

Tartu Ülikool  
Bioloogia – geograafiateaduskond  
Geograafia instituut

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias

**Saaremaa Mõisaküla lubjakivikarjääri savikate lubjakivide  
potentsiaal loodusliku hüdraulilise lubja toorainena**

**Tea Jänes**

Juhendajad: PhD Tõnu Muring  
MSc Priit Penu

Kaitsmisele lubatud:  
Juhendaja:  
Instituudi juhataja:

Tartu 2006

## SISUKORD

<i>SISSEJUHATUS</i> .....	3
<i>I TEOREETILISED LÄHTEKOHAD</i> .....	6
1.1 Mõisted .....	6
1.2 Ehituslubja ajalooline ülevaade .....	7
1.3 Lubja tootmine traditsioonilisel meetodil.....	11
1.4 Ehituslubi .....	16
1.4.1 Lubimördid .....	18
1.4.2 Lubivärvid .....	19
1.5 Looduslik hüdrauliline lubi.....	21
<i>II MATERJAL JA METOODIKA</i> .....	24
2.1 Lubjakivide iseloomustus.....	24
2.2 Savikate lubjakivide põletamine .....	28
2.3 Hüdraulilise lubja kustutamine.....	29
2.4 Katsed lubja potentsiaalselt hüdrauliliste omaduste uurimiseks.....	31
2.4.1 Kustutamine.....	31
2.4.2 Mördi veesidumisvõime määramine.....	34
2.4.3 Mördi katsetamine .....	35
<i>III TULEMUSED</i> .....	38
3.1 Põletamine .....	38
3.2 Kustutamine .....	39
3.3 Veesidumisvõime.....	44
3.4 Mördi katsetamine .....	45
<i>IV ARUTELU</i> .....	47
<i>KOKKUVÕTE</i> .....	50
<i>SUMMARY</i> .....	52
<i>VIIDATUD ALLIKAD</i> .....	54
<i>LISAD</i> .....	57

## SISSEJUHATUS

Eestimaa on läbi aegade tuntud paekivimaana (Einasto, Matve 1989); paas on meie aluspõhi, eestlase olemise ja püsimise sümbol (Tomberg 2005b). 4. mail 1992. aastal kuulutas praegune Eesti Vabariigi president, Eesti Vabariigi Ülemnõukogu Presiidiumi esimees Arnold Rüütel paekivi Eesti rahvuskiviks. Kuu aega hiljem, 4. juunil 1992. aastal, avati Porkuni piiskopilinnuse väravatornis Porkuni Paemuuseum (Tomberg 2005b).

Lupja on läbi ajaloo hinnatud kui väärtuslikku, tugevat, vastupidavat ning sobilikku materjali väga erinevate objektide (majakad, kindlused, talumajapidamised, mõisad jpt) ehitamisel (Sickels-Taves, Allsopp 2005). Tsementide avastamine tõi kaasa palju uusi, eelnevalt võimatuna tundunud lahendusi. Meisterlikud teadmised ja praktika lubja kasutamisest olid tsemendi populaarsuse taustal peaaegu kadumas. Kui varem oli iga talu õues oma lubjakustutusauk, siis veel mõned aastad tagasi oli lupja pea et võimatu kaubandusvõrgust saada (Kuusemets, Jürmann, 2005). Erinevalt veidi üle saja aasta vanast tsementmördist on lubimördi kasutamise traditsioon varajasse ajalukku ulatuv ning tänapäevani on säilinud ilmselt selle praktika parimad näited, millest tasub õppust võtta (Helves 1996).

Industriaalajastule järgnenud säästva arengu idee on seadnud kahtluse alla pikka aega ehitussektori imelapseks peetud tsemendi omadused. Aja jooksul, nüüdseks juba piisava praktika tulemusel, on ilmnunud, et portlandtsemendi kasutamisel esineb tõelisi puudujääke, seda nii uute konstruktsioonide loomisel kui vanade hoonete restaureerimisel (Krumnacher 2001). Seega on hakatud lubimördi tehnoloogia rakendamise vastu uuesti elavat huvi tundma. Lubja tagasitulekut ehitusmaastikule toetavad mitmed viimasel ajal oluliseks muutunud tõed:

- Lubimört on heade hingavate omadustega;
- Lubi on looduslikult puhas;
- Vana lubikrohv on taaskasutatav uutes mördisegudes;

- Lubimördi karboniseerumisel seotakse oluline osa selle põletamisel eraldunud CO<sub>2</sub> (St. Astier Natural Hydraulic Lime 2006).

Me peame kasutama materjale, mis tarbivad looduse ressursse võimalikult vähe ja mõjutavad keskkonda minimaalselt, seda nii maja ehitamisel kui ka lammutamisel, kui oma aja äraelanud materjalid muutuvad jäätmeteks. Materjalid on ehitise koostisosadeks ääretult lühikese aja – vaid mõne aastakümne kestel (Hemgren, Wannfors 2003). Eesti kontekstis soodustab lubitoodete kasutamist ka nende kohalik päritolu.

Saaremaal on savikate lubjakivide varud, mis on potentsiaalsed loodusliku hüdraulilise lubja tooraine, tootmiseks piisavad; teadaolevalt ei ole seni keegi nende uurimisega põhjalikumalt tegelenud. Hetkeseisuga Eestis looduslikku hüdraulilist lubja ei toodeta. Hoonete restaureerimisel on teatud keskkonnatingimustes ja teatud hoonete osades hüdrauliliste omadustega lubja kasutamine ainuvõimalik.

Käesolev uurimistöö on teadaolevalt esimene Eestis, mis keskendub kohaliku päritoluga loodusliku hüdraulilise lubja uurimisele. **Käesoleva töö eesmärk on välja selgitada Saaremaa Lümända – Mõisaküla lubjakivimaardla Mõisaküla lubjakivikarjääri savikate lubjakivide potentsiaal loodusliku hüdraulilise lubja toorainena.** Lähtuvalt lubjakivide mineraloogilisest koostisest ja visuaalsest analüüsist on püstitatud hüpotees, et kõik kolm Saaremaa Mõisaküla karjääri savikat lubjakivi on potentsiaalsed loodusliku hüdraulilise lubja toorained.

Hüdraulilise lubja omaduste uurimise jäljed on lähiminevikus, näiteks Inglismaal hakati looduslikele hüdraulilistele lubjadele rohkem tähelepanu pöörama alles alates 1994. aastast (Maher 1998). Eestikeelsed allikad peaaegu puuduvad. Üksikuid viiteid võib leida nõukogudeaegsetest ja põhjanaabrite poolt välja antud ning tõlgitud käsiraamatutest. Ehituslubja üldisemalt käsitlevad materjale on rohkem, sh on kaitstud kaks magistritööd: 1996. aastal Herki Helvese poolt „Ajalooste lubimörtide uurimise analüütilisi probleeme”, mis käsitleb Tartu Jaani kiriku restaureerimisega seotud küsimusi, ning 2003. aastal Andrus Uuetalu teemal „Lubimörtide püsivusomaduste uurimine”. Samuti on teostatud üksikuid väiksemaid uurimusi ning bakalaureuse töid.

Käesolevas töös viidatud Internetis kättesaadavast informatsioonist pärineb peamiselt Šotimaa uurijatelt ja praktikutelt, sest just seal on suurel hulgal

restaureerimist ja säilitamist vajavaid sajandeid tagasi ehitatud olulise kultuurilise ning ajaloolise väärtusega ehitisi. Lisaks tellis autor 2005. aasta kevadel Rahvusliku Lubja Assotsiatsiooni (*The National Lime Association*) poolt korraldatud Rahvusvahelise Ehituslubja Sümpoosiumi 2005 (*International Building Lime Symposium*) artiklite digitaalse kogumiku.

Töö teoreetilises osas antakse lühiülevaade lubja kasutamisest ja taasavastamisest ajaloos. Lisaks tutvustatakse traditsioonilist lubjatootmist ning ehituslubja olemust üldiselt. Viimases peatükis käsitletakse konkreetsemalt loodusliku hüdraulilise lubja omadusi. Töö metoodika sisaldab töö eesmärgi saavutamiseks korraldatud katsete ja mõõtmiste kirjeldusi; rohkem tähelepanu on pööratud loodusliku hüdraulilise lubja kustutamisküsimustele. Tulemuste peatükis esitatakse praktiliste testide tulemustest lähtuvalt uuritavate objektide kohta tehtud üldised ning spetsiifilised järeldused. Arutelu osas on mõtiskletud tulemuste seoste kokkulangevuste ja põhjuste üle, lisaks antakse soovitusi ning mõtteid edasiste uuringute osas konkreetsetest uurimisobjektidest lähtuvalt.

Käesoleva uurimuse valmimisele aitasid kaasa geoloogia ja mineraloogia professor Kalle Kirsimäe, geoloogia üliõpilane Martin Liira, keraamikud Piret Veski, Kaido Kask ja Tanel Tell, lubjateoreetik ja praktik Andrus Uuetalu, perekond Jakobson ning Taavi Hein. Suured tänud juhendajatele, vanemteadur Tõnu Muringule ja Priit Penule.

## I TEOREETILISED LÄHTEKOHAD

### 1.1 Mõisted

Kõik allpool esitatud mõistete seletused on võetud standardist EVS 763-1: 2000.

**Lubi** (*lime*): erinevaid füüsikalisi ja keemilisi ühendeid sisaldav materjal, milles esineb kaltsium- ja/või magneesiumoksiidi ( $\text{CaO}$  ja  $\text{MgO}$ ) ja/või –hüdroksiid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ja  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ).

**Ehituslubi** (*building lime*): ehituskonstruksioonides ja –protsessis kasutatavad lubjad.

**Õhklubi** (*air lime*): peamiselt kaltsiumoksiidist või –hüdroksiidist koosnev lubi, mis kivistub aeglaselt õhus sisalduva süsinikdioksiidiga reageerimisel, vee all üldjuhul ei kivistu, õhklubjad esinevad kas kustutamata või kustutatud lubjana.

**Kustutamata lubi** (*quicklime*): õhklubi, mis koosneb peamiselt lubjakivi ja/või dolomiidi põletamisel tekkinud kaltsium- ja magneesiumoksiidist, esineb erinevas jämeduses suurematest kamakatest kuni peeneks jahvatatud pulbrini.

**Kustutatud lubi** (*hydrated lime, slaked lime*): õhklubi, mis saadakse kustutamata lupjade kindlarežiimilisel kustutamisel. Kustutatud lupjasid toodetakse kuiva pulbri, lubjataigna või loabrina (lubjapiim).

**Looduslik hüdrauliline lubi** (*natural hydraulic lime*): lubi, mis saadakse suurema või vähema savi- ja ränisisaldusega lubjakivi põletamisel (temperatuuril alla  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ja pulbriks kustutamisel. Kõikidel looduslikel hüdraulilistel lupjadel on omadus osaliselt tarduda ja kividada vees. Atmosfääris  $\text{CO}_2$  toimuv kividamine kaasneb. Eritooted võivad sisaldada lisatud putsolaanseid või hüdraulilisi materjale kuni 20%.

**Hüdrauliline lubi** (*hydraulic lime*): sobivatest toorainesegudest toodetud, peamiselt kaltsiumhüdroksiide, kaltsiumsilikaate ja kaltsiumaluminaate sisaldav lubi. Osaliselt omadus tarduda ja kividada vees. Atmosfääris  $\text{CO}_2$  toimuv kividamine kaasneb.

## 1.2 Ehituslubja ajalooline ülevaade

Lubisideaineid on kasutatud pikka aega väga laialdaselt. Lubimörte osati käsitleda ja kasutada juba rohkem kui 8000 aastat tagasi (Lime Mortar 2006). Lubja põletamine algas Mesopotaamias 5., Egiptuses 3. ja Hiinas 2. aastatuhandel e.m.a (Eesti Entsüklopeedia 1990). Arheoloogide poolt leitud vanim lubjaahi asub Mesopotaamia aladel, selle vanuseks on dateeritud 2450 a e.m.a (Raado 2006). Eestis hakati lubimörte kasutama 13. sajandi alguses. Mõisates sai lubja põletamine ja kasutamine hoo sisse majandusliku arengu elavnemise ajal 18. sajandi lõpul. 19. sajandi viimasel veerandil hakati lubjaahjusid ka taludesse rajama (Tomberg 2005a). Vanade paemurdude uurimisel julgeb väita, et Eestis on seni tegeletud ainult õhkclubja tootmisega. Ajaloolistes paemurdudes on kaevandatud kuni hallikate kihtide avaldumiseni (Priit Penu suulistel andmetel 2006). Liiva- või savilisanditega paekivi on piirkonniti peetud põletuseks ebasobilikuks, eriti sinakashalli südamikuga nn vesipaasi (Leetmaa 2000). Need nn *hallikad kihid* on olulise savilisandiga lubjakivikihid ehk savikad lubjakivid. Saaremaa kolme savika lubjakivitüübi võimalike hüdrauliliste omaduste uurimisega tegeletakse käesolevas uurimistöös.

Lubja teadusliku uurimise alguseks võib pidada 18. sajandi esimest poolt, mil tavapraktikas juba ammu kasutuses olevatele lubja imevõimalustele ning tehnikatele hakati otsima teaduslikke ja faktilisi põhjendusi. Inglismaal moodustati mitu professoritest, uurijatest ja inseneridest koosnevat uurimisrühma. Tasub mainimist fakt, et James Watt avastas aurumasina tänu inglase Joseph Black'i latentse soojuse uuringutele, mis põhines lubja kustutamisel eralduva soojuse uurimisel (Krumnacher 2001).

Pikka aega püsis tõekspidamine, et kõige vastupidavamate omadustega lubi on säravvalge ning saadud kõige tugevamast võimalikust lubjakivist (Vitruvius 1960, *cit* Sickels-Taves, Allsopp 2005). Lubja hüdrauliliste omaduste põhjustele hakkas esimesena vastuseid otsima inglise arhitekt John Smeaton (1724 – 1792), kui talle anti ülesandeks konstrueerida Eddystone'i majakas (Sickels-Taves, Allsopp 2005), vt lisa 1. Seda peetakse siiani kaasaegse inseneriteaduse nurgakiviks (Krumnacher 2001). Smeaton katsetas väga paljusid erinevaid lupjasid ja mõrdisegusid, et leida sobilikem, mis peaks vastu pidevale merelainete uhtumisele. Smeaton avastas, et lubjakivi struktuuri algne tugevus ja sellest saadava mördi tugevusomadused ei korreleeru – nii

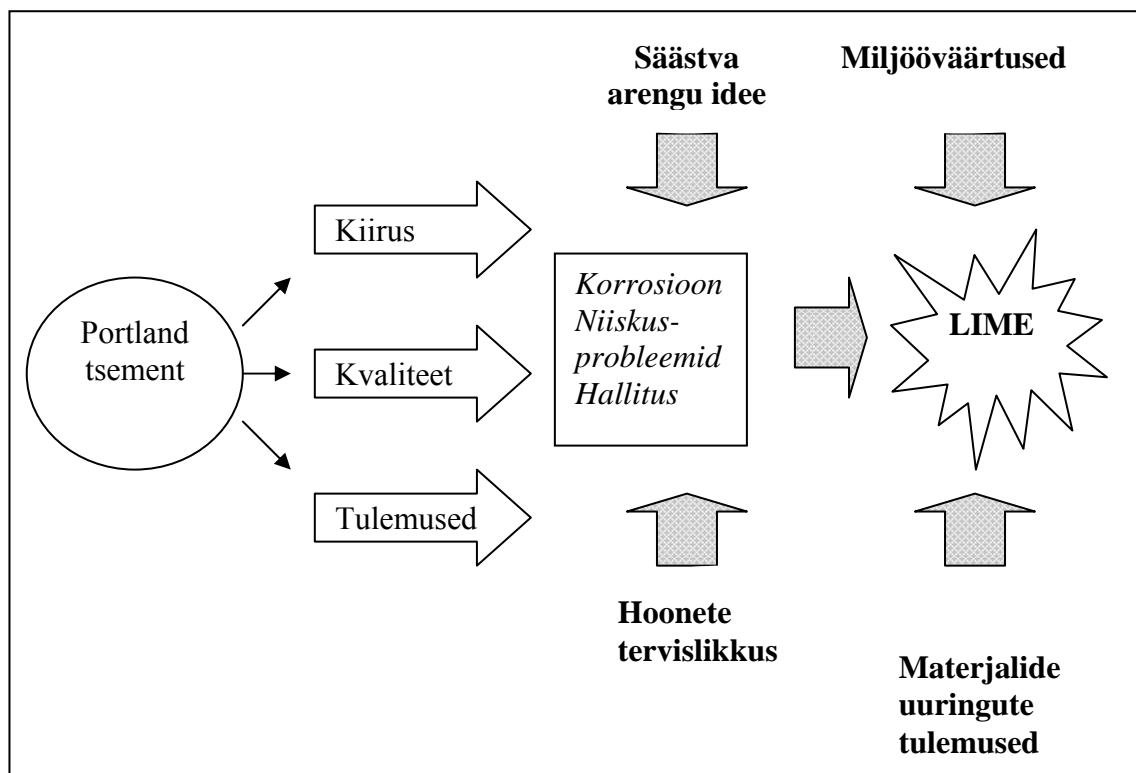
kriidist kui marmorist saadud mört on samade tugevusnäitajatega. Sellega purustas ta pikka aega püsinud Vitruviuse doktriini lubja värvusest kui tugevuse indikaatorist. Lubja värvus on tugevuse seisukohast tähtsusetu. Smeaton avastas, et need lubjad, millest saadud mördid on veega kokkupuutel püsivamad, sisaldavad märgataval hulgal saviosakesi. Samas lihtsalt savi lisamine juba valmis lubjasegule ei andnud soovitud tulemust; ainult põletusprotsessi läbinud lubjakivid olid hüdrauliliste omadustega (Sickels-Taves, Allsopp 2005). Karboniseerumisel reageerivad põletusprotsessi käigus tekkinud kaltsiumsilikaadid ja -aluminaadid veega ning tekivad uued, vees halvasti lahustuvad kaltsiumhüdrosilikaadid ja -aluminaadid (Raado 2004). Üheks juhtivamaks looduslike hüdrauliliste lubjade ja tsementide uurijaks ning testijaks ajaloos on olnud Prantsuse Teede ja Sildade Ehituse Peainsener Lois J. Vicat (1786 – 1861), kelle sulest ilmus 1828. aastal ka esimene laiaulatuslik käsiraamat „*Mortars and Cements*” (Krumnacher 2001). Antiikajal kasutati hüdrauliliste sideainetena ka maakoos põlenud ja vulkaanipursetel esilekerkinud savipinnaseid. Napoli lähedal Pozzuolis ja mujal Itaalias kasutati putsolaani, Kreekas Santorini mulda, Saksamaal trassi (Kaila 1999). Kunstlikest ühenditest on kasutatud 600 –800 °C põletatud savi, tootmisjääke, kütusešlakki ja tuhka (Helves 1996). Viimasel ajal on suurenenud jahvatatud lubjakivi kasutamine, mis ei anna ainult ilusat valget värvust, vaid parandab oluliselt ka mördi omadusi (Kaila 1999).

Lubimörtide kasutamine modernsel ajastul ei olnud nii laiaulatuslikuk kui oleks võinud ajaloo taustal eeldada. Nagu ikka, jäljendades loodust, hakati kasutama looduslikke sideaineid ja seejärel tootma tehissideaineid (Raado 2004). Algas tsemendi ja betooni võidukäik ehitusmaastikul, mis kestab tänapäevani. 1976. aastal patenteeris inglane James Parker esimese uue ajastu „tsemendi”, mida selle punaka värvuse tõttu võrreldi Rooma tsemendiga ja hakati seega nimetati *rooma tsemendiks*. Rooma tsemendi (romaanitsemendi) suureks kasutusplatsiks oli 1828. aastal Londonis Thamesi jõe alt läbiehitatud tunnel. 1844. aastal patenteeris inglane Isaac Johnson praegu meile teadaoleva portlandtsemendi (Kaila 1999). Tsemendi- ja betoonikultuur jätsid lubjatootmise pikaks ajaks unarusse. Põlvest põlve edasi antud tarkused olid peaaegu kadumas (Hidemark 1997).

Eestis ilmus esimene teaduslik uurimus spetsiaalselt lubja ja tsemendi tootmiseks kasutatavate lubjakivide tehniliste omaduste kohta 20. sajandi alguses.

Seoses uute tööstusharude loomisega läänemaailmas, hoogustus ka Eestis kohaliku paekivi kasutamine tehnoloogilise toormena. Kunda ja Aseris läksid käiku tsemendivabrikud, Tamsalus ja Rakkes rajati lubjatehased (Einasto, Matve 1989). Praegu põletatakse Eestis lubja Rakke lubjatehases ja pärimuslikul viisil Saaremaal Lümandas väikeses maa-ahjus (Tomberg 2005a).

Aja jooksul, nüüdseks juba piisava praktika tulemusel, on ilmnunud, et portlandtsemendi kasutamisel esineb tõelisi puudujääke, seda nii uute konstruktsioonide loomisel kui vanade hoonete restaureerimisel (Krumnacher 2001). 1922. aastal *American Society for Testing and Materials* (ASTM) poolt korraldatud konverentsil tehti kokkuvõtteid tsementkonstruktsioonides esinenud vigadest ning peamiseks järelduseks oli, et liiga tugevad mördid ei ole alati kõige sobilikumad, seda eriti vanade mörtide parandamisel. Toodi välja mitmeid tsementidega seotud probleeme, mida lubimörtide puhul ei oldud seni täheldatud. Seega alates sellest kohtumisest hakati lubja omadustele ja rollile modernsel ehitusmaastikul taas rohkem tähelepanu pöörama.



Joonis 1. Lubja taasavastamisele kaasaaidanud 21. sajandi muutused (Sickels-Taves, Allsopp 2005).

Esiolgselt hea tulemus võib aja jooksul kiiresti ja oluliselt kvaliteedis kaotada. Muutunud väärtushinnangute ajastul saadi aru, et tuleb tagasi pöörduda traditsiooniliste ja ennast tõestanud ehitustehnikate juurde, seda eriti restaureerimismaastikul.

Portlandsemendiga seonduvad olulised probleemid on üheks peamiseks põhjuseks, miks hakati otsima tagasiteed lubimörtide juurde (Sickels-Taves, Allsopp 2005). Lubja taasavastamisele mõjuvaid jõude on kirjeldatud joonisel 1.

Mitmed 16. – 19. sajandil kirjutatud raamatud lubja füüsikaliste ja keemiliste omaduste kohta on nüüdseks uuesti trükitud. Mitmed uued tehnoloogilised uurimused ja katsetused rajanevad just sellest ajastust pärit teooriatele. (Sickels-Taves, Allsopp 2005).

### 1.3 Lubja tootmine traditsioonilisel meetodil

Vana hoone taastamine on arhitektile, ehitajale ja käsitöölisele tõeline väljakutse. Restaureeritav objekt on ainulaadne, algupärane minevikudokument ja seda tuleks võimalikult kaua puutumatus säilitada. Seda ei tohiks muuta, sest iga muudatus vähendab objekti algupärast väärtust (Jormalainen 2000). 21. sajandi restaureerimise filosoofia on, et remontida tuleks võimalikult samasuguste materjalide ja teostusviisidega kui algupärasel ehitises (Jormalainen 2000, Krumnacher 2001).

Ajalooliste ehitiste renoveerimise praktika on tõestanud, et tööstuslikul meetodil toodetud lubi ja mördisegud on renoveerimistööl ebasobilikud. Vaatamata ajaloolise ja kaasaegse mördi mehaanilise ja keemilise koostise sarnasusele, käitub kumbki seinale kantuna väga erinevalt. Viimane on tingitud tootmistehnoloogilisest eripärasest. Tööstuslik tootmine on mehhaniseeritud protsess, kus lubja põletamistemperatuur on tunduvalt kõrgem, kütusena kasutatakse peamiselt sütt või gaasi. Traditsioonilisel tootmisel kasutatakse lubjapõletuseks küttena puitu ning kustutamine toimub käsitsi. Lubja omadused sõltuvalt otseselt tootmisprotsessist, millest järeldeb, et vanade mörtide asenduseks ja paikamiseks sobivad ainult sarnaselt vanadel meetoditel toodetud lubimördid (Krumnacher 2001). Tööstuslikult ja käsitsi toodetud lubja hinnavahe on ligi kümnekordne, mis tuleneb nii tööjõu kulu kui kvaliteedi erinevustest. Nõudlike lubjatööde jaoks võetakse alati käsitsi toodetud lubi (Kaila 1999).

Tööstusliku lubja peamiseks tootjaks Eestis on AS Nordkalk lubjatehas Rakkes (Jürmann 2004). Mitmed Eesti firmad toodavad ka valmis lubikrohvi segusid, kus kasutatakse mitte ainult Eestis toodetud lubja (Kuusemets, Jürmann 2005). Traditsioonilisel meetodil toodab Eestis lubja AS Limex Saaremaal Lümända vallas Mõisakülas Tolmu talu maal, kus töötab praegu Eestimaa üks väheseid lubjapõletuse maaahjudest. Lubja tootmine toimub ettevõttes ligilähedaselt sama tehnoloogia alusel kui 50 – 60 aastat tagasi, kuidugi mõõdukalt moderniseerituna (AS Limex 2006). Restaureerijate hulgas on Saaremaa lubi au sees (Ling 2004). Piirkond on tuntud kui ajalooliselt välja kujunenud lubjakivi kaevandamise ja lubjapõletuse ala. Ligikaudu 10 – 15 hektaril on loendatud 16 lubjaahju varemed (AS Limex 2006).

Ehituslubja tootmine algab paekivi murdmisest, järgneb põletamine, kustutamine, mördi valmistamine, krohvimine ja kivistumine. Lubja ringlus lubjakivist lubjakivini on esitatud lisas 2. Joonis kirjeldab traditsioonilisel meetodil lubja tootmist.

Lubjakivi murdmine toimub käsitööna spetsiaalsete vasarate, kiilude ja kangidega (Penu 2003), millest tuleneb ka kaevandamiskoha nimi – paemurd (Einasto 2006). Murtud lubjakivitükid on ca 20-30 cm läbimõõdu ja mitmesuguse kujuga, mis transporditakse traktoriga lubjaahju (Penu 2003), vt joonis 2 ja 3.



*Joonis 2. Maa pealne lubjaahi (Leetmaa 2000).*



*Joonis 3. Maa sisse kaevatud või valliga piiratud lubjaahi (Leetmaa 2000).*

Traditsiooniliselt toimus lubjapõletamine lubjakivimurru lähedal metsas, sest kivi oli vedamiseks raske. Kõige lihtsam lubjapõletusahi on kolme seinaga ja katuseeta ruum, mis laotakse tavalisest kivist. Veidi arenenum mudel on kivist või tulekindlast tellisest müüritud ümar püstahi. Enamasti on lubjaahi osaliselt maa sisse kaevatud (joonis 2), et ei oleks vaja teha liiga massiivseid seinu (Kaila 1999). Kohtades, kus lubjaahjude rajamisel antud võtet kasutada polnud võimalik (nt Lääne – Eesti vahetult paepealsed tasased maad), ehitati lubjaahjud maa peale (joonis 3), seega tulid seinad laduda oluliselt paksemad – kuni kaks meetrit (Leetmaa 2000).

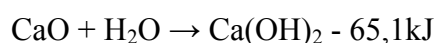
Vajadust ja eesmärke silmas pidades on lubjaahjude suurus olnud väga erinev, ulatudes 3 – 6 m<sup>3</sup> kuni 120 m<sup>3</sup>. Mingeid kindlaid mõõte pole välja kujunenud. Üldiselt tundub, et pidas paika ehituspõhimõtte, mille puhul ahjude läbimõõt ei ületanud nende kõrgust (sügavust). Suuruselt optimaalseks on peetud keskmise kõrgusega 3 – 5 m ning siseläbimõõduga 2 – 4 m lubjaahjusid, seda nii enda tarbeks kui lupja müügiks tootvate taluahjude puhul (Leetmaa 2000).

Lubjakivi põletatakse sõltuvalt toorainest, küttematerjalist, ilmastikust jne 50...75 h. Küttematerjalina on kasutusel nii vanad majapalgid kui ka hästikuivanud metsapuit, küttematerjali kulu on ca 1 m<sup>3</sup> tunnis. Põletamistemperatuur on ca 1100..1300° C (Penu 2003). Põletusprotsessi käigus lubjakivi (CaCO<sub>3</sub>) dekarboniseerub ja muutub kustutamata lubjaks (CaO) vastavalt järgnevale võrrandile:





Valminud lubjakivi omandab rohekas-kollaka värvivarjundi (Penu 2003). Lubjaks põletamisel kaotab lubjakivi umbes 40 % massist ja 10 – 20 % mahust. Kui lupja on vaja transportida, siis on seda kõige kasulikum teha sellel etapil, sest kustutades suurenevad kaal ja maht uuesti (Kaila 1999).

Lubja kustutamisprotsessist sõltuvalt on tulemuseks kas kuiv pulbriline või pastaks kustutatud Ca(OH)<sub>2</sub>. Lubja kustutamine on kustutamata lubja reageerimine veega, mille tulemusena tekib kaltsiumhüdroksiid ja vabaneb soojusenergia:



Kustutamisel suureneb lubja maht 200 – 350 %. Lubja kustutamiseks on kaks meetodit: märg- ja kuivkustutamine. Lubja kustutamiseks ei tohi kasutada liiga palju ega liiga vähe vett, sest mõlemal juhul halveneb lubja kvaliteet. Traditsiooniliselt on kasutatud märgkustutamist: vett lisatakse nii palju, et kustutatud lubi jääb märjaks tainaks. Hüdraulilist lubja ei tohi eelnevalt kustutada. Ameerika „*Bricklayers` Guide*” aastast 1907 määrab hüdraulilise lubja üldisteks kvaliteedinõueteks: „Lubi tuleb põhjalikult kustutada ehitusplatsil, lisades sellele vajalik hulk vett. Protsessi ajal peab see soojuse ja niiskuse säilitamiseks olema korralikult liivaga kaetud. Kogu lubi tuleb ära kasutada kustutamisest kümne päeva jooksul.” Erinevalt märgkustutamisest, hüdraulilist lubja kustutamise ajal ei segata. Kuum lubi haudub öö läbi, enne kui see koos liivaga mördiks tambitakse ja kasutusele võetakse (Kaila 1999). Pärast kustutamist lubi sõelutakse. Õhklubi asetatakse säilitusaukudesse 1 – 2 aastaks järelkustuma (Penu 2003). Eksperimentaalselt on tõestatud, et lubja pikaajalisel rohke veega laaderdumisel jätkub pidev osakeste peenendumine, kus saadakse peenemad Ca(OH)<sub>2</sub> osakesed (Helves 1996), lubi muutub plastsemaks ning paremini nakkuvaks (Krumnacher 2001).

Kuivkustutamist kasutatakse lubja tööstuslikul tootmisel; selle korral arvutatakse täpselt välja kustutusreaktsiooniks vajalik veehulk (ligikaudu 320 g vett/ 1000 g lubja kohta). Märgkustutatud ja vanandatud lubja kristalliline struktuur erineb kuivkustutatud lubja struktuurist oluliselt (Kaila 1999), vt joonis 4.

<b>Käsitsi toodetud lubja kristall</b>	<b>Tööstuslikult toodetud lubja kristall</b>
	

Joonis 4. Traditsiooniliselt ja tööstuslikult toodetud lubja kristallide erinevus (Åkesson 2003).

Traditsioonilisel meetodil valmistatud lubja karboniseerumisel moodustuvad pikad nõeljad kristallid, mis seovad paremini. Tööstuslikult valmistatud lubja kristallid muutuvad karboniseerumisel mikroskoobi all vaadates pallikesteks ning need ei seo nii hästi. Siit tulebki välja põhjus, miks käsitsi tehtud lubja hinnatakse (Ling 2004). North Yorkshire *County Council* (2006) soovib ehitiste restaureerimisel alati ja kahtlusteta eelistada märgkustutusmeetodil ning korralikult laagerdunud lubja, väites et kuivkustutatud lubi, olgu ta nii värske ja kvaliteetne kui võimalik, ei suuda kunagi konkureerida traditsioonilisel meetodil kustutatud lubjaga.

## 1.4 Ehituslubi

Ehituslupja saadakse kaltsiumkarbonaatsete kivimite põletamisel. Ehituslubi on mineraalne sideaine, mis jaguneb õhk- ja hüdraulilisteks sideaineteks. Õhksideaineteks nimetatakse sideaineid, mis veega segatult õhu käes tarduvad ja kivinevad ning oma tugevuse säilitavad. Vee keskkonnas nende kivinemine takistatud. Hüdraulilised sideained võivad pärast tardumist kivineda nii õhus kui ka vees. Hüdraulilised sideained on sideained, mis veega segamisel hüdratatsiooniprotsesside tulemusena tarduvad ja kivinevad ning selle tulemusena moodustunud tehiskivi on püsiv ka vee keskkonnas (Raado 2005a).

Eesti standardi EVS 763-1:2000 „Ehituslubi. Osa 1: Määratlused, spetsifikaadid, vastavuskriteeriumid ja vastavushindamine” järgi klassifitseeritakse ehituslubjad kaltsiumilisteks, dolomiitseteks, hüdraulilisteks ja looduslikeks hüdraulilisteks lupjadeks, vt tabel 1.

Tabel 1. Ehituslubjad (EVS 763-1 2000).

Nimetus	Tähis
Kaltsiumiline lubi 90	CL90
Kaltsiumiline lubi 80	CL80
Kaltsiumiline lubi 70	CL 70
Dolomiitne lubi 85	DL85
Dolomiitne lubi 80	DL 80
Hüdrauliline lubi 2	HL2
Hüdrauliline lubi 3,5	HL3,5
Hüdrauliline lubi 5	HL5
Looduslik hüdrauliline lubi 2	NHL 2
Looduslik hüdrauliline lubi 3,5	NHL 3,5
Looduslik hüdrauliline lubi 5	NHL 5

Lubja tüüp sõltub lähtekivimi omadustest. Looduslike hüdraulilisi lupjasid saadakse loodusliku lubjakivi põletamisel: kui savikate lisandite hulk ei ületa 8 – 25 %,

saadakse õhklubi, kui neid on rohkem, saadakse hüdrauliline lubi. Hüdraulilise lubja tooraine sisaldab olulisel määral  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ja  $Fe_2O_3$  (Raado 2006). Hüdraulilist lubja HL toodetakse peamiselt kaltsiumlubjakivi ja savi koospõletamisel, mitte looduslikult savi sisaldavatest lubjakividest. Kunstlikult toodetud hüdraulilised lubjad (HL) sarnanevad pigem tsementidele, seega sisuliselt oleks neid õigem nimetada *hüdraulilisteks sideaineteks*, mitte hüdraulilisteks lupjadeks. Kunstlikult toodetud hüdraulilised lubjad ei sobi oma omadustelt restaureemistöodele (St. Astier Natural Hydraulic Lime 2006).

Õhklupjasid klassifitseeritakse vastavalt nende koostisele ( $CaO + MgO$  sisaldusele), hüdraulisi lupjasid vastavalt tabelis 2 toodud survetugevusele (EVS 763-1 2000).

*Tabel 2. Hüdrauliliste lupjade ja looduslike hüdrauliliste lupjade survetugevused, MPa (EVS 763-1 2000).*

Ehituslubja tüüp	Survetugevus (MPa)	
	7 päeva	28 päeva
HL2 ja NHL 2	-	2 – 7
HL3,5 ja NHL 3,5	$\geq 1,5$	3,5 – 10
HL5 ja NHL 5	$\geq 2$	5 – 15*
* Lupjadel HL 5 ja NHL 5, mille puistemahumass on väiksem kui 0,9 kg/dm <sup>3</sup> , on lubatud survetugevus kuni 20 MPa.		

Ehituslupjasid kasutatakse peamiselt lubimördi näol, väiksemas mahus lubivärvidena. Lubimördi ja lubivärvi on ehitamisel kasutatud aastasadu. Lihtsate materjalide, tööriistade ja meetoditega ning põlvest põlve edasi kantud kogemuste varal on ehitatud ilusaid ja vastupidavaid hooneid (Åkesson 2003).

### **1.4.1 Lubimördid**

Lubimörte kasutatakse krohvimiseks ja müüritöödeks. Mört on müürikivide sidumiseks ja katmiseks kasutatav segu (Kaila 1999). Mörtide puhul on oluline sideaine-täiteaine vahekord, täiteainete puhtus ning terastikuline koostis (Raado 2006). Eesmärgipärast mörti ei ole lihtne leida. Restaureerimisel tuleb valida vana mördi tugevusnäitajatele sarnane segu. Vanade mörtide omadustega mitte arvestamine on üks levinumaid vigu restaureerimisel, mille tulemusel parandused osutuvad ebaesteetilisteks ja lagunevad kiiresti (Riba 1994). Töö lubitoodetega on suuresti käsitöö, mis eeldab teadmisi, ettevalmistust ja kannatlikkust. Vanu tarkusi aluseks võttes õnnestub töö lubjaga alati ning tulemus kestab mitmeid inimpõlvi (Åkesson 2003). Oluline on tõdeda, et mördi tugevus ei määra müüri vastupidavust. Arusaam, et mida tugevam mört, seda tugevam sein, ei kehti. Sõltuvalt kivi omadustest tuleb valida õige tugevusega mört, et lõpptulemus oleks vastupidav (Riba 1994).

Lubimört ja lubivärv kivistuvad (karboniseeruvad) õhus oleva süsihappegaasi toimel. Karboniseerumiseks on vaja soojust ja niiskust. Karboniseerumine on aeglane protsess, 10 mm paksuse lubikrohvikihi kivistumiseks kulub soodsatel tingimustel üks kuu. Karboniseerumise kiirendamiseks ja kindlustamiseks võib aluskihti iga krohvi- või värvikihi eel süsihappegaasiga rikastatud veega niisutada. Hüdraulilist lupja (või tellisepuru) sisaldavat krohvi ega värvi ei niisutata süsihappeveega, sest selle tulemusena pinna vastupidavus nõrgeneb (Åkesson 2003). Väliseid krohvitöid saab teha, kui ööpäevane keskmine õhutemperatuur on üle + 5 °C. Läbikülmunud mördisegu ei saavuta enam piisavat tugevust ning töid tuleb otsast alustada. Mõnel juhul lisatakse mördisegule külmakindluse tõstmiseks kaltsiumkloriidi, mis aga tänu hügrokoopilistele omadustele põhjustab pigem niiskusprobleeme ja korrosiooni. Krohvikihhi vastupidavus sõltub mördi poorsusest, paksusest ja pealekandmistehnikast (Riba 1994). Krohvi hilisemat tugevust suurendab märgatavalt mördi korralik tampimine ja nuiamine selle ettevalmistamistusel (Krumnacher 2001).

Eesti sisemaal piisab tellismüüriil vähemalt 15 mm paksusest lubikrohvi kihist, rannikul 25 mm. Looduslikest kividest müür vajab 25 – 60 mm krohvikihhi. Vananenud või rikutud lubikrohve saab uuesti kasutada, lisades uut sideainelupja ning puuduva osa täitelupja ja liiva (Tammelo, Kolk 2005).

Soovitud tulemuse saavutamiseks on õigete omadustega täiteainete kasutamine määrava tähtsusega. Peamiseks täiteaineks mõrdis on erineva terasuurusega puhas liiv, millest 5 – 10 % moodustab alla 0,075 mm läbimõõduga tolmlüiv, vahel ka savi (peentäide). Praktikas ei saa kasutada terasid, mille läbimõõt ületab 1/3 krohvikihi paksusest. Nii on tavapraktikas suurimaks tera läbimõõduks kujunenud 5 mm.

Liivaosakeste kuju ning suurus mõjutavad otseselt mõrdi omadusi. Parimad on nurkja kujuga terad, sest need ei libise omavahel, teisel kohal on vee poolt ümaraks lihvitud kruus. Peen osa on oluline, kuna hoiab kinni niiskust ja võimaldab seega mõrdi tugevnemist (Kaila 1999). Vitruviuse (1960) märkmetes on täheldatud, et kui kasutatakse jõe- või mereliiva, siis sobivaim mõrdi täiteainete suhe on 1:2; muudel juhtudel 1:3 (Sickels-Taves, Allsopp 2005). Märkustutatud lubjast mõrdi valmistamisel tuleb aga arvestada lubjas juba olemasoleva peenmaterjaliga – liigne hulk peentäidet lükkab liivaterad üksteisest eemale ja võivad tekkida praod (Kaila 1999). Osaliselt on täiteainetena soovitatav kasutada üle- ja alapõlenud lubjakivi osakesi, sest need suurendavad mõrdi poorsust, seega ka külmakindlust ning loovad hea karkassi (Priit Penu suulised andmed).

### **1.4.2 Lubivärvid**

Lubivärv on krohvipindade parim viimistlusviis (Kaila 1999). Lubivärve valmistatakse kõrgekvaliteedilisest kustutatud lubjast. Kasutatakse kivist välisseinte värvimiseks eriti seal, kus on kasutatud lubimörte ja –krohve ning lubivärve. Võib kasutada nii betooni kui kergbetooni pindadele, samuti krohvipinnale. Parim omadus on poorsus, kuid mehhaaniline tugevus on madal. Ka väävlioksiide sisaldava tööstuspiirkondade õhu suhtes madal püsivus. Heledad värvitoonid. Värvida tuleb tihti (Raado 2005a).

Lubivärviga kaetud pinda niisutatakse süsihappevee või lubjaveega kolm korda nädalas. Traditsioonilise lubivärviga värvides saab vaid ühtlaselt heledaid toone. Pigmenti lisades suureneb lubivärvi omapära ja võlu, mis väljendub laigulisuses ja

valgetes rantides. Välisseinu saab lubivärviga värvida ainult hiliskevadest sügiseni – kui puuduvad öökülmad. Värvitakse lubjarikkale lubikrohvile (Åkesson 2003).

Pigmentide kasutamisel lähtutakse võimalusel värviproovide kogu „Lubivärv 90”<sup>1</sup> retseptidest, vt lisa 3. Eestis on retseptikogu olemas Muinsuskaitseametil, Tallinna Kultuuriväärtuste Ametil ja AS-l Limex. Lubimördi toonimisel traditsiooniliste pigmentidega tuleb arvestada, et optimaalse tooni saab pigmendihulgaga, mis moodustab ühe protsendi kuiva mördi kaalust (Åkesson 2003).

Lubivärvidele, milles on rohkem kui neli kilogrammi pigmenti lisatakse laigulisuse vähendamiseks iga kilogrammi pigmendi kohta kümme liitrit vett. See kehtib eriti umbrate ja punaste pigmentide kasutamisel (Åkesson 2003).

---

<sup>1</sup> „Lubivärv 90” koosneb 224 prooviplaadist. Selle töötasid välja Knut Åkesson (ECS-Teknik AB) ja Sven-Olof Hjorth (Teknisk Malerikonsult). Värviproovide kogu täiendatakse pidevalt (Åkesson 2003).

## 1.5 Looduslik hüdrauliline lubi

Looduslik hüdrauliline lubi saadakse looduslike, 8 – 25 % saviühendeid sisaldavate mergellubjakivide põletamisel (Raado 2006). Peale mergellubja põletamise on hüdraulilist lubja võimalik saada mitmesuguste hüdrauliliste lisandite kasutamisel. Laiemas mõttes on kõik hüdraulilised lisandid amorfset  $\text{SiO}_2$  ja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sisaldavad materjalid (Helves 1996). Saviühendid reageerivad põletamise käigus  $\text{CaO}$ ga, mille tulemusel moodustuvad dikaltsiumsilikaadid ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), kaltsiumaluminaadid ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) ja dikaltsiumferriidid ( $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Boynton 1980). Keskmiselt on hüdraulilises lubjas 40 – 60 %  $\text{CaO}$ , 6 %  $\text{MgO}$ , 6%  $\text{CO}_2$  (Raado 2005a). Looduslikke hüdraulilisi lubjasid klassifitseeritakse vastavalt survetugevusele: NHL 2, NHL 3,5 ja NHL 5 (EVS 763-1 2000), vt tabel 2. NHL 2 on nõrgalt, NHL 3,5 mõõdukalt ja NHL 5 silmapaistvalt hüdrauliliste omadustega.

Hüdraulilisust iseloomustatakse vastava mooduliga  $m$ , mis väljendab sisalduvate reaktiivsete oksiidide vahekorda (Raado 2006).

$$m = \frac{\text{CaO \%}}{\text{SiO}_2 \% + \text{Al}_2\text{O}_3 \% + \text{Fe}_2\text{O}_3 \%}$$

$m = 1,7 - 4,5$ : tugevalt hüdraulilised lubjad;

$m = 4,5 - 9$ : nõrgalt hüdraulilised lubjad.

Alla 1,7 on savi palju, üle 9 on tegu õhkmördiga (Helves 1996). Looduslike hüdrauliliste lubjade puhul tuleb mooduli juures arvesse võtta, et mitte kogu olemasolev  $\text{SiO}_2$  ei ole lahustuv, st võimeline reageerima kaltsiumoksiidiga; osa jääb püsima kvartsina. Hüdrauliliste omaduste ilmnemiseks piisab, et 4 % olemasolevast  $\text{SiO}_2$  oleks lahustuv. Hüdrauliliste sideainete hüdromooduli abil klassifitseerimist nimetatakse *Vicat*'i süsteemiks. Hüdromooduli väljaarvutamiseega tsementidel saab ennustada nende

survetugevust, looduslike hüdrauliliste lupjade puhul see nii ei ole (St. Astier Natural Hydraulic Lime 2006).

Lisaks *Vicat* süsteemile kasutatakse hüdrauliliste lupjade (sh looduslike) klassifitseerimiseks järgnevaid meetodeid:

1. *Tardumisaja järgi*: hüdraulilised, mittehüdraulilised. Kui tardumisaeg on üle ühe ööpäeva, siis loetakse lubi mittehüdrauliliseks;

2. *Tsementeerumisindeksi järgi*: hüdraulilistes lupjades esineb lahustuv  $\text{SiO}_2$  dikaltsiumaluminaatidena ( $\text{C}_2\text{S}$ ); tsementides trikaltsiumaluminaatidena ( $\text{C}_3\text{S}$ ). Lisaks võivad hüdraulilised lubjad sisaldada mittepõlenud osakesi, tsemendid mitte;

3.  *$\text{SiO}_2$  lahustuvuse alusel*: väga ebakindel meetod. Lahustunud  $\text{SiO}_2$  protsent sõltub otseselt põletustingimustest, mis tähendab, et ühest ja samast toorainest on võimalik saada väga erinevate hüdrauliliste omadustega lupja (St. Astier Natural Hydraulic Lime 2006).

Looduslikel hüdraulilistel lupjadel on olemas kõik õhklupjadele omased positiivsed karakteristikud, samas lisanduvad veel mitmed tsementide tähtsaimad omadused – kiire tardumise algus, kiire kivinemine. Oluliseks eeliseks nii õhklupjade kui tsementidega võrreldes on soolade taluvus, mistõttu nende kasutamine rannalähedaste ehitiste viimistlemisel ei ole probleemiks (Telling Lime Products 2006). Kokkuvõtlikult on mõningaid olulisemaid omadusi välja toodud ja võrreldud tabelis 3.

Looduslike hüdrauliliste lupjade kasutamise suurimaks puuduseks on meisterlike teadmiste ja oskuste vähesus. Hüdrauliliste lupjade omadustele ning kasutusvõimalustele on uuesti hakatud teaduslikku tähelepanu pöörama, seda eelkõige erinevatele restaureerimisprobleemidele lahenduste otsimise eesmärgil (Krumnacher 2001).

Tabel 3. Looduslike hüdrauliliste lubjade, õhklupjade ning tsementide eelised ja puudused.

<b>Karakteristikud</b>	<b>Looduslik hüdrauliline lubi</b>	<b>Õhklubi</b>	<b>Tsemendid</b>
CO <sub>2</sub> absorbeerimine õhust	+	+	-
Hingavus (hea ruumikliima)	+	+	-
Iseparanemisvõime	+	+	-
Materjali taaskasutatavus	+	+	-
Sobivus vanade mörtidega	+	+	-
Resistentsus bakterite suhtes	+	+	-
Resistentsus soolade suhtes	+	-	-
Tugevus	+	+/-	+
Vastupidavus	+	+	+/-
Kiire tardumise algus	+	-	+
Kiire tulemus	+	-	+
Teadmised ja oskused	-/+	+/-	+

**Lähtuvalt lubjakivide mineraloogilisest koostisest ja visuaalsest analüüsist on püstitatud hüpotees, et kõik kolm Mõisaküla karjääri savikat lubjakivi on potentsiaalsed loodusliku hüdraulilise lubja toorained.**

## II MATERJAL JA METOODIKA

Käesoleva töö konkreetne eesmärk on välja selgitada Saaremaa Mõisaküla lubjakivikarjääri kolme erineva savistunud lubjakivituubi potentsiaal loodusliku hüdraulilise lubja toorainena.

Uurimisplaani koostamisel oli abiks oma ala praktik ja lubja uurimisega tegelenud Andrus Uuetalu. Katsete teostamisel püüti järgida Eestis kehtivaid standardeid. Ehituslubja käsitlevaid eestikeelseid standardeid on kaks: EVS 763-1:2000, EVS 763-2:2000. Lisaks tutvus autor erinevate müürimörte puudutavate standarditega. Enamus Internetist leitud hüdrauliliste lupjade uuringuid viitavad standarditele *French Norm NFP 15.311* ja *European Norm EN 459*; vastavat eestikeelset standardit ei ole. Katsete teostamisel juhinduti käsiraamatutes ja artiklites viidatud alternatiivsetest meetoditest ning nõuannetest.

Käesoleva töö käigus mõeldakse lubjakivide all selle töö käigus konkreetselt testitavaid savikaid lubjakivisid; mõiste „hüdrauliline lubi” ja looduslik hüdrauliline lubi” tähendavad mõlemad looduslikku hüdraulilist lupja. Töös nimetatud kaltsiumoksiid (CaO) ja kõik sellega seonduvad mõõtmised viitavad testitud savikate lubjakivide kustutamata lubjale, sest CaO on põletamise peamine tule.

### 2.1 Lubjakivide iseloomustus

Käesoleva uurimuse objektiks on Ülem – Siluri ajastu Paadla lademe Sauvere kihist pärit kolm erineva mineraloogilise koostisega savikat lubjakivi. Kõik kiviproovid pärinevad Lümända – Mõisaküla lubjakivimaardla Mõisaküla lubjakivikarjäärist Lääne – Saaremaalt (joonis 5).

Käesoleva töö katsealused savikad lubjakivid on nimetatud järgnevalt: *vahekiht*, *põhjakih*t, *säbruline*. Nimetused on tuletatud lubjakivide paiknemise ja omaduste järgi. Lubjakivide üldise väljanägemise kohta annab aimu joonis 6.



Joonis 5. Mõisaküla lubjakivikarjäär asub Lõmanda vallas Saaremaal (AS Limex 2006).



a

b

c

Joonis 6. Uurimise aluseks olevate lubjakivide näidised: a vahekiht, b säbruline, c põhjakiht.

*Vahekiht* ja *põhjakiht* asetsevad üksteise peal ja on esindatud kogu karjääri ulatuses; *säbruline* paikneb karjääri ida servas iseseisvate pesadena hajali. *Vahekiht* asetseb maapinnast kuni 1 m sügavusel, kihi keskmine paksus on 5 – 10 cm. *Põhjakiht* avaldub 2,4 – 2,5 m sügavusel, kihi paksus on ligikaudu 1 m, allpool on veidi teistsuguste omadustega savikad karbonaatsed kivimid. *Säbruline* avaldub 1,2 – 1,5 m sügavusel, varud on väga väikesed. Suurimat huvi pakub *põhjakiht*, mille varud võimaldaksid kohaliku hüdraulilise lubja tootmist. *Vahekiht* ja *säbruline* on tootmistehnoloogiliselt väheolulised, samas nende omadused võivad osutada

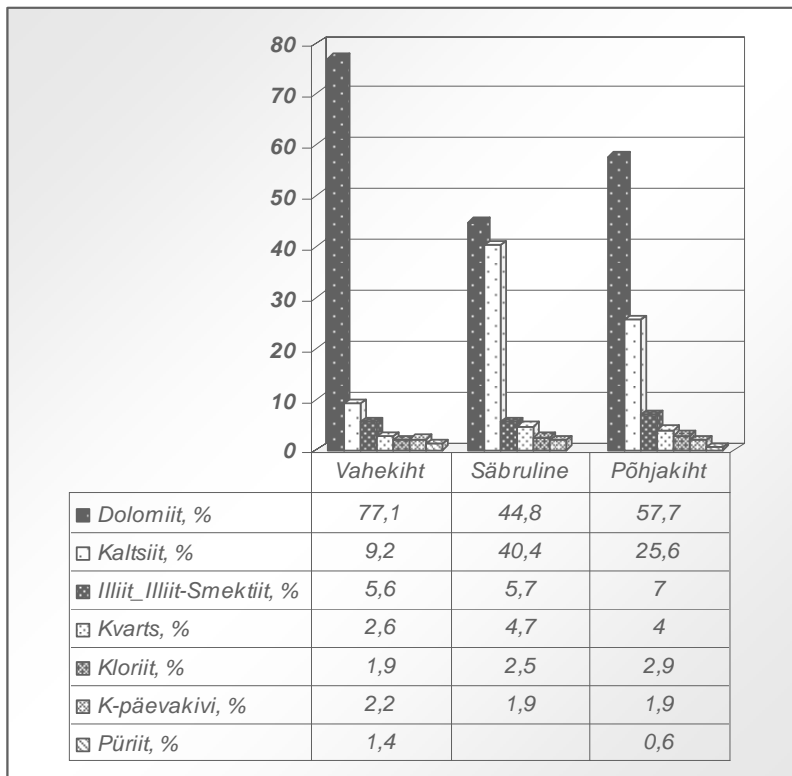
asendamatuteks teatud hoonete vanade mörtide, mis hetkel veel teada ei ole, parandamiseks.

*Säbruline* ja *põhjakih*t olid enne katsete alustamist 3 – 5 kg kamakatena, vahekiht 0,2 – 0,8 kg tükkidena. Haamriga lõhkumisel hinnati objektide kõvadust ning nende homogeensust/ heterogeensust. Vaatlustulemuste põhjal on töö katsetes kasutatavad savikad lubjakivid iseloomustatud tabelis 4.

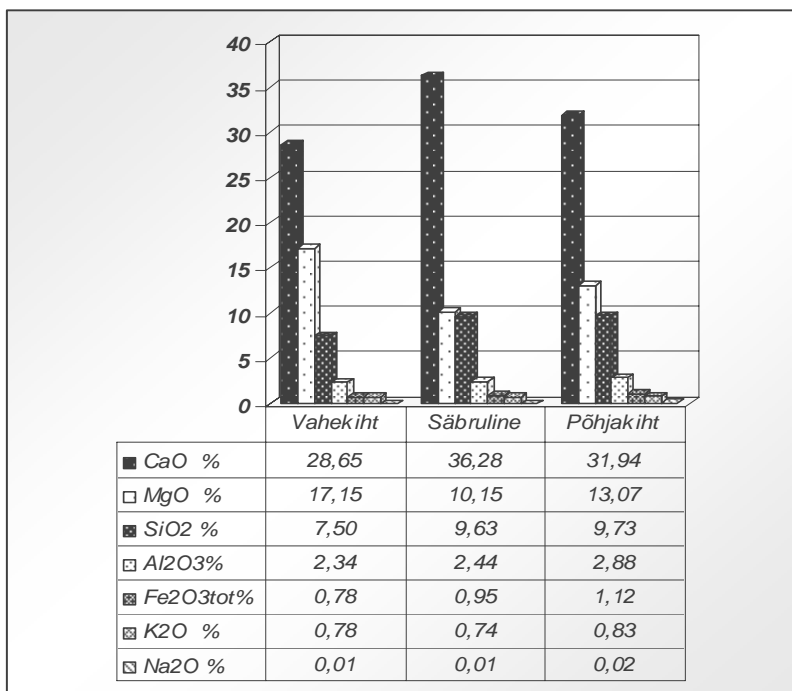
*Tabel 4. Lubjakivide esialgsed vaatlustulemused.*

	<b>Värvus</b>	<b>Kõvadus</b>
<b><i>Vahekiht</i></b>	ühtlaselt tumehall, mõned valged laigud	pude
<b><i>Säbruline</i></b>	heledam, õrnalt roheka alatooniga, hulgaliselt kobaras valgeid laike ja musti täppe	tugev
<b><i>Põhjakih</i>t</b>	hallikaspruun, üksikud heledamad laigud ja triibud	keskmine

Uuritavate lubjakivide mineraalsed ja arvutuslikud keemilised koostisanalüüsid olid eelnevalt, Priit Penu palvel, teostatud Tartu Ülikooli geoloogia laboris prof. Kalle Kirsimäe poolt. Lubjakivide mineraalne koostis kaaluprotsentides on esitatud joonisel 7, arvutuslik keemiline koostis joonisel 8.



Joonis 7. Lubjakivide mineraalne koostis, % (Kirsimäe 2005).



Joonis 8. Lubjakivide arvutuslik keemiline koostis, % (Kirsimäe 2005).

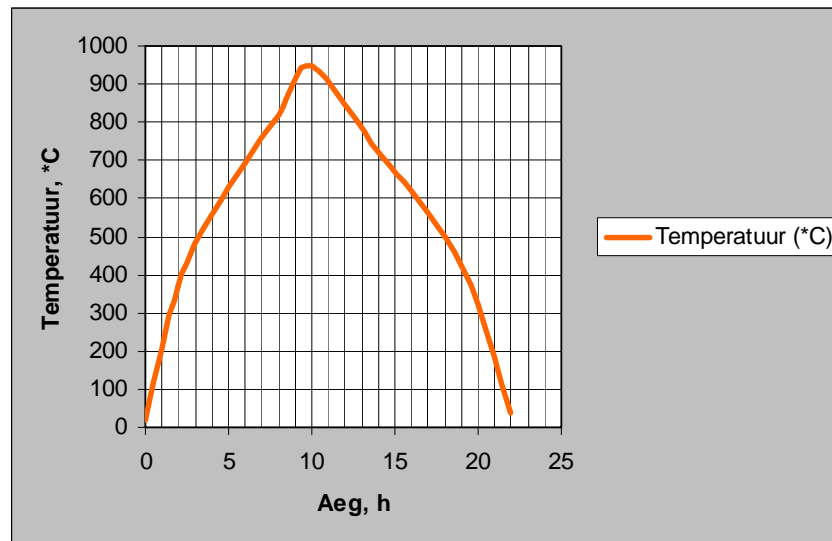
Lähtuvalt lubjakivide mineraloogilisest koostisest ja visuaalsest analüüsist on püstitatud hüpotees, et kõik kolm testitavat lubjakivi on potentsiaalsed loodusliku hüdraulilise lubja toorained.

Saaremaa savikate lubjakivide kui võimaliku loodusliku hüdraulilise lubja tootmise tooraine uurimist alustati kevad – talvel 2006. Töö praktiline osa on läbiviidud vahemikus 20. aprill – 10. mai 2006. Talveperioodil traditsioonilisel viisil lubjakivi põletamisega ei tegeleta. Seega on käesoleva uurimuse käigus katsetatud võimalikku alternatiivset väikesemahulist lubjakivi põletamise meetodit, milleks on keraamikaahi.

## **2.2 Savikate lubjakivide põletamine**

Põletuseks taoti kivid haamriga 100 – 300 g tükkideks, et kindlustada võimalikult täiuslik läbipõlemine olemasolevates tingimustes. Proovipõletus teostati Tartus Antoniuse Gildi Savikojas väikeses elektrilises keraamikaahjus. Teadaolevalt ei ole keegi varem keraamikaahjus lubja saamise eesmärgil lubjakivi põletanud, mistõttu ei olnud teada võimalikud mõjud ahjule ja teistele põletusprotsessis olevatele saviesemetele. Sellest lähtuvalt võeti esmaseks põletuseks igast kivitüübist prooviks umbes 300 g. Põletuse käigus ja hilisemal visuaalsel keraamiliste esemete ja ahju hindamisel olulisi mõjusid ei täheldatud. Ülejäänud osa lubjakividest põletati finantsilistel kaalutlustel gaasiküttega keraamikaahjus keraamik Tanel Telli tööstuudios Otepää lähedal Sihval.

Esimese põletuse tulemusena selgus, et valitud temperatuur (950 °C) ja aeg (24h koos ahju kuumenemise ja jahtumisega) on piisav 100 – 300 g savikate lubjakivitükkide läbipõletamiseks. Teine põletus viidi läbi samadel tingimustel. Teise põletusprotsessi temperatuuri kulgu jälgiti pidevalt. Põletusprotsessi ajaline ja temperatuuriline ülevaade on esitatud joonisel 9.



Joonis 9. Lubjakivide põletamisel keraamikaahjus mõõdetud temperatuur.

Teise põletusprotsessi eel ja pärast lubjakivitükid kaaluti. Pärast kaalumist pakiti põletatud savikad lubjakivid, iga tüüp eraldi, kahte kilekotti ning sulgeti kaanega klaasnõusse, et kivitükkide pinnal vältida olulist iseeneselikku õhuniiskuse toimet kaltsiumhüdroksiidi moodustumist.

## 2.3 Hüdraulilise lubja kustutamine

Kustutamata lubja kustumistemperatuuri ja aja mõõtmised tehti Tartu Ülikooli geoloogia laboris. Katseks valmistati 1950. aastal Tehnika Kolhoosi poolt välja antud raamatus „Lubja põletamine 1” kirjeldatud *Dewari* anuma ideoloogiapõhine alternatiivseade. Soojakadude minimeerimiseks asetati katseklaas kahekordse villase kanga sisse, pealt suleti topeltkile ning kummiga. Kilest torgati läbi digitaalne termomeeter ning segamispulk. Kaalumiseks kasutasin labori digitaalset kaalu. Kõik kirjeldatud katseseadmed on esitatud lisas 4.

Kustutamise läbiviimise osas konsulteeris autor eesti lubjapraktikute Priit Penu ja Andrus Uuetaluga. Mitte kumbki ei ole varem looduslike hüdrauliliste lubjadega

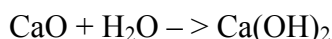
kokku puutunud. Seega lähtus autor uuritavate mergliliste lubjakivide kustutamise uurimisel järgnevatest tähelepanekutest kirjanduses:

1. Riba (1994): Hüdraulilise lubja kustutamine on keeruline. Vaja on meistrite kogemusi ja teadmisi, sest iga konkreetse hüdraulilise lubja kustutamiseks vajaminev vee hulk on erinev. Oluline on lisada kustumiseks vajalik vee kogus – mitte liiga vähe ega liiga palju. Liigne vesi võib esile kutsuda enneaegse karboniseerumise, vähene vesi mittetäieliku kustumise;

2. Pärnamägi (2002): Hüdrauliline lubi kustutatakse pulbriks ja peale seda veel jahvatatakse;

3. Kaila (1999): Kui lubi on hüdrauliline ehk vees kivinev, ei tohi seda eelnevalt kustutada. Ameerika „*Bricklayers` Guide*” aastast 1907 määrab hüdraulilise lubja üldisteks kvaliteedinõueteks: „Lubi tuleb põhjalikult kustutada ehitusplatsil, lisades sellele vajalik hulk vett. Protsessi ajal peab see soojuse ja niiskuse säilitamiseks olema korralikult liivaga kaetud. Kogu lubi tuleb ära kasutada kustutamisest kümne päeva jooksul.” Erinevalt märgkustutamisest, hüdraulilist lubja kustutamise ajal ei segata. Kuum lubi haudub öö läbi, enne kui see koos liivaga mördiks tambitakse ja kasutusele võetakse.

Lubja kustumiseks minimaalselt vajalik vee kogus arvutati võrrandist:



Võrrandist järeldub, et 20 g kustutamata lubja kustutamiseks on tarvis 6,43 ml vett, 200 g jaoks 64,3 ml. Ühe kilogrammi kustutamata lubja jaoks 321,4 ml vett.

## 2.4 Katsed lubja potentsiaalselt hüdrauliliste omaduste uurimiseks

### 2.4.1 Kustutamine

Kustutamise uurimiseks tehti kokku 18 katset, mille käigus varieerusid: kaltsiumoksiidi peensusaste, lisatav vee kogus, liiva kasutamine/mittekasutamine. Kõik katsed on nummerdatud, tähed (a, b, c) tähistavad antud katses kasutatud lubjakivituüpi: a – vahekiht, b – säbruline, c - põhjakiht. Katsetes varieerunud kaltsiumoksiidi kogus, vee hulk, liiva kasutamine/mittekasutamine ning kustutamise käigus mõõdetud, hinnatud parameetrid on esitatud tabelis 5. Plussmärk tähendab, et antud parameetrit mõõdeti/hinnati; miinusmärk tähendab, et seda ei tehtud.

Esimeses kahes katses on kasutatud uhmri abil pulbriks peenestatud põletamata kaltsiumoksiidi. Katsetes 3 – 6 on kustutamata lubi haamri abil peenestatud 10 – 30 g tükkideks. Kõikides katsetes kasutati destilleeritud vett temperatuuril 21 °C ning Savitehasest toodud Laguja karjääri liiva fraktsiooniga 0 – 2 mm.

*Esimeses katses* (1a, 1b, 1c) lisati 20 g CaO 6,5 ml destilleeritud vett, mis on valemist (a) arvatud täpne kogus 20 g kaltsiumoksiidi kustutamiseks kaltsiumhüdroksiidiks. Ühe grammi kaltsiumoksiidi kustutamiseks läheb vaja 0,32 g vett, 20g kaltsiumoksiidi kustutamiseks 6,5 ml. Esimese katse eesmärk oli välja selgitada, kas antud tingimustes kustumiseks täpselt vajaminev vee hulk on piisav. 20 g CaO mõõdeti 150 ml katseklaasi, suleti pealt kile ja kummiga, asetati kahekordse villase suka sisse, lisati digitaalne termomeeter, segamispulk. Määrati katse alguse aeg, valati peale 6,5 ml vett. Kustumise käigus mõõdeti iga poole minuti järel kustumistemperatuuri.

*Teises katses* (2a, 2b, 2c) lisati vett täpselt kaks korda rohkem kui oli kaaluliselt kustutamata lubja. Eesmärk oli mõõta oluliselt suurema vee koguse lisamise mõju kustumistemperatuurile ja ajale, samuti näha ja hinnata kustunud lõppprodukti olekut. Kasutatud meetod on kirjeldatud katses üks.

Tabel 5. Uuritud savikate lubjakivide kustutamata lubja kustutamise uurimiseks teostatud katsed ning katsete käigus mõõdetud, hinnatud parameetrid ( „+” tähistab, et katse teostati ja „–”, et seda ei tehtud).

KATSE NR	KUSTUTAMINE			MÕÕDETUD JA HINNANGULISED PARAMEETRID				
	CaO (g)	H <sub>2</sub> O (ml)	Liiv (g)	T <sub>max</sub> (min)	aeg T <sub>max</sub> (min)	Ca(OH) <sub>2</sub> olek	Ca(OH) <sub>2</sub> kaal (g)	Ca(OH) <sub>2</sub> maht (ml)
<b>1a</b>	20*	6,5		+	+	+	+	+
<b>1b</b>	20*	6,5		+	+	+	+	+
<b>1c</b>	20*	6,5		+	+	+	+	+
<b>2a</b>	20*	40		+	+	+	+	+
<b>2b</b>	20*	40		+	+	+	+	+
<b>2c</b>	20*	40		+	+	+	+	+
<b>3a</b>	200	130	200	+	+	+	+	+
<b>3b</b>	200	130	200	+	+	+	+	+

\* CaO pulbriks uhmerdatud.

KATSE NR	KUSTUTAMINE			MÕÕDETUD JA HINNANGULISED PARAMEETRID				
	CaO (g)	H <sub>2</sub> O (ml)	Liiv (g)	T <sub>max</sub> (min)	aeg T <sub>max</sub> (min)	Ca(OH) <sub>2</sub> olek	Ca(OH) <sub>2</sub> kaal (g)	Ca(OH) <sub>2</sub> maht (ml)
3c	200	130	200	+	+	+	+	+
4a	200	130		+	+	+	+	+
4b	200	130		+	+	+	+	+
4c	200	130		+	+	+	+	+
5a	200	260		-	-	+	-	-
5b	200	260		-	-	+	-	-
5c	200	260		-	-	+	-	-
6a	1000	642		-	-	+	-	-
6b	1000	642		-	-	+	-	-
6c	1000	642		-	-	+	-	-

*Kolmandas katses* (3a, 3b, 3c) järgiti Kaila (1999) poolt tsiteeritud Ameerika „*Bricklayers` Guide*” nõuandeid: kustutada koos liivaga ning lasta 24 h segamatult haududa. Arvestades autori alternatiivseid põletusmeetodeid võib eeldada, et kivimiteläbipõlemine ei olnud nii täiuslik kui suures ahjus põletamisel – võib esineda lisamaterjali ning alapõlenud osiseid.

Seda arvestades võetakse liiva ja kustutamata lupja kaaluliselt võrdsetes kogustes. Lähtuvalt Pärnamäe (2002) väitest, et hüdrauliline lubi tuleb kustutada pulbriks ning eeldusest, et olemasolevatel tingimustel on vee aurumiskaod märkimisväärsed, on vee kogus arvestatud täpselt kaks korda suurem kui otseselt kustumiseks vajalik. Eesmärk on saada pulber ja võimalikult täielikult kustunud lubi. Kustutamiseks kasutati 0,3 l ja 0,5 l keeratava kaanega klaaspurke. Pärast kustumise  $T_{max}$  saavutamist ja mõõtmist purgid suleti ning jäeti ööpäevaks seisma.

*Neljas katse* (4a, 4b, 4c) on identne kolmanda katsega, ainsa erinevusega, et liiva ei kasutatud.

*Viies katse* (5a, 5b, 5c) on läbiviidud kolmandas katses kirjeldatud tingimustel. Liiva ei kasutatud ning vett lisati neli korda rohkem kui kustumiseks otseselt tarvis. Katsetati õhkclubja kustutamise meetodit, kus liigne vesi kustutatava lubja suhtes ei ole oluline, pigem positiivne.

*Kuuenda katse* (6a, 6b, 6c) eesmärk oli saada piisav kogus kvaliteetset lupja, millest valmistada mört katseplaatide krohvimiseks. Käesolevas katses võeti arvesse juba läbiviidud katsete vaatlus- ja mõõtmistulemusi. Suurema koguse katselubja, so 1 kg, kustutamiseks valiti neljas proovimeetod.

#### **2.4.2 Mördi veesidumisvõime määramine**

Teises ja kolmandas kustutamise proovis saadud lupjadel mõõdeti veesidumisvõimet (WRV). Mõõtmistel arvestati standardi EVS 763-2:2000 juhistega; katseseadmeid modifitseeriti vastavalt võimalustele. Esimene katse tehti väikeste mördikogustega, seega kasutati väikeseid filterpabereid ( $d=5$  cm). Plastikrõnga asemel kasutati metallist rõngast. Teisel katsel kasutatud filterpaberid olid suuremad ( $d=10$  cm). Viie minuti pärast kaaluti märjad filterpaberid uuesti.

Veesidumisvõime (WRV) arvutati valemist:

$$\text{WRV}_x (\%) = 100 - \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 - m_3)} * 100, \text{ kus}$$

$m_1$  – kuiva filterpaberi mass;

$m_3$  – seadme mass ilma mördiseguta;

$m_2$  – märja filterpaberi mass;

$m_4$  – seadme mass koos mördiseguga.

Kahe katse tulemuste põhjal arvutati igast lubjakivitüübist saadud lubja keskmine veesidumisvõime:

$$\text{WRV} (\%) = \frac{\text{WRV}_1 + \text{WRV}_2}{2}$$

Arvestades asjaolu, et kolmandas kustutamiskatses oli tulemuseks pulbriline lubi, määrati enne veesidumisvõime katse teostamist ka iga lubimördi veevajadus. Selleks mõõdeti 150 ml katseklaasi 40 g liivaga kustutatud lupja, kuni lubjapasta moodustumiseni lisati pipeti abil tilk haaval vett juurde. Veekulu arvestati iga mördi valmistamise puhul eraldi.

### **2.4.3 Mördi katsetamine**

Katsetes 3 ja 6 saadud lubjast valmistati mördid katseplaatide krohvimiseks, kokku kaksteist proovi. Katsetatud lubimördiproovid on esitatud tabelis 6, illustreerivalt lisas 5.

Iga proovi tähis viitab kasutatud lubja kustutusmeetodile ning lubisideaine:täiteaine mahusuhteile. Lubja number viitab kustutamiskatse meetodile, tähed (a,b,c) tähistavad antud katses kasutatud lubjakivitüüpi: a – *vahekiht*, b –

säbruline, c – põhjakiht. Krohvimisalustena kasutati 1 cm paksuseid kipsplaate (10 x 20 cm). Plaadid olid eelnevalt kaetud *Kreidezeit* lubipahtliga (OÜ Safran, art nr 980). Enne krohvi pealekandmist niisutati pind veega ning lasti mõni minut kuivada. Proovid krohviti 4 – 5 mm paksuste ühekordsete kihtidena. Krohvitud katseplaadid jäeti kuivama siseruumi otsese päikesekiirguse eest varjatuna. Prooviplaatide kuivamist jälgiti kahel krohvimisele järgnenud päeval: hinnati kivinemise kiirust, värvust, pragunemist.

Tabel 6. Krohvimisel katsetatud lubimördiproovid.

Katse nr	Katse tähis	Suhe	Lubi	Liiv	Kipsplaat	Krohvikihi paksus
1	<b>K3a:1</b>	1:1	3a	-	10 x 20	4 - 5 mm
2	<b>K3b:1</b>	1:1	3b	-	10 x 20	4 - 5 mm
3	<b>K3c:1</b>	1:1	3c	-	10 x 20	4 - 5 mm
4	<b>K3a:2</b>	1:2	3a	+	10 x 20	4 - 5 mm
5	<b>K3b:2</b>	1:2	3b	+	10 x 20	4 - 5 mm
6	<b>K3c:2</b>	1:2	3c	+	10 x 20	4 - 5 mm
7	<b>K6a:2</b>	1:2	6a	+	10 x 20	4 - 5 mm
8	<b>K6b:2</b>	1:2	6b	+	10 x 20	4 - 5 mm
9	<b>K6c:2</b>	1:2	6c	+	10 x 20	4 - 5 mm
10	<b>K6a:3</b>	1:3	6a	+	10 x 20	4 - 5 mm
11	<b>K6b:3</b>	1:3	6b	+	10 x 20	4 - 5 mm
12	<b>K6c:3</b>	1:3	6c	+	10 x 20	4 - 5 mm

Et hinnata paksema mördikihi kuivamisomadusi ning hilisemalt suhtelist tugevust, vooliti krohvimisproovis 4, 5 ja 6 valmistatud mördist 375 - 380 g kerad. Valmis kerad kaaluti ning asetati kuivama otsese päikesekiirguse eest varjatuna. Ööpäeva möödudes kaaluti kerad uuesti. Kerade algkaalu ( $m_0$ ) ning 24 h järgse ( $m_{24h}$ ) kaalu kaudu arvutati kaotatud vee hulk ning protsentuaalne veesisaldus võrreldes algsega. Kerade protsentuaalne veesisaldus arvutati järgneva valemi järgi:

$$\text{Veesisaldus (\%)} = 100 - \frac{m_0 - m_{24h}}{m_0} * 100, \text{ kus}$$

$m_0$  – kera kaal kera voolimisel;

$m_{24h}$  – kera kaal 24 h pärast.

## III TULEMUSED

### 3.1 Põletamine

Põletamise käigus muutusid savikad lubjakivid valkjateks, mahulisi muutusi ei täheldatud. Kaaluliselt olid tükid tunduvalt kergemad kui enne. Põletatud mergleid oli võimalik käe vahel tükkideks murda, seega esmasel vaatluse tulemusena võis järeldada, et põletamine on õnnestunud. Teise, suurema mahulise, põletusprotsessi eel ja pärast lubjakivitükid kaaluti. Tulemused on esitatud tabelis 7.

Tabel 7. Lubjakivide põletamise käigus toimunud kaalumuutused.

	<b>Lubjakivi (kg)</b>	<b>Põletatud (kg)</b>	<b>Kaalukadu (kg)</b>	<b>Kaalukadu (%)</b>	<i>Teoreetiline kuumutuskadu (%)<sup>3</sup></i>
<b><i>Vahekiht</i></b>	2,6	1,5	1,1	<b>42</b>	41
<b><i>Säbruline</i></b>	5,1	3,4	1,7	<b>33</b>	39
<b><i>Põhjakih</i></b>	4,1	2,4	1,7	<b>41</b>	40

Kõige vähem kaotas põletamisel kaalu *säbruline* lubjakiviproov – 33 %. *Vahekiht* ja *põhjakih* kaotasid vastavalt 42 % ja 41 %, so põhimõtteliselt samas suurusjärgus. Huvitav on tõdeda, et praktiliselt mõõdetud kuumutuskadu vastab peaaegu teoreetilisele, millest võib järeldada, et valitud põletusmeetod toimus. Suurem lahknevus on *säbrulise* lubjakivi puhul, mille mineraloogilises koostises teistega võrreldes on tunduvalt rohkem kaltsiiti, mille põletustemperatuur on veidi kõrgem kui antud katses, ning vähem dolomiiti, mis laguneb madalamal temperatuuril. Mõlemad näitajad: nii lahknevus teoreetilisest arvutusest kui mineraloogiline koostis – viitavad otseselt

<sup>3</sup> Arvutatud prof. Kalle Kirsimäe poolt lubjakivide keemilise koostise määramisel.

potentsiaalselt alapõlenud osistele *säbrulises* lubjakivis. Viimast saab kontrollida kustutamiskatsete analüüsil.

Sellele, kas ja kui edukalt savikate lubjakivide põletamine keraamikaahjus (vt lisa 4, joonis 1) tegelikult toimus, annab vastuse kustutamisel saadud tulem.

### 3.2 Kustutamine

Kuue kustutamiskatse 18 proovi parameetrid ning mõõdetud tulemused on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 8.

Kuue erineva kustutamismeetodi katsetamistest tehti järgnevad üldised järeldused:

- *Kaltsiumoksiidi pulbriks peenestamine ei mõjuta kustutamisprotsessi kulgu ega tulemuse kvaliteeti.*

Kustutamata lubja eelnevat jahvatamist võiks soovitada, kui on teada, et põlemine on olnud mittetäielik, ning esineb olulisel määral alapõlenud osiseid. Seda seetõttu, et kvaliteetse lubja saamiseks ei tohiks sees olla suuri kivimi tükke. Kustutatud lubja jahvatamine on mõnevõrra mahukam ettevõtmine.

- *Kustutamata lubjale lisatav õige vee kogus on väga oluline.*

Kui vett lisatakse liiga vähe, siis on kustumine mittetäielik. Kui vett lisatakse liiga palju, siis lubja kustumine aeglustub tunduvalt. Maksimaalne kustumistemperatuur ( $T_{\max}$ ) jääb püsima tunduvalt madalamale tasemele, lubi omandab mittesiduva klombilise oleku, millest kvaliteetse hüdraulilise lubimördi valmistamine on kaheldav. Katsed tõestasid, et kvaliteetse hüdraulilise lubja saamiseks tuleb see kustutada pulbriks. Mittehermeetilistes kustutustingimustel toimus väga hästi kustumiseks vajaliku vee hulga korrutamine kahega.

- *Liivaga kustutamise võimalikud eelised ei ole veel teada.*

Tabel 8. Uuritud savikate lubjakivide kustutamata lubja kustutamise uurimiseks teostatud katsed ning katsete käigus mõõdetud, hinnatud parameetrite tulemused.

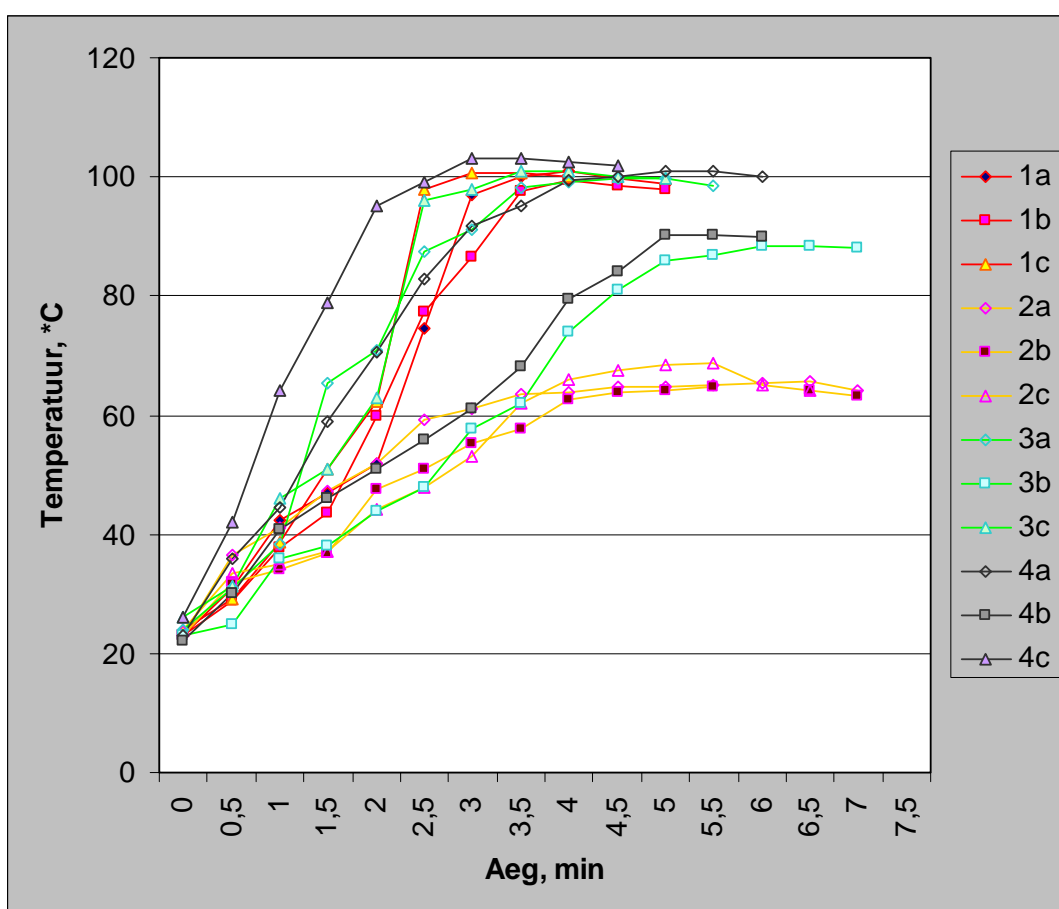
KATSE NR	KUSTUTAMINE			MÕÕDETUD JA HINNANGULISED PARAMEETRID				
	CaO (g)	H <sub>2</sub> O (ml)	Liiv (g)	T <sub>max</sub> (min)	aeg T <sub>max</sub> (min)	Ca(OH) <sub>2</sub> olek	Ca(OH) <sub>2</sub> kaal (g)	Ca(OH) <sub>2</sub> maht (ml)
1a	20*	6,5		100,1	3,5	pulber	25,78	47
1b	20*	6,5		99,4	4	pulber	26,07	40
1c	20*	6,5		100,8	3	pulber	26,09	45
2a	20*	40		65,7	6,5	klombiline pasta	58,92	58
2b	20*	40		64,7	5,5	piimjas tükiline	59,62	50
2c	20*	40		68,7	5,5	pasta-piim	59,42	55
3a	200	130	200	99,8	4,5	pulber	538	580
3b	200	130	200	88,4	6	pulber	532	450
3c	200	130	200	101,1	3,5	pulber	541	580
4a	200	130		101,1	5	pulber	327	450

\* CaO pulbriks uhmerdatud.

KATSE NR	KUSTUTAMINE			MÕÕDETUD JA HINNANGULISED PARAMEETRID				
	CaO (g)	H <sub>2</sub> O (ml)	Liiv (g)	T <sub>max</sub> (min)	aeg T <sub>max</sub> (min)	Ca(OH) <sub>2</sub> olek	Ca(OH) <sub>2</sub> kaal (g)	Ca(OH) <sub>2</sub> maht (ml)
4b	200	130		90,3	5	pulber	328	322
4c	200	130		<b>103,1</b>	<b>3</b>	pulber	329	464
5a	200	260		-		klombid	-	-
5b	200	260		-		klombiline pasta	-	-
5c	200	260		-		klombid	-	-
6a	1000	642		-		pulber	-	-
6b	1000	642		-		pulber	-	-
6c	1000	642		-		pulber	-	-

1907. aastal välja antud Ameerika „*Bricklayers` Guide*” soovitatud meetod (vt ptk 2.3) toimis väga edukalt. Autor proovis sama meetodit ka ilma liivata; esmapilgul oli tulemuseks samuti peen ja kvaliteetne kustutatud hüdrauliline lubi. Liivaga kustutamise praktilised ja/või esteetilised eelised võivad ilmned krohvimiskatsete analüüsil ja pikemaajalisel jälgimisel.

Lupjade kustumistemperatuure mõõdeti nelja katse jooksul. Kustutamistestide kustumistemperatuuride ajalist käiku kirjeldab joonis 10.



Joonis 10. Kolme lubjatiüübi nelja kustutamistesti kustumistemperatuuride võrdlus.

Katsed on joonisel grupeeritud nii lubja tüübi kui katse numbril alusel. Vahekihi lupjasid (a) tähistab romb, säbrulise lubjakivi lupjasid (b) ruut, põhjakivi lupjasid (c) kolmnurk. Esimene katse on tähistatud punase joonega, teine kollase, kolmas roheline

ning neljas tumehalli joonega. Kõik lubjatüübid käitusid erinevate katsete käigus sarnaselt. Lupjade omavahelisi erinevusi kirjeldab kõige selgemalt neljas test (tumehallid jooned).

Käesoleva töö uurimisobjektiks olevate savikate lubjakivide kustutamata lubja kustumistemperatuuride ja – aja mõõtmisel tehti järgnevad järeldused:

- Keskmiselt kõige kõrgemad kustumistemperatuurid esinesid *põhjakihi* lubjakivist (tähis c) saadud lubja kustutamisel.
- Keskmiselt kõige kiiremini saavutas maksimaalse kustumistemperatuuri ( $T_{\max}$ ) *põhjakihi* lubjakivist (tähis c) saadud lubi.
- Kõige madalamad kustumistemperatuurid ( $T_{\max}$ ) olid *säbrulisest* lubjakivist (tähis b) saadud lubjal.
- Kõige aeglasemalt saavutas maksimaalse kustumistemperatuuri ( $T_{\max}$ ) *säbrulisest* lubjakivist (tähis b) saadud lubi.
- *Vahekihist* (tähis a) saadud lubi käitus väga sarnaselt *põhjakihist* saadud lubjaga.

Kolme kustutatud lubja vaatlusanalüüsil tehti järgnevad järeldused:

- *Säbrulisest* lubjakivist saadud kustutatud lubjas esines olulisel määral kustumata kiviosakesi, keskmiselt 10 %. Teiste lupjade puhul kustumata osakesi ei täheldatud.
- Kõige valgem lubi saadi *põhjakihi* lubjakivist.
- *Vahekihi* lubjakivist saadud lubi omandas õrnalt kollaka varjundi.
- *Säbrulisest* lubjakivist saadud lubi oli üldiselt helepruunika (tammetõru) värvusega, esines ka üksikuid tumedamaid osakesi.
- Kõige peeneteralisem oli *põhjakihi* lubjakivist saadud lubi.
- Kõige jämedam (sõmerjas) oli *säbrulisest* lubjakivist saadud lubi.
- *Vahekihist* saadud lubi sarnanes pigem *põhjakihist* saadud lubjale kui *säbrulisele*.
- Kustutatud lubjast mördi valmistamisel oli sama koguse sideaine juures kõige suurem veevajadus *põhjakihist* saadud lubjal: 1/3 pulbriks kustutatud lubja massist.

- *Säbrulisest ja vahekihist* saadud lubja mördi veevajadus oli samaväärne, so 1/4 pulbriks kustutatud lubja massist.

Savikatest lubjakividest saadud kustutatud lupjade esialgsed füüsikalised vaatlushinnangud ning mördi veevajaduse hindamine on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 9.

*Tabel 9. Uuritud savikate lubjakivide kustutamata lubja kustutamise uurimiseks teostatud katsed ning katsete käigus mõõdetud, hinnatud parameetrite tulemused.*

<b>Kustutatud lubja lähtekivim</b>	<b>Värvus</b>	<b>Peensus</b>	<b>Kustumata osakesed</b>	<b>Mördi veevajadus (ml/g lubi)</b>
<i>Vahekiht</i>	pigem valge	peen	-	1/4
<i>Säbruline</i>	helepruun	sõmer	+	1/4
<i>Põhjakiht</i>	valge	väga peen	-	1/3

### 3.3 Veesidumisvõime

Mörtide veesidumisvõimet määrati kahe katse abil. Selgus, et veesidumisvõime poolest katsealused lubjad olulisi erinevusi ei oma. Kõikide mörtide veesidumisvõime oli vahemikus 87 – 92 %, kahe katse põhjal arvatud keskmised väärtused on esitatud tabelis 10.

*Tabel 10. Katsetatud lupjade veesidumisvõime.*

<b>Kustutatud lubja lähtekivim</b>	<b>Veesidumisvõime (%)</b>
<i>Vahekiht</i>	91%
<i>Säbruline</i>	89%
<i>Põhjakiht</i>	90%

Kõige paremini suudab vett endas hoida *vahekihi* lubjakivist saadud lubi. *Säbrulise* lubjakivi lubja veesidumisvõime on kõige madalam. *Põhjakivi* lubjakivi lubja veesidumisvõime on 90%, mis on võrdne kahe eelneva keskmise väärtusega. Mõlema katse mõõtmised ning arvutuslikud tulemused on esitatud lisas 6.

### 3.4 Mördi katsetamine

Krohvimisel võrreldi liivaga ja liivata kustutatud lubja mörtide omadusi. Mördid valmistati suhtes 1:1, 1:2 ja 1:3. Kõik proovid olid järgmise päeva hommikuks, so 10 h möödudes kivistunud. Liivaga kustutatud 1:1 mördiproovis oli kõikides märgata üksikute pragude tekkimist.

Liivaga ja liivata kustutamise oluline vahe ilmneb kuiva krohvi värvuses – liivaga kustutatud lubja kasutamisel on lõpptulemus märgatavalt heledam. Kui liivaga kustutatud lubimördi kokku segamisel liiva juurde ei lisata, on tulemuseks täiesti valge pind. Tabelis 11 on kokkuvõtlikult esitatud krohvimisproovide esialgsed hinnangud.

Kolmandal päeval pärast krohvimist silmaga eristatavaid olulisi muutusi ei täheldatud. Nädala pärast olid krohviplaadid väljanägemiselt samasugused.

Krohvimise käigus valmistatud 375 - 380 g mördikerad (d=5cm) olid samuti kuivanud väga kiiresti. Järgmise päeva hommikuks olid kõikide kerade pealispind kuivaks ja valgeks muutunud. Pind, mis toetus alusele oli õrnalt niiske. Seest olid kõik kerad veel tumedad, st suhteliselt niisked. Kerad olid muutunud piisavalt tugevaks, et neid vabalt käes hoida ja uurida kartmata tekitada deformatsioone. Veekadu kerade kuivamisel esimese 24 h jooksul on välja toodud tabelis 12.

Tabel 11. Krohvimisel katsetatud mördi tüübid ja vahekorrad ning krohvi kuivamise hinnanguline iseloomustus 10 h möödudes.

KROHV			10 h MÖÖDUMISEL		
Katse nr	Katse tähis	Suhe	Krohvi kõvadus	Krohvi kihi värvus	Märkused
1	<b>K3a:1</b>	1:1	kivistunud	puhasvalge	kuivamisel on tekkinud üksikud mikropraod
2	<b>K3b:1</b>	1:1	kivistunud	valge	
3	<b>K3c:1</b>	1:1	kivistunud	puhasvalge	
4	<b>K3a:2</b>	1:2	kivistunud	hallikas valge	
5	<b>K3b:2</b>	1:2	kivistunud	hallikas valge	
6	<b>K3c:2</b>	1:2	kivistunud	hallikas valge	
7	<b>K6a:2</b>	1:2	kivistunud	hallikas valge	
8	<b>K6b:2</b>	1:2	kivistunud	hallikas valge	
9	<b>K6c:2</b>	1:2	kivistunud	hallikas valge	
10	<b>K6a:3</b>	1:3	kivistunud	helehall	
11	<b>K6b:3</b>	1:3	kivistunud	helehall	
12	<b>K6c:3</b>	1:3	kivistunud	hallikas valge	

Tabel 12. Mördikerade massikadu ja protsentuaalne veesisaldus võrreldes algsega 24 tunni möödudes.

	$m_0$ (g)	$m_{24h}$ (g)	Veekadu (g)	Veesisaldus (%)
<i>Vahekiht</i>	380	349	31	92%
<i>Säbruline</i>	378	340	38	90%
<i>Põhjakiht</i>	375	341	34	91%

## IV ARUTELU

Käesoleva uurimuse objektiks olnud kolme Saaremaa Mõisaküla paekivi karjäärist pärit savikate lubjakivide esialgsed eeldused ja sobivus loodusliku hüdraulilise ehituslubja valmistamiseks on olemas. Töö käigus läbiviidud katsed näitavad, kõikidest savikatest lubjakividest valmistatud lubi on krohvi sideainena kõlbulik ning praktilisel tootmise tasandil uurimist vääriv.

Igast katsetatud savikast lubjakivitüübist valmistatud lubi omas hüdraulilisi omadusi, sarnanedes pigem tsemendile kui õhklubjale. Viimast võib väita kiire kuivamise ning kivinemise põhjal. Vastupidavust niiskuse, soolade ja saastunud õhu suhtes tuleb veel testida. Teoreetiliselt peaks kõik katsetatud lubjad sobima nii mereäärsesse kui saastunud linnakeskkonda.

Arvestades hüdraulilise lubja omadust taluda niiskust ja soolasid, oleks huvitav testida käesolevate lupjade baasil valmistatud lubivärvide omadusi ja vastupidavust. Loodusliku hüdraulilise lubja baasil valmistatud lubivärvid võiksid olla sobilikud eelkõige köögi seinte ja lae katmiseks.

Kõik kuivanud mördid olid heledad (valged, valkjashallid, helehallid). Liivaga kustutatud mördid muutusid kuivades säravvalgeteks, mördid 1:2 olid valged, mördid 1:3 õrnalt hallikad. Mördi toon sõltub otseselt kasutatud liivast (täiteainetest), mille teadlikul valikul saab mõjutada kuivanud krohvi tooni. Käesolevate lupjade heleduse järgi otsustades ei tohiks mördi toonimisega probleeme olla. Kindluse mõttes on enne suuremate pindade töötlemist alati mõttekas teha katsekrohvimine. Hüdraulilise lubja puhul saab tulemuse kätte kiiresti, juba mõne tunni möödudes. Hommikul krohvides, peaks hiljemalt õhtuks tulemus teada olema.

Huvitav on tõdeda, et mördi veehoidvuse katsete tulemused ning kerade kuivamisel arvutatud mördi veesisaldus 24 h möödudes on põhimõtteliselt identsed (+/- 1%). Sellest võib järeldada, et sooritatud veehoidvuskatsed olemasolevates tingimustes andsid soovitud tulemuse, lisaks julgeb kindlamalt väita, et kõigi katsetatud looduslike hüdrauliliste lupjade veehoidvus on ~ 90%. Mördi kõrge veehoidvuse protsent on väga

oluline, seda eelkõige lõpliku tugevuse saavutamise seisukohalt. Kui krohv kaotab liiga kiiresti niiskust, siis lakkab kivinemine vee toimel ning lõpptulemus ei pruugi vastata ootustele. Samal põhjusel peab krohvitud pindu ka otsese päikesevalguse (soojuse) eest kaitsma.

Arvestades asjaolu, et vanade majade ja hoonete (kirikud, majakad, kõrvalhooned) lagunened lubikrohvi ja vuugitäiteid ei saa tsemendiga parandada, on teatud keskkonnatingimustes loodusliku hüdraulilise lubja kasutamine võibolla ainuvõimalik. *Vahekihhist* ja *põhjakihist* saadud lubi on suhteliselt sarnaste omadustega. *Säbrulisest* lubjakivist saadud lubi on õrnalt tumedam ning jämedateralisem. Igast lubjakivitüübist saadud lubja spetsiifilisi omadusi teades ning täiteainetega varieerides on võimalik saada nii värvuselt kui struktuurilt vana krohviga sarnane restaureerimiskrohv.

Majanduslikult pakkus kõige suuremat huvi põhjakihhi mergel, mille varud on oluliselt suuremad. Teostatud katsete tulemusena oli põhjakihhi lubjakivist saadud looduslik hüdrauliline lubi väga heade omadustega, struktuurilt kõige peenem ja puhtam. Kui arvestada asjaolu, et põhjakihhist saadud lubimõrde veevajadus oli teistest tunduvalt suurem, samas veehoidvus teistega võrdne, võib eeldada, et seni tõestamata näitajate põhjal võib mainitud lubjatüüp osutada isegi kõige kõrgemate hüdrauliliste omadustega lubjaks. Seega tuleks teostada veel suur hulk keemilisi ja praktilisi analüüse.

Looduslike hüdrauliliste lupjadega tegelemisel peab olema väga hoolikas ning omama piisavalt teoreetilisi teadmisi. Käesoleva töö tulemusi silmas pidades tuli kasuks töö autori eelnev võhiklikkus lubja temaatikas. Kui uuritavaid mergleid oleks käsitletud sarnaselt tavalise, so õhklubja, meetoditele toetudes, oleks olnud suhteliselt kindel võimalus kogu katsematerjal kahel korral (põletamisel ja kustutamisel) pöördumatult ära rikkuda. Kui põletustemperatuur oleks olnud üle 1000 °C, nagu lubjakivide põletamisel, siis teoreetiliselt oleks tekkinud olulisel määral ülepõlenud osakesi ja lubjaosakeste struktuur oleks võinud saada kahjustada. Kui arvestada käesolevate savikate lubjakivide suhteliselt kõrget dolomiidi sisaldust (MgO alandab põletustemperatuuri), siis kahjustuste esinemine oleks olnud küllaltki tõenäoline. Teisalt, kui kustutamata hüdraulilisele lubjale valada peale suvaline kogus vett, rikub

see samuti lubja siduvad omadused, lubi tõmbub klompi ning mõne aja möödudes hakkab kivistuma.

Käesoleva töö eesmärkide saavutamiseks oli lubjakivide keraamikaahjus põletamine piisav, kuid igapäeva praktikas ei julge soovitada (eelkõige keraamikaahju silmas pidades). Liivaga kustutamisel on soovitatav enne kustutamise algust määrata kindlaks hilisema mördi soovitud sideaine-täiteaine suhe. Võimaluse korral tuleks kogu liiv kustumise ajaks lubja hulka lisada. Koos kustutamise tulemusel on kõik liivaosakesed lubjaosakestega kaetud ning tulevane mört on homogeensem. Olulised eelised/puudused liivaga kustutamisel ei ole Eestis veel tõestatud, esialgsete mördiproovide vaatlushinnangute alusel võib eeldada, et liivaga kustutatud lubjast mörtide toonimine võib anda ühtlasema tulemuse.

**Traditsioonilisel teel maaahjus põletatud lubi võib töös testitud lubjast erineda. Võimalikke erinevusi ning omadusi tuleks minu arvates veel uurida ja katsetada.**

## KOKKUVÕTE

Uurimistöö eesmärk oli välja selgitada Saaremaa Lümada – Mõisaküla lubjakivimaardla Mõisaküla lubjakivikarjääri savikate lubjakivide potentsiaal loodusliku hüdraulilise lubja toorainena. Lähtuvalt lubjakivide mineraloogilisest koostisest ja visuaalsest analüüsist püstitati hüpotees, et kõik kolm testitavat lubjakivi on potentsiaalsed loodusliku hüdraulilise lubja toorained.

Saaremaal on savikate lubjakivide varud, mis on potentsiaalsed loodusliku hüdraulilise lubja tooraine, tootmiseks piisavad. Käesolev uurimistöö on teadaolevalt esimene Eestis, mis keskendus kohaliku päritoluga loodusliku hüdraulilise lubja uurimisele.

Looduslik hüdrauliline lubi on lubi, mis saadakse suurema või vähema savi- ja ränisisaldusega lubjakivi põletamisel (temperatuuril alla 1250 °C) ja pulbriks kustutamisel. Kõikidel looduslikel hüdraulilistel lupjadel on omadus osaliselt tarduda ja kivineda vees. Hoonete restaureerimisel on teatud keskkonnatingimustes ja teatud hoonete osades hüdrauliliste omadustega lubja kasutamine ainuvõimalik.

Käesoleva töö katsealused savikad lubjakivid on töös nimetatud järgnevalt: *vahekiht*, *põhjakih*t, *säbruline*. Suurt tähelepanu pöörati testitava lubja õigele kustutamisele, sest kirjanduslikud viited loodusliku hüdraulilise lubja kustutamise kohta olid üksikud ning mitmetähenduslikud. Uuriti lupjade kustumistemperatuuri, veesidumisvõimet ning mördi kivistumiseks kuluvat aega, lisaks hinnati lubja ja kuivanud krohvi üldiseid omadusi.

Uurimuse praktiliste katsete tulemusena tehti potentsiaalselt hüdrauliliste omadustega lubja kustutamise kohta kolm järeldust:

- Kustutamata lubja pulbriks peenestamine ei mõjuta kustutamisprotsessi kulgu ega tulemuse kvaliteeti;
- Kustutamata lubjale lisatav õige vee kogus on väga oluline;
- Liivaga kustutamise võimalikud eelised ei ole veel teada.

Erinevate kustutusmeetodite tulemusel saadud testlubjast valmistati kokku 12 krohviproovi sideaine-täiteaine suhetega 1:1, 1:2, 1:3. Kümne tunni möödumisel olid kõik testitud mördiproovid kivistunud ja muutunud heledaks (säravvalgest helehallini). Paksema krohvikihi kuivamise testimiseks valmistatud mördikerad olid sama aja möödumisel seest õrnalt niisked, kuid pealispind oli kivistunud.

Uurimistöö käigus sooritatud katsetuste tulemusel võib väita, et **Mõisaküla lubjakivikarjääri testitud savikatest lubjakividest on võimalik saada looduslikku hüdraulilist lupja**. Suuri erinevusi testitud savikate lubjakivide omadustes ei esinenud, kuid veidi paremate omadustega paistis silma *põhjakihist* saadud lubi: aktiivne, peen, puhas, säravvalge. *Säbrulisest* lubjakivist saadud lubi sisaldas olulisel määral kustumata osakesi, oli õrnalt hallika värvusega ja kõige jämedam. *Vahekihist* saadud lubi oli keskmiste omadustega, kuid sarnanes pigem *põhjakihi* lubjale.

Mõisaküla lubjakivikarjääri savikate lubjakivide potentsiaal loodusliku hüdraulilise lubja toorainena on olemas. Täpsemate omaduste, võimaluste ja piirangute teadasaamiseks tuleb läbi viia oluliselt rohkem ja standarditest lähtuvaid katseid.

## **The potential of Saaremaa – Mõisaküla limestone quarry agrillaceous limestone to be the base rock to produce natural hydraulic lime**

### *SUMMARY*

The aim of this research was to examine the potential hydraulic properties of agrillaceous limestone of Saaremaa Lümada – Mõisaküla limestone quarry. Three different types of agrillaceous limestone were tested. All three tested limestone were grey-colored and had differences in their mineralogical composition. Considering this, the hypothesis of this research was that all three objects of limestone were potential sources of natural hydraulic lime production in Estonia.

The three tested limestone were named: *middle layer*, *bottom layer*, *dotted*. A lot of attention was paid to slaking. There were a lot of different hints about slaking natural hydraulic limes in literature. Other examined properties were: maximum temperature of slaking, water retention, setting time, grout color.

General observations about slaking of natural hydraulic limes were made:

- Grinding of quicklime does not influence the outcome and quality of hydrated lime;
- The right amount of water added to natural hydraulic quicklime is extremely important;
- The benefits of slaking together with sand are not known yet.

Twelve different mortar mixes in ratios 1:1, 1:2, 1:3 were tested, to assess the setting time and color changes. After 10 hours the surface of all grout tests was dry and white; more dense grout was only slightly damp inside.

As the result of testing, the conclusion was that all three agrillaceous limestone of Saaremaa Lümada – Mõisaküla limestone quarry are potential sources of local natural hydraulic lime production. There were not recognized big differences between

tested three limestone. Slightly better properties had the lime made of *bottom layer*. This was the most active, fine, pure and white-colored one. *Dotted lime* was the most coarse, grey-colored and had a significant amount of unburned components. Lime from *middle layer* had medium properties, still more similar to *bottom layer* than to *dotted one*.

There is a great potential to produce natural hydraulic lime of all three tested limestone but a great amount of testing must be done before. More knowledge about specific qualities of all limestone must be gained.

## VIIDATUD ALLIKAD

- Åkesson, K. 2003. Lubimört 1 – Praktilisi juhiseid lubivärvi ja lubimördiga töötamiseks. Tallinn.
- Boynton, R.S., 1980. Chemistry and Technology of Limestone. Second Edition. John Wiley & Sons, INC., New York.
- Eesti Entsüklopeedia, 5. kd., 1990. Valgus, Tallinn.
- Einasto, R., 2006. Mõned säästliku paekasutuse põhimõtted. Keskkonnatehnika, 1:36-38.
- Einasto, R., Matve, H., 1989. Paekivi kasutamise ja rakendusuuringute ajaloost Eestis. Raamatus: Viiding, H. (toim), Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist VII. Valgus, Tallinn, 57-75.
- EVS 763-1:2000. Ehituslubi. Osa 1, Määratlused, spetsifikaadid, vastavuskriteeriumid ja vastavushindamine. Eesti Standardikeskus, Tallinn.
- EVS 763-2:2000. Ehituslubi. Osa 2, Katsemeetodid. Eesti Standardikeskus, Tallinn.
- Helves, H., 1996. Ajalooliste lubimörtide uurimise analüütilisi probleeme. Magistritöö, käsikiri. Tartu Ülikool, Tartu.
- Hemgren, P., Wannfors, H., 2003. Maja ABC. Sinisukk, Tallinn.
- Hidemark, O., 1997. Küsimus on materjalide kättesaadavuses. Raamatus: Restaureerimise põhimõtted, ehitustehnoloogia ja materjalid. Artiklid rootsi ajakirjast „Kulturmilövård”. Rootsi Riigi Muinsuskaitseamet, Stockholm.
- Jormalainen, P., 2000. Uuendusremont. „Ehitame” kirjastus, Tallinn.
- Jürmann, K. 2004. Lubja kui ehitusmaterjali keskkonnanalüüs. Raamatus: Roose, A., Kuusemets, V. Ja Liivak, E. (toim), *Keskkonna- ja elutsükli hinnangud ehituses*. Tartu Ülikool, 25–29.
- Kaila, P., 1999. Majatohter II osa. „Ehitame” kirjastus, OÜ Viplala, Tallinn.
- Kuusemets, V., Jürmann, K., 2005. Lubi ehitusmaterjalina. Raamatus: Roose, A. (toim), *Keskkonnasäästlik planeerimine ja ehitus*. Tartu Ülikool, 102-107.
- Leetmaa, M., 2000. Lubja- ja tõrvaahjud. Raamatus: Lang, M., Saron, J., Tamjärv, M. (toim), *Suitsutare*. Eesti Vabaõhumuuseum. OÜ Infotrükk, Tallinn, 147 - 192.
- Mutt, A., 1950. Lubja põletamine 1. Tehnika kolhoos. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn.
- Pärnamägi, H., 2002. Ehitusmaterjalid. Tallinna Tehnikakõrgkool, Tallinn.

- Raado, L., 2004. Millist tsementi kasutada? Ehitaja, 10 (96): 43-44.
- Riba, A., E., 1994. Mitchell's Building Series: Materials. Fifth Edition. Longman Group UK Limited, London.
- Sickels, L. B., 1987. Mortars in Old Buildings and in Masonry Conservation: A Historical and Practical Treatise. Ph.D. dissertation, University of Edinburgh, Scotland.
- Sickels-Taves, L., Allsopp, P.D, 2005. Lime and its place in the 21<sup>st</sup> century: combining tradition, innovation, and science in building preservation. *International Building Lime Symposium, Florida*.
- Tammelo, E., Kolk, J. (toim), 2005. Ehituslubi ja lubimört. Raamatus: Ehitusmaterjalide käsiraamat. Presshouse OÜ, 177-178.
- Tomberg, E., 2005. Rakke lubjatehase ajaloost. Keskkonnatehnika, 2:45-48.
- Tomberg, E., 2005b. Rahvuskivi rahva kiviks. Raamatus: Valgma, I., Viilup, H., Kattel, T., Reinsalu, E. (toim), Ehitusmaterjalide kaevandamine ja varud. TTÜ Mäeinstituut, 27-32.
- Uuetalu, A., 2003. Lubimörtide püsivusomaduste parandamise võimalused. Magistritöö, käsikiri. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- Vitruvius, 1960. The Ten Books of Architecture. Morgan, Dover Publications, Inc., New York

#### INTERNETI ALLIKAD

- Aberdeen City Council, 2006. [[www.aberdeencity.gov.uk/acc/PDF/property\\_technical\\_services/Local%20Agenda%2021.pdf](http://www.aberdeencity.gov.uk/acc/PDF/property_technical_services/Local%20Agenda%2021.pdf)]. 21.04.2006.
- Krumnacher, P. J., 2001. Lime and Cement Technology: Transition from Lime Mortar, 2006. [<http://www.stastier.co.uk/index.htm?nhl/data/nhl5.htm~rbottom>]. 12. 05. 2006
- Ling, T., 2004. Käsitsitoodetud lubi on kvaliteetsem. Loodus. [[http://www.loodusajakiri.ee/loodus/artikkel602\\_573.html](http://www.loodusajakiri.ee/loodus/artikkel602_573.html)]. 14. 04.2006
- Maher, M. J., 1998. Annual research report 1997/98. [[sbe.napier.ac.uk/research/reports/1998.html](http://sbe.napier.ac.uk/research/reports/1998.html)]. 21.04.2006.

- North Yorkshire County Council, 2006. Lime Mortars.  
[[www.northyorks.gov.uk/.../Environmental%20Services/Historic%20building%20advice%20-%20512/Lime%20Mortars.pdf](http://www.northyorks.gov.uk/.../Environmental%20Services/Historic%20building%20advice%20-%20512/Lime%20Mortars.pdf)]. 21.04.2006.
- Penu, P., 2003. Lubjatootmine traditsioonilisel meetodil.  
[<http://www.aktiva.ee/26479y/z0zARTICLEy233786.html>]. 18.04.2006.
- Raado, L., 2005a. EPM 3500 Ehitusmaterjalid. Loengukonspekt. Tallinna Tehnikaülikool, Ehitustootluse instituut.  
[<http://ehitustootlus.ttu.ee/materjalid.html>]. 18.04.2006.
- Raado, L., 2005b. Korrosioonikaitse ehituses. Loengukonspekt. Tallinna Tehnikaülikool, Ehitustootluse instituut.  
[<http://ehitustootlus.ttu.ee/materjalid.html>]. 18.04.2006.
- Raado, L., 2006. Lubi 2006. Loengukonspekt. Tallinna Tehnikaülikool, Ehitustootluse instituut. [<http://ehitustootlus.ttu.ee/materjalid.html>]. 18.04.2006.
- St. Astier Natural Hydraulic Lime, 2006. [<http://www.limes.us/aboutlime.html>]. 29. 04. 2006.
- Telling Lime Products Limited, 2006. [<http://www.telling.co.uk/tlp.htm>]. 14.05. 2006.
- Traditional to Standardized Treatment Methods. [[scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-02182001-031406/unrestricted/Drafsst.PDF](http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-02182001-031406/unrestricted/Drafsst.PDF)]. 21.04.2006.
- AS Limex, 2006. [<http://www.limex.ee/index.php>]. 18.04.2006.
- OÜ Safran. [<http://www.safran.ee>]. 14. 05. 2006.

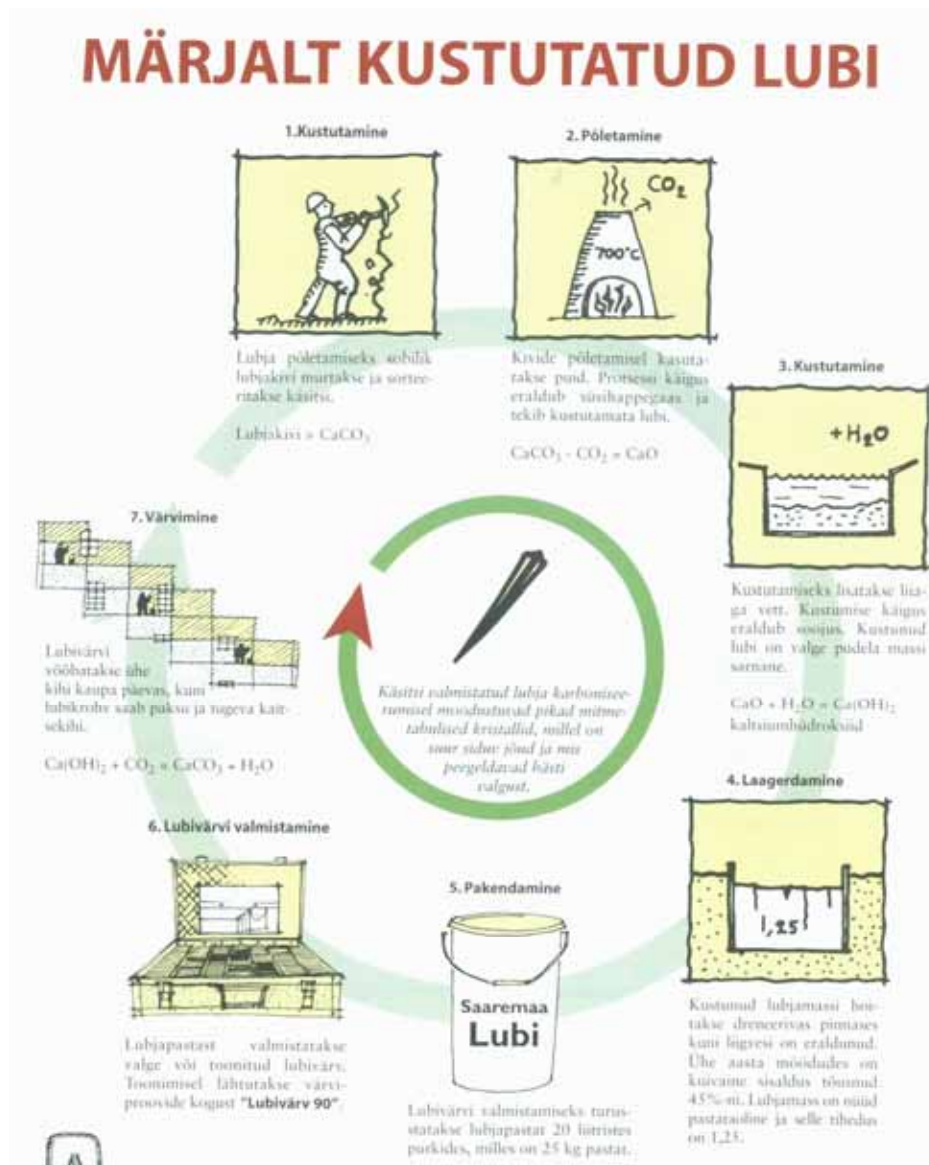
*LISAD*

## LISA 1



*Eddystone majakas. Ajaloos esimene loodusliku hüdraulilise lubja testimine praktikas.  
[[http://www.lindahall.org/events\\_exhib/exhibit/exhibits/civil/images/eddystone\\_south\\_450.jpg](http://www.lindahall.org/events_exhib/exhibit/exhibits/civil/images/eddystone_south_450.jpg)].*

## LISA 2



Lubja tootmine traditsioonilisel meetodil (Åkesson 2003).

## LISA 3



*Värviproovide kogu „Lubivärv 90” (Åkesson 2003).*

## LISA 4

Töös kasutatud katseseadmed.



*Keraamikaahi*



*Digitaalne termomeeter*



*Digitaalne kaal*

## LISA 5

### Krohvimisplaadid



*Märjad krohviproovid.*



*Põhjakihi kolme erineva täiteainete vahekorraga kuivanud krohviproovid.*

## LISA 6

### Mördi veesidumisvõime arvutamise valemid, katsete tulemused ja arvutatud väärtused.

$$WRV_x (\%) = 100 - \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 - m_3)} * 100, \text{ kus}$$

$m_1$  – kuiva filterpaberi mass;

$m_3$  – seadme mass ilma mördiseguta;

$m_2$  – märja filterpaberi mass;

$m_4$  – seadme mass koos mördiseguga.

$$WRV (\%) = \frac{WRV_1 + WRV_2}{2}, \text{ kus}$$

$WRV_1$  – esimeses katses arvutatud mördi veesidumisvõime;

$WRV_2$  – teises katses arvutatud mördi veesidumisvõime.

*Tabel 1. Esimese katse tulemuste põhjal arvutatud veesidumisvõime väärtused ja mõõtmistulemused.*

<b>KATSE I</b>	<b>WRV<sub>1</sub> (%)</b>	<b>m<sub>1</sub> (g)</b>	<b>m<sub>2</sub> (g)</b>	<b>m<sub>3</sub> (g)</b>	<b>m<sub>4</sub> (g)</b>
Vahekiht	<b>92%</b>	1,38	2,63	1,38	16,38
Säbruline	<b>87%</b>	1,82	3,14	1,82	11,82
Põhjakih	<b>88%</b>	1,84	3,07	1,84	11,96

*Tabel 2. Esimese katse tulemuste põhjal arvutatud veesidumisvõime väärtused ja mõõtmistulemused.*

<b>KATSE II</b>	<b>WRV<sub>2</sub> (%)</b>	<b>m<sub>1</sub> (g)</b>	<b>m<sub>2</sub> (g)</b>	<b>m<sub>3</sub> (g)</b>	<b>m<sub>4</sub> (g)</b>
Vahekiht	<b>90%</b>	11,76	15,8	16,41	56,94
Säbruline	<b>91%</b>	12,36	16,2	17,16	58,98
Põhjakih	<b>91%</b>	12,09	15,8	16,7	59,4

*Tabel 3. Mörtide veesidumisvõimed, kahe katse keskmised tulemused.*

<b>VEESIDUMISVÕIME</b>	<b>WRV (%)</b>	<b>WRV<sub>1</sub> (%)</b>	<b>WRV<sub>2</sub> (%)</b>
Vahekiht	<b>91%</b>	92%	90%
Säbruline	<b>89%</b>	87%	91%
Põhjakih	<b>90%</b>	88%	91%