

EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut
Maaehituse osakond



Martin Mõttus

**Erineva geokeemilise koostisega kivimite
sobivus hüdraulilise lubja tootmiseks**

Magistritöö

Juhendaja: prof. Jaan Miljan
Kaasjuhendaja: Lea Stroh

Tartu 2010

Lõputöö koostas iniseseisvalt. Kõigile töös kasutatud teiste autorite töödele ja andmeallikatele on viidatud. Kinnitan, et annan oma intellektuaalomandi varalised õigused lõputöö tulemuste suhtes üle Eesti Maaülikoolile.

.....
kuupäev/nimi/allkiri

Tunnistan lõputöö kaitsmisvalmiks.

Juhendaja

.....
kuupäev/nimi/allkiri

Kaasjuhendaja

.....
kuupäev/nimi/allkiri



Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Martin Mõttus		Õppekava: Maehitus	
Pealkiri: Erineva geokeemilise koostisega kivimite sobivus hüdraulilise lubja tootmiseks			
Lk.: 60	Jooniseid: 50	Tabeleid: 20	Lisasid: 1
Osakond:	maaehituse osakond		
Uurimisvaldkond:	mineraalsed sideained		
Juhendaja:	prof. Jaan Miljan		
Kaasjuhendaja:	Lea Stroh		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu, 2010		
<p>Magistritöö teemaks on looduslik hüdrauliline lubi. Töö eesmärk oli välja selgitada, missuguse geokeemilise koostisega kivim on sobivaim hüdraulilise lubja tootmiseks ja missugune on optimaalne temperatuur lubja põletamiseks.</p> <p>Töös käsitletakse lubja olemust ja ehituslubja valmistamise protsessi ning selgitatakse õhkclubja ja hüdraulilise lubja erinevusi.</p> <p>Katsete teostamiseks toodi lubjakivid Saaremaa erinevatest karjäärides ja paikadest. Saadud lubjakivid analüüsiti geokeemiliselt, põletati keraamikaahjus erinevate temperatuuride juures, kustutati ja saadud lubjast tehti erineva koostisega mördid. Saadud mörte katsetati paindetugevusele, survetugevusele ja mahumuutusele.</p> <p>Keemilise analüüsi alusel arvutati lubjade hüdraulilisuse moodulid ning selgus, et mõned katsetatud kivimitest sobivad loodusliku hüdraulilise lubja valmistamiseks.</p> <p>Selgus ka, et hüdraulilise lubja omadused sõltuvad osaliselt temperatuurist. Mõnedes kirjalikes allikates oli väidetud, et hüdraulilise lubja põletamiseks piisab 800°C. Katsete põhjal selgus, et 800°C juures põletatud lubjakivi ei hakanud kustuma. Katse ei õnnestunud ka põletamisaja pikendamisel. Katsed õnnestusid aga kõrgema temperatuuri puhul. Kõige paremate tugevusnäitajatega katsekehade lubi põletati 900°C juures.</p> <p>Magistritöö tulemust saab praktiliselt rakendada AS Limex loodusliku hüdraulilise lubja tootmise alustamiseks Eestis.</p>			
Märksõnad: lubi, hüdrauliline lubi, lubja põletamine, lubja kustutamine			



Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Martin Myttus		Specialty: Rural building	
Title: Suitability of rocks with different composition for production of hydraulic lime			
60 pages	50 figures	20 tables	1 appendixes
Department:	rural building		
Field of research:	mineral binders		
Supervisor(s):	prof. Jaan Miljan Lea Stroh		
Place and date:	Tartu, 2010		
<p>This master's thesis is on natural hydraulic lime. The aim of this work is to learn lime stones with which composition are the most suitable for production of natural hydraulic lime and what is the optimal lime-burning temperature.</p> <p>This work handles the nature of lime and building lime production process, it also shows the differences between air and hydraulic lime.</p> <p>Lime stones were brought from different quarries and places of Saaremaa for carrying out some tests. Given lime stones were analyzed geochemically, burnt in a ceramic oven at different temperatures, slaked and gotten lime was used to make mortars with different composition. Gotten mortars were tested for bending and compressing strength and volume change. On the basis of the chemical analysis the hydraulicity modules were calculated and it became clear that some of the tested rocks are fit for production of natural hydraulic lime.</p> <p>It also turns out that properties of hydraulic lime depend partially on the burning temperature. Some written sources claim that 800°C is enough for burning hydraulic lime. The tests show that a limestone burnt at 800°C can't be slaked. The test didn't succeed even when the burning time was extended. The test succeeded with a higher temperature. Test bodies with the best strength parameters were burnt at 900°C.</p> <p>The results of master's thesis can be practically applied for starting production of hydraulic lime by AS Limex in Estonia.</p>			
Keywords: lime, binder, hydraulic lime, lime-burning, lime slaking			

SISUKORD

Sissejuhatus	6
Mõisted.....	8
1. Lubja tootmine ja kasutamine	11
1.1 Ajalugu.....	11
1.2 Lubjakivi liigid.....	12
1.3 Lubja ringlus	14
1.4 Lubjakivi kaevandamine Saaremaal	16
1.5 Lubja tootmine	19
1.5.1 Lubjapõletamise ahjud ja lubja põletamine.....	19
1.5.2 Lubja kustutamine.....	24
2. Lubjakivide geoloogiline analüüs ja lubja valmistamine.....	27
2.1 Lubjakivide mineraalne koostis	27
2.2 Lubjakivi põletamine	29
2.3 Lubja kustutamine.....	37
3. Katsete meetodika.....	41
3.1 Põletatud lubjakivide keemiline analüüs.....	41
3.2 Mahu muutuse ühtlus	44
3.3 Lubimõrdi katsekehade painde- ja survetugevuse määramine.....	49
4. Katsete tulemused	54
4.1 Keemilise analüüsi tulemus	54
4.2 Mahumuutuse ühtluse määramise tulemus	55
4.3 Painde- ja survetugevus.....	57
4.3.1 Paindetugevus	58
4.3.2 Survetugevus.....	59
Kokkuvõte.....	62
Summary	63
Kasutatud kirjandus.....	64
Lisad.....	66
Lisa 1. Etiketid koos kasutusjuhendi ja tootja andmetega	66

Sissejuhatus

Viimasel ajal on muutunud aktuaalseks mõiste säästev ehitamine. See on ehitusviis, kus lõpptulemus püütakse saavutada ümbritsevat keskkonda maksimaalselt säästes ja inimese tervist arvestades.

Väga oluline roll on materjali valikul. Ehitusmaterjalide ökoloogilisuse hindamisel lähtutakse nende mõjudest keskkonnale ja inimese tervisele. Mõju keskkonnale avaldub kolmes erinevas etapis: tootmis-, kasutamise- ja ladustamisetapis. Mõju inimesele avaldub kaudsemalt tootmis- ja ladustamisetapis, otseselt aga kasutamisetapis [<http://www.ehituslahendused.ee/miks.php>](12.03.2010).

Säästva ehituse seisukohalt tuleb eelistada madalama primaarenergia sisaldusega materjale. Materjalide primaarenergia all mõistetakse energiahulka, mis on vajalik materjali tootmiseks, hõlmates endas kogu energiakulu alates toormaterjali kaevandamisest ja lõpetades ehituspaika transportimisega (Spiegel 1999).

Madala primaarenergiasisaldusega on ehitusmaterjalid, mida saab võtta otse loodusest või lihtsa töötlemisega sobivaks ehitusmaterjaliks muuta. Materjalide taaskasutamisel saab vahele jätta mõned energiamahukad etapid tooraine kaevandamisest materjali tootmiseni. Madalama primaarenergiasisaldusega on ka kohaliku päritoluga ehitusmaterjalid, sest väheneb transpordist tingitud energiakulu.

Kõikidele nendele tingimustele vastab ka lubjakivi, mida ma käesolevas töös käsitlen.

Paekivi on eesti rahvuskivi, mis oluliselt rikastab meie maa loodust ja kultuuri. Ilma selle rikkuseta poleks meil kirikuid, mõisaid, linnaelamuid ega paljusid teisi paehooneid sellistena, nagu nad praegu on. Huvi paekivi vastu on viimase kümne aasta jooksul tublisti tõusnud. On suurenenud paega tegelevate firmade arv. Arhitektide ja restaatorite huvitatus paest kui ehitus- ja taastamismaterjalist väljendub uute ja korrastatud paehitiste järjest suurenevas hulgas (Perens 2003).

Käesoleva uurimistöö jaoks toodi lubjakivi Saaremaalt. Saaremaa on üks paerikkamaid maakondi Eestis. Paekasutus on seal mitmekülgne ja pikaajaline. Kinnituseks sobivad arheoloog Monika Mägi sõnad tema poolt 1999.-2002. aastal Saaremaal Tõnija külas väljakaevatud ca 2000 aasta vanuse kultuskaevu kohta: “Taolisi säilitusauke on leitud ka mujal maailmas, ent need polnud tavaliselt kiviga vooderdatud. Siin pole see aga mingi ime, siin oli laialt kombeks kõike kivist ehitada” (Perens 2003).

Minu magistritöö teemaks on looduslik hüdrauliline lubi. Töö eesmärk on välja selgitada, missuguse geokeemilise koostisega kivim on sobivaim hüdraulilise lubja tootmiseks, missugune on optimaalne temperatuur lubja põletamiseks ja erinevate koostisega lubjamörtide analüüsimine.

Nende eesmärkide saavutamiseks määrati Saaremaa erinevatest kohtadest toodud lubjakivitükkide mineraalne (vt peatükk 2.1) ja keemiline koostis (vt peatükk 3.1 ja 4.1). Kivid põletati keraamikaahjus (vt peatükk 2.2) ja kustutati (vt peatükk 2.3). Saadud lubjast valmistati erineva koostisega mördid ja proovikoogid (vt peatükk 3.2 ja 3.3), millel määrati painde- ja survetugevust ning mahumuutust (vt peatükk 3.2, 3.3, 4.2 ja 4.3). Uurimuse lõpus annan vastuse küsimusele: missuguse geoloogilise koostisega ja missuguse temperatuuri juures põletatud lubi sobib kõige paremini hüdraulilise lubja valmistamiseks?

Mõisted

1) **Paekivi ehk paas** on lubjakivi, dolomiidi ja mergli üldnimetus. Paekivi kõige levinum erim on lubjakivi (Perens 2003).

2) Lubjakivi

Lubjakivi koosneb peaaesjalikult ühest mineraalist – kaltsiidist. Puhas lubjakivi sisaldab seega 56% CaO ja 44% CO₂. Ta on värvuselt helevalge, kollakas või hall. Terajämeduselt võib ta olla tihe (afaniitne) või palja silmaga nähtava teralisusega (kristall-teraline) kivim. Lisandina võib lubjakivis esineda dolomiiti, savi, glaukoniiti, raua hüdroksiide, purdmineraale jt. Puhtas lubjakivis ei tõuse lisandite hulk üle 5%.

Lubjakivi on väga laialdase levikuga. Teda esineb kõigi geoloogiliste perioodide vältel kujunenud setendite seas. Meie aluspõhjas on lubjakivi ulatusliku levikuga ordoviitsiumi, siluri ja ülemdevoni setendite seas. Lubjakivi on biokeemiline setend (Arold 1987).

3) Dolomiit

Dolomiit CaMg · (CO₃)₂ koosneb valdavalt dolomiidist, kuid lisandina võib temas esineda kaltsiiti, savi, kipsi, opaali jt. Dolomiidi ja lubjakivi vahel on olemas pidevad üleminekud, sest suurem osa dolomiidist on tekkinud esialgse lubjakivi dolomiidistumisel (Arold 1987).

Dolomiidi keemiline koostis on CaO 30,4; MgO 21,7; CO₂ 47,9%. Isomorfse lisandina võib esineda Fe ja Mn (Herbert 1984).

4) Sideained

Sideaineks nimetatakse sellist ainet, mis füüsikalis-keemiliste protsesside toimel muutub vedelast või taignataolisest olekust kivitaoliseks ja seob seejuures temasse segatud üksikuid kivid ning materjalide tükid ja peened osakesed kokku. Sideaineid kasutatakse:

- a) põletamata tehiskivimaterjalide ja valmisdetailide valmistamisel
- b) kivimaterjalide müürimisel ja valmisdetailide ühendamisel
- c) betoonide ja ehitusmörtide valmistamiseks.

Sideained jagatakse kahte suurde gruppi:

- 1) mineraalsed – anorgaanilised (tsement, lubi, kips, vesiklaas jt.)
- 2) orgaanilised (bituumenid, tõrvad, liimid jt.)

Mineraalseid sideaineid kasutatakse ehitusel rohkem kui orgaanilisi. Enamikul juhtudel valmistatakse nad pulbri kujul, mis kasutamisel segatakse veega, misjärel nad tarduvad ja hiljem kivistuvad. Erandi moodustavad:

- 1) väike grupp magneesium-sideaineid, mille kivistamiseks on tarvis vee asemel mõnede soolade - kõige sagedamini magneesiumsoolade vesilahuseid
- 2) mineraalne sideaine – vesiklaas (vedelklaas) saabub tehast ehitusele tavaliselt vedelal kujul, mõnikord ka tahke massina, mis tuleb lahustada soojas vees või aurus (Skramtajev 1951).

5) Õhk-sideaine ja hüdrauliline sideaine

Kui kivistumist alanud sideaine võib edasi kivistuda ja alaliselt säilitada ning tõsta oma tugevust ainult õhus, siis nimetatakse teda õhksideaineks. Sideainet, mis kivistub ja säilitab ning tõstab alaliselt tugevust mitte ainult õhus, vaid peamiselt vees, nimetatakse hüdrauliliseks sideaineks.

Näidetena õhksideainetest on õhklubi ja kips, hüdraulilistest sideainetest - tsemendid. On sideaineid, mis võivad säilitada tugevust ja vees kivistuda ainult pärast eelnevat pikaajast hoidmist õhus. Ka need sideained kuuluvad hüdrauliliste liiki; näiteks hüdrauliline lubi. Sideainete jagamine õhk- ja hüdraulilisteks on praktikas väga tähtis: pealmaaehitistes võib kasutada õhksideaineid ja enamikku hüdraulilistest sideainetest, allamaa- ja allvee-ehitistes – ainult hüdraulilisi sideaineid.

Keemiliselt koostiselt jagunevad õhksideained nelja gruppi:

- 1) õhklubi, mis sisaldab peamiselt kaltsiumoksiidi CaO ; vähemal määral ka magneesiumoksiidi MgO
- 2) kips-sideained koosnevad peamiselt väävelhappekaltsiumist CaSO_4 . Sellesse gruppi kuuluvad: ehituskips, modelleerimiskips ja kõrgtugevusega kips, anhüdrüidsideained
- 3) magneesium-sideained sisaldavad peamiselt magneesiumoksiidi
- 4) naatrium- või kaaliumsilikaadid – vesiklaas.

Hüdraulilised sideained on nelja oksiidi: $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ keerukad süsteemid. Olenevalt nende ainete hulgalisest vahekorrast (Skramtajev 1951).

6) Mört

Mört (sks. Mörtel < lad. mortarium 'lubjasegu') – sideaine, peene täitematerjali ja vee kivistuv segu; võib sisaldada ka lisandeid. Eristatakse sideaine järgi. Kasutuse järgi eristatakse müüri- ja krohvimörte (Helves 1996).

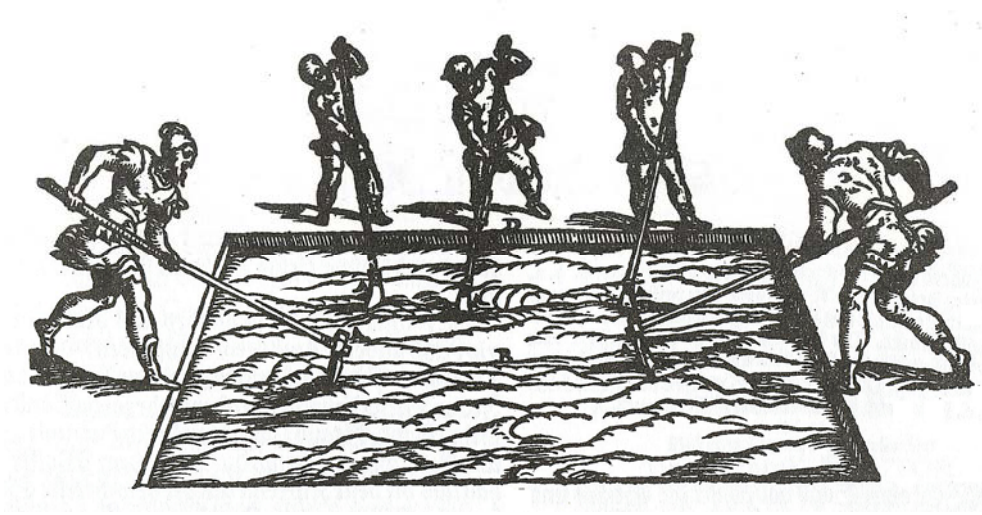
7) Krohv

Kivistunud mördist kattekiht. Katab ehitise pindade ebatasasused, kaitseb ehitist keskkonna mõjude vastu, suurendab tarindi tulekindlust, õhu-, heli- ja soojapidavust (Helves 1996).

1. Lubja tootmine ja kasutamine

1.1 Ajalugu

Lupja on Eestimaal tuntud suurepärase sideainena varsti juba tuhatkond aastat. Omadustelt sobib lubi meie kliimasse hästi ning on asendamatu vanade hoonete puhul. Paraku on traditsiooniline lubjaga töötamise oskus viimase sajakonna aasta jooksul hääbunud. Selleks andis tõuke 19. saj. lõpul laia kasutuse leidnud tsement ja 20. saj. teisel poolel toimunud ehituse industrialiseerimine. Nii olemegi praegu õippoisi rollis, kellel kõik tööd alati ei õnnestu, sest lubjal põhinevate mörtide ja värvide kasutamine nõuab tänapäeva tavapärasest ehituspraktikast erinevaid oskusi ja vilumust. Joonisel 1.1 on näidatud lubimördi valmistamise protsess. Pilt on aastast 1660.



Joonis 1.1 Lubimördi valmistamine (Kalkputs 2 1984:4)

Lubja kasutamine ehituses oli tuntud juba Mesopotaamias, Vana-Egiptuses, Vana-Kreekas jm. On väidetud, et lubja tootmisel ja kasutamisel toimuvad keemilised reaktsioonid olid üldse esimesed inimkonna poolt teadlikult kasutusele võetud keemilised reaktsioonid.

Lubi on savi ja kipsi kõrval üks vanimaid ehituses kasutatavaid sideaineid. Eestisse jõudis lubja tarvitamise ja põletamise oskus 13. sajandil Saksa ja Skandinaavia ehitusmeistrite kaudu. Keskaegsed kirikud ja kaitserajatised on esimesed kiviehitised Eestis, kus nii mördi kui värvi sideainena kasutati kohalikku lupja.

Paasi on kasutatud iidsetest aegadest saadik kalmete, hoonete ja kindlustuste rajamisel ning paest on ka suurem osa riigi tähtsamatest arhitektuurimälestistest, sealhulgas UNESCO maailmapärandi nimekirja kantud Tallinna vanalinn. Paas on hõlpsasti töödeldav ning aegade jooksul on sellest valmistatud kauneid skulptuure. Viimasel ajal leiab paas edukalt kasutamist hoonete sise- ja välisviimistluses ning isegi ehete valmistamisel. Alates 4. maist 1992 on paas Eesti rahvuskivi [http://www.porkuni.ee/?op=body&id=66](12.04.2010).

18. sajandi lõpuni toodeti lupja vaid vähestes piirkondades üle Eesti, kuid 18.-19. sajandi vahetuseks laienes see märgatavalt. 1867. aastal oli Eesti aladel 304 lubjaahju. Lubja ja tõrva põletamine oli 19. sajandi lõpuni peamiselt mõisate kõrvaltegevusalaks. Tööd tegid talupojad, kes seal saadud oskusi kasutades hakkasid 19. sajandi teisel poolel põletusahjusid rajama ka talude juurde. Laialdane lubjapõletus taludes oli Eestis valdav 19. sajandi lõpuni, mil turule jõudis tsement. 1990. aastate alguses taaskäivitati endisaegne lubjapõletus Saaremaal Lümandas

[http://www.muinas.ee/vvfiles/0/20%20Lubi%20I.pdf] (12.04.2010).

1.2 Lubjakivi liigid

Paekivi ehk paas on karbonaatkivimi rahvapärane nimetus. Tegelikult on paekivi lubjakivi, dolokivi (dolomiit) ja mergli ühisnimetus. Paekivi kõige levinum vorm on lubjakivi. Lubjakivi on kõige enam kasutatav looduslik kivim Eestis. Lubjakivi on karbonaatkivim, mille karbonaatses osast moodustab kaltsiit üle 50 %, MgO sisaldus on kuni 14% ja lahustumatu jäägi sisaldus kuni 25%.

Lubjakivi kaevandamise moodus on avakaevandamine ning viis aukkaevandamine. Lubjakivi kaevandamisel saab kasutada mitmesuguseid tehnoloogiaid: puur- ja lõhketööd, raiumine hüdrovasaraga, saagimine.

Kasutusala järgi liigitatakse lubjakivi:

1) Tehnoloogiline lubjakivi - kasutatakse keemilisest koostisest lähtuvalt mitmes tehnoloogilises protsessis nagu tsemendi tootmiseks, lubja põletamiseks, paberi- ja metallitööstuses, samuti põllumajanduses (loomasöödade toorainena, maaparanduses), heitvete puhastamisel, joogivee töötlemisel ning muudel eesmärkidel. Lubjakivipulbrit leidub heledavärvilistes kahhelkivides, krohvis, tasandussegudes, katusepapis ja fiibriga tugevdatud tsementplaadis. Kustutamata lupja on vaja sideainena lubjaliiva tellistes ning kustutatud lupja igat liiki krohvides ja tasandussegudes. Paberitööstus kasutab lubjakivitooteid täiteainetena ja kattepigmentidena. Kvaliteetpaber sisaldab märkimisväärsel hulgal mineraale, sest need parandavad paberi trükiomadusi, tehes selle läbipaistmatuks ning suurendades heledust ja läikivust. Keemiatööstus kasutab lubjakivil põhinevaid materjale näiteks plastide, värvi ja liimi tootmisel. Seadusandlusest tulenevad nõuded maavarale: CaO sisaldus ei tohi olla alla 50%, lisandite ja lahustumatu jäägi ($\text{SiO}_2 + \text{R}_2\text{O}_3$) sisaldus mitte üle 10%.

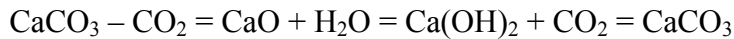
2) Ehituslubjakivi - kasutatakse lähtuvalt füüsikalise-mehaanilistest omadustest. Survetugevus kuivalt peaks olema vähemalt $200 \text{ kg} / \text{cm}^2$, külmakindlus 15 tsükli. Kõrgemargilise karbonaatkivimi survetugevus peab olema üle $600 \text{ kg} / \text{cm}^2$ ning külmakindlus mitte alla 25 tsükli. Ehituslubjakivi kasutatakse killustiku tootmiseks, müürikividena, kõnniteeplaatidena, trepiastmetena jne. Killustikku kasutatakse omakorda betooni täitematerjalina, teedeehituses, pinnasele toetuvate põrandate alusena jne. Peamised killustiku omaduste näitajad on lähtekivimi survetugevuse külmakindlus, kulumiskindlus, savi ja tolmu sisaldus. Teekillustikul kontrollitakse veel terade purunevust survesilindris. Vastavalt kvaliteedile jagatakse klassideks - mida madalam klass, seda kvaliteetsem (I - kõige kvaliteetsem). Ehituslubjakivist on ehitatud suur osa Tallinna vanalinnast, linnahall, rahvusraamatukogu uuematest ehitistest Birgitta kloostri fassaad Pirital ja KUMU.

3) Täitelubjakivi - Täitematerjaliks loetakse kivimit, mis keemilise koostise poolest ei vasta tehnoloogilisele lubjakivile esitatavatele nõuetele ning mille survetugevus on alla

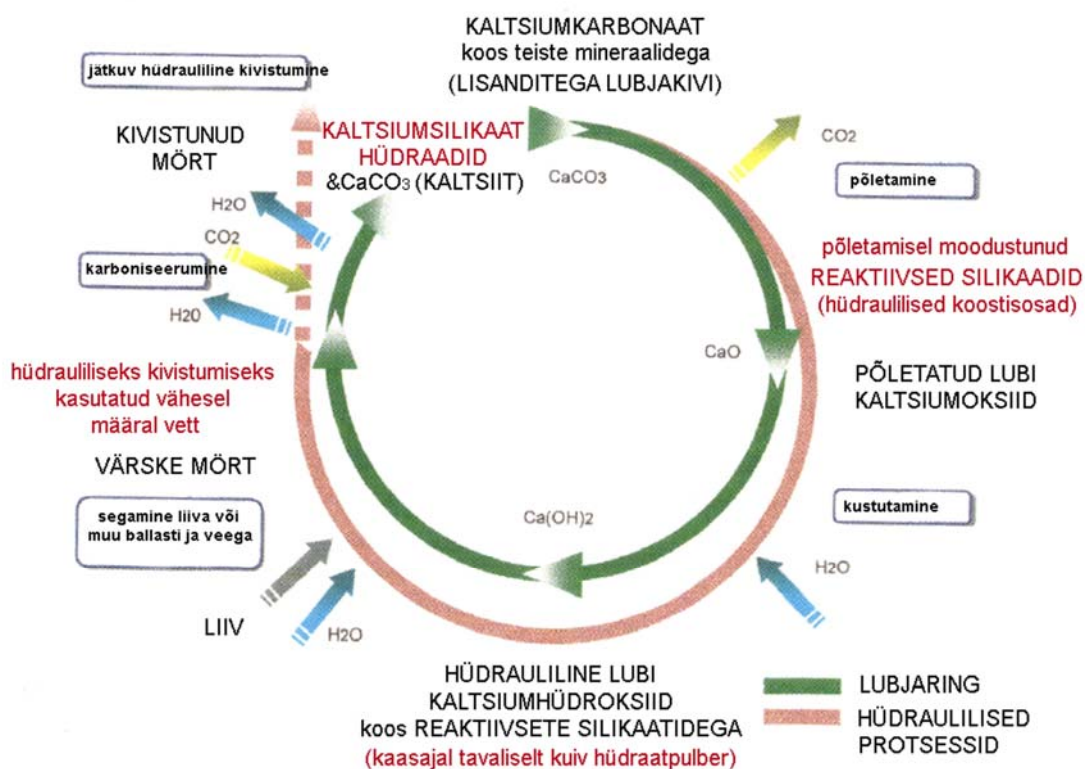
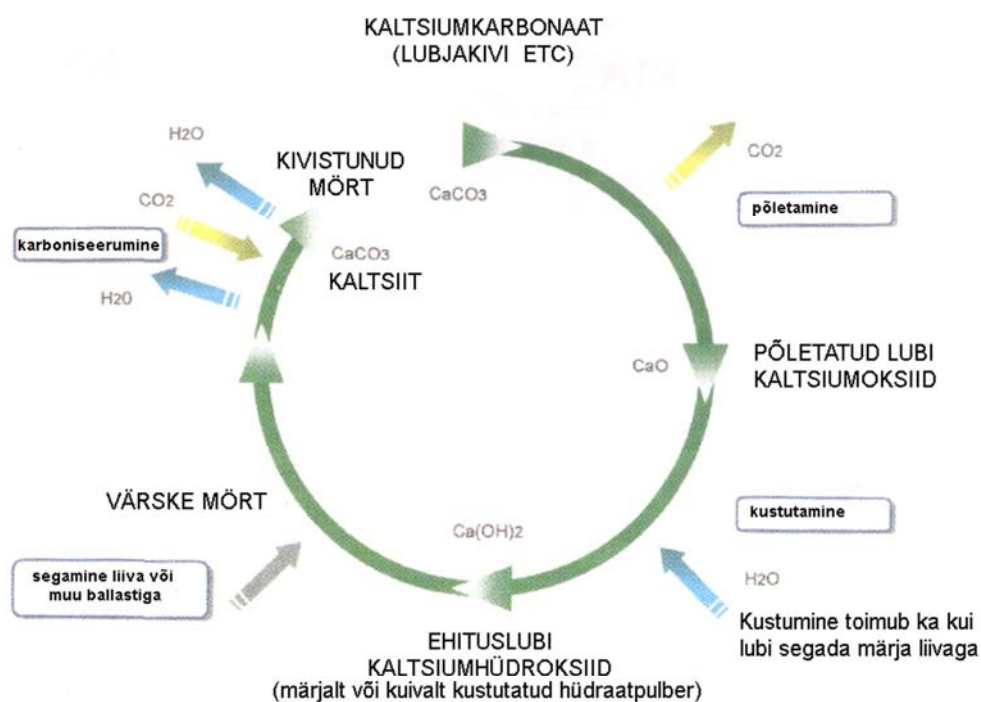
200 kg/cm² (Veebiõpik kaevandamisest, rakendusgeoloogiast ja geotehnoloogiast [<http://www.mi.ttu.ee/opik>](10.01.2010)).

1.3 Lubja ringlus

Looduses olev lubjakivi kasutamine koos põletamise, kustutamise ja kivistumisega moodustab olelusringi, mida saab keemiliste reaktsioonidega väljendada järgmiselt:



Lubja põletamiseks sobilik lubjakivi murtakse ja sorteeritaks käsitsi (Lubjakivi = CaCO₃). Lubjakivide põletamiseks kasutatakse puid, gaasi, turvast ja teisi kütteaineid. Põletamise protsessi käigus eraldub süsihappegaas ja tekib kustutamata lubi (CaCO₃ → CO₂ + CaO). Kustutamiseks lisatakse liiaga vett, kui kustutatakse märjalt või kustutamine toimub jooksva lindi: lubjale pihustatakse täpselt niipalju vett, kui kulub kustumiseks, ilma et pulbriline olek muutuks – sellis kustutamise viisi nimetatakse „kuivalt kustutamiseks“. Märjalt kustutatud lubi on valge püdela massi sarnane (CaO + H₂O = Ca(OH)₂). Lubimört kivistub süsihappegaasi toimele (Ca(OH)₂ + CO₂ = CaCO₃) (Åkesson 2003). Õhklubja ja hüdraulilise lubja ringlused on toodud joonisel 1.2



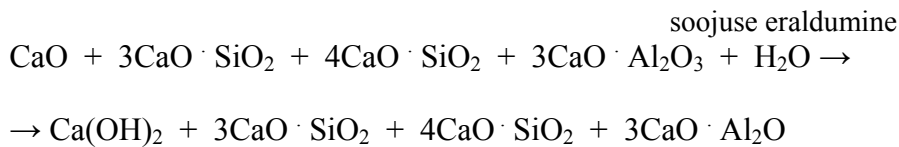
Joonis 1.2 Õhklubja ja hüdraulilise lubja olelusringi lihtsustatud skeem (Gibbons 2003)

Hüdraulilise lubja keemilised reaktsioonid

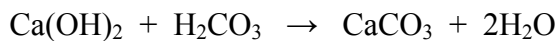
Põletamine



Kustutamine



Karboniseerumine

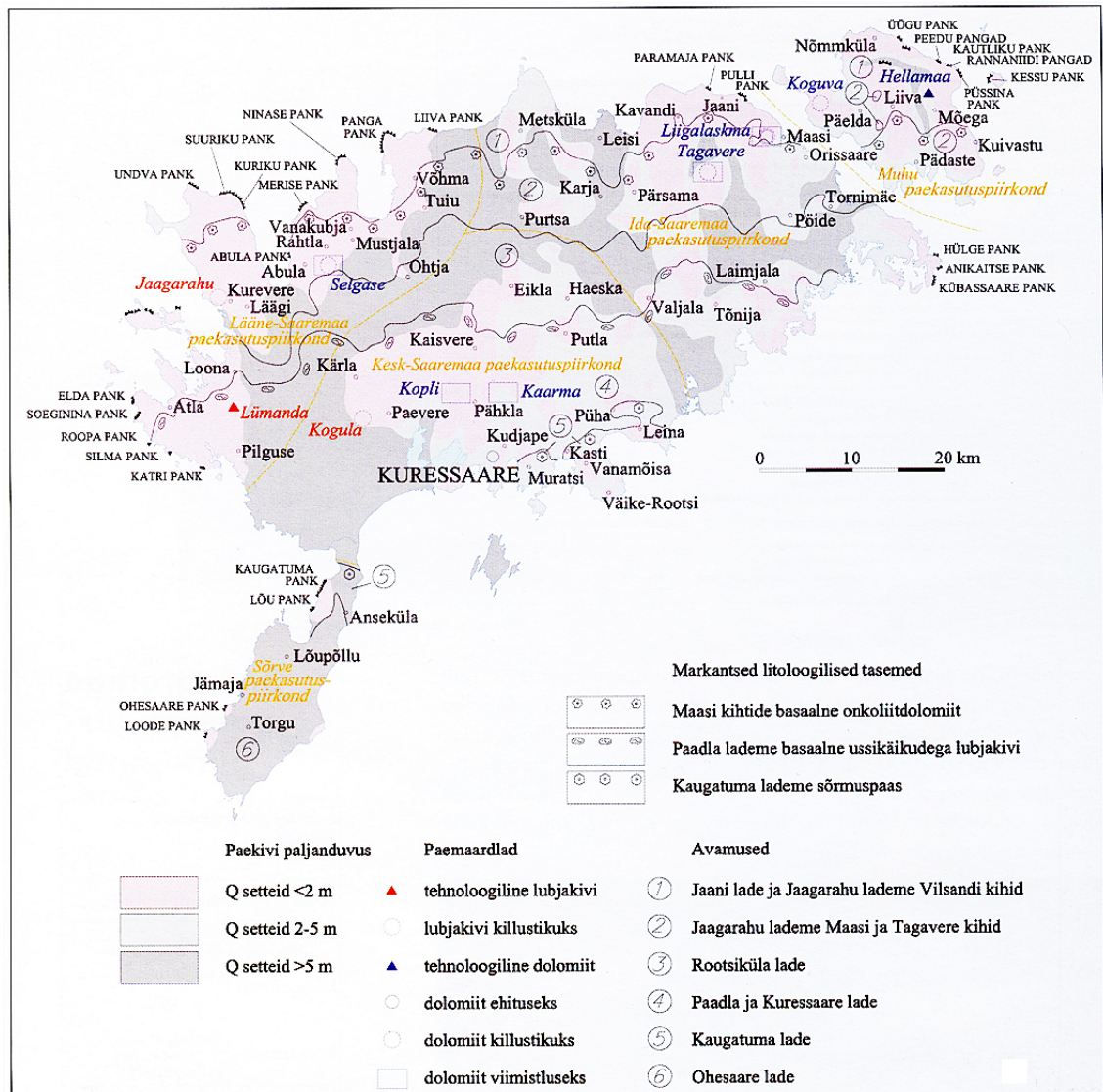


Kaltsiümsilikaadid ja kaltsiumaluminaadid moodustavad veega reageerides lahustamatud, nn CSH- ja CHA- geelid (Balksten 2005).

1.4 Lubjakivi kaevandamine Saaremaal

Lümanda karjääris paljanduvad Siluri ladestu Paadla lademe lubjakivid (joonis 1.3). Paadla lade levib Kesk- ja Lõuna-Saaremaal, Kihnu ja Ruhnu saarel ning Mandri-Eesti edelanurgas. Saaremaal haarab Paadla lademe avamus saare lõunaosa (välja arvatud Sõrve poolsaar ja äärmine lõunarannik). Eristatakse kolme üksteist lateraalselt asendavat Paadla ealist kihistut: Paadla, Kihnu ja Torgu. Paadla lademe paksus on 11,4-25 m ja see suureneb lääne suunas (Mürk 2008).

Paadla lademes esineb kaks lubja tootmiseks kasutamiskõlblikku kivimitüüpi: mikrokihiline savikas dolomiit, mis moodustab Kaarma maardla ning stromatoporaatiderikas lubjakivi. Kaarma dolomiit on hallika värvusega hästi töödeldav hea ehituskivi ja väga ilmastikukindel. Lubjakivi kasutatakse lubja tootmiseks Lümandas (Mürk 2008).



Joonis 1.3 Saaremaa paekasutuspiirkonnad ja paemaardlad (Perens 2003)

Lubjakivi lasub mitmes kihis (tavaliselt 4-6), (joonis1.4). Igal kihil on erinev koostis. Peamine kiht on hea õhkclubja jaoks (kõige puhtam). Allpool on mergeljas kivi, mis sobib hüdraulilise lubja tootmiseks. Kivimite sorteerimine toimub kaevanduses visuaalselt. Mida rohkem kaltsiumi lubjakivis, seda pruunim on kivi ja seda valgemaks muutub kustutamise protsessis. Kui kivi on rohekas, siis on see mergelkivi. Visuaalselt - mida rohekam kivi, seda suurema savisisaldusega see on.



Joonis 1.4 Paekivi kihid Saaremaal, Lümända Mõisaküla karjääris

Loa lubja kaevandamiseks annab maavarade komisjon. Loa saamine võtab palju aega (kuni 1 aasta). Lubja kaevandatakse ja purustatakse põhiliselt käsitsi. Kivide purustamise efektiivsus sõltub suure osas aastaajast. Kõige kergem on kivimeid purustada varakevadel, sest kivid on veel märjad, toimuvad temperatuuri muutused ja kivimite sees on pinged. Sorteerimine käib ka käsitsi, sorteeritakse erinevatesse klassidesse. Väiksemad tükid jäetakse karjääri taastamiseks.

Lubjakivi kaevandatakse põhiliselt käsitsi, väheste lõhketööde rakendamisega. Lõhkamist kasutatakse vaid lubjakivikihtide kergitamiseks ja kobestamiseks, mitte kivimilasundi lõhkumiseks. Lubjakivi murdmine toimub käsitööna spetsiaalsete vasarate, kiilude ja kangidega. Murtud lubjakivitükid on ca 20-30cm läbimõõdu ja mitmesuguse kujuga, mis transporditakse traktoriga lubjaahju juurde. Kuna erinevad lubjakivikihid on erineva kvaliteediga, siis toimub paralleelselt kivi murdmisega ka erineva kvaliteediga kivimite selekteerimine visuaalselt. Visuaalse eristamise aluseks on peamiselt kihi värvus; värvi järgi sorteerides - mida tumedam (pruunikam) on lubjakivi, seda kvaliteetsem. Korraga on kaevandamisel töös 3 erinevat lubjakivikihti, millest mergli vahekiht (10-15cm) praagitakse välja visuaalse vaatluse alusel. Ülemisest, ca

40cm kihist toodetakse vähemkvaliteetset krohvi- ja mördilupja ning vähemnõudlike (näit. põllumajandustöödeks) kasutatavat värvilupja. Alumine, kvaliteetsem kiht (paksus ca 1m) eraldatakse omakorda ja sellest valmistatakse värvilupja. Ühes astmes kaevandatava kompleksi paksus on seega ca 1,5m. Katendi paksus on 10-20cm, mis eemaldatakse kaevandatavalt alalt ja ladustati karjääri serva, kasutades seda hiljem rekultiveerimiseks. Praeguse paemuru pindala on 0,2ha, perspektiivne 1,6ha. Murd asub lubjaahjust ca 30-40m kaugusel. Kobestavaid lõhketöid teostas 1994.a. AS Lõhketööd, mille tarvis puuriti puuraugud sügavusega ca 2m [limex.ee/index.php?teema=3](16.11.2009).

1.5 Lubja tootmine

1.5.1 Lubjapõletamise ahjud ja lubja põletamine

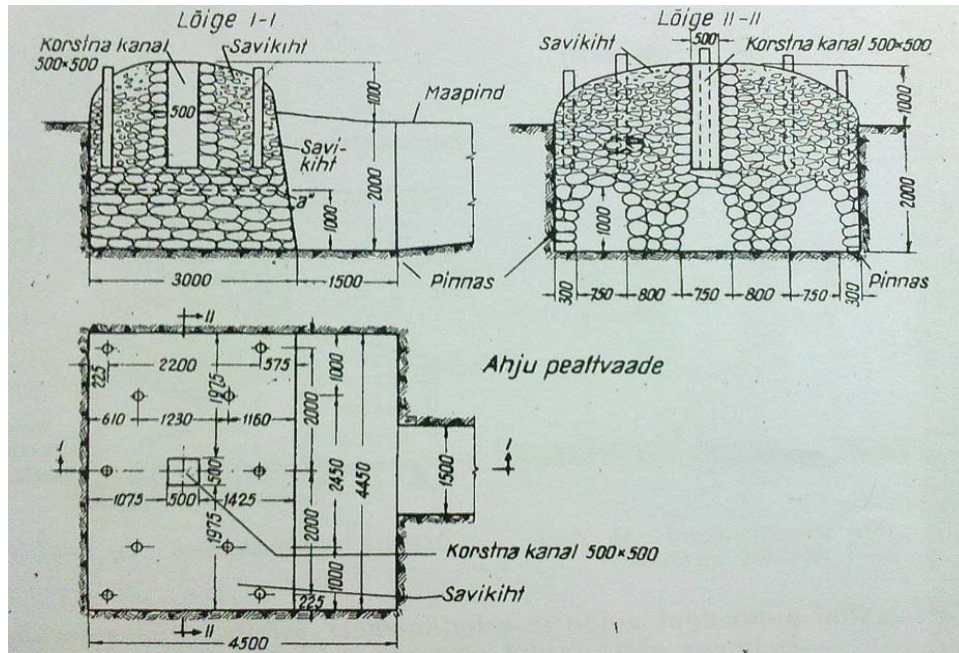
Lupja põletatakse peamiselt vertikaalsetes šahtahjudes (püstahjudes), harvamini pöörlevates ahjudes ja väiketootmises ka väliahjudes.

a) Lubjapõletamine maa sisse rajatud augus (lubjapõletamise väliahi)

Väikese aastatoodangu puhul (100-250 tonni) põletatakse lubjakivi väliahjudes (joonis 1.5), mis ehitatakse maapinnale või kivimurdu lubjakivi murdmiskoha lähedale. Tihedasse ja kuiva pinnasesse kaevatakse 2m sügavune $4,5 \times 4,5$ m neljakandiline auk. Kütuse asetamiseks laotakse auku lubjakivi tükkidest kolm kanalitaolist küttekollet, mis kaetakse samadest kividest võlvikestega. Võlvikestele laotakse lubjakivitükid kuni auk oli täis, kusjuures ülemine osa kujundatakse kuplitaoliselt.

Ahju keskosasse jäetakse ladumisel vertikaalne kanal, peale selle müüritakse kivide sisse üksikutesse kohtadesse veel puitvaiad, mis paekivide põletamisel ära põlevad ja seega moodustavad lisasuitsukanalid. Ahju laotud kivid kaetakse pealt savikihiga. Kütuseks kasutatakse kuivi puid või turvast. Põletamisprotsess kestab 7 ööpäeva. Pärast põlemise lõpetamist jäetakse ahi kolmeks ööpäevaks jahtuma. Seejärel laaditakse lubi ahjust välja ja sorteeritakse.

Väliahjade olulisemad puudused: suur tööjõukulu täitmisel ja tühendamisel, suur kütusekulu ja kõrge praagiprotsent üle- ja alapõletatud lubja näol (Skramtajev 1951).



Joonis 1.5 Lubjapõletamise väliahi (Skramtajev 1951)

b) Šahtahjud (püstahjud)

Kõige rohkem on levinud lubjapõletamise šahtahjud (püstahjud). Sellistes ahjudes toimub üheaegselt kolm operatsiooni: materjali kuivatamine, põletamine (dekarboniseerumine) ja jahutamine. Olenevalt kütuse liigist on šahtahjud: 1) lühikeseleegilised ehk sisepõlemisega ahjud; 2) pikaleegilised ahjud (väljaulatuvate küttekolletega); 3) gaasiahjud (Skramtajev 1951).

Väljaulatuvate küttekolletega šahtahjud ehitatakse pikaleegilise kütuse puhul (küttepuut, turvas, põlevkivi jne.). Sellist ahju lubjakivide põletamisel kasutab ka Saaremaa ettevõtte AS Limex oma tootmises Lümandas.

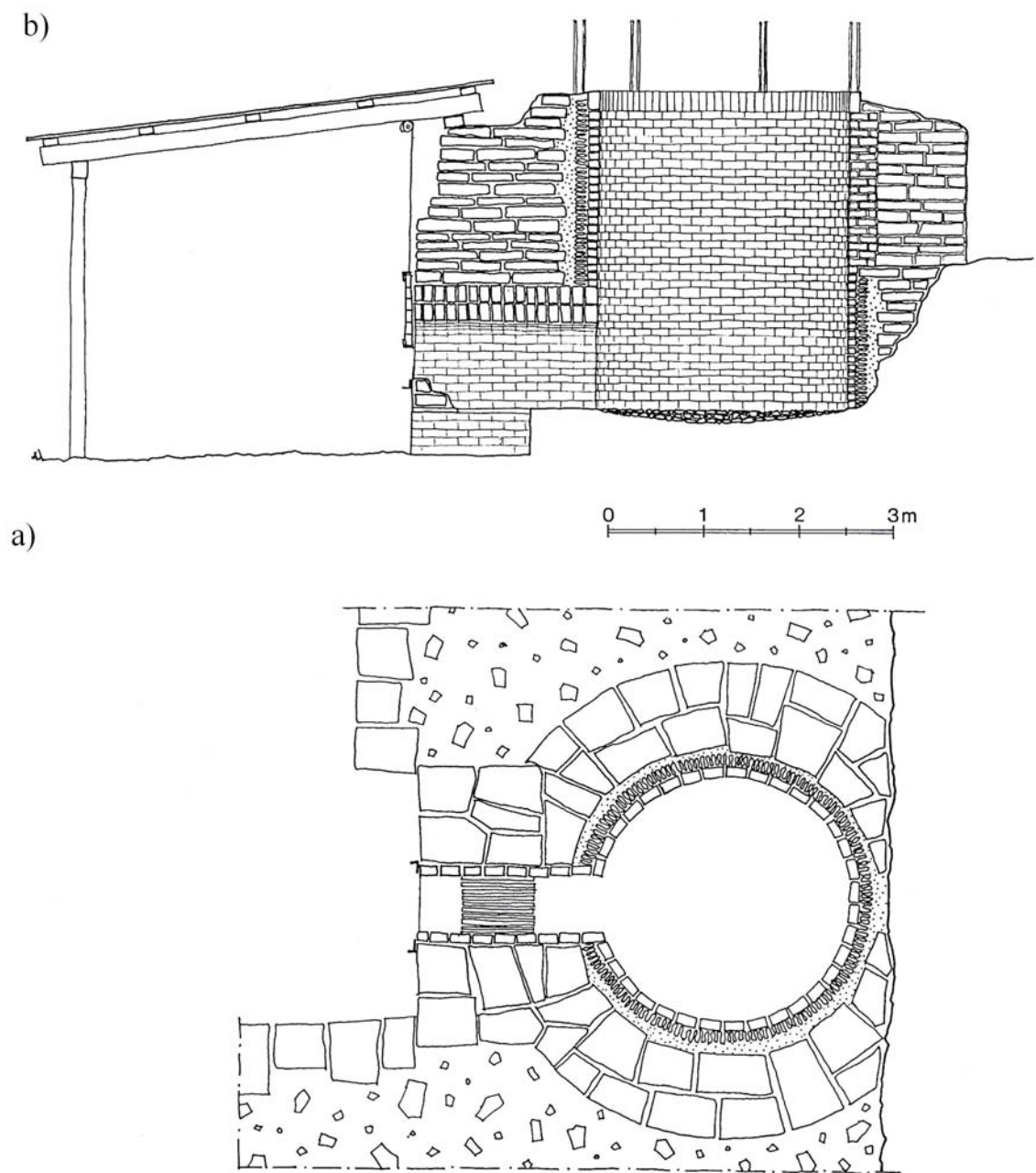
Lubjakivi põletatakse umbes 3.80m kõrguses ja 1.5m laiuses, alt ja ülalt kitsenevas ("munakujulises") lubjaahjus. Lubjaahjude restaureerimiseks kasutati kohapeal veel säilinud teadmisi 50 aasta vanuste ahjude "saladustest". Ahju sisekiht on vooderdatud shamottelistega, seejärel tuleb soojusisolatsioonikiht ning välimiseks kihiks on ca 80-100cm paksune lubjakivist välisvooderdus. Telliste sideainena on kasutatud kohaliku päritoluga spetsiaalselt kuumakindlat Kuusnõmme lahe lähedalt pärit savi ja nn. shamottsavi ning kohaliku liiva segu, mis tekitavad sulades väga kuumakindla glasuurikihi tellise pinnale. Ahju täitmisel lubjakiviga moodustatakse ahju põhja keskele ca 2m pikkune, 1m laiune ja 1.2m kõrgune tuleruum (küttekolle), mille peale

asetatakse võlvideks suured paetükid. Tuleruumis toimub puidu põlemisprotsess [<http://www.limex.ee/index.php?teema=3>](20.04.2010).

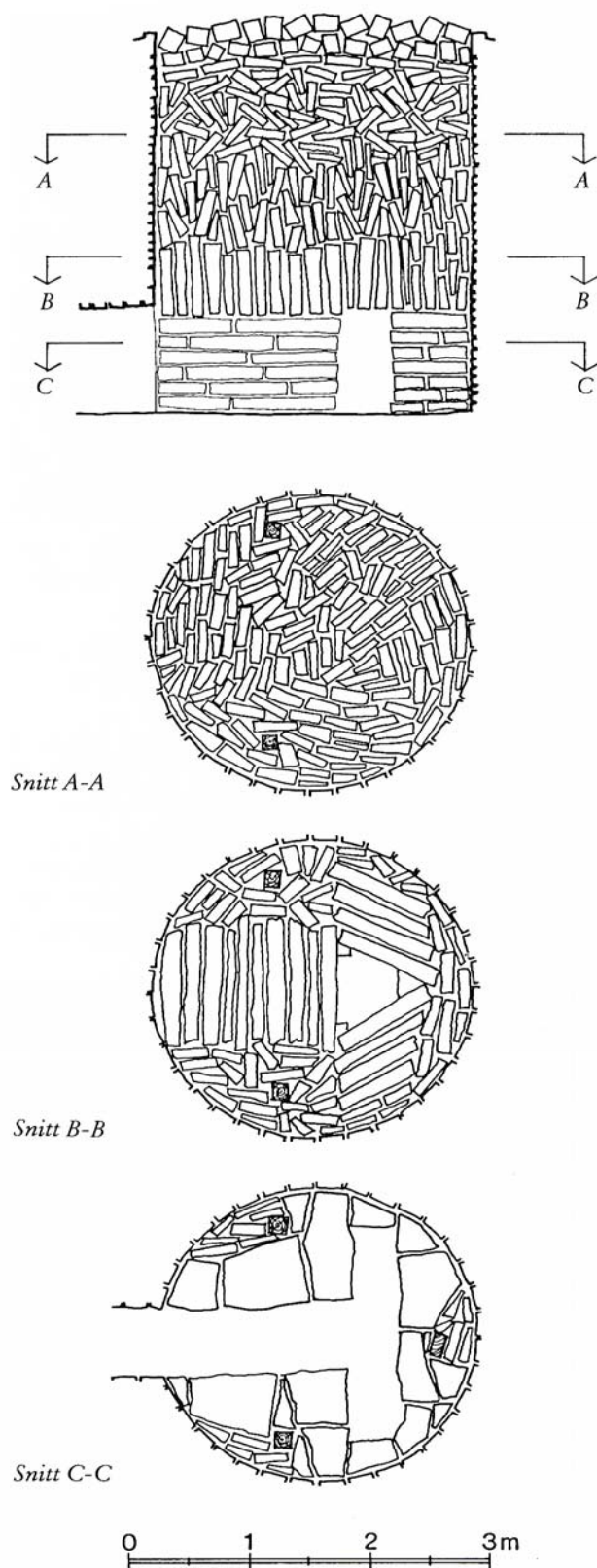
Šahtahju skeem ja üks võimalustest, kuidas lubjakivid ahju laduda on näidatud joonistel 1.6 ja 1.7. Ahju põhjas laotakse kivimid lapiti, et kivide vahele moodustub T-kujuline kanal. Kivide vahele paigutatakse vertikaalsed palgid, mis puidu põledes tekitavad tõmbekanaleid - lõige C-C (Joonis 1.7 Snitt C-C).

Kanali peal laotakse suured lubjakivitükid serviti, takistamaks, et kanalid täituksid põlemise ajal kividega - lõige B-B (Joonis 1.7 Snitt B-B). Üleval pool laotakse lubjakivid ahju korrapäraselt, kuni ahi on täis - lõige A-A (Joonis 1.7 Snitt A-A). Kõige peale laotakse 2 kihti tulekindlat tellist.

Veendumaks, et lubja põletamise võib lõpetada, lüüakse ahju pealt sisse raudkang või ora; kui see läheb põhja, võib põletamise lõpetada. Samuti võib ka ahjust põletatud lubjakivi proove välja võtta ja põletamise lõpetamise üle otsustada nende kustumise järgi. Kui kustutamisel lubi laguneb ainult pealispinnalt, tuleb põletamist jätkata (Lubja põletamine 1950).



Joonis 1.6 Gotlandi Hejnumi lubjaahju plaan a) ja lõige b) (Gotlandskalk, Rapport RAÄ 1987:7).



Joonis 1.7 Gotlandi lubjaahju vertikaal- ja horisontaallõiked, mis näitavad kivide ladumise tehnikat (Gotlandskalk, Rapport RAÄ 1987:7).

1.5.2 Lubja kustutamine

Saaremaa ettevõttes Limex AS toimub lubja kustutamine järgmiselt:

Peale jahutamist laaditakse kustutamata lubja tükid tõstemehhanismiga (joonis 1.8) transpordivahendile ja transporditakse kustutusväljale.



Joonis 1.8 Tõstemehhanism (30.10.2009, Lea Stroh)

Tavaliselt jääb ahju peale ja ahju põhjale 100-200kg halvasti põlenud lubjakivi, mis sorteeritakse ja lisatakse järgmisesse ahju. Samuti tekib ca 50-60kg tuhaga segatud lubjakivi, mida kasutatakse kohalike poolt väetisena. Lubja kustutamine on kustutamata lubja reageerimine veega, mille tulemusena tekib kaltsiumhüdroksiid ja vabaneb soojusenergia.

Kustutus-säilituskompleks asub ca 2km kaugusel ahjudest. Kustutamine toimub

plekkvannis mõõtmetega 2×3×0.5m, millesse mahub ca 300kg CaO ja umbes 10 korda suurem veekogus (joonis 1.9).



Joonis 1.9 Plekkvann lubja kustutamiseks (30.10.2009, Lea Stroh)

Kustutamisel lisatakse vett alati liiast, et tagada täielik kustumisprotsess. Reaktsiooni edukaks kulgemiseks toimub massi pidev segamine käsitsi spetsiaalsete roopidega. Kui CaO on lahustunud, juhitakse see nn. lubjapiim läbi 3mm jämeduse sõelte (eraldavad suuremad lahustumatud osakesed ja muud mehaanilised lisandid) liivapinnasesse ehitatud betoonist ja puidust vooderdatud 1.5m sügavustesse säilitusaukudesse e. haudadesse. Liivapinnas on oluline tegur, et toimuks pidev niiskusevahetus pinnase ja lubjapasta vahel. Säilitusaukudes toimub lubja järelkustumine ca 1-2 aastat ning seejärel on lubjapasta (H_2O sisaldus ca 55%) realiseerimiskõlbulik. Lubjapasta pakendamiseks transporditakse pasta aukudest spetsiaalse tigulaaduriga ning pakendatakse kas otse laaduri abil või käsitsi. Krohvilubi pakendatakse 500kg, 50kg, 25kg või 20kg kilekottidesse (joonis 1.10) ning värvilubi 1kg, 5kg, 14kg ja 25kg plastpurkidesse. Purkidele liimitakse ka vastavad etiketid koos kasutusjuhendi ja tootja andmetega (lisa 1). Toodangu tarnimine toimub nii hulgi- (AS Uninaks) kui jaekaubanduse võrkudes ning ehitus- ja restaureerimisfirmadele. Lubjapastat kasutatakse põhiliselt ehitustöödel mörtide ja krohvide koostises, lubivärvi valmistamiseks, happeliste muldade lupjamiseks jne [<http://limex.ee/index.php?teema=3>](20.04.2010).



Joonis 1.10 Valmis krohvi- ja müürilubi pakendatuna turustamiseks [www.limex.ee](20.04.2010)

2. Lubjakivide geoloogiline analüüs ja lubja valmistamine

2.1 Lubjakivide mineraalne koostis

Oktoobri lõpus (30.10.2010) sai käidud Saaremaal, Lümandas, kus asub ettevõtte Limex AS, mis tegeleb lubja valmistamisega. Priit Penu näitas ja selgitas kogu lubja valmistamise protsessi karjäärist kuni valmis toodanguni. Seal said võetud ka kivimid lubja valmistamiseks ja edaspidiseks katsetamiseks. Aprillis tõi Priit Penu ühe kivimi juurde. (joonis 2.1).



Joonis 2.1 Katsetamisele minevad lubjakivi tükid

Esimene etapp tulevaste hüdrauliliste omaduste määramisel oli kivide geoloogiline analüüs. See tehti Tartu Ülikooli Geoloogia osakonnas tänu professorile Kalle Kirsimäele. Ettevalmistused analüüsi jaoks tegin ise, need olid: kivide purustamine haamriga (joonis 2.2), uhmerdamine (joonis 2.3) ja saadud pulbrist „tablettide“ valmistamine (joonis 2.4).

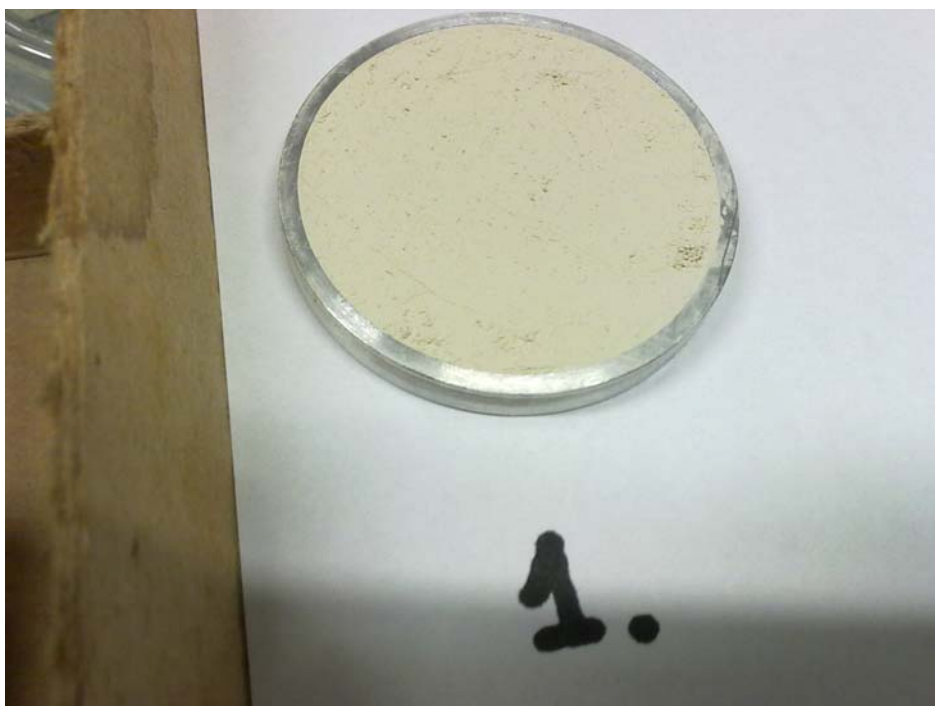


Joonis 2.2 Kivide purustamine haamriga



Joonis 2.3 Purustatud lubjakivi ahhaatuhmris

Peale igat peenestamist puhastasin ahhaadist uhmri soolhappega, mis lahustas uhmrisse jäänuid lubjakivi osakesed, et järgmine proov oleks puhas ja ei sisaldaks eelmise kivimi osakesi.



Joonis 2.4 Analüüsiks valmis lubjakivi proov

Saadut tulemusi analüüsis professor Kalle Kirsimäe. Tulemused on toodud alljärgnevas tabelis (tabel 2.1).

Tabel 2.1 Kivide mineraalne koostis

Proovi nr.	Kaltsiit	+	Dolomiit	+	Illiid+illiid-smektiit	+	Kloriid	+	Kvarts	+	K-päevakivi	+
1	26,7	0,4	61,9	0,7	3,6	0,5	3,1	0,4	2,3	0,1	2,5	0,2
2	13,5	0,3	69,5	0,9	6,9	0,7	4,6	0,4	3	0,1	2,4	0,3
3	15,3	0,3	62,1	0,5	10,2	0,5	4,4	0,3	5,4	0,1	2,6	0,2
4	64,6	0,4	28,3	0,3	3,5	0,3	2,5	0,3	1,1	0,1		
5	99,4	0,1							0,6	0,1		
6			95,5	0,3	3,9	0,5			0,7	0,1		

Analüüsitud proovide päritolu:

- 1 – Mõisaküla karjäär
- 2 – „Riigi“ karjäär
- 3 – Mõisaküla karjääri mergel kivi
- 4 – „Trassi“ kivi
- 5 – põllult korjatud kivi, nn. lambapea
- 6 – merest võetud kivi (sadama süvendist)

Tabelist 2.1 järeldub, et proovid nr. 5 ja nr. 6 ei sobi hüdraulilise lubja valmistamiseks, sest nad sisaldavad väga vähe savimineraale, põhimõtteliselt ei sisaldagi. Need kaks kivimit langevad edaspidistest katsetest välja.

2.2 Lubjakivi põletamine

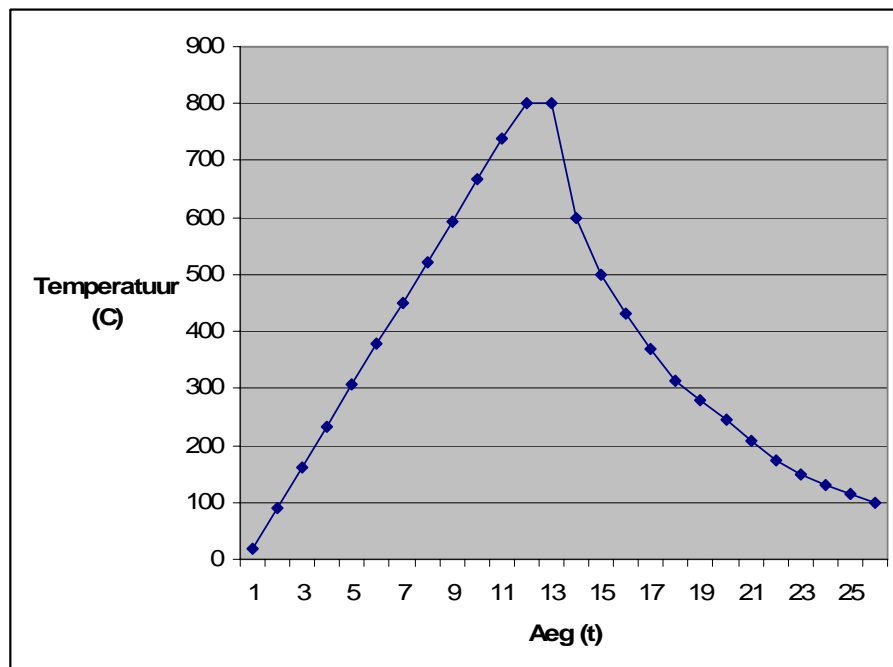
Hüdraulilise lubja tootmine koosneb põletamisest ja kustutamisest. Eelkõige on vaja valida temperatuur kivide põletamise jaoks. Erinevates kirjandusallikates on soovitatud erinevaid temperatuure hüdraulilise lubja põletamiseks.

- 1) - Põletamine toimub šahtahjudes 900°-ses temperatuuris (Skramtajev 1951)

2) - Hüdraulilist lubja põletatakse 900 - 1100°C juures (Воробьев 1971), samad numbrid on ka raamatus „Матерьялы для отделочников- строителей. Материалы для малярных и штукатурных работ“ (Чмырь 1990).

3) - Optimaalne temperatuur hüdraulilise lubja põletamiseks on 800-1400°C. Traditsiooniline põletamine (kasutades puitu) toimub 800-1000°C (Balksten 2007).

Konsultant Priit Penu soovitas esimese põletamise teha 800°C juures. Põletamine tehti 14.04.2010. Põletamise algus kell 16:25, algtemperatuur ahjus oli 18°C, maksimaalseks temperatuuriks oli programmeeritud 800°C. (joonis 2.5):



Joonis 2.5 Temperatuuri graafik lubjakivide põletamisel 800°C juures 14.04.2010

Põletamine toimus riulitega ja automaatikaga varustatud keraamikaahjus (joonis 2.6), Maaülikooli maahituse osakonna laboris. Põletamine toimus ahju lahtiste tuulutussavaga.



Joonis 2.6 Automaatikaga keraamikaahi, milles põletati lupja

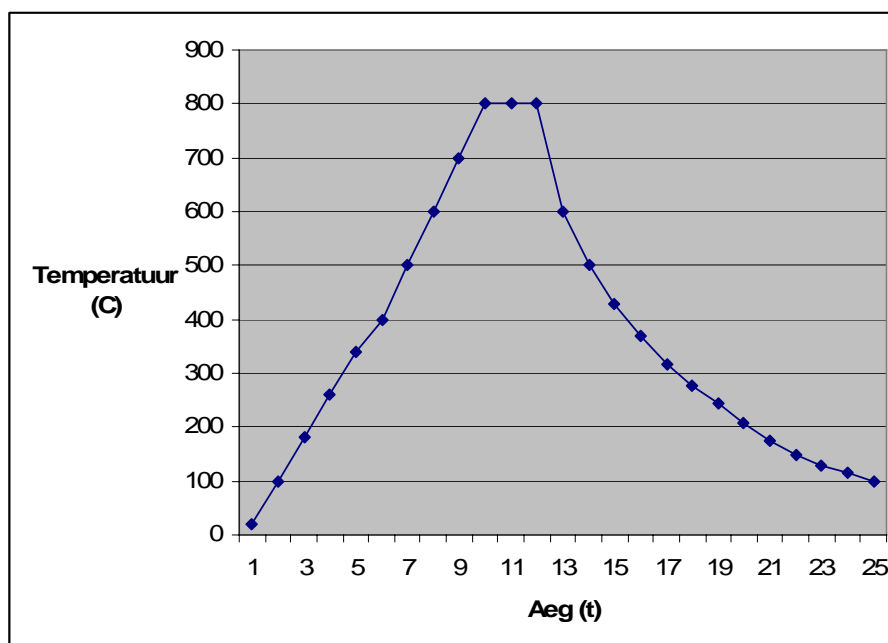
Enne põletamist purustati kivid 100 kuni 300g tükkideks, et kindlustada võimalikult täiuslik läbipõlemine (Jänes 2006). Katsetavate kivikoguste massid määrati enne ja pärast põletamist (tabelis 2.2).

Tabel 2.2 Erinevate kivide massid enne ja pärast põletamist 800°C juures

Proovi nr.	Kivi päritolu	Mass enne (g)	Mass pärast (g)	Massi kadu põletamisel (g)	Massi-kaos %
1	Mõisaküla	2430	1992	438	18
2	Trass	1740	1437	303	17,4
3	Riigi karjäär	1020	951	69	6,8

Kuna lubjakivi sisaldab ligikaudu 40% CO₂, järelkult peaks see õige põletamise järel kaotama sama protsendi oma massist. Tabelist on näha, et massi kaod on palju väiksemad, seega saab teha järelduse, et lubjakivid ei ole täielikult põlenud. Seda, et kivimid ei ole piisavalt hästi põletatud, kinnitas ka see, et nad ei hakanud veega reageerima ja kustumisprotsess ei alanud. Katse jätkamiseks oli kaks võimalust: esiteks, tõsta põletamise temperatuuri, ja teiseks, pikendada maksimaalse temperatuuri kestvust.

Otsustatud oli alguseks pikendada maksimaalse temperatuuri püsimise aega. Teine põletamine toimus 16.04.2010, põletamise algus oli kell 10:00, algtemperatuur ahjus oli 19°C. Maksimaalseks temperatuuriks valitud 800°C. Maksimaalse temperatuuri püsimise ajaks oli valitud 2 tundi (joonis 2.7). Teise põletamise tulemused on toodud alljärgnevas tabelis (tabel 2.3):

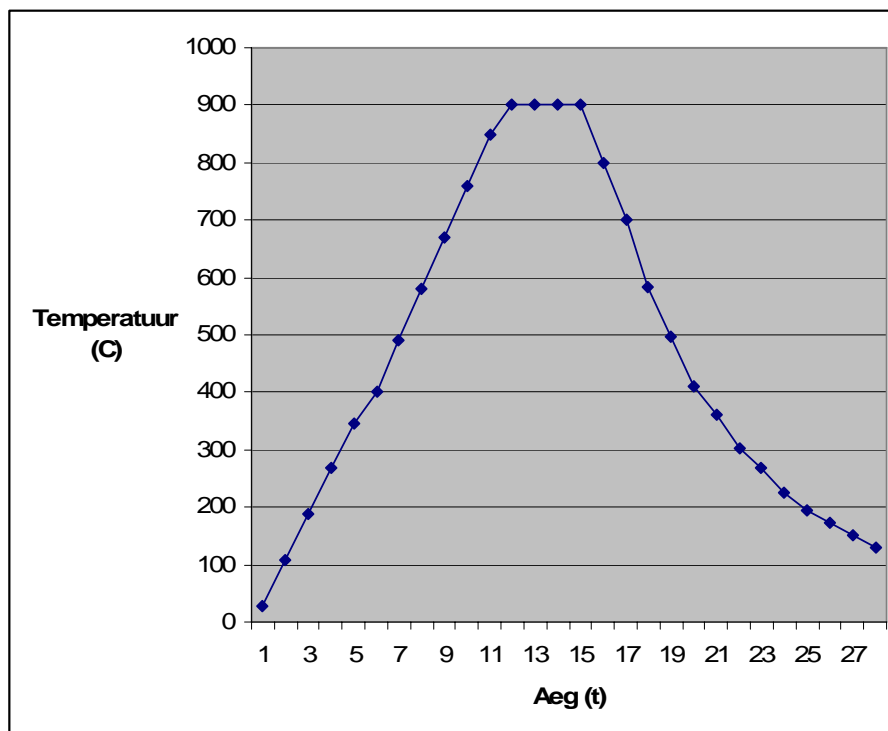


Joonis 2.7 Temperatuuri graafik lubjakivide põletamisel 800°C juures 16.04.2010

Tabel 2.3 Erinevate kivide massid enne ja pärast põletamist 800°C juures

Proovi nr.	Kivi päritolu	Mass enne (g)	Mass pärast (g)	Massi kadu põletamisel (g)	Massi-kaos %
1	Mõisaküla	2082	1650	432	20,7
2	Trass	2129	1828	301	14,1
3	Riigi karjäär	2037	1638	399	19,6

Tabelist selgub taas, et põletamine ei õnnestunud. Temperatuurist 800°C jääb väheks. Kolmanda põletamise jaoks valin temperatuuri 900°C, mis oli soovitatud suuremas osas kirjandusest. Põletamine algas 17.04.2010 kell 17:28, algtemperatuur ahjus oli 27°C. Ahju režiim: 80°C/tunnis kuni 400°C ja 90°C/tunnis kuni 900°C. Maksimaalse temperatuuri püsimise aeg 3 tundi (joonis 2.8).



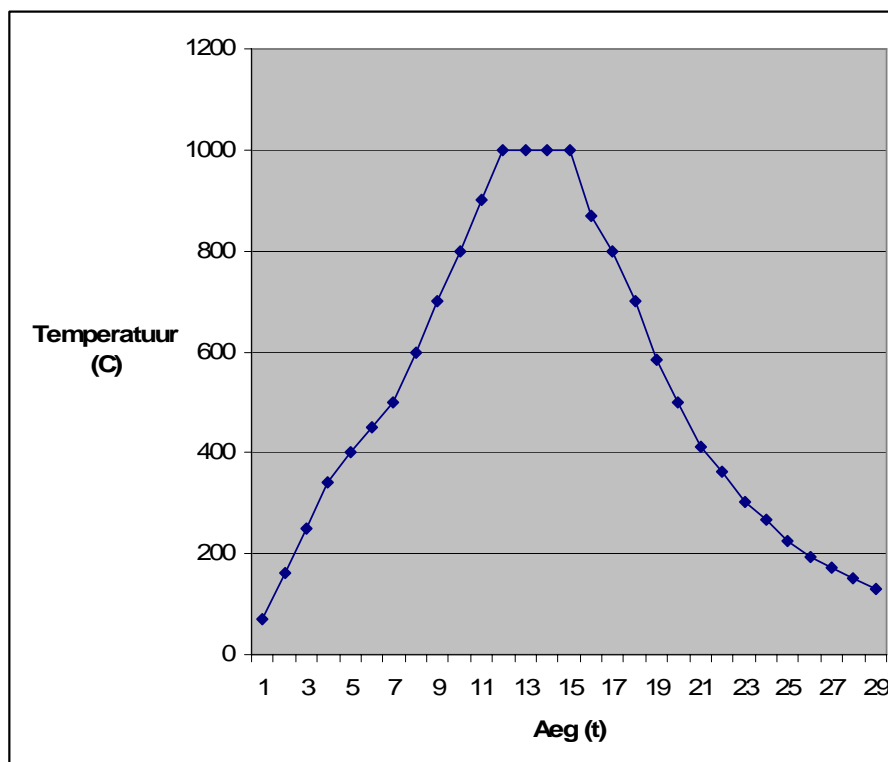
Joonis 2.8 Temperatuuri graafik lubjakivide põletamisel 900°C juures
17.04.2010

Vaadates järgmist tabelit (tabel 2.4) on näha, et kolmas põletamine oli õnnestunud:

Tabel 2.4 Erinevate kivide massid enne ja pärast põletamist 900°C juures

Proovi nr.	Kivi päritolu	Mass enne (g)	Mass pärast (g)	Massi kadu põletamisel (g)	Massi-kaos %
1	Riigi karjäär	1802	1058	744	41,3
2	Mõisaküla	2064	1208	856	41,5
3	Mergel	2614	1580	1034	39,6
4	Meri	1062	584	478	45

900°C juures põletamine õnnestus. Neljas põletamine tehti 1000°C juures. Põletamise algus 20.04.10, kell 11:30, algtemperatuur ahjus 71°C. Maksimaalne temperatuur 1000°C. Maksimaalse temperatuuri püsimise aeg 3 tundi (joonis 2.9). Põletamise tulemused esitatud tabelis 2.5:



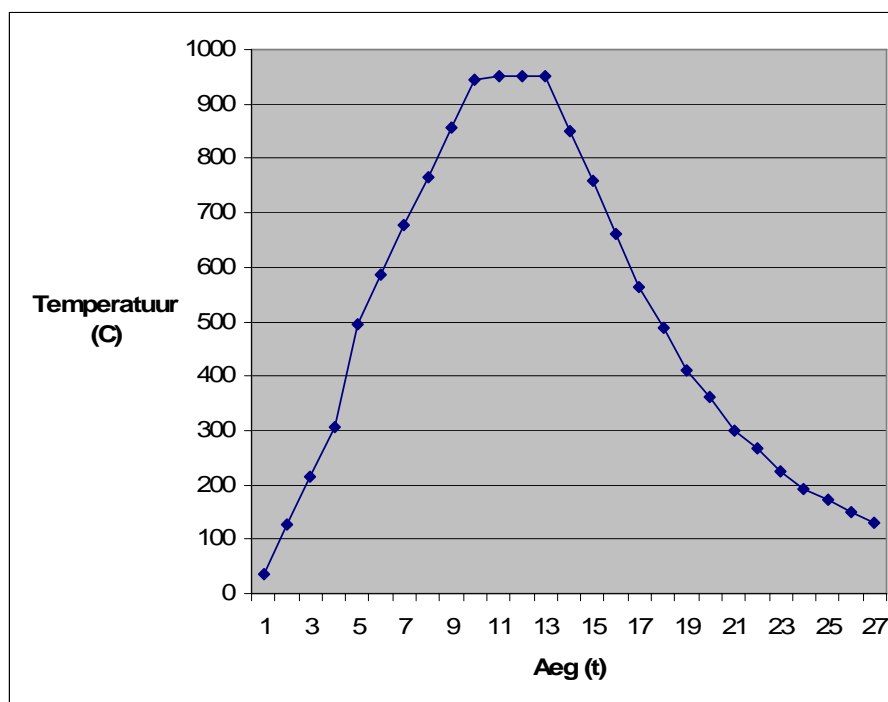
Joonis 2.9 Temperatuuri graafik lubjakivide põletamisel 1000°C juures 20.04.2010

Tabel 2.5 Erinevate kivide massid enne ja pärast põletamist 1000°C juures

Proovi nr.	Kivi päritolu	Mass enne (g)	Mass pärast (g)	Massi kadu põletamisel (g)	Massi-kaod %
1	Riigi karjäär	1979	1153	826	41,7
2	Mõisaküla	1855	1099	756	40,8
3	Mergel	1887	1140	747	39,6
4	Meri	445	240	205	46

Võrreldes kahte viimast lubjapõletamist on näha, et massikaod praktiliselt ei erine. Võib öelda, et massikao protsent 900°C ja 1000°C juures on ühesugune. Kristin Balksteini doktoritöös on toodud, et kõrgematel temperatuuridel tekib rohkem aluminaate (Al_2O_3), madalatel temperatuuridel beliiti [Ca_2SiO_4 , mõnikord formuleeritud nagu $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (Bournazel 1998)]. Need kivistuvad erinevalt, näiteks kivistuvad aluminaadid mõne tunniga, beliidid aga kuni 28 päeva jooksul (Balksten 2007), aga see selgub ainult pärast keemilist analüüsi ja katsekehade valmistamist.

Viimane põletamine tehti 950°C juures algusega 21.04.2010, kell 17:15, algtemperatuur ahjus oli 36°C. Ahju kuumenemise režiim: 90°C/tunnis kuni 950°C. 950°C juures hoiti 3 tundi (joonis 2.10). Tulemused on toodud tabelis 2.6

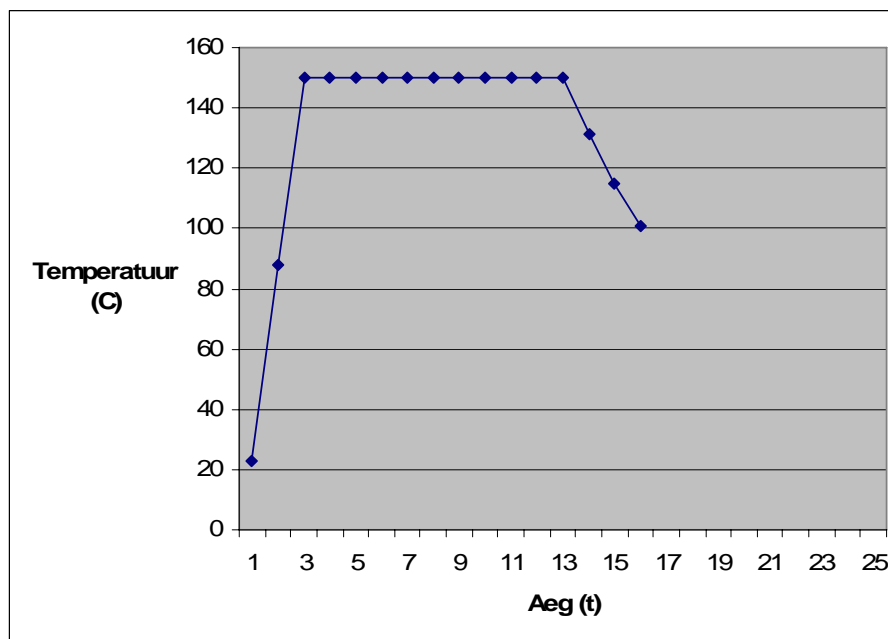


Joonis 2.10 Temperatuuri graafik lubjakivide põletamisel 950°C juures 21.04.2010

Tabel 2.6 Erinevate kivide massid enne ja pärast põletamist 950°C juures

Proovi nr.	Kivi päritolu	Mass enne (g)	Mass pärast (g)	Massi kadu põletamisel (g)	Massi-kaos %
1	Trass	1995	1145	850	42,6
2	Mergel	2019	1224	795	39,4
3	Mõisaküla	1986	1121	865	43,5

Sellega oli kivide põletamine lõppenud. Lisaks kuivatati kivid 150°C juures, et määrata vee sisalduse protsent. Väikestes hulkades leidub kõikides õhkuivades lubjakivides vett kuni 3% (Lubja põletamine 1950). Kivid kuivatati 19.04.2010 kell 10:50, algtemperatuur ahjus oli 23°C. 150°C juures, lubjakive hoiti 9,59 tundi (joonis 2.11). Kivid kaaluti enne ahju panemist, peale 10 tundi seal olemist ja peale väljavõtmist. Tulemustega tabel (tabel 2.7):



Joonis 2.11 Temperatuuri graafik lubjakivide kuivatamisel 150°C juures
21.04.2010

Tabel 2.7 Lubjakivide veesisaldus

Proovi nr.	Kivi päritolu	Mass normaal olekus	Mass peale 10 t ahjus olekut	Kuiva proovi mass	Massi kadu (g)	Veesisaldus %
1	Mõisaküla	1915	1979	1979	11	0,6
2	Mergel	1908	1855	1855	60	3,1
3	Riik	1990	1888	1887	21	1,1
4	Meri	446	445	445	1	0,2

Nendest andmetest selgub, et kivid olid suhteliselt kuivad ja enamuse massikao kivide põletamisel moodustas CO₂ kadu. Aga ikkagi arvutan ma puhtalt CO₂ kadu kolmel viimasel põletamisel valemiga: massikao % - veesisalduse %. Tulemused on toodud tabelites 2.8, 2.9 ja 2.10.

Tabel 2.8 CO₂ kadu lubjakivi põletamisel 900°C juures

Proovi nr.	Kivi päritolu	Puhas CO ₂ kadu (%)
1	Riigi karjäär	40,2
2	Mõisaküla	40,9
3	Mergel	36,5
4	Meri	44,8

Tabel 2.9 CO₂ kadu lubjakivi põletamisel 950°C juures

Proovi nr.	Kivi päritolu	Puhas CO ₂ kadu (%)
1	Mõisaküla	42
2	Mergel	36,3

Tabel 2.10 CO₂ kadu lubjakivi põletamisel 1000°C juures

Proovi nr.	Kivi päritolu	Puhas CO ₂ kadu (%)
1	Riigi karjäär	40,6
2	Mõisaküla	40,2
3	Mergel	36,5
4	Meri	45,8

2.3 Lubja kustutamine

Lupja võib kustutada pulberlubjaks või lubjainaks. Pulbriks kustutamisel suureneb lubja maht. Mahu suurenemine on seletatav erikaalu vähenemisega ja pulbriks lagunemisega (Skramtajev 1951).

Põletatud lubjakivide pulbriks kustutamisel toimub tavaliselt lagunemise protsess, mille tulemusena lagunevad kivid 5 – 20 mikromeetri suurusteks osakesteks.

Lubja kustutamisel pulbriks tuleb vältida tooraine soojenemist üle 100°C. Mida suurem on temperatuur lubja kustutamisel, seda suuremad kaltsiumhüdroksiidi osakesed tekivad. Hiljem on võimatu neid osakesi veega segades lagundada ja saada heade plastiliste omadustega taigat (Волженский 1986).

Pärast põletamist pandi lubjakivi tükid anumatesse (joonis 2.12). Kustutamise protsessi kiirendamiseks pritsiti lubjakividele esimese kolme päeva jooksul kolm korda päevas pihustiga toatemperatuuril vett ja seejärel kaeti anumad niiskete lappidega. Lapid tehti märjaks (joonis 2.13) esimesel kolmel päeval kaks korda päevas ja hiljem üks kord päevas ning neid hoiti erinevatel lupjadel 17 kuni 22 päeva, alates lubjakivide väljavõtmisest ahjust. Katsetes prooviti vältida lubja ülekuumenemist, selleks kasteti põletatud lubjakivi veega väga tagasihoidlikult. Vahepeal lisati vett rohkem ja reaktsiooniga kaasnes lubjakivide kuumenemine ning vee aurumine, mis tähendas, et vahepeal oli temperatuur üle 100°C.



Joonis 2.12 Põletatud lubjakivid anumates



Joonis 2.13 Põletatud lubjaga anumad on niiske keskkonna loomiseks kaetud märgade lappidega

Teoreetiliselt kulub põletatud lubja kustutamiseks vett 32,13% põletatud lubja massist. Tegelikult tuleb aga võtta pulbriks kustutamisel 70% vett (Lubja põletamine 1950). Sellisel meetodil, nagu antud juhul kustutamisel kasutati, on võimatu kustutamiseks kuluva vee hulka täpselt määrata. Osa vett aurustus ja osa massist võib olla juurde võetud CO₂ arvel. Massi muutus peale lubja kustutamist on toodud tabelites (tabel 2.11, tabel 2.12 ja tabel 2.13):

Tabel 2.11 900°C juures põletatud lubjakivid

Kivi päritolu	Mass enne(g)	Mass pärast(g)	Masside vahe(g)	Massi kasv kustutamisel %
Riik	1058	1230	172	13,98
Mõisaküla	1208	1413	205	14,5
Mergel	1580	1920	340	17,7

Tabel 2.12 950°C juures põletatud lubjakivid

Kivi päritolu	Mass enne(g)	Mass pärast(g)	Masside vahe(g)	Massi kasv kustutamisel %
Trass	1145	1414	269	19,02
Mergel	1224	1446	222	15,35
Mõisaküla	1121	1304	183	14,03

Tabel 2.13 1000°C juures põletatud lubjakivid

Kivi päritolu	Mass enne(g)	Mass pärast(g)	Masside vahe(g)	Massi kasv kustutamisel %
Riik	1153	1356	203	14,97
Mõisaküla	1099	1298	199	15,33
Mergel	1140	1439	299	20,77

Järgmisena on toodud fotod, mis tehti enne lubja kustutamist, kustutamise jooksul ning kustutamise lõpus. Joonised 2.14, 2.15 ja 2.16.



Joonis 2.14 Lubjakivi tükid kustutamise protsessis 19.04.2010



Joonis 2.15 Lubjakivide murenemine kustutamise protsessis
22.04.2010



Joonis 2.16 Kustunud lubi 26.04.2010

3. Katsete meetoodika

3.1 Põletatud lubjakivide keemiline analüüs

Kivide keemiline analüüs tehti Tartu Ülikoolis geoloogia ja mineraloogia professor Kalle Kirsimäe juhtimisel. Analüüsiks viidi üheksa proovi. Esimene, mis tehti, oli lubjapulbrite kuivatamine 105°C juures 24 tunni jooksul (joonis 3.1).



Joonis 3.1 Kuivatuskapp, milles proovid kuivatati

Kuivast pulbrist võeti 1-grammised proovid, täpsusega $\pm 0,001\text{g}$ (joonis 3.2 ja 3.3). Need proovid pandi omakorda üheks ööpäevaks temperatuurile 950°C (joonis 3.4). Peale väljavõtmist kaaluti proovid uuesti. Andmed on tabelis 3.1, need olid vajalikud keemilise koostise määramiseks. Seejärel pulber peenestati ja pressiti 200kN jõuga (s.o. 20 tonni) (joonis 3.5). Tulemuseks saadi „tabletid“, mis olid keemiliseks analüüsiks valmis (joonis 3.6).

Tabel 3.1 Erinevate proovide massid enne ja pärast põletamist 950°C juures

Proov	Mass (g)	Mass peale põletamist (g)	Masside vahe (g)	Massi kao %
MER 5	1	0,821	0,179	17,9
MÕIS 3	1	0,851	0,149	14,9
MER 9	1	0,854	0,146	14,6
MÕIS 4	1	0,857	0,143	14,3
TRASS 8	1	0,808	0,192	19,2
MÕIS 6	1	0,836	0,164	16,4
RIIK 7	1	0,846	0,154	15,4
RIIK 2	1	0,825	0,175	17,5
MER 1	1	0,838	0,162	16,2

MER 5 - mergel, mis oli põletatud temperatuuril 900°C juures

MÕIS 3 - Mõisaküla karjääri kivi, põletatud 1000°C juures

MER 9 - mergel, põletatud 950°C juures

MÕIS 4 - Mõisaküla karjääri kivi, põletatud 950°C juures

TRASS 8 - trassikivi, põletatud 950°C juures

MÕIS 6 - Mõisaküla karjääri kivi, põletatud 900°C juures

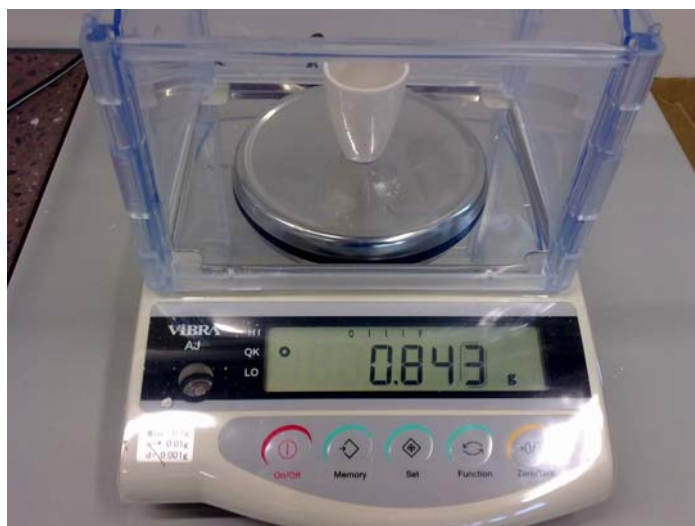
RIIK 7 - riigi karjääri kivi, põletatud 900°C juures

RIIK 2 - riigi karjääri kivi, põletatud 1000°C juures

MER 1 - mergel, põletatud 1000°C juures



Joonis 3.2 1-grammised proovid



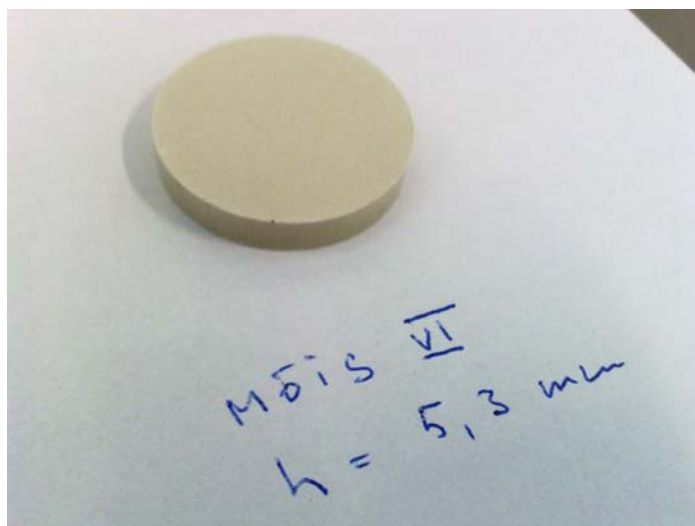
Joonis 3.3 Kaal täpsusega 0,001 grammi



Joonis 3.4 Ahi, kus põletati 1-grammised proovid



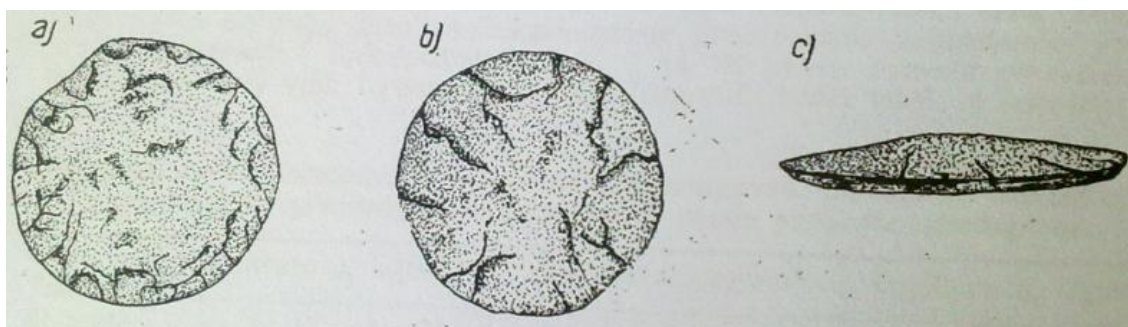
Joonis 3.5 200kN press



Joonis 3.6 Analüüsiks valmis proov

3.2 Mahu muutuse ühtlus

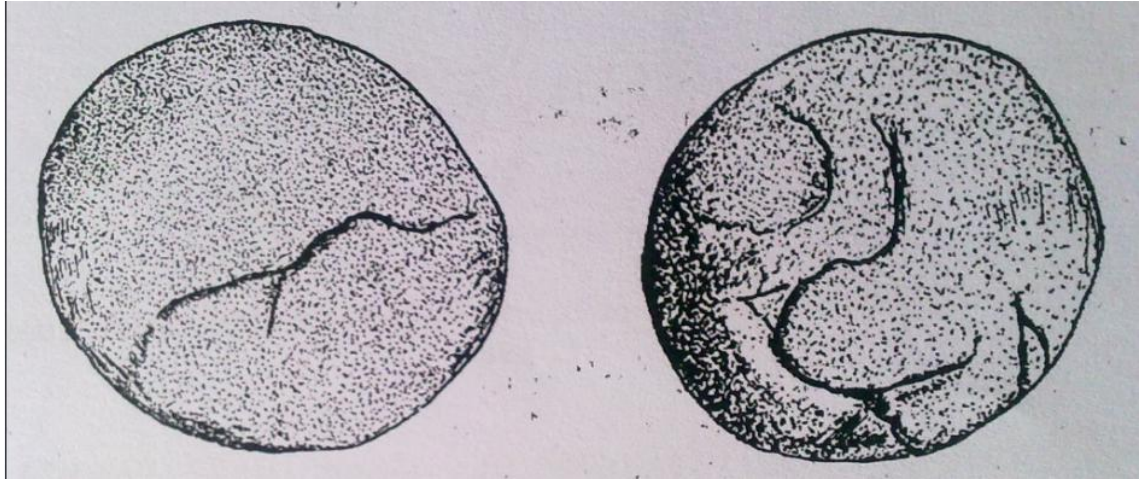
Mahu muutuse ühtlus (standardis EVS 763-2:2000 sama põhimõttega katse on nimetatud külma vee katseks) – lubjast valmistatud kookidel ei tohi kivistumisel tekkida radiaalpragusid ega kõverdumisi (joonis 3.7).



Joonis 3.7 Proovikoogikesed, mis pole talunud mahumuutuse ühtluse teimi:

a) – koogikese purunemine; b) – ohtlikud radiaalpraod; c) – kõverdumine (Skramtajev 1951)

Mitte kõik praod pole ohtlikud. Esimese ööpäeva jooksul võivad koogikese keskkohal ilmned a juuspraod (kuivamispraod), mis ei ulatu koogikese servani (joonis 3.8), ei ole lubja halva kvaliteedi tunnuseks sel juhul, kui koogikeste vastasküljel ei ole servani ulatuvaid radiaalseid pragusid. Mahu ebaühtlased muutused ilmnevad hüdraulilisel lubjal, mis sisaldab vaba CaO ja MgO-d (Skramtajev 1951).

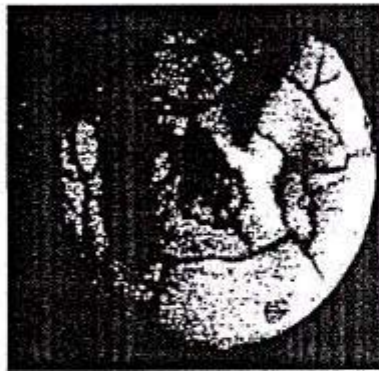


Joonis 3.8 Mahumuutuse ühtluse teimi talunud koogikesed (koogikestel on lubatavad kuivamispraod) (Skramtajev 1951)

Katsekehade valmistamine vastavalt standardile on järgmine: 200g hüdraulilist lubja sõtkutakse 3 minuti jooksul 45g kuni 90g veega taignaks. Taigen jagatakse kahte võrdsesse ossa, kumbki osa pannakse kergelt õlitatud lameda klaasplaadi (peegelklaasi) keskele ning raputatakse, kuni kookide läbimõõdud on 50mm kuni 70mm ja paksused umbes 10mm. Pärast seda ei tohi kooke enam noaga töödelda. Käesoleva töö katsetes jäi 90g veest väheks (taignat ei tulnud välja) ja lisati 120g vett. Pärast lubjataigna valmistamist pannakse koogid niiskesse kambrisse ning jäetakse sinna tarduma. 24 tunni möödudes asetatakse koogid vette. Kooke võib vaatlemiseks veest välja võtta maksimaalselt 30 minutiks, vältimaks servadesse tekkida võivaid radiaalseid kahanemispragusid. Standardis on kirjas, et see katse on hüdraulilise lubja jaoks, mille SO_3 sisaldus on 3% - 7%. Katsetatavad lubjad on väiksema SO_3 sisaldusega, kuid katset teen ikkagi. Standardis EVS 763-2:2000 on kirjutatud: kui koogid on pärast varem tehtud protsessi kompaktsed ning ei ole märgata paisumispragusid, loetakse katse „rahuldatuks“. Kahanemispraod ei oma hindamise seisukohast tähtsust. Paisumispragude esinemisel loetakse katse „mitterahuldatuks“. Lubi loetakse mahupüsivaks, kui 27 päeva vees olnud katsekehad ei ole lagunened ega nende pealispind pole kattunud paisumispragude võrguga (joonis 3.9).



Katse rahuldatud



Kahanemispragudega katsekeha (katse rahuldatud)



Paisumispragudega katsekeha (katse mitterahuldatud)

Joonis 3.9 Lubatavad ja mittelubatavad pragude tekked (EVS 763-2:2000)

Katsekehad enne vette panekut

1) Riigi karjääri lubi (joonised 3.10 ja 3.11)

Katsekehad (A1 ja A2) valmistati 09.05.2010, kell 19:30. Katsekehi hoiti üks ööpäev niiskes keskkonnas ning selle aja möödumisel pandi need vette.



Joonis 3.10 Riigi karjääri lubjast valmistatud katsekeha A1 enne vette panekut



Joonis 3.11 Riigi karjääri lubjast valmistatud katsekeha A2 enne vette panekut

2) Mõisaküla karjääri lubi (joonised 3.12 ja 3.13)

Katsekehad (B1 ja B2) valmistati 10.05.2010, kell 19:30. Katsekehi hoiti üks ööpäev niiskes keskkonnas ning selle aja möödumisel pandi need vette.



Joonis 3.12 Mõisaküla karjääri lubjast valmistatud katsekeha B1 enne vette panekut



Joonis 3.13 Mõisaküla karjääri lubjast valmistatud katsekeha B2 enne vette panekut

3.3 Lubimördi katsekehade painde- ja survetugevuse määramine

Painde- ja survetugevuse määramiseks tehti erineva koostisega katsekehad mõõtudega 160×40×40 mm. Katsekehade valmistamiseks kasutati standardvorme (joonis 3.14). Hüdraulilisest lubjast mörtide retseptid olid võetud järgmised: 1:3 (Weaver 1997, Klotsanov 1969), 2:5 (Weaver 1997), 0,5:0,5:3 (Balkstein 2007). Lubimörtide komponentide koostised on toodud tabelis 3.2.



Joonis 3.14 Vorm 160×40×40mm katsekehade valmistamiseks

Tabel 3.2 Mörtide koostised

Katsekeha number	Mördi komponendid	Komponentide suhe	vbt
1a	Mõisaküla lubi(17.04)/lubi „merest“/liiv	0,5:0,5:3	2,27/1,14
1b	Sõelumata Mõisaküla lubi (17.04)/lubi „merest“/liiv	0,5:0,5:3	1,81/0,91
2	Riigi karjääri lubi(17.04)/lubi „merest“/liiv	0,5:0,5:3	2,0/1,0
3	Riigi karjääri lubi(17.04)/liiv	1:3	0,86
4	Mõisaküla lubi(17.04)/liiv	1:3	0,86
5	„Trassi“ lubi/liiv	1:3	0,86
6	Riigi karjääri lubi (21.04)/liiv	1:3	0,86
7	Mergel/liiv	1:3	0,86
8	Mõisaküla lubi (21.04)/liiv	1:3	0,86
9	Mõisaküla lubi (22.04)/liiv	2:5	0,875
10	Riigi karjääri lubi (21.04)/liiv	2:5	0,875
11	„Trassi“ lubi/liiv	2:5	0,875

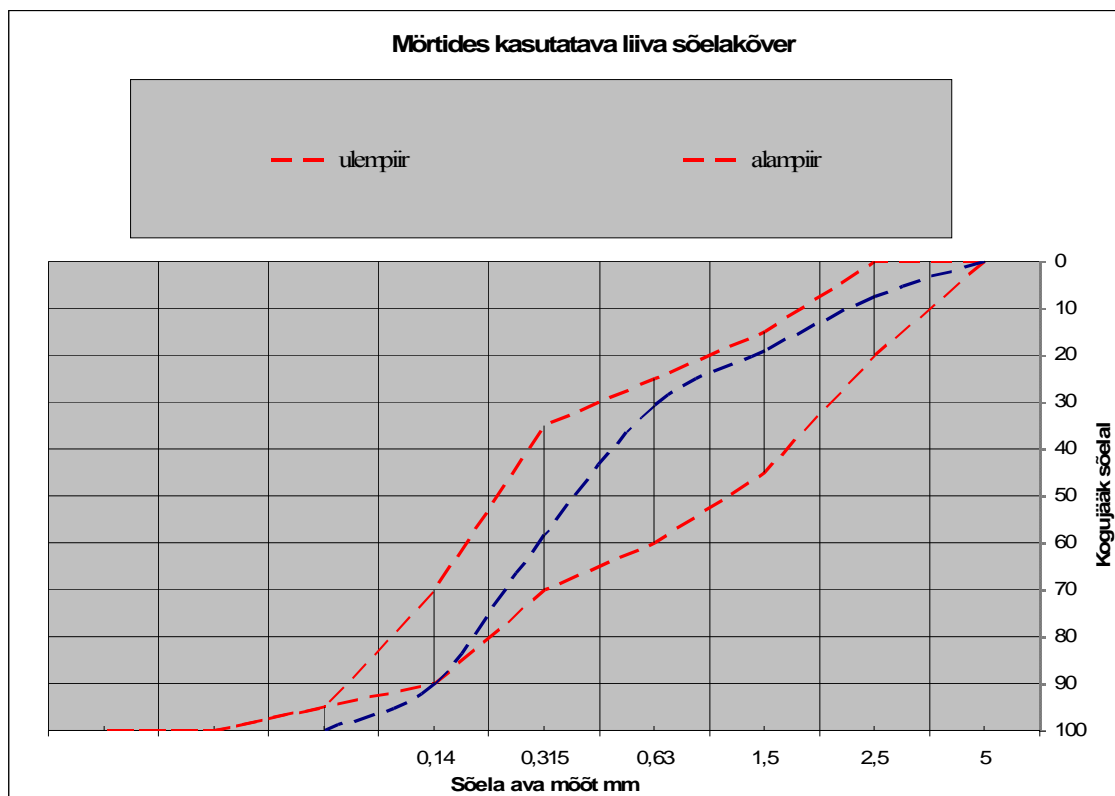
Vbt

Vee ja sideaine suhe vbt leitakse järgmiselt:

$Vbt = \text{kogu vee mass} / \text{kuiva sideaine mass [kg/kg]}$ (Balkstein 2007).

Retseptides 1a, 1b ja 2 on pandud hüdrauliline lubi koos õhklubjaga. Suurema tõenäosusega on õhklubi („merest“) hakanud juba katsetes karboniseeruma, seega täidab ta mõrdis mitte sideaine, vaid täiteaine funktsioone, seepärast ongi tabelis toodud 2 vbt suhet: esimene juhul, kui õhklubi on mõrdis täiteainena, teine number juhul, kui õhklubi on ikkagi sideaine. Enne katsetamist olid proovikehad kivistunud 20 päeva jooksul.

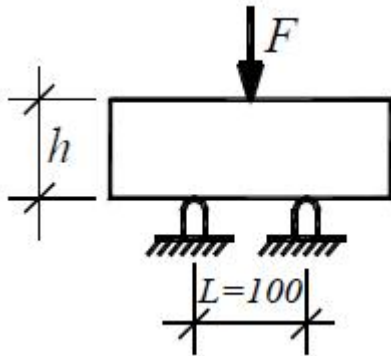
Kasutatud liiva sõelkõver on näidatud joonisel 3.15:



Joonis 3.15 Mõrtides kasutatud liiva sõelkõver

Sõelkõvera ülempiir ja alampiir on võetud raamatust „Матерьялы для отделочников-строителей. Материалы для малярных и штукатурных работ“ (Чмырь 1990).

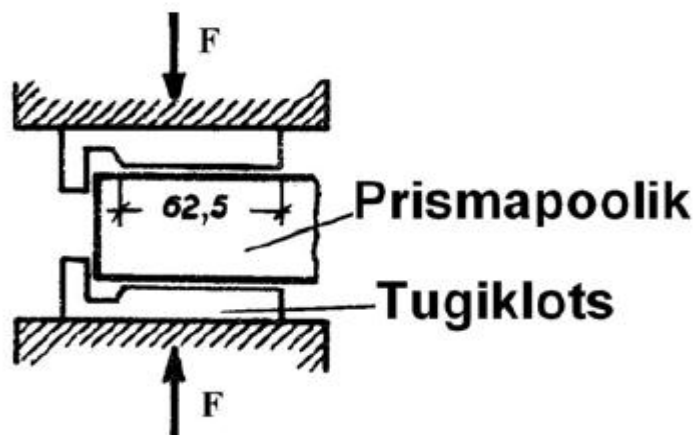
Paindetugevuse määramiseks asetatakse katsekeha kahele toele, mille vahekaugus on 10cm. Proovikeha koormatakse toeava keskel (joonis 3.16). Enne paindekatsed tuleb katsekehad nummerdada, määrata vajalikud mõõtmised valemi kasutamiseks ja märkida katsekehale sirgjooned, mis tähistavad koormuse ja tuge asukohti (Kiviste 2009).



Joonis 3.16 Katseskeem paindetugevuse määramiseks (Kiviste 2009)

Käesolevas töös katsete tulemusi käsitsi ei arvatatud, sest programm „Instron“ andis valmis tulemusi.

Survetugevus määratakse paindekatsel saadud prismapoolikutega. Prismapoolik tsentreeritakse 25cm²-se pinnaga tugiklotside vahele põiksuunas hälbega $\pm 0,5$ mm ja pikisuunas nii, et prisma otspind ulatuks üle tugiklotsi ääre umbes 10mm. Tuleb jälgida, et pikisuunas oleks ikka kogu katsekeha tugiklotside vahel (joonis 3.17) (Kiviste 2009).



Joonis 3.17 Survetugevuse määramise katseskeem (Kiviste 2009)

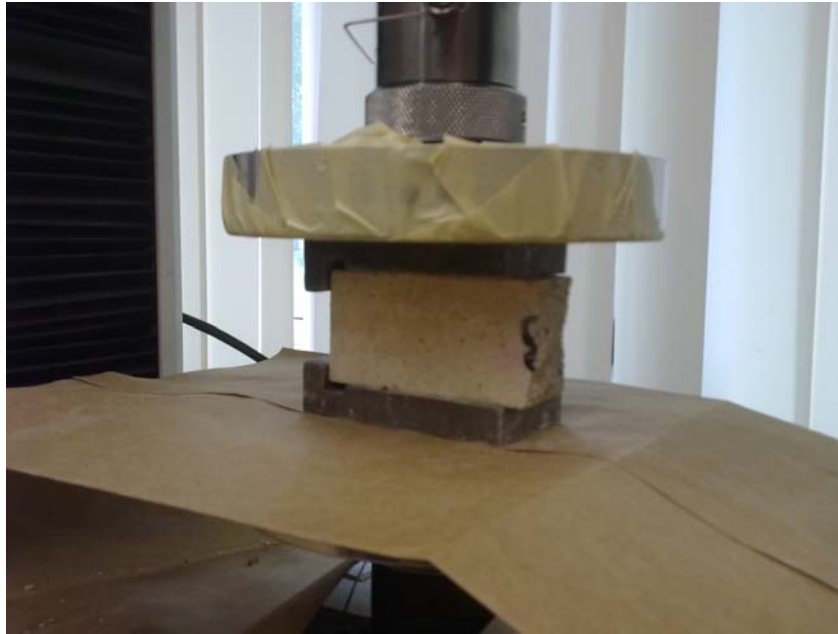
Katse tehti pressil INSTRON. Pressi andmed on välja toodud joonisel 3.18. Joonisel 3.19 on näidatud paindetugevuse määramise katse. Joonisel 3.20 on survetugevuse määramine.



Joonis 3.18 Kasutatud pressi andmed



Joonis 3.19 Paindetugevuse määramine



Joonis 3.20 Survetugevuse määramine

Paindetugevuse määramisel määrati ka elastsusmoodulit. Elastsusmoodul E on suurus, mis näitab materjali elastsust, see avaldub pinge ja elastse deformatsiooni suhtena. Elastsusmoodul näitab, kui suur pinge tekib materjalis ühikulise suhtelise pikenemise korral [<http://et.wikipedia.org/wiki/Elastsusmoodul>] (28.05.2010).

4. Katsete tulemused

4.1 Keemilise analüüsi tulemus

Keemiline analüüs oli vajalik hüdraulilisuse mooduli m määramiseks. Tulemused on tabelis 4.1. Tabelis on alles jäetud ainult need andmed, mida on vaja hüdraulilise mooduli määramiseks. Hüdraulilisust iseloomustava mooduli m arvutamiseks kasutatakse järgmist valemit (ЧМЫРЬ 1990):

$$m = \%CaO / (\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3)$$

Tabel 4.1 Röntgenfluoresentsanalüüs, pulberpreparaat, standardivaba fundamentaalparameetrite meetod, kaaluprotsentides.

Proovi päritolu	Põletamise t°	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
Riigi karjäär	1000	1,17	3,59	51,95	0,93
Riigi karjäär	900	1,14	3,69	52,35	0,94
Mergel	1000	2,11	6,20	45,30	1,12
Mergel	950	1,86	5,98	48,30	0,99
Mergel	900	1,62	4,61	48,01	0,95
Mõisaküla	1000	1,78	5,69	47,56	1,21
Mõisaküla	950	1,30	4,17	53,08	1,06
Mõisaküla	900	1,30	4,17	49,40	0,96
Trass	950	0,49	1,65	59,37	0,60

Vastavalt tabelile, saab öelda, et väide “kõrgematel temperatuuridel tekib rohkem aluminaate (Al₂O₃) ja ferraate (Fe₂O₃)” (Balkstein 2007) on õige. Arvutatud hüdraulilisuse moodulid on välja toodud tabelis 4.2

Tabel 4.2 Erinevate lupjade hüdraulilisuse moodulid

Proovi päritolu	Põletamise t°	Hüdraulilisuse moodul
Riigi karjäär	1000	9,13
Riigi karjäär	900	9,08
Mõisaküla	1000	5,48
Mõisaküla	950	8,13
Mõisaküla	900	7,68
Mergel	1000	4,80
Mergel	950	5,47
Mergel	900	6,69
Trass	950	21,67

Hüdraulilise lubja puhul $m = 1,7 \dots 9$. Kui moodul on alla 1,7 on savi palju, kui on üle 9 on tegemist õhklubjaga.

4.2 Mahumuutuse ühtluse määramise tulemus

Tardumisel vees visuaalseid muutusi katsekehades ei toimunud. Pragusid ei tekkinud.

1) Riigi karjääri lubi (joonised 4.1 ja 4.2) 20 päeva pärast vees hoidmist.



Joonis 4.1 Katsekeha A1 pärast 20 päeva vees olemist



Joonis 4.2 Katsekeha A2 pärast 20 päeva vees olemist

1) Mõisküla karjääri lubi (joonised 4.3 ja 4.4) 20 päeva pärast vees hoidmist.



Joonis 4.3 Katsekeha B1 pärast 20 päeva vees olemist



Joonis 4.4 Katsekeha B2 pärast 20 päeva vees olemist

4.3 Painde- ja survetugevus

Tabel 4.3 Katsekehade numbrid, koostised ja vahekord

Katsekeha number	Mördi komponendid	Komponentide suhe
1a	Mõisaküla lubi(17.04)/lubi „merest“/liiv	0,5:0,5:3
1b	Sõelumata Mõisaküla lubi (17.04)/lubi „merest“/liiv	0,5:0,5:3
2	Riigi karjääri lubi(17.04)/lubi „merest“/liiv	0,5:0,5:3
3	Riigi karjääri lubi(17.04)/liiv	1:3
4	Mõisaküla lubi(17.04)/liiv	1:3
5	„Trassi“ lubi/liiv	1:3
6	Riigi karjääri lubi(21.04)/liiv	1:3
7	Mergel/liiv	1:3
8	Mõisaküla lubi(21.04)/liiv	1:3
9	Mõisaküla lubi(22.04)/liiv	2:5
10	Riigi karjääri lubi(21.04)/liiv	2:5
11	„Trassi“ lubi/liiv	2:5

4.3.1 Paindetugevus

Erinevate katsekehade paindetugevused ja elastsusmoodulid on välja toodud tabelis 4.4. Esimene number (1...11) näitab katsekeha koostist. Täht ν tähendab, et katsekeha oli kivistunud mitte ainult õhus, vaid ka vees (24 tundi). Tabelitest on näha, et tugevust see ei mõjutanud.

Tabel 4.4 Katsekehade paindetugevused ja elastsusmoodulid 20 päevaselt

	Katsekeha number	Kõrgus (mm)	Laius (mm)	Maksimaalne jõud (N)	Paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)
1	1a	40	40	335,0949	0,79	656,73
3	1a	40	40	291,3424	0,68	483,45
4	1a	40	40	363,4677	0,85	430,42
5	1a	40	40	331,4777	0,78	476,96
6	2	40	40	347,7602	0,82	533,18
7	2	40	40	269,7223	0,63	772,47
8	2	40	40	273,6837	0,64	-45,94
9	1b	40	40	351,2759	0,82	224,16
10	1b	40	40	358,0967	0,84	627,46
11	3	40	40	541,7819	1,27	139,39
12	3v	40	40	544,7628	1,28	963,66
13	3v	40	40	549,328	1,29	-----
14	4	40	40	581,9662	1,36	1087,61
15	4v	40	40	582,3846	1,36	457,93
16	4v	40	40	588,2587	1,38	517,2
17	5	40	40	284,5563	0,67	422,68
18	5	40	40	305,577	0,72	-68,34
19	5	40	40	302,2675	0,71	308,39
20	6	40	40	401,5453	0,94	0,31
21	6v	40	40	363,3795	0,85	1104
22	6v	40	40	373,2263	0,87	983,89
23	7	40	40	359,8021	0,84	452,24
24	7v	40	40	249,268	0,58	467,94
25	7v	40	40	293,3265	0,69	893,2
26	8	40	40	415,1573	0,97	423,34
27	8v	40	40	445,627	1,04	883,35
28	8v	40	40	375,1163	0,88	280,64
29	9	40	40	453,2791	1,06	691,18
30	9v	40	40	449,5248	1,05	258,53
31	9v	40	40	469,3681	1,1	1046,05
32	10	40	40	419,4427	0,98	777,86
33	10v	40	40	337,3839	0,79	2241,59

34	10v	40	40	372,0221	0,87	-----
35	11	40	40	351,3562	0,82	519,27
36	11	40	40	348,0771	0,82	864,13
37	11	40	40	286,4724	0,67	426,97

4.3.2 Survetugevus

Erinevate katsekehade survetugevused on välja toodud tabelis 4.5.

Tabel 4.5 Katsekehade survetugevused 20 päevaselt

	Katsekeha number	Laius (mm)	Paksus (mm)	Maksimaalne jõud (N)	Survetugevus (MPa)
1	11	62,5	40	4437,04	1,775
2	11	62,5	40	4431,4	1,773
3	11	62,5	40	4385,78	1,754
4	11	62,5	40	3867,98	1,547
5	11	62,5	40	3767,11	1,507
6	11	62,5	40	4505,62	1,802
7	10	62,5	40	4923,25	1,969
8	10	62,5	40	4689,42	1,876
9	10v	62,5	40	4229,82	1,692
10	10v	62,5	40	3990,51	1,596
11	10v	62,5	40	4328,53	1,731
12	10v	62,5	40	3985,48	1,594
13	9	62,5	40	5992,6	2,397
14	9	62,5	40	6229,24	2,492
15	9v	62,5	40	5284,89	2,114
16	9v	62,5	40	5385,59	2,154
17	9v	62,5	40	5266,12	2,106
18	9v	62,5	40	4187,07	1,675
19	8	62,5	40	4168,46	1,667
20	8	62,5	40	4354,05	1,742
21	8v	62,5	40	3854,85	1,542
22	8v	62,5	40	4127,96	1,651
23	8v	62,5	40	3627,06	1,451
24	8v	62,5	40	3475,8	1,39
25	7	62,5	40	2686,01	1,074
26	7	62,5	40	2807,95	1,123
27	7v	62,5	40	2656,81	1,063
28	7v	62,5	40	2882,27	1,153
29	7v	62,5	40	2213,84	0,886
30	7v	62,5	40	3042,07	1,217
31	6	62,5	40	5538,45	2,215
32	6	62,5	40	5724,48	2,29

33	6v	62,5	40	4766,08	1,906
34	6v	62,5	40	5341,69	2,137
35	6v	62,5	40	4971,69	1,989
36	6v	62,5	40	4828,62	1,931
37	5	62,5	40	3552,77	1,421
38	5	62,5	40	3480,46	1,392
39	5	62,5	40	2854,71	1,142
40	5	62,5	40	3556,23	1,422
41	5	62,5	40	3536,48	1,415
42	5	62,5	40	3587,38	1,435
43	4	62,5	40	6983,67	2,793
44	4	62,5	40	7660,5	3,064
45	4v	62,5	40	7341,68	2,937
46	4v	62,5	40	5896,33	2,359
47	4v	62,5	40	5714,83	2,286
48	4v	62,5	40	5598,23	2,239
49	3	62,5	40	6982,12	2,793
50	3	62,5	40	8031,44	3,213
51	3v	62,5	40	6774,71	2,71
52	3v	62,5	40	7030,43	2,812
53	3v	62,5	40	7391,02	2,956
54	3v	62,5	40	6970,79	2,788
55	2	62,5	40	3603,54	1,441
56	2	62,5	40	3839,65	1,536
57	2	62,5	40	3488,79	1,396
58	2	62,5	40	3459,44	1,384
59	2	62,5	40	3116,93	1,247
60	2	62,5	40	3509,75	1,404
61	1b	62,5	40	4127,98	1,651
62	1b	62,5	40	4268,79	1,708
63	1b	62,5	40	3314,24	1,326
64	1b	62,5	40	4005,41	1,602
65	1a	62,5	40	3456,37	1,383
66	1a	62,5	40	2591,68	1,037
67	1a	62,5	40	2786,8	1,115
68	1a	62,5	40	2919,54	1,168
69	1a	62,5	40	3217,34	1,287
70	1a	62,5	40	2482,28	0,993
71	1a	62,5	40	3111,35	1,245
72	1a	62,5	40	3129,43	1,252

Ühe ja sama koostisega mörtide tugevused on nii suure erinevusega, sest nad on katsetatud survele peale paindetugevuse määramist, mille tulemusena proovikehades võiksid tekkida lisapinged ja proovikehad on murenenud erinevalt. Hüdraulilist lupja klassifitseeritakse vastavalt survetugevusele: NHL 2, NHL 3,5 ja NHL 5, kus number

näitab minimaalset survetugevust (MPa) peale 28 päevast kivistumist. Survetugevuste järgi tehtud katsetes ei ole mitte ükski lubja klass kõrgeim kui NHL 2 (2-7 MPa). NHL 2 klassile pretendeerivad „Mõisaküla“ lubi ja „riigi“ lubi.

Võrreldes retsepte 1:3, kus sideaineks kasutati Mõisaküla karjääri lubja, on näha, et 900°C juures põletatud lubjakivid andsid parema tulemuse, kui 1000°C juures põletatud. Sama võib öelda ka riigi karjääri lubjas kohta.

Kokkuvõte

Paekivi on Eesti rahvuskivi. Huvi paekivi vastu on viimase kümne aasta jooksul tublisti tõusnud. Arhitektide ja restauraatorite huvi paest kui ehitus- ja taastamismaterjalist väljendub uute ja korrastatud paeehitiste järjest suurenevas hulgas.

Lubi jaguneb õhkclubjaks ja hüdrauliliseks lubjaks. Õhkclubi kivistub õhu süsihappegaasi toimel. Hüdrauliline lubi kivistub õhus ja võib jätkata kivistumist ka vees. Hüdrauliline lubi kivistub kiiremini ja tugevamaks, kui õhkclubi. Hüdraulilisuse annavad lubjale lubjakivides sisalduvad saviühendid, mis sai tõestatud ka teostatud katsetega.

Saaremaalt toodud lubjakivi tükkidest valmistati lubi. Neid analüüsiti keemiliselt, põletati ja kustutati ning valmistati katsekehad. Keemilise analüüsi alusel arvatati lubjade hüdraulilisuse moodulid ning selgus, et mõned katsetatud kivimitest sobivad tõesti loodusliku hüdraulilise lubja valmistamiseks. Selgus ka, et hüdraulilise lubja omadused sõltuvad põletamise temperatuurist. Mida kõrgem on temperatuur, seda rohkem aluminaate ja ferrate tekib. Nendest sõltub omakorda hüdraulilisuse moodul, mis näitab, kas tegemist on õhkclubja või hüdraulilise lubjaga. Tõestati, et hüdrauliline lubi muutub mahus ühtlaselt - koogikujulised proovikehad ei pragunenud ega deformeerunud vees hoidmisel.

Mõnedes kirjalikes allikates oli väidetud, et hüdraulilise lubja põletamiseks piisab 800°C. Katsete põhjal selgus, et 800°C juures põletatud lubjakivi ei hakanud kustuma. Katse ei õnnestunud ka põletamisaja pikendamisel. Katsed õnnestusid aga kõrgema temperatuuri puhul. Kõige paremate tugevusnäitajatega katsekehade lubi põletati 900°C juures. 1000°C juures katse õnnestus samuti, kuid 900°C juures olid näitajad veidi paremad.

Katsekehade painde- ja survetugevuse katsete alusel võib öelda, et kõige paremini sobivad hüdraulilise lubja valmistamiseks riigi ja Mõisaküla karjääri kivimid. Sobilik temperatuur hüdraulilise lubja põletamiseks on 900°C.

Summary

Limestone is the national stone of Estonia. During the last ten years interest in the limestone has risen considerably. Interest of architects and restorers in the limestone as a building and restoration material is seen as the quantity of new and restored lime buildings increases.

Lime is divided to air lime and hydraulic lime. Air lime hardens in the air and can continue hardening in the water. Hydraulic lime hardens faster and also becomes stronger than air lime. Lime has its hydraulicity thanks to the clay compounds in the limestone, this was proved by conducted tests. Lime was made out of limestone pieces that were brought from Saaremaa. These pieces were chemically analyzed, burnt and slaked, then the test bodies were made. On the basis of the chemical analysis the hydraulicity modules were calculated and it became clear that some of the tested rocks are fit for production of natural hydraulic lime. It also turns out that properties of hydraulic lime depend on the burning temperature. The higher the temperature the more ferrates and aluminates will emerge. A hydraulicity module that shows if it's air or hydraulic lime depends on the quantity of ferrates and aluminates. It was proved that hydraulic lime changes in volume evenly – cookie-shaped test bodies didn't crack or deform while being in the water.

Some written sources claim that 800°C is enough for burning hydraulic lime. The tests show that a limestone burnt at 800°C can't be slaked. The test didn't succeed even when the burning time was extended. The test succeeded with a higher temperature. Test bodies with the best strength parameters were burnt at 900°C. The test also succeeded at 1000°C but the parameters at 900°C were a little bit better.

On the basis of test bodies' bending and compressive strength parameters it can be said that the best rocks to produce hydraulic lime are the rocks from state's and Mõisaküla quarries. The appropriate temperature for burning hydraulic lime is 900°C.

Kasutatud kirjandus

1. Perens H., Paekivi Eesti ehitistes 1, 2003
2. Arold I., Raukas A., Viiding H. Geoloogia alused, 1987
3. Viiding H., Eesti mineraalid ja kivimid, 1984
4. Säätvad ehituslahendused, <http://www.ehituslahendused.ee/miks.php>
5. Skramtajev B.G., Popov N.A, Gerlivanov N.A. ja Mudrov G.G, Ehitusmaterjalid, Tõlge Arvo Veski, 1951
6. Kalkputs 2. Riksantikvarieämbetet och statens historiska museer, RAPPORT RAÄ 1984
7. Muinsuskaitseamet, <http://www.muinas.ee/vvfiles/0/20%20Lubi%20I.pdf>
8. Veebiõpik kaevandamisest, rakendusgeoloogiast ja geotehnoloogiast mäendusõpik, <http://www.mi.ttu.ee/opik>
9. Åkesson K., Lubimört 1, tõlge Lea Täheväli Stroh, 2003
10. Gibbons P., „Preparation and use of lime mortars, 2003
11. Balksten K., Kalkputs. Porstrukturens betydelse för beständighet. Licentiatavhandling. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 2005
12. Mürk L., Lümända leiukoha karbonaatkivimite kasutamine lubjatoormena, lõputöö 2008
13. AS Limex-i lehekülg <http://www.limex.ee>
14. Gotlands kalk, Riksantikvarieämbetet och statens historiska museer, Rapport raä 1987:7
15. MTÜ Porkuni, <http://www.porkuni.ee/?op=body&id=66>
16. Воробьев В.А., Комар А.Г., Строительные материалы, 1971
17. Чмырь В.Д., Матерьялы для отделочников- строителей. Материалы для малярных и штукатурных работ, 1990
18. Balksten K., Traditional Lime Mortar and Plaster, 2007
19. Волженский А.В., Минеральные вяжущие вещества, 1986
20. Helves H., Ajaliiliste lubimörtide uurimise analüütilisi probleeme, 1996
21. Spiegel, R., Green building materials. A guide to product selection and specification, 1999.

22. Jänes T., Saaremaa Mõisakülakivikarjääri savikate lubjakivide potentsiaal loodusliku hüdraulilise lubja toorainena, 2006.
23. Lubja põletamine, Eesti riiklik kirjastus, toimetajad A. Mutt, M. Aardma, 1950
24. Bournazel J., Yves Malier, Micheline Moranville Regourd, 1998, Concrete, from Material to Structure RILEM Publications
25. Uuetalu A., Lubimörtide püsivusomaduste parandamise võimalused, 2003
26. Martin E. Weaver, Conserving buildings, 1997
27. Klotšánov P., Suržanenko A., 1969
28. Kiviste M., Ehitusmaterjalid: laboratoorsete tööde juhend, 2009

Lisad

Lisa 1. Etiketid koos kasutusjuhendi ja tootja andmetega



LUBJAPASTA SAAREMAA LUBI

KASUTAMINE: lubivärvi (segada lahus vahekorras 1:3 (1 kg pastat ja 3 liitrit vett) ja lubjavee (vahekord 1:10) valmistamiseks ja kasutamiseks kultuur-ajaloolistel ja haldushoonetel ning elamutel. Põllumajandushoonete desinfitseerimiseks, viljapuude lupjamiseks. Desinfitseerimisel ja valgendamisel valmistada lahus vahekorras 1:1.

KULU: Pasta kulu u. 0,5–1 kg/m² (1–3 käsitlemiskorra järel). Kulu sõltub värvitava aluspinna iseloomust.

KASUTAMISJUHEND: Uued, värvimata pinnad puhastada mustusest, tolmust ja lahtisest materjalist. Varem lubivärviga värvitud pinnalt kõrvaldada vana värv terasharjaga või survepesu meetodil kuuma veega. Krohvipinna parandamist või uuendamist teha ümbritsevatele pinnale vastava tasasusega, kasutades sama karedusega ja sama lubja, liiva ning tsemendi vahekorraga segu. Lubivärvi ei soovitata tsementkrohvipindadele. Pinnad, mida ei taheta värvida (aknaklaasid, metallpinnad, looduslik kivipind) katta kinni enne värvimist.

VÄRVIMISTINGIMUSED: Värvitav pind peab olema puhas ja kõva, värvitava pinna ja õhu temperatuur üle 5°C, õhu suhteline niiskus 50–90%. Mitte värvida eredas päikesevalguses ega vihmase ilmaga.

TÖÖRIISTADE PUHASTAMINE: Lupjamiseks kasutatud hari pesta peale töö lõpetamist äädikhappe lahusega ja loputada puhta veega.

KESKKONNAKAITSE: Vältida toote sattumist kanalisatsiooni, pinnasesse ja veekogudesse.

OHUTUSNÕUDED: Kanda sobivaid silmade ja näo kaitsevahendeid. Pritsmete silmesattumisel loputada kohaselt rohke veega ja pöörduda arsti poole.



Xn

SÄILITAMINE: Piiramata säilimisajaga, hoida suletud nõus temperatuuril üle 0°C.

TÖÖOHUTUS: kanda silmade ja näo kaitsevahendeid. Pritsmete silmasattumisel loputada koheselt rohke veega.

AS LIMEX, 93301 Lümända, Saare maakond. **1.2kg**
Tel: 515 6165, faks: 457 6380. www.limex.ee

SAAREMAA KASUTAMINE

Известковая паста для окраски оштукатуренных поверхностей изготовлена традиционным способом из отборного известняка путем обжигания его с последующим гашением.

Применение: фасады исторических общественных и административных зданий, жилых домов, дезинфицирование сельскохозяйственных сооружений, побелка плодовых деревьев.

Расход: для краски готовится раствор в пропорциях 1:3 (паста:вода) при дезинфицировании или побелке в пропорциях 1:1. При отделочной окраске расход паста около 0,5–1 кг/м² с нанесением 1–3 слоев.

Способ применения: неокрошенные ранее поверхности очищают от загрязнений, пыльных прилипших частиц. Поверхности, окрашенные ранее известковыми красками, очищают от старой краски металлической щеткой из нержавеющей стали или отбивают горячей водой под давлением. Исправление или обновление оштукатуренной поверхности следует производить в соответствии с имеющейся отделкой, используя раствор известняка и цемента, дающими такую же шероховатость поверхности. Известковую краску не рекомендуется наносить на поверхности цементной штукатурки. Поверхности не подлежащие окраске, накрывают до начала окрасочных работ.

Условия покраски: окрашиваемая поверхность должна быть чистой и твердой, температура поверхности и воздуха более 5°C, относительная влажность воздуха 50–90%. При ярком солнечном свете или дожде покраску не производят.

Очистка инструмента: щетку, использованную для побелки, после работы промывают раствором уксусной кислоты и прополаскивают в чистой воде.

Защита окружающей среды: не допускать попадания известки в канализацию, водоемы и на почву.


Меры безопасности: использовать индивидуальные средства защиты кожи, глаз и дыхательных путей. При попадании известки в глаза немедленно промывать их водой.

Срок хранения: в закупоренных емкостях при температуре выше 0°C время хранения не ограничено.

LUBJAPASTA

Saaremaa

Lubi®



Traditsioonilisel meetodil põletatud ja kustumatud lubjapasta.
Kasutatakse restaureerimistöodel lubivärvide, lubimörtide ja lubikrohvide valmistamiseks.
Hoida külmumast!

kg

AS LIMEX, 93301 Lümända, Saare maakond. Tel: 515 6165, faks: 457 6380, www.limex.ee

KASUTAMINE: lubivärvi (segada lahus vahetorras 1:3 (1 kg pastat ja 3 liitrit vett) ja lubjavee (vahetord 1:10) valmistamiseks ja kasutamiseks kultuur-ajaloolistel ja haldushoonetel ning elamuil. Põllumajandushoonete desinfitseerimiseks, viljade lubjamiseks. Desinfitseerimisel ja valgendamisel valmistada lahus vahetorras 1:1.

KULU: Pasta kulu 0,5–1 kg/m² (1–3 käsitlemiskorra järel). Kulu sõltub värvitava aluspinnala iseloomust.

KASUTAMISVIIS: Uued, värvimata pinnad puhastada mustusest, tolmust ja lahtisest materjalist. Varem lubivärviga värvitud pinnalt kõrvaldada vana värv terasharjaga või survepesu meetodil kuma veega. Krohvipinna parandamist või uuendamist teha ümbritsevale pinnale vastava tasasega, kasutades sama karedusega ja sama lubja, liiva ning tsemendi vahetorraga segu. Lubivärvi ei soovitata tsemendikrohvipindadele. Pinnad, mida ei taheta värvida (aknaklaasid, metallpinnad, looduslik kivipind) katta kinni emme värvimisega.

VÄRVIMISTINGIMUSED: Värvitav pind peab olema puhas ja kova, värvitava pinnaga õhu temperatuur üle 5°C, õhusuhteline niiskus 50–90%. Mitte värvida eredas päikesevalguses ega vihmase ilmaga.

TÕÕRISTADE PUHASTAMINE: Lujamiseks kasutatud hari pesta pesale töö lõpetamisel äädikhappe lahusega ja loputada puhta veega.

KESKKONNAKAITSE: Vältida toote sattumist kanalisatsiooni, pinnasesse ja veekogudesse.



OHUTUSNÕUDED: Kanda sobivaid silmade ja näo kaitsevahendeid. Pritsmete silmesattumisel loputada kohaselt rohke veega ja pöörduda arsti poole.

SÄILITAMINE: Pihramata säilimisajaga, hoida suletud nõus temperatuuril üle 0°C

TÕÕHUTUS: Kkanda silmade ja näo kaitsevahendeid. Pritsmete silmasattumisel loputada kohaselt rohke veega.