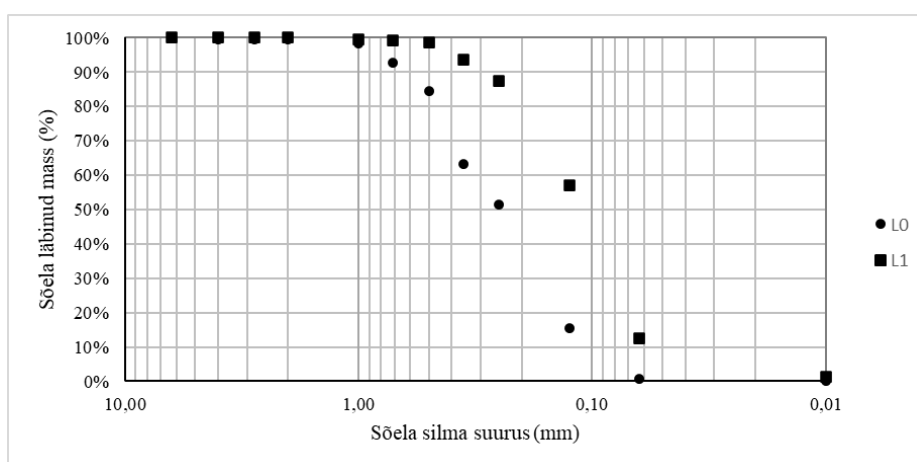
Joonis 5. Liiva graanuli keskmise läbimõõdu sõltuvus jahvatamise ajast

Jahvatamine aitas ka vähendada graanulite läbimõõdu dispersiooni, mis nagu AAC karakteriseerimise osas selgub, tagas homogeensema poorbetooni. Iga uuritava fraktsiooni keskmise osakese läbimõõt on toodud tabelis 3. Jahvatamata liiva korral oli diameetri määramatus suur loodusliku liiva loomuliku jaotumise tõttu. Juba ühe minutiline jahvatamine aitas oluliselt vähendada liivaterade mõõtmete varieeruvust ning pikem töötlemine ühtlustas seda veelgi enam.

Tabel 3. Erinevate fraktsioonide graanulite keskmine läbimõõt

Fraktsiooni nimi	L0	L1	L3	L6	L9
Jahvatamise aeg [min]	0	1	3	6	9
Liivatera keskmine läbimõõt [μm]	740 $\pm$ 130	280 $\pm$ 30	210 $\pm$ 30	90 $\pm$ 10	54 $\pm$ 8

Sõel-kaskaad analüüsi tulemused töötlemata liiva ja 280 μm liiva osakeste suuruse järgi jaotumiste kohta on toodud joonisel 6. Joonised näitavad selgelt liivaterade jaotuse koondumist ja liikumist väiksemate osakeste poole. Näiteks L0 puhul läbis 500 μm silmaga sõela 85% teradest samas kui L1 juures oli see hulk 99%. 125 μm silmaga sõela puhul olid vastavad hulgad 16% ja 57%.



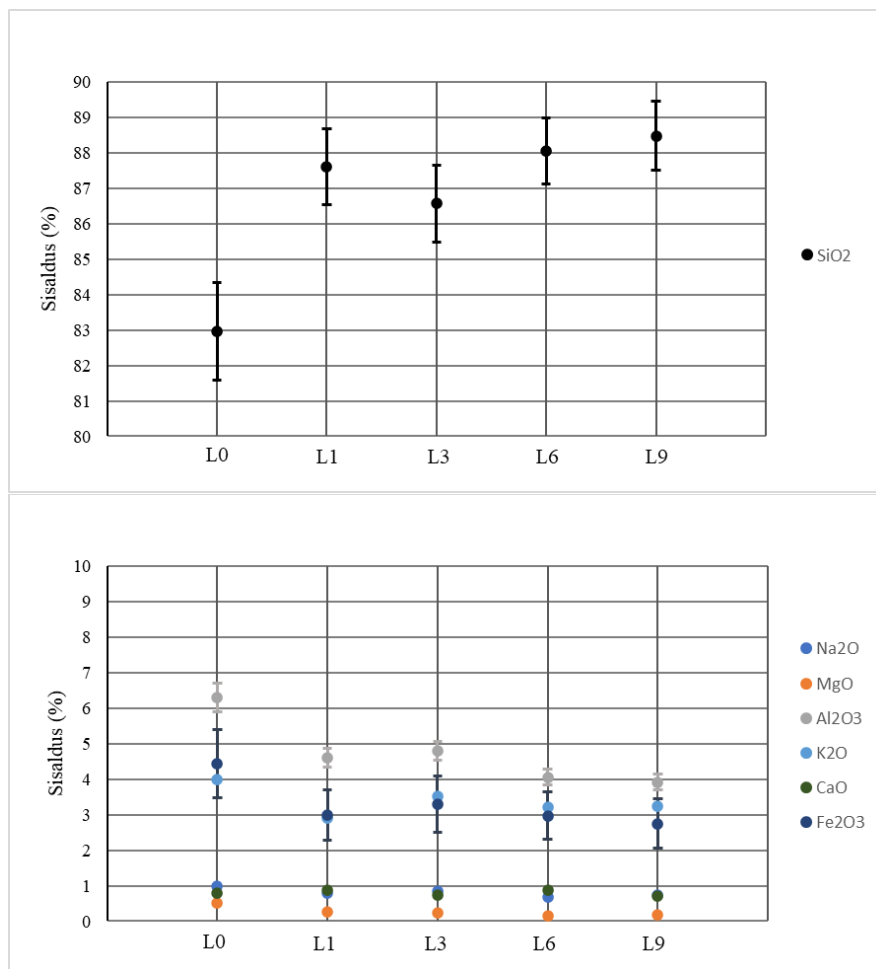
Joonis 6. Osakeste jaotumine sõel-kaskaad analüüsil

Kasutatud sõel-kaskaad analüüs ei sobinud 210 μm ja peenemate liivade jaotumise uurimiseks. Nende puhul muutus väiksemate osakeste osakaal piisavalt suureks, et ummistada sõelad ja takistada edasist jaotumist. Küll aga saab nende puhul analüüsi tulemuste põhjal väita, et kõigi kolme fraktsiooni puhul oli sisuliselt kogu mass vahemikus 0...250 μm , kuna 100% osakestest läbis 250 μm silmaga sõela (lisa 2). Kuigi jaotumine selles vahemikus ei ole selge, võib eeldada, et arvestatavas osas oli tegu mölliga ehk 2...63 μm suuruste osakestega. Samuti oli tõenäoliselt mõju avaldaval määral tegu saviga ehk <2 μm läbimõõduga osakestega. Mölli ja savi potsolaansete omaduste tõttu on selliste räniallikate puhul võimalik vähendada vajaliku tsemendi kogust ning autoklaavimise aega.

3.1.2 Elementkoostis

EDX pool-kvantitatiivse analüüsiga määratud liivaterade elementkoostis on leitav joonisel 7. Kuna EDX analüüs ei võimalda määrata orgaaniliste ainete sisaldust, tehti kõik arvutused eeldusel, et orgaanilisi ühendeid liivades ei leidunud. Väiksemate osakestega fraktsioonide

puhul oli kõrgem SiO_2 sisaldus ja madalam lisandite sisaldus. Eriti selgelt avaldus erinevus töötlemata liiva ja L1 vahel. See viitab, et lisandeid leidis vähem liivaterade sisemistes kihtides. L0 ja L1 vahel oli kvartsiosakese suuruse muutuse hüpe suurim ning seetõttu ei ole võimalik öelda, kas lisandite kontsentratsioon oli suurim tera pinnal või ulatus selline kiht sügavamale graanuli sisse.



Joonis 7. Elementide jaotus erineva jahvatusmääraga liivades

SiO_2 sisaldus püsis vahemikus 83...89%, mis on suhteliselt madal. Räniallika ränidioksiidi sisaldus peaks olema vähemalt 90% ning ideaalis peaks lisandite kogusisaldus olema vähem kui 5%. Madal SiO_2 sisaldus võib põhjustada C/S teguri ebaoptimaalset väärtust ning keerukamat kontrolli. See nõuab suuremat liiva osakaalu retseptis, mis lisaks negatiivsetele finantsaspektidele suurendab soovimatute lisandite koguseid poorbetoonis. Suured lisandite kogused võivad omakorda mõjutada tobermoriidi moodustumist ning põhjustada ka ebasobivaid makroskaalas mehaanilisi omadusi.

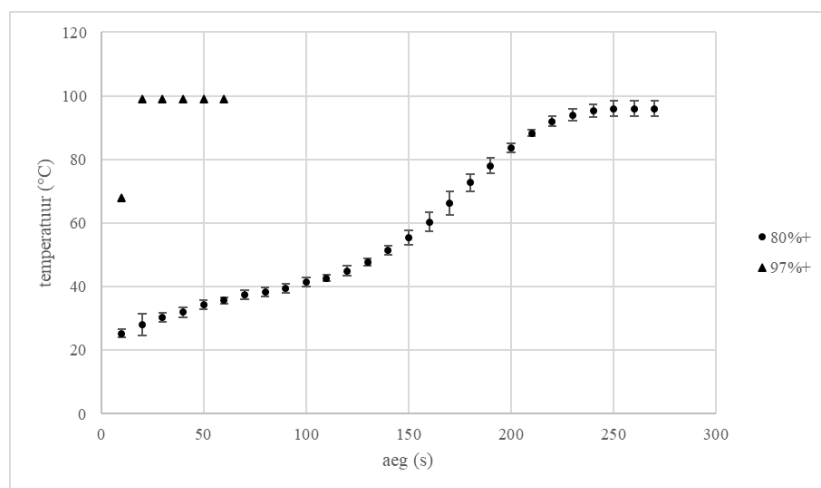
Jahvatamisel vähenesid märgatavalt Fe_2O_3 ja Al_2O_3 lisandite sisaldused, teiste lisandite sisaldus oli nii madal, et nende muutuse osas järeldusi teha pole võimalik. Lisandite vähenemine võis

tuleneda asjaolust, et need paiknesid terade pindmistes kihtides või olid adsorbeerunud terade pinnale ning jahvatatud liiva analüüsi andmetes avaldub selle tegelik koostis. Fe_2O_3 ja Al_2O_3 sisaldused olid peaaegu alati madalamad kui 5%, mis on täiesti tavapärane ning nende individuaalne mõju sellise räni allikaga valmistatud poorbetooni omadustele on minimaalne. Probleemiks osutub Fe_2O_3 ja K_2O summaarne osakaal, mis küündis jahvatamata liiva puhul kuni 10%-ni, kuid teiste fraktsioonide puhul jäi 7% ligi. Lisandite osakaalude koosmõjul väheneb SiO_2 osakaal, mis nagu eelpool mainitud, mõjutab negatiivselt AAC omadusi.

3.2 Retsepti arendus

Retsepti väljatöötamise käigus uuriti mitmeid aspekte, mis otseselt Männiku karjääri liivaga seotud ei ole, kuid mis mängivad rolli valmistatud AAC omadustes. Neist kõige olulisemateks on lubja aktiivsus, liiva niiskus ning optimaalse kerkimise W/S teguri leidmine. Järgnevalt on lühidalt kirjeldatud neid kõiki.

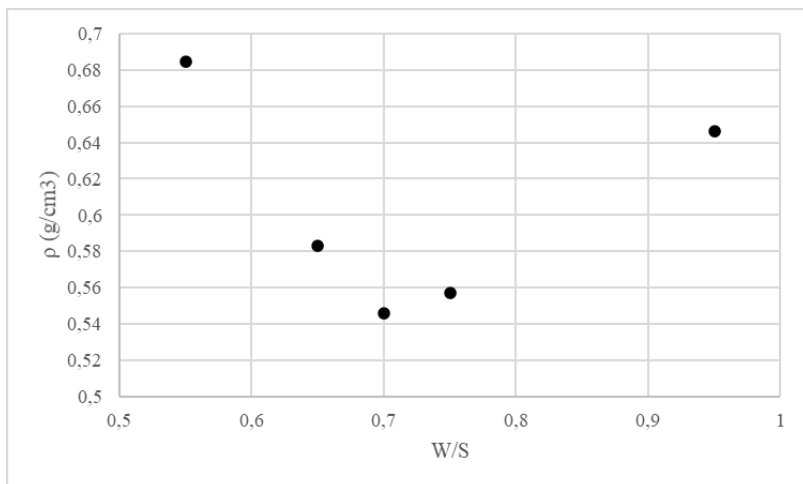
Lubja aktiivsus määrati eesmärgiga uurida retseptide edasisel arendamisel C/S teguri mõju poorbetoonile. Kasutatud 80% puhtusega ehituslubja võrreldi laboratoorse 97% CaO ning kirjanduses leiduvate andmetega (joonis 8). Selgus, et kasutatud lubi oli suhteliselt madala reaktiivsusega ning aktiveerus 110 sek peale katse lähteainete segamise algust. Sellest lähtuvalt kohandati retseptis segamise aega ja intensiivsust.



Joonis 8. Ehitus- ja laboratoorse lubja kustumiskiirused.

Retsepti jaoks sobiva W/S teguri leidmine toimus katse- ja eksitusmeetodil. Selgus, et optimaalne teguri väärtus jääb 0,7 juurde ning selle näol on tegu uuritud väärtustest ainsa sobivaga (joonis 9). Madalam tihedus W/S väiksemate ja suuremate väärtuste juures tulenes madalamast kerkimisest, mida omakorda võisid põhjustada vastavalt kas liiga suured

struktuurisisesed siduvad jõud või poore tekitava gaasi ehk H_2 eraldumine segust enne tahenemist.



Joonis 9. AAC tiheduse sõltuvus valmistamise W/S tegurist. Kasutatud 90 μm liiva.

3.3 Autoklaavitud poorbetooni karakteriseerimine

3.3.1 Töötlemata liiva poorbetoon

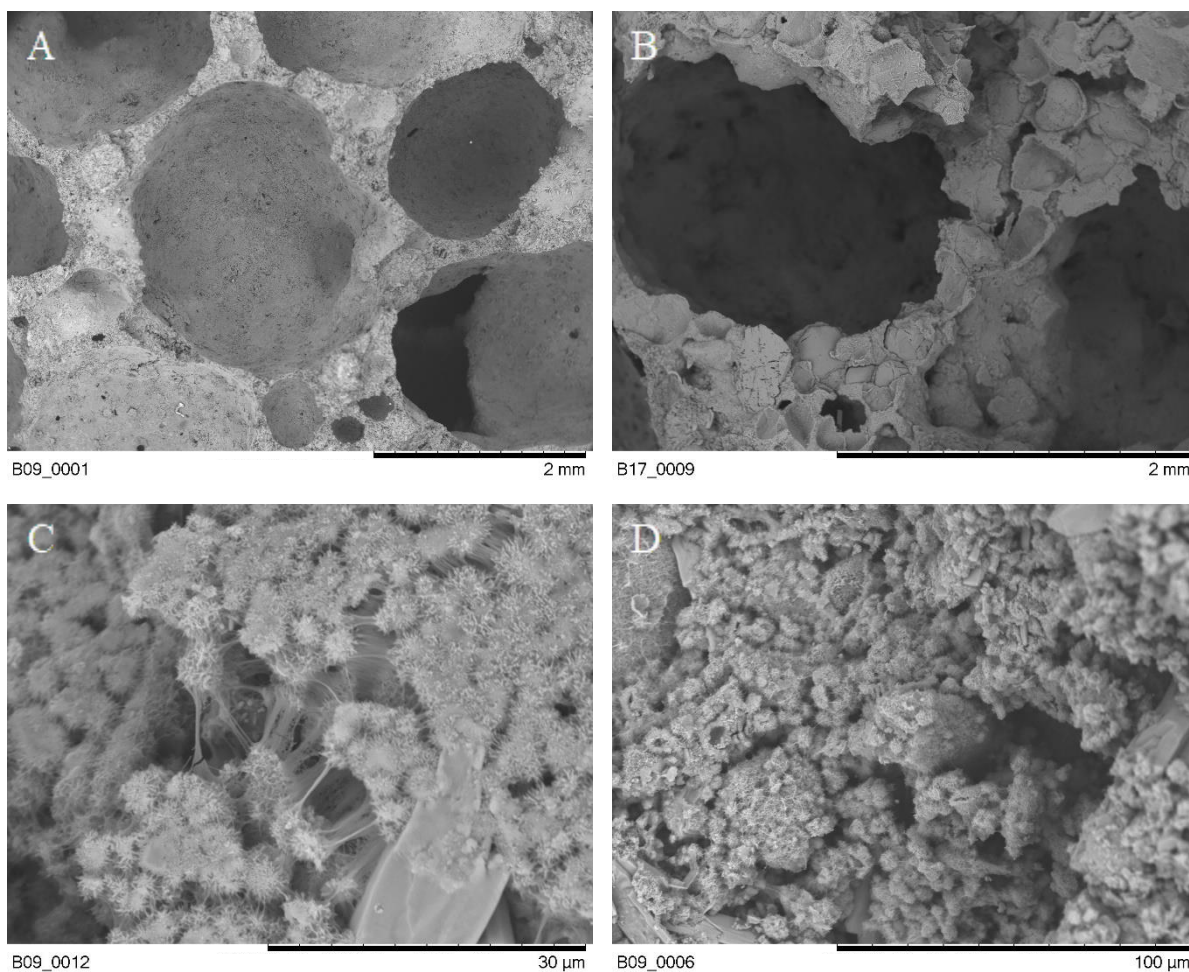
Töötlemata liiva AAC-l esinesid anomaalsed omadused. See tulenes eelkõige valmistamisel kliimakambris kerkimise käigus toimunud kihistumise tõttu. Paljud jahvatamata liiva osakesed olid liiga suured suspensioonis püsimiseks. Tulemuseks oli liiva-rikas tihedam kiht, mis settis põhja ja madalama tihedusega vee, mölli ja teiste lähteainete rikas pealmine kiht. Toorikutesse sattus üldiselt mõlemat kihti, kuid kihtide osakaal erines, mistõttu oli tiheduste ja survetugevuste variatsioon suur. Samal põhjusel ei ole mõtet rääkida ka keskmistest mehaanilistest omadustest. Töötlemata liiva poorbetooni omadusi kirjeldab tabel 4, kus on toodud niiske tihedus (ρ_{niiske}), kuivtihedus (ρ_{kuiv}), survetugevus (σ) ja mehaaniline efektiivsus (A_s), mis on survetugevuse ja kuivtiheduse ruudu jagatis. Keskmise poori läbimõõt oli $2,0 \pm 0,3$ mm ja keskmine vaheseina paksus 140 ± 30 μm .

Tabel 4. Töötlemata liiva AAC mehaanilised omadused

Katsekeha	ρ_{niiske} [g/cm ³]	ρ_{kuiv} [g/cm ³]	σ [MPa]	A_s [Pa·m ⁶ /kg ²]
B-09/070/L0	-	0,761	0,510	0,89
B-17/070/L0	0,864	0,612	0,431	1,21
B-18/070/L0	0,786	0,746	0,395	0,77

Mikrograafide vaatlus kinnitas, et B-09 ja B-18 pärinevad ülemisest kihist ning B-17 alumisest, suurema tihedusega kihist (joonis 10A ja 10B). Kuigi katsekehade valmistamine kihistumise

tõttu ebaõnnestus, tekkis sellest võimalus ülemise kihi näol näha väga peene räniallikaga valminud poorbetooni. Selles avaldusid selgelt liiga pika autoklaavimise aja tunnused ehk nõeljad tobermoriidi uusmoodustised nii poori seintel (joonis 10C) kui ka poore eraldavates vaheseintes. Lisaks leidis ka teisi nõeljaid C-S-H moodustisi, mille puhul tõenäoliselt ei ole tegu tobermoriidiga. Nende tekkimise põhjuseks võis olla ka madal C/S tegur, kuna lubja jääke vaheseintes ei leidunud, tõenäoliselt välja settimise tõttu. Puudusid ka räniallika jäägid. Vaheseinad ise olid anomaalse tühimike-rohke struktuuriga (joonis 10D), mille tekkimise põhjused on ebaselged. Vaheseinte omadused kandusid selgelt üle ka poori seintesse, kus selline struktuur oli H₂ mullide mõjul kokku surutud (lisa 3). Võib eeldada, et sellise AAC makropooride vaheline ühendus on väga hea ning niiskusjuhtivus kõrge. Samuti lubas suur tühimike hulk kõrget tobermoriidi osakaalu, kuid kas see võimaldab ka plaatja tobermoriidi teket üle-autoklaavimise tõttu öelda ei saa. Erinevalt kõigi teiste liivade poorbetoonidest, leidis vaheseintes ka C-S-H uusmoodustiste monokristalle (lisa 3).



Joonis 10. Töötlemata liiva AAC mikrograafid. A) Madalama tihedusega kihi struktuur. B) Kõrgema tihedusega kihi struktuur. C) Nõeljas tobermoriit poori seintel. D) Tühimike rohke anomaalne vahesein.

Alumises tihedamas kihis oli mikrograafidelt näha suuri reageerimata lähteainete tükke. Madala vee sisalduse tõttu ei ole normaalselt kulgenud tavapärased reaktsioonid, erandiks oli H₂ eraldumine. Seda näitas küllaltki tavapärane makropooride paigutus ja kuju. Nii vaheseintes kui ka poori seintel leidus väga erinevaid monokristalle alates ideaalsest plaatjast tobermoriidist kuni väga niitjate C-S-H uusmoodustisteni (lisa 3). Ka siin võimaldas suur tühimike hulk kõrget tobermoriidi osakaalu (lisa 3).

3.3.2 280 µm liiva poorbetoon

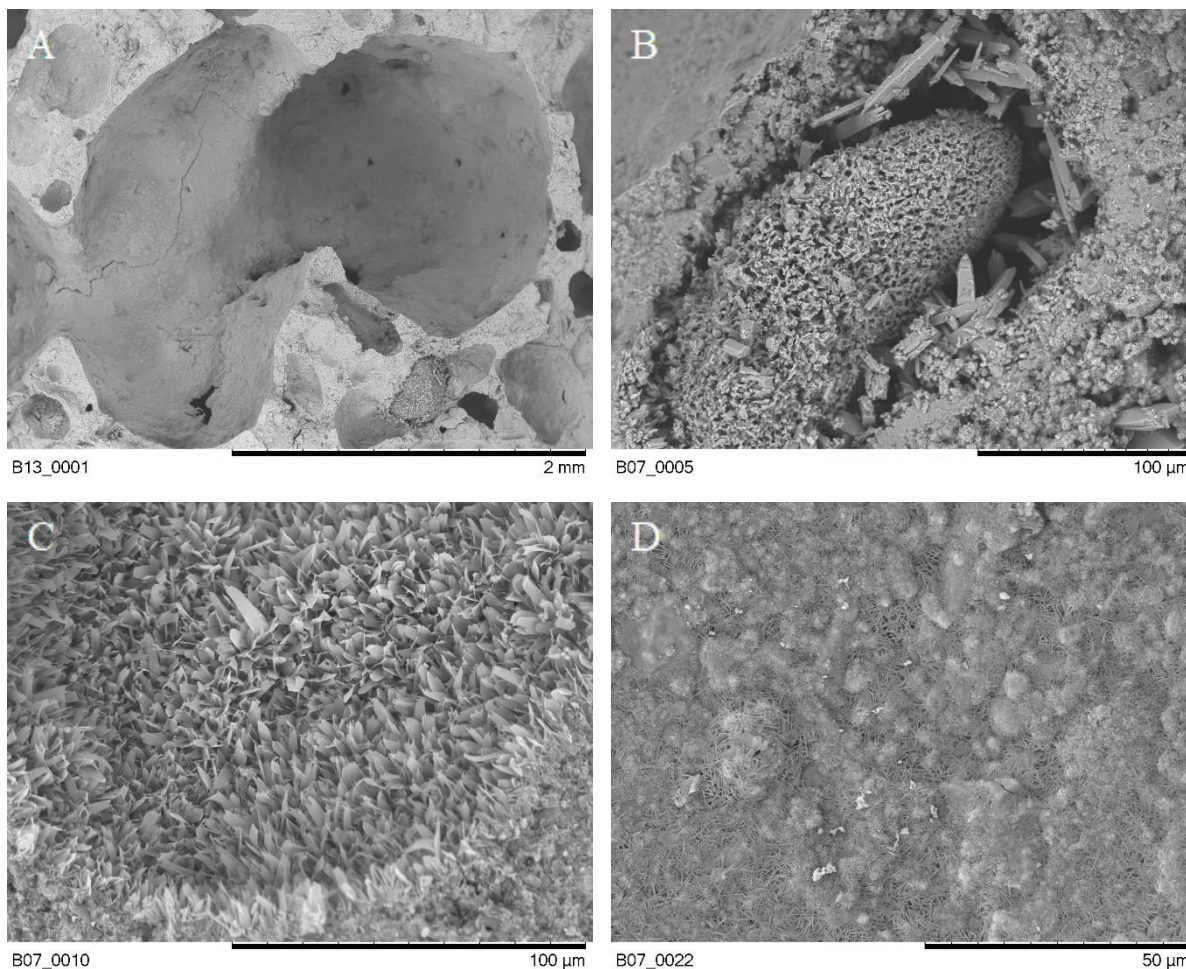
Referentsiks valiti 280 µm liiva retsepti järgi toodetud poorbetoon, kui kõige jämedama räniallika graanuliga ehk kõige vähem töödeldud normaalne AAC. Töötlemata liiva poorbetoon ei sobinud selleks võrreldes teiste retseptide järgi toodetud AAC-ga väga anomaalse struktuuri tõttu.

Kolme tooriku mehaaniliste omaduste andmed on toodud tabelis 5. 280 µm liiva AAC keskmine survetugevus oli 2,4±0,2 MPa ja mehaaniline efektiivsus 7,0±0,3 Pa·m⁶/kg². Keskmine poori läbimõõt oli 1,7±0,3 mm ja keskmine vaheseina paksus 130±30 µm.

Tabel 5. 280 µm liiva AAC mehaanilised omadused

Katsekeha	ρ _{niiske} [g/cm ³]	ρ _{kuiiv} [g/cm ³]	σ [MPa]	A _s [Pa·m ⁶ /kg ²]
B-07/070/L1	0,677	0,567	2,121	6,85
B-13/070/L1	0,742	0,607	2,517	7,38
B-14/070/L1	0,763	0,638	2,623	6,87

Struktuuri uurimisel mikrograafide abil oli näha suurt ühinenud pooride osakaalu, ehk esines palju olukordi, kus kahe poori vahel puudus vahesein (joonis 11A). See viitab eelpool mainitud vesiniku raskendatud liikumisele segu faasis ehk H₂ iseoptimeeruv käitumine oli takistatud. Selle põhjuseks võis olla vajalike sisepingete puudumine, mis omakorda võis tuleneda segu madalast paisumisest. Võrreldes peenema räniallika toorikutega oli 280 µm betoon kõrgema tihedusega ehk madalama paisumisega.



Joonis 11. 280 μm liiva AAC mikrograafid. A) Ühinenud makropoorid. B) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lähteaine jääk CaSO_4 uusmoodustistega. C) Plaatjas tobermoriit vaheseinas. D) Poori sein.

Vaheseintes leidis lähteaine jääke nagu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, SiO_2 ja mingid tuvastamata osakesed, mis suuruselt ja kujult olid väga sarnased ränidioksiid jääkidega. Nende näol võis tegu olla ka C-S-H uusmoodustustega. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jääke iseloomustab poorne struktuur, mida ümbritsevad CaSO_4 uusmoodustised (joonis 11B). Poorsus võis tuleneda ehituslubja arvestatavast kustutatud lubja osakaalust. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vahele oli paigutunud kustutamata lubi, mis vee lisamisel välja reageeris, jättes omapärase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ struktuuri. Vaheseinte pooridesse ja pragudesse tekkinud tobermoriit oli plaatjas (joonis 11C), mis viitab räniallika optimaalsele lahustuvusele ehk autoklaavimise protsessi käigus rakendatud tingimused (eelkõige autoklaavimise aeg) olid soodsad. Teatud lähteainete jäägid mõjutasid tobermoriidi kristallide kuju muutes neid pirdjamateks (lisa 3).

Vaatlusel oli poori seintel leiduv tobermoriit kujult sisuliselt identne vaheseintes leiduva tobermoriidiga ehk oli samuti plaatja kujuga (lisa 3). Poori seinu iseloomustasid mugarlikud C-S-H moodustised, mis vaheldusid klassikalise tobermoriidi rikka seina struktuuriga (joonis

11D). Kas moodustised asendavad tobermoriiti või olid kasvanud nende selle peale ei ole mikrograafide vaatlusel selge. Uusmoodustisi poori seintel ei leidunud.

3.3.3 210 µm liiva poorbetoon

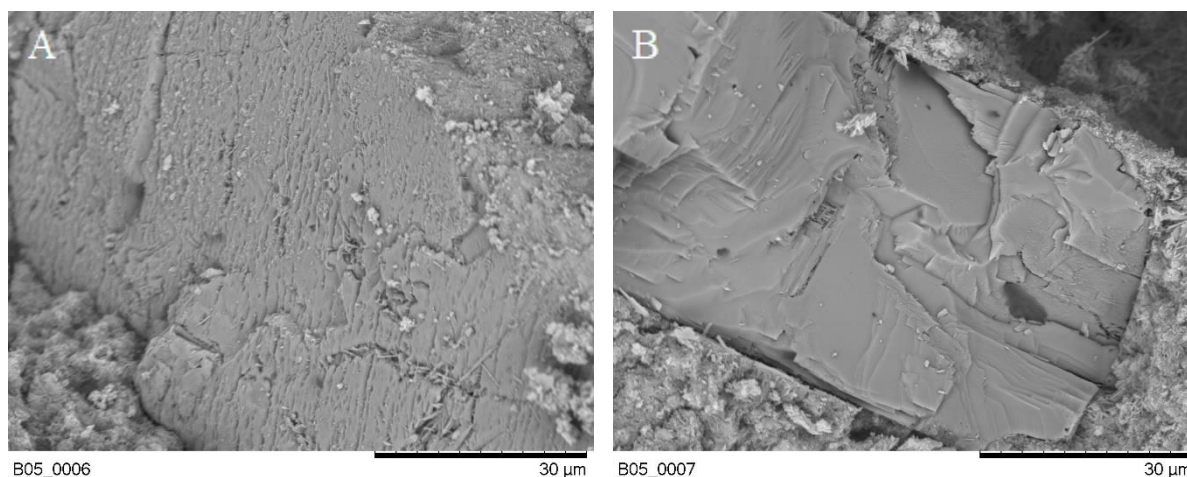
210 µm ja 280 µm liivade AAC struktuurid olid äärmiselt sarnased. Nii vaheseinte kui ka poori seinte tobermoriit oli plaatjas ilma märgatavate erinevusteta. Samuti olid sarnased vaheseintes leiduvate lähteainete jääkide osakesed. Peamiseks erinevuseks oli poori seintel esineva C-S-H moodustistega kaetud pinna puudumine. Esinesid identse koostisega üksikud C-S-H klastrid.

Keskmine survetugevus oli $2,9 \pm 0,3$ MPa ja keskmine mehaaniline efektiivsus 8 ± 1 Pa·m⁶/kg². Keskmine poori läbimõõt oli $1,3 \pm 0,1$ mm ja keskmine vaheseina paksus 90 ± 30 µm. Mehaanilised omadused on toodud tabelis 6.

Tabel 6. 210 µm liiva AAC mehaanilised omadused

Katsekeha	ρ_{niiske} [g/cm ³]	ρ_{kuiv} [g/cm ³]	σ [MPa]	A_s [Pa·m ⁶ /kg ²]
B-05/070/L3	-	0,583	3,046	9,26
B-11/070/L3	0,725	0,627	2,728	7,54
B-12/070/L3	0,743	0,673	2,844	6,50

Siin uuriti lähemalt ka SiO₂ jääkide ja tuvastamata SiO₂ sarnaste C-S-H jääkide erinevust. Esmasel vaatlusel olid need suuruse ja kuju poolest eristamatud, kuid EDX analüüsi ning struktuuri lähemal uurimisel on erinevused ilmselged (joonised 12A ja 12B). Sellest hoolimata ei õnnestunud tundmatuid osakesi üheselt identifitseerida.



Joonis 12. 210 µm liiva AAC mikrograafid. A) SiO₂ jäägi osake. B) Tuvastamata SiO₂ sarnane C-S-H osake.

3.3.4 90 µm liiva poorbetoon

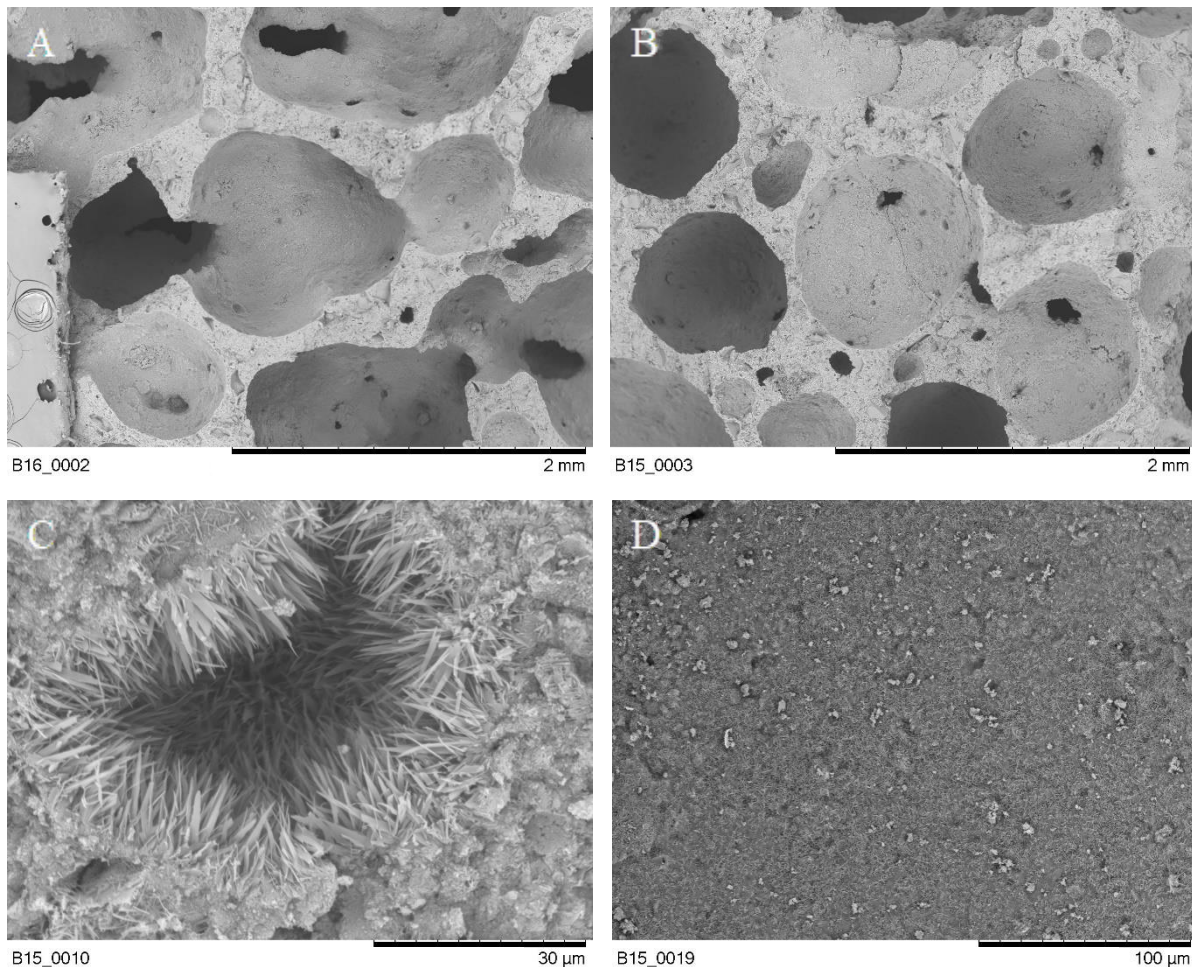
Võrreldes jämedamate räniallikatega oli siin märgata olulisemalt väiksemat kuivtiheduse variatsiooni katsekehade vahel. Võib eeldada, et viimaste puhul esineb kõigil mingil määral lähteainete kihistumist kerkimise käigus, kuigi kaugeltki mitte nii märgatavat kui töötlemata liiva AAC puhul. 90 µm liiva AAC puhul erines teistest oluliselt ühe tooriku survetugevus. Seda anomaaliat seletas katsekeha B-15 makropooride tasandi suurem korrastatus, vähem esines pooride ühinemisi, vaheseinte paksus oli ühtlasem ja pooride kuju oli kompaktsem (joonis 13A ja 13B). Kuidas B-15 kõrgem korrastatus õnnestus saavutada, ei ole teada, kuna kõigi katsekehade valmistamise metoodika oli identne. Võrreldes eelpool kirjeldatud jämedamate liivade poorbetoonidega oli makropooride tasandi struktuur stabiilsem ja ühtlasem. Makropooride kuju oli kompaktsem ning tunduvalt vähem oli ühinemisi ehk vaheseinata kõrvuti asuvaid makropoore. See näitab, et katsekeha kliimakambris tahenemise ajal on olnud sobivad reoloogilised omadused H_2 iseoptimeeruvaks käitumiseks.

Selle retsepti poorbetooni keskmine survetugevus oli $3,0 \pm 0,4$ MPa ja mehaaniline efektiivsus 10 ± 2 Pa·m⁶/kg² (tabel 7). Keskmine poori läbimõõt oli $1,12 \pm 0,09$ mm ja keskmine vaheseina paksus 110 ± 20 µm. Siin joonistus välja keskmise poori suuruse vähenemise trend räniallika osakese läbimõõdu vähenemisel.

Tabel 7. 90 µm liiva AAC mehaanilised omadused

Katsekeha	ρ_{niiiske} [g/cm ³]	ρ_{kuiiv} [g/cm ³]	σ [MPa]	A_s [Pa·m ⁶ /kg ²]
B-06/070/L6	-	0,547	2,845	9,96
B-15/070/L6	0,686	0,549	3,451	11,76
B-16/070/L6	0,691	0,587	2,617	8,01

Ka siin leidus vaheseintes tavapäraseid lähteainete jääke nagu Ca(OH)₂ (mis olid ümbritsetud CaSO₄ monokristallidega), SiO₂ ja tuvastamata osakesed. SiO₂ jäägi osakeste osakaal ei erinenud jämedamatest fraktsioonidest valmistatud katsekehade omadest, kuid nende läbimõõt oli tunduvalt väiksem. Vaheseinte tobermoriit oli oluliselt pirdjam, kuid sarnanes pigem plaatjale kui nõeljale tobermoriidile (joonis 13C). See näitab, et 10 tunnine autoklaavimise aeg oli 90 µm liiva jaoks juba liiga pikk. Erinevalt 280 µm ja 210 µm liivade AAC-le olid vaheseintes leiduvad poorid oluliselt väiksemad, kompaktsema kujuga ning täitunud tobermoriidi kristallidega, mida võib seostada kõrgema survetugevusega (joonis 13C).



Joonis 13. 90 μm liiva AAC mikrograafid. A) Tavapärase katsekeha pooride struktuur. B) Anomaalse katsekeha pooride struktuur. C) Pirdjad tobermoriidi kristallid vaheseina pooris. D) C-S-H klastrid poori seinal.

Kvartsiosakese diameetri vähenemise tõttu oli hästi näha poori seinte C-S-H uusmoodustiste suuruse ja esinemise vähenemine (joonis 13D). Need C-S-H klastrid tõenäoliselt mehaanilistes omadustes erilist rolli ei omanud, kuna need ei mõjutanud tobermoriidi või poori seina üldist struktuuri enda ümber. Üldiselt oli poori seinte struktuur väga tavapärane. Tobermoriit oli plaatjam kui vaheseintes ning sellega katmata piirkondi poori seintel esines väga vähe. Kristallstruktuuride ja vaheseinte tasanditel anomaalse B-15 ja tavapäraste proovide vahel erinevusi ei leidunud.

3.3.5 54 μm liiva poorbetoon

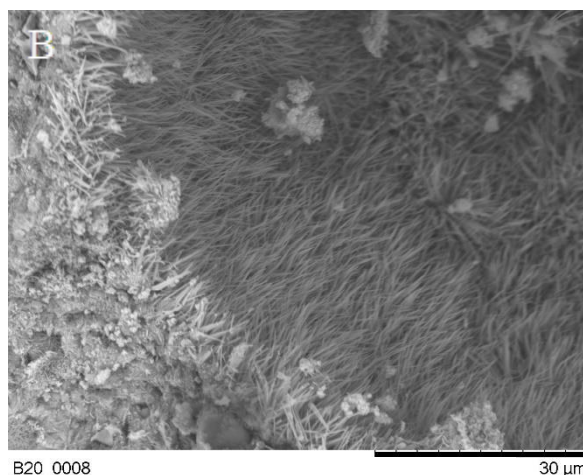
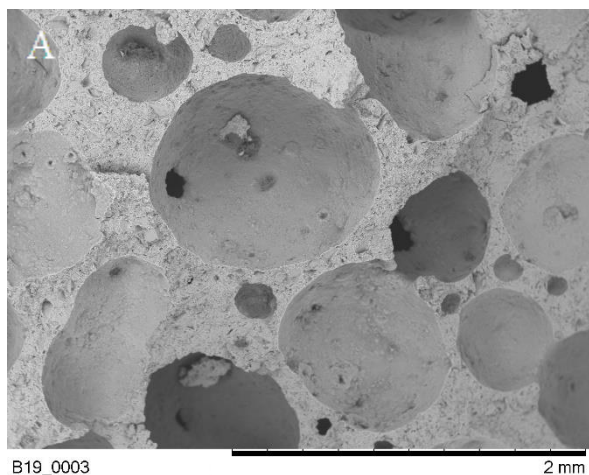
54 μm liiva AAC mehaanilised omadused on leitavad tabelis 8. Keskmine survetugevus oli $2,34 \pm 0,09$ MPa ja keskmine mehaaniline efektiivsus $9,1 \pm 0,5$ Pa·m⁶/kg². Kui 90 μm liiva poorbetooni juures anomaalse katsekeha tulemused välja arvata oli 54 μm liiva poorbetoonil kõrgeim mehaaniline efektiivsus. Keskmine poori läbimõõt oli $0,97 \pm 0,09$ mm ning vaheseina läbimõõt 100 ± 20 μm .

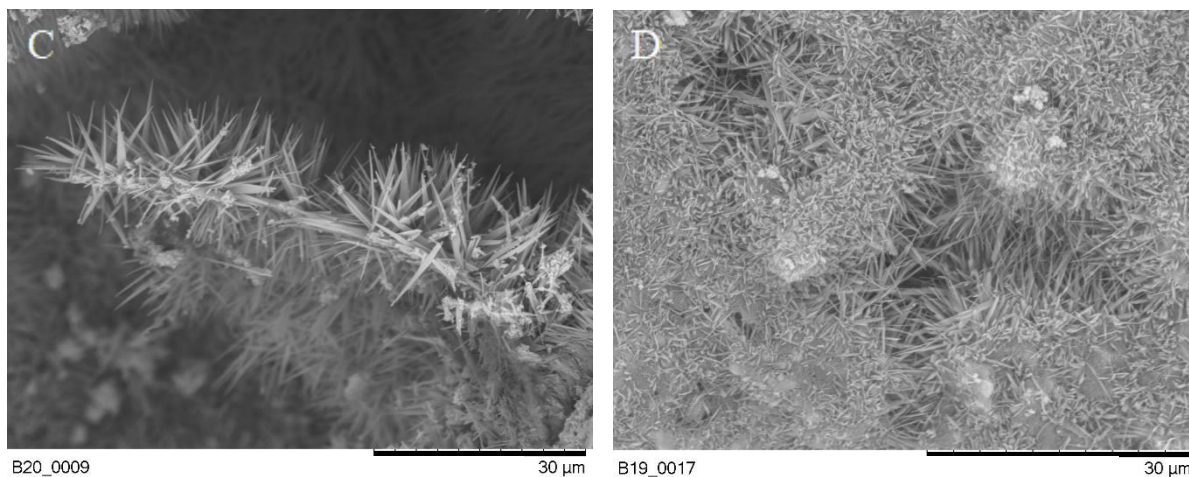
Tabel 8. 54 μm liiva AAC mehaanilised omadused

Katsekeha	$\rho_{\text{niiske}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	$\rho_{\text{kuiv}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	$\sigma [\text{MPa}]$	$A_s [\text{Pa}\cdot\text{m}^6/\text{kg}^2]$
B-08/070/L9	0,696	0,515	0,157	9,33
B-19/070/L9	0,705	0,538	0,195	8,47
B-20/070/L9	0,673	0,522	0,159	9,56

Makropooride tasandi struktuur oli 54 μm liiva AAC-l üldpildis sarnane 42 μm liiva poorbetooniga (joonis 14A). Pooride ühinemisi oli vähe ning nende kuju oli kompaktne. Märkimisväärne on eriti madal variatsioon erinevate toorikute proovide vahel. Tõenäoliselt pikemast liiva jahvatusajast tulenev väiksem kvartsitüki suuruse variatsioon tagas valmistamisel homogeensema pasta segamise käigus ja selle järgsel kerkimisel.

Ka vaheseinad sarnanesid 42 μm liiva poorbetooniga lähteaine jääkide esinemise ja pooride jaotumise aspektidest. Tobermoriit oli nõeljas ning leidis ka niitjaid moodustisi, mille näol ei olnud arvatavasti tegu tobermoriidiga (joonised 14B ja 14C). See näitab, et plaatja tobermoriidi tekkimiseks olid autoklaavimise tingimused valed. Tõenäoliselt oleks autoklaavimise aja vähendamisega võimalik saavutada kõrgema kvaliteediga tobermoriit ning seeläbi tõsta survetugevust ja mehaanilist efektiivsust.



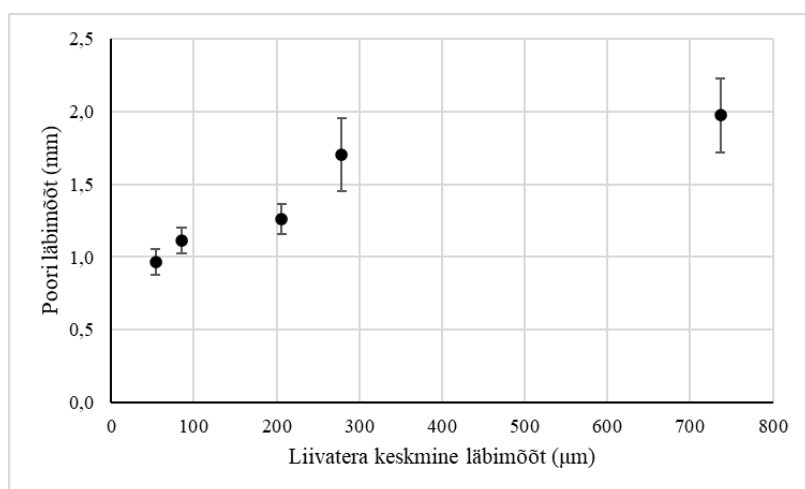


Joonis 14. 54 μm liiva AAC mikrograafid. A) Poorbetooni üldine struktuur. B) Niitjad uusmoodustised vaheseintes. C) Nõeljad tobermoriidi kristallid vaheseintes. D) Nõeljad tobermoriidi kristallid poori seintel.

Pooris seinte juures võib samuti tuua paralleeli 42 μm liiva poorbetooniga. Üldistes omadustes, sealhulgas mainitud poori seinte C-S-H klastrite esinemise sageduses ja suuruses märgatavat vahet ei olnud. Erandiks oli poori seinte tobermoriit, mis oli võrreldes 42 μm liiva AAC-ga veelgi nõeljana kujuga (joonis 14D).

3.5.6 Seosed erinevate liivafraktsioonide poorbetoonide vahel

Selle töö raames uuritud räniallikate erinevate fraktsioonide puhul ilmnes selge seos liiva osakese keskmise ja poori keskmise läbimõõdu vahel. Vähem jahvatatud räniallikate puhul esinesid suuremad makropoorid (joonis 15). Vaheseinte paksuse juures sellist seost ei avaldunud.



Joonis 15. Pori läbimõõdu seos liivatera läbimõõduga. Suuremad liivaterad põhjustavad suuremaid poore.

Väiksemate osakestega fraktsioonide puhul tähendati madalamat tihedust, kõrgemat survetugevust ning nende läbi kõrgemat mehaanilist efektiivsust. Need omadused paranesid osakese suuruse vähenemisel kuni 90 μm liiva AAC-ni. 90 μm liiva ja 54 μm liiva poorbetoonid mehaanilistes omadustes oluliselt ei erinenud. Küll aga erinesid need kristallstruktuuride tasandil. 54 μm liiva AAC puhul olid tobermoriidi monokristallid pirdjamad ja esines ka niitjat struktuuri, mille näol ei ole ilmselt tegu tobermoriidiga. Selliste struktuuride tekke põhjuseks oli tõenäoliselt üle-autoklaavimine ning autoklaavi tingimuste korrigeerimisel võib jätkuda mehaaniliste omaduste paranemise trend. Ideaalseid plaatjaid tobermoriidi struktuure esines 280 μm ja 210 μm liiva poorbetoonides. Sellest lähtuvalt tuleks vähendada peenemate fraktsioonide poorbetoonide autoklaavimise aegu liivatera suuruse vähenemisega proportsionaalselt.

Kuna pool-kvantitatiivse analüüsi käigus selgus, et Männiku liiv võib sisaldada oodatust rohkem soovimatuid lisandeid, vajab keemilise koostise uurimine täiendavat täpsemat analüüsi. Edasised Männiku karjääri uuringud peaksid sisaldama keemilise koostise uurimist kvantitatiivsetel meetoditel, mis suudavad tuvastada ka orgaaniliste ühendite osakaalu.

Kokkuvõte

Käesoleva töö raames uuriti Männiku karjääri liiva kui potentsiaalset AAC räniallikat ning karakteriseeriti nii liiva kui ka liivast valmistatud autoklaavitud poorbetooni. Töötati välja uuritud lähteainetele sobiv retsept autoklaavitud poorbetooni laboratoorseks tootmiseks. Peamisteks uurimismeetodideks olid sõel-kaskaad, SEM mikrograafide ja EDX analüüsid.

Tuvastati Männiku karjääri liiva keemiline koostis ning määrati SiO_2 ja esinevate lisandite ligikaudsed suhtelised sisaldused. Uuriti erinevaid liiva töötlusastmeid, mis kajastusid kuulveskiga jahvatamisel saavutatud liivatera keskmise suuruse vähenemises. Selgus, et uuritud vahemikus väheneb liivatera suurus ajas lineaarselt. Erinevate osakese suurusega fraktsioonide juures tuvastati lisandite paiknemine terade välimistes kihtides ning SiO_2 suurem osakaal sisemistes kihtides. SiO_2 sisaldus jäi uuritud fraktsioonides 83...90% vahele ning levinumateks lisanditeks olid Fe_2O_3 , Al_2O_3 ja K_2O . Osakeste jaotumist erinevates fraktsioonides uuriti sõel-kaskaad analüüsil, mis näitas, et jahvatamine homogeniseerib fraktsioone ning vähendab osakeste suuruse variatsiooni. Lisaks selgus, et ühtlustamiseks piisab juba väga vähesest töötlustest ehk antud töös ühe minutilisest jahvatamisest ning suurem töötlemine ehk kuue minutiline jahvatamine muudab suuruse hajumise sisuliselt olematuks.

Männiku liivast valmistatud poorbetooni juures uuriti eelkõige survetugevuse ja tiheduse muutust erinevate liiva fraktsioonide juures, seejuures tehes seoseid makroskaalas mehaaniliste omaduste ja struktuuri vahel. Selgelt ilmnes seos kõrgema struktuuri korrapära ja kõrgema survetugevuse vahel. See seos avaldus nii liivatera suuruse vähenemisel korrapära kasvamisel kui ka kohati sama liivaga valmistatud kuid erineva korrapäraga katsekehade vahel. Üldiselt räniallika liivatera suuruse vähenemisel kõik poorbetooni makroskaalas mehaanilised omadused paranesid kuni teatud piirväärtuseni. Omaduste paranemise pidurdumine peenemate fraktsioonide puhul võib tuleneda üle-autoklaavimisest. Tobermoriidi kvaliteet langes väiksemate osakestega fraktsioonide juures, moodustades pirdjaid, nõeljad ja ka niitjaid struktuure, mis on tüüpiline liiga pika autoklaavimise tunnus. Suuremate osakestega liiva juures oli tobermoriit plaatjam, mida seostatakse paremate tugevusomadustega.

Tõestati, et mõõdukalt töödeldud Männiku karjääri liiv sobib autoklaavitud poorbetooni tootmiseks, kuid seejuures võib sisaldada liiga kõrgel määral soovimatuid lisandeid. Liiva kvaliteedi ja selle poorbetooni sobivuse lõplikuks kinnitamiseks oleks vaja selle keemilist koostist veel lähemalt uurida kvantitatiivsetel meetoditel.

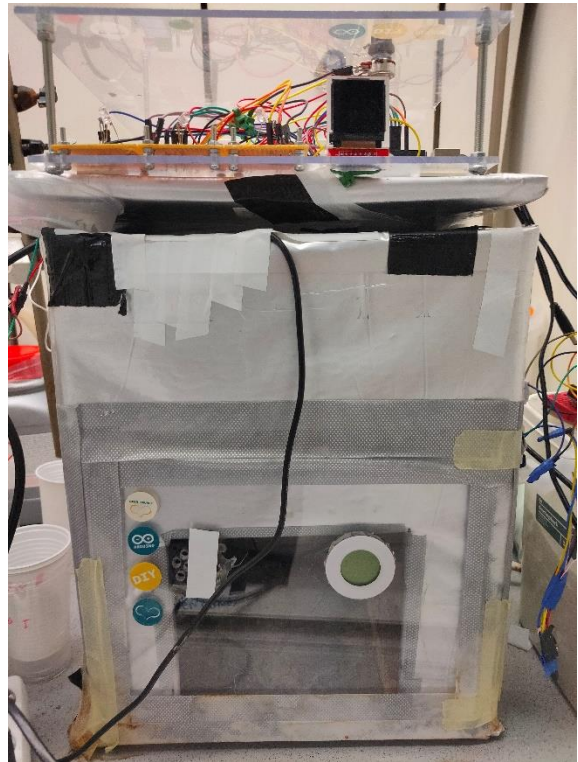
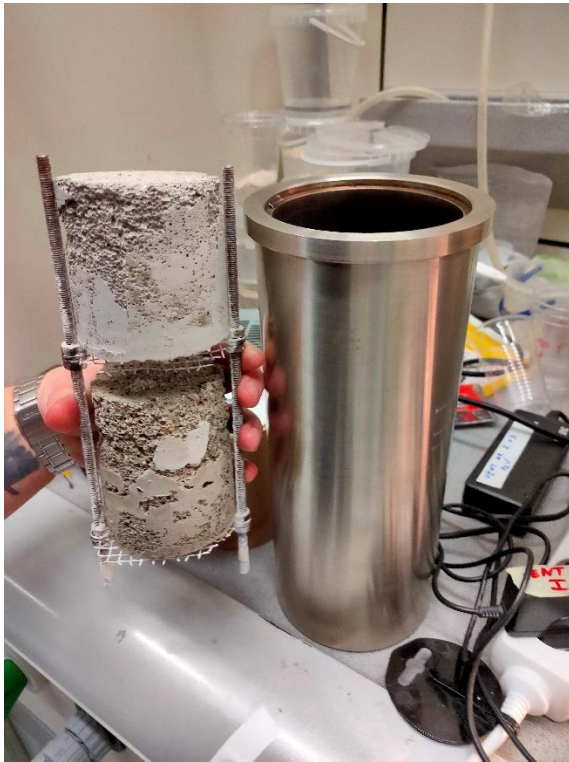
Kasutatud kirjandus

- [1] X. Qu and X. Zhao, "Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 505–516, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.208.
- [2] "Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv (EL) 2018/844, 30. mai 2018, millega muudetakse direktiivi 2010/31/EL hoonete energiatõhususe kohta ja direktiivi 2012/27/EL energiatõhususe kohta (EMPs kohaldatav tekst)," vol. 156. Jun. 19, 2018. Accessed: Jul. 26, 2021. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj/est>
- [3] "Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL, 19. mai 2010, hoonete energiatõhususe kohta," vol. 153. Jun. 18, 2010. Accessed: Jul. 26, 2021. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj/est>
- [4] W. van Boggelen, "History of Autoclaved Aerated Concrete The short story of a long lasting building material," *AAC Worldw.*, vol. 10, pp. 8–13, 2018 2014.
- [5] M. Otsus, "Autoklaavitud poorbetooni struktuuri ja survetugevuse sõltuvused," Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, Tartu, 2017.
- [6] K. Siimut, "Armeerivad lisandid autoklaavitud poorbetoonis," Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, Tartu, 2019.
- [7] A. Thongtha, S. Maneewan, C. Punlek, and Y. Ungkoon, "Investigation of the compressive strength, time lags and decrement factors of AAC-lightweight concrete containing sugar sediment waste," *Energy Build.*, vol. 84, pp. 516–525, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.026.
- [8] S. Aroni, *Autoclaved Aerated Concrete - Properties, Testing and Design*. London: CRC Press, 1993.
- [9] H. F. W. Taylor, *Cement chemistry*, 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.
- [10] A. Hartmann, D. Schulenberg, and J.-C. Buhl, "Synthesis and Structural Characterization of CSH-Phases in the Range of C/S = 0.41 - 1.66 at Temperatures of the Tobermorite Xonotlite Crossover," *J. Mater. Sci. Chem. Eng.*, vol. 03, no. 11, pp. 39–55, 2015, doi: 10.4236/msce.2015.311006.
- [11] J. R. Houston, R. S. Maxwell, and S. A. Carroll, "Transformation of meta-stable calcium silicate hydrates to tobermorite: reaction kinetics and molecular structure from XRD and NMR spectroscopy," *Geochem. Trans.*, vol. 10, no. 1, p. 1, Jan. 2009, doi: 10.1186/1467-4866-10-1.
- [12] H. F. W. Taylor, "Tobermorite, jennite, and cement gel," *Z. Für Krist.*, vol. 202, pp. 41–50, 1992.
- [13] M. Nedeljković, J. Visser, T. G. Nijland, S. Valcke, and E. Schlangen, "Physical, chemical and mineralogical characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: A comparative study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, p. 121475, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121475.
- [14] M. Westerholm, B. Lagerblad, J. Silfwerbrand, and E. Forssberg, "Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 4, pp. 274–282, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008.
- [15] A. Korpa, T. Kowald, and R. Trettin, "Hydration behaviour, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale pozzolanic additives," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 7, pp. 955–962, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.02.010.
- [16] Z.-Q. Wu and J. F. Young, "The hydration of tricalcium silicate in the presence of colloidal silica," *J. Mater. Sci.*, vol. 19, no. 11, pp. 3477–3486, Nov. 1984, doi: 10.1007/BF00552262.

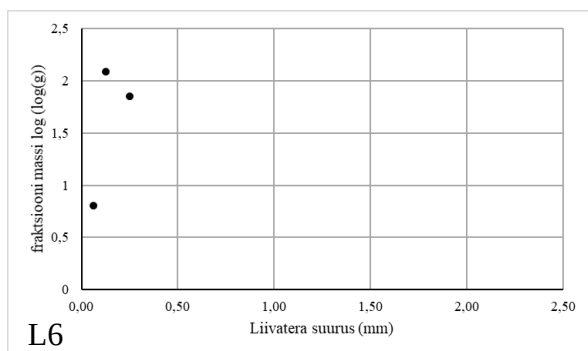
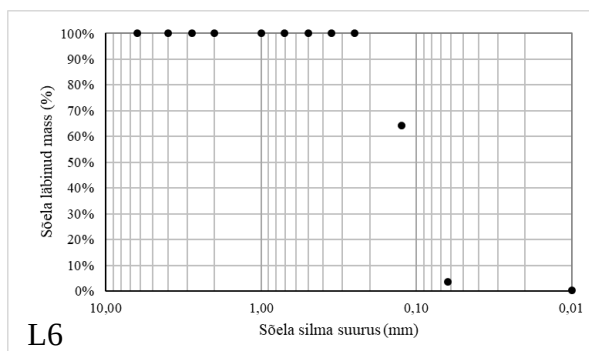
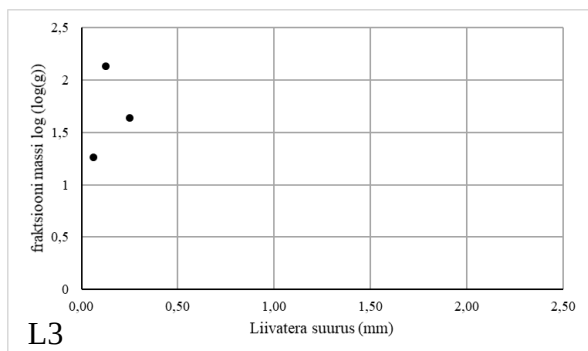
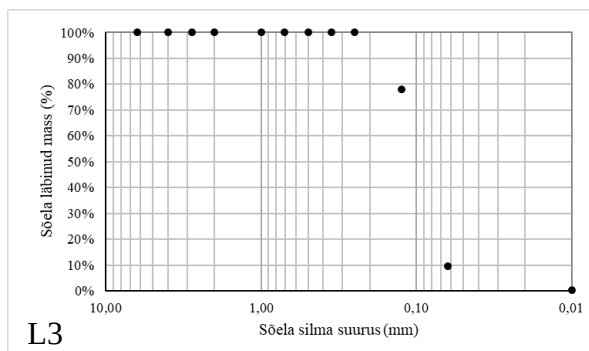
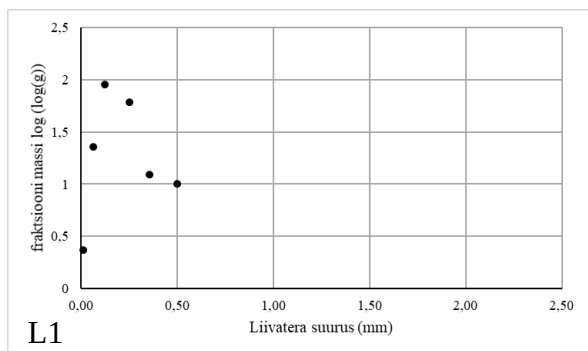
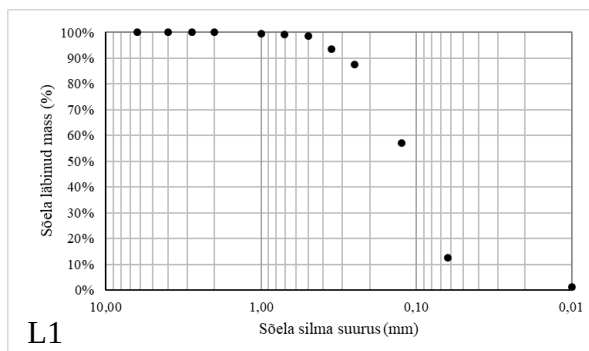
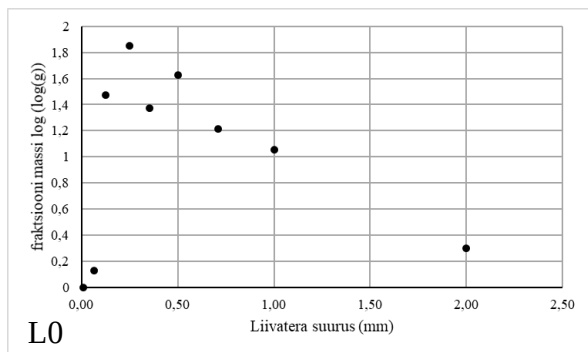
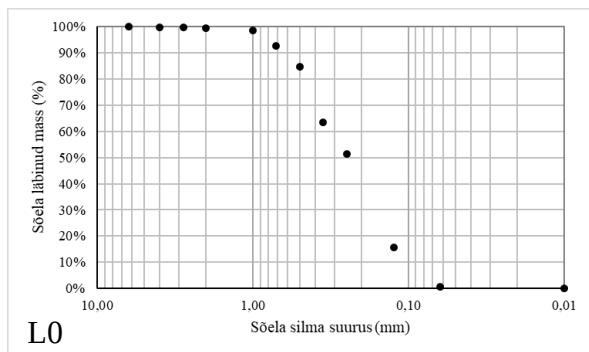
- [17] G. Pachideh and M. Gholhaki, "Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 26, p. 100856, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jobte.2019.100856.
- [18] M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, and S. Khani, "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 879–888, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.054.
- [19] C. Karakurt, H. Kurama, and İ. B. Topçu, "Utilization of natural zeolite in aerated concrete production," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.002.
- [20] X. Huang, W. Ni, W. Cui, Z. Wang, and L. Zhu, "Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 1–5, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.034.
- [21] K. Matsui *et al.*, "In situ time-resolved X-ray diffraction of tobermorite formation in autoclaved aerated concrete: Influence of silica source reactivity and Al addition," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 5, pp. 510–519, May 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.01.022.
- [22] "The history of precast concrete elements," *Prilhofer Consulting GmbH & Co. KG*. <https://www.prilhofer.com/precast-history> (accessed Apr. 05, 2021).
- [23] D. Charlton, "Insulated fireproof concrete form system," US10753093B2, Aug. 25, 2020 Accessed: Apr. 08, 2021. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US10753093B2/en>
- [24] F. W. Riepe, "Wall construction method using injected urethane foam between the wall frame and autoclaved aerated concrete (AAC) blocks," US8240103B2, Aug. 14, 2012 Accessed: Apr. 09, 2021. [Online]. Available: [https://patents.google.com/patent/US8240103B2/en?q=\(autoclaved+aerated+concrete+sandwich+\(panel+OR+element\)\)&country=WO,US,EP&status=GRANT&type=PATENT](https://patents.google.com/patent/US8240103B2/en?q=(autoclaved+aerated+concrete+sandwich+(panel+OR+element))&country=WO,US,EP&status=GRANT&type=PATENT)
- [25] K. Eskusson, *Autoklaavitud gaasilikaat*. Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus, 2001.
- [26] Y. Song, B. Li, E.-H. Yang, Y. Liu, and T. Ding, "Feasibility study on utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as aerating agent for the production of autoclaved aerated concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 56, pp. 51–58, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.006.
- [27] Y.-L. Chen, J.-E. Chang, Y.-C. Lai, and M.-I. M. Chou, "A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 622–629, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.116.
- [28] R. Jasiński, Ł. Drobiec, and W. Mazur, "Validation of Selected Non-Destructive Methods for Determining the Compressive Strength of Masonry Units Made of Autoclaved Aerated Concrete," *Materials*, vol. 12, no. 3, Art. no. 3, 2019, doi: 10.3390/ma12030389.
- [29] N. Narayanan and K. Ramamurthy, "Structure and properties of aerated concrete: a review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 5, pp. 321–329, Oct. 2000, doi: 10.1016/S0958-9465(00)00016-0.
- [30] A. O. Mydin and Y. C. Wang, "An Experimental Investigation of Mechanical Properties of Lightweight Foamed Concrete Subjected to Elevated Temperatures up to 600°C," vol. 1, p. 16, 2010.
- [31] M. Jerman, M. Keppert, J. Výborný, and R. Černý, "Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 352–359, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.036.

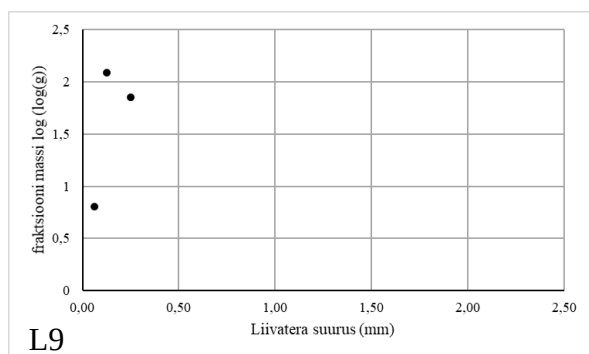
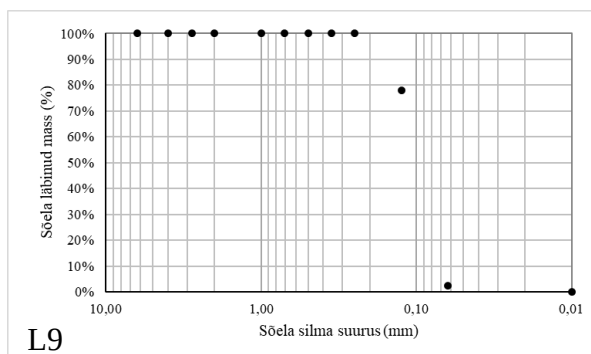
- [32] A. Laukaitis and B. Fiks, “Acoustical properties of aerated autoclaved concrete,” *Appl. Acoust.*, vol. 67, no. 3, pp. 284–296, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.apacoust.2005.07.003.
- [33] E. P. Kearsley and P. J. Wainwright, “Porosity and permeability of foamed concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 5, pp. 805–812, May 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00490-2.
- [34] I. Ioannou, A. Hamilton, and C. Hall, “Capillary absorption of water and n-decane by autoclaved aerated concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 6, pp. 766–771, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.01.013.

Lisa 1. Katseseadmete fotod



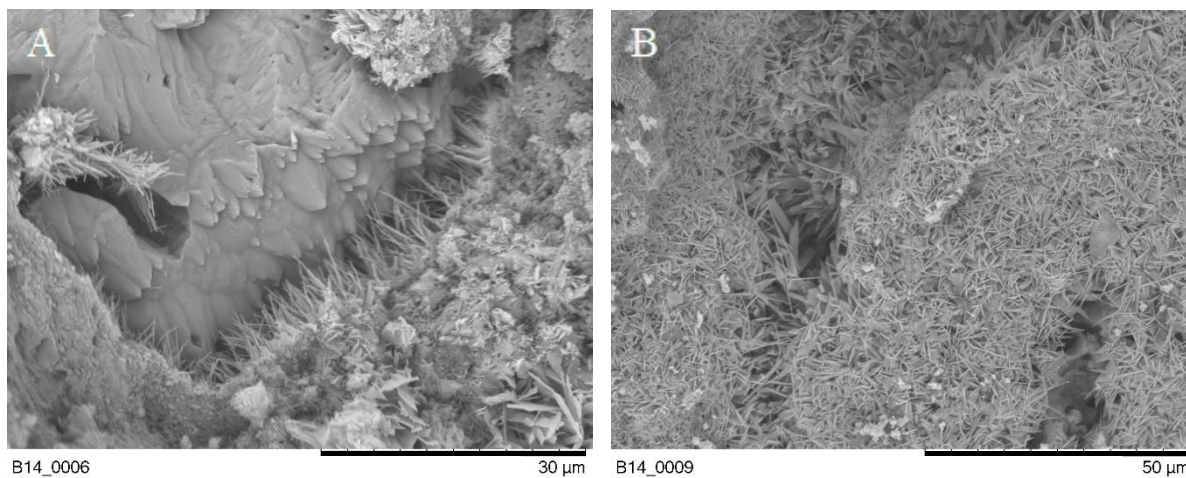
Lisa 2. Sõel-kaskaad analüüsi andmed



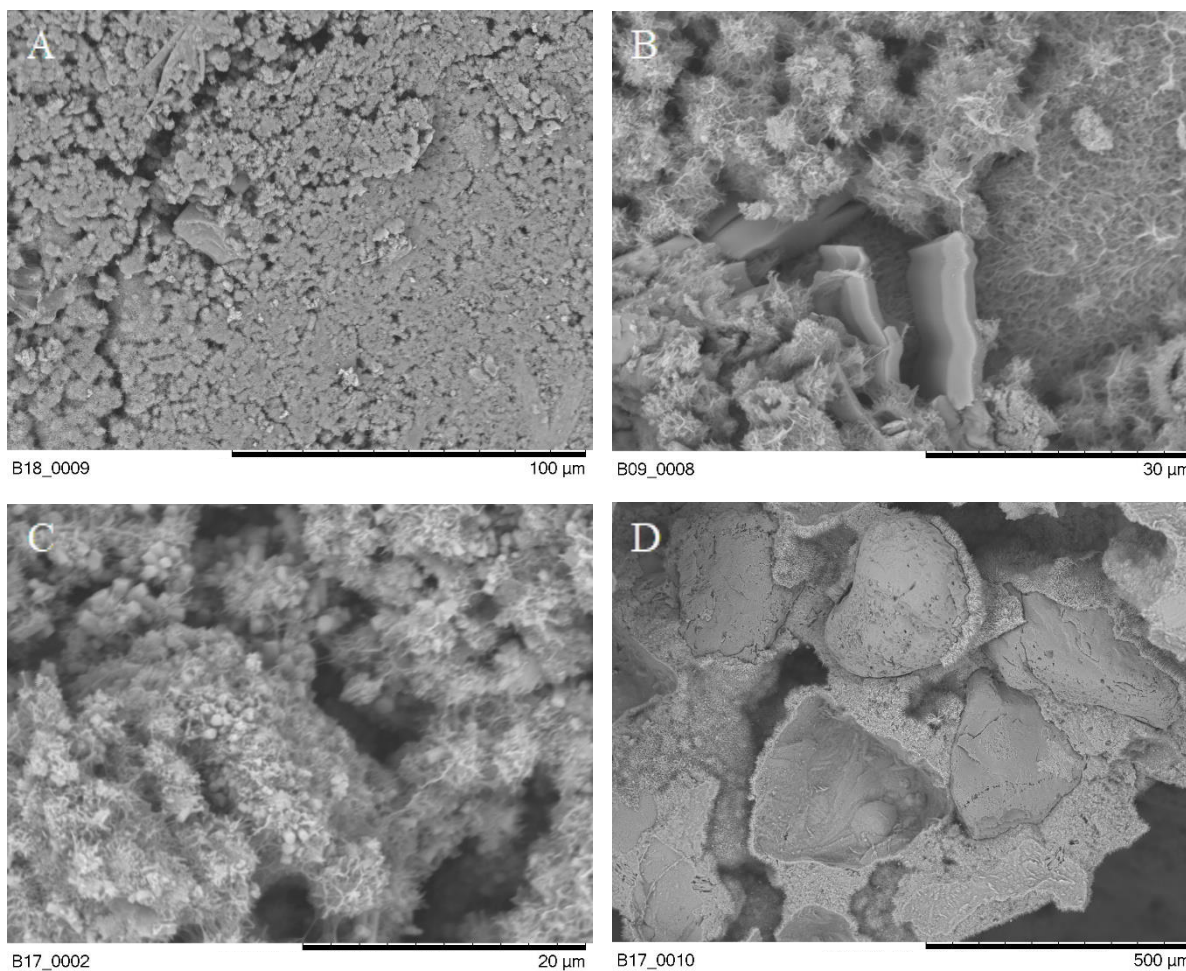


Joonis 16. Liivade sõel-kaskaad analüüsi osakese protsentuaalne ja logaritmnormaal jaotus

Lisa 3. Skaneeriva elektronmikroskoobi mikrograafid



Joonis 17. 280 μm liiva AAC mikrograafid. A) Lähteaine jääkide mõju tobermoriidile. B) Tobermoriit poori seintel.



Joonis 18. Töötlemata liiva AAC mikrograafid. A) Pori seina üldstruktuur. B) Monokristallid poori vaheseintes. C) Niitjad moodustised tihedama kihi vaheseintes. D) Kõrge tobermoriidi osakaal vaheseintes.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Siim Koor,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Männiku karjääri liivast poorbetooni disain ja karakteriseerimine“,

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, 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.

Siim Koor
10.08.2021