

Vilppu Nieminen

Kivimuurin korjaussuunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

27.11.2015

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Vilppu Nieminen Kivimuurin korjaussuunnittelu 74 sivua + 3 liitettä 27.11.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Toimitusjohtaja Juhani Pentinmikko Tutkintovastaava Timo Leppänen
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli koota ja muokata luonnonkivimuurien korjaussuunnittelussa tarvittavaa tietoa oppaaksi, jolla uusi korjausrakennesuunnittelija pääsee käsiksi kivirakenteiden suunnittelun perusteisiin.</p> <p>Luonnonkivimuureille, joissa useat muuttujat vaihtelevat ei ole olemassa suunnittelustandardia tai selkeää ohjeistusta, toisin kuin useimmille muille rakenteille. Suunnittelijalle jää siksi paljon vastuuta ja harkittavaa.</p> <p>Opinnäytetyössä koottiin kiviin liittyvää suunnittelussa tarvittavaa materiaalitietoa, sekä tietoa erilaisten muurien rakenteellisesta käyttäytymisestä kuormituksen alaisena.</p> <p>Koska luonnonkivimuurit ovat sisäiseltä geometrialtaan monimutkaisia ja rakennustavoiltaan vaihtelevia, ei opinnäytetyöhön voitu koota selkeitä lukuarvoja tai kertoimia eri muuttujien merkityksille lujuuslaskennassa. Kuitenkin niiden vaikutuksia pyrittiin käsittelemään, jotta suunnittelija saa käsityksen siitä kuinka rakenteen suunnitteluarvoja voidaan määritellä.</p> <p>Tuloksena syntyi ”käsikirja” muurien rakenteellisista ominaisuuksista ja korjaussuunnittelun perusteista uudelle muurien suunnittelun pariin tulevalle henkilölle.</p>	
Avainsanat	kivi, kivimuri, muuri, luonnonkivi, korjausrakentaminen

Author(s) Title	Vilppu Nieminen Renovation Design of Stone Walls
Number of Pages Date	74 pages + 3 appendices 27 November 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil engineering
Specialisation option	Structural engineering
Instructors	Juhani Pentinmikko, Managing Director Timo Leppänen, Head of Degree Programme
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to prepare a "design manual" on the basic principles of the renovation of natural stone walls.</p> <p>Due to several variables in stone wall structures, there is no design standard available, unlike for most of the other structures. This leaves a lot of responsibility and consideration for the structural designer. Therefore this thesis was aimed to help new structural designers to get started with design process. Furthermore, solutions are suggested how to carry out the renovation and repair work. This thesis includes the basic material information of stones and mortars, as well as assessment principles for different kinds of natural stone walls.</p> <p>Due to the complex internal geometry and structural variety of stone walls, there are numerous variables which can have an effect on the strength of stone walls. Unfortunately it was not possible to give simple numerical values for the separate factors which can influence the stability of stone walls. The effects of these factors were, however, examined in order to suggest solutions how to assess the design values of stone walls.</p> <p>As a result, an instruction manual dealing with the basic principles of stone wall renovation was compiled for young structural designers.</p>	
Keywords	stone, natural stone wall, renovation, structural design

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kivimuureista	2
3	Yleisimmät kivimuurityypit	4
3.1	Pyörökivimuuri eli maakivi- tai peltokivimuuri	4
3.2	Kylmämuurit eli kuivamuurit	4
3.3	Saumatut kylmämuurit	5
3.4	Laastilla muuratut kivimuurit	6
3.5	Kuorimuurit	6
3.6	Valumuurit	7
3.7	Verkkomuurit	8
3.8	Paasikivimuurit eli harkkomuurit tai rustikamuurit	9
3.9	Harkkosekamuuri	10
3.10	Tukimuurit	10
4	Yleisimmät muurien vauriot	11
4.1	Laastin vauriot	11
4.2	Halkeamat	11
4.3	Pullistumat, kallistumat ja muut liikkeet	12
4.4	Sortumat	12
5	Vaurioiden kartoitus	14
6	Kiven hankinta	16
7	Muurin lujuuteen vaikuttavia ominaisuuksia	17
7.1	Kivi	18
7.1.1	Puristuslujuus	21
7.1.2	Tiheys	21
7.1.3	Kimmokerroin eli kimmomoduuli	22
7.1.4	Vetolujuus	22
7.1.5	Huokoisuus ja vedenimukyky	23
7.1.6	Muita kiven ominaisuuksia	24
7.2	Laasti	24

7.2.1	Kalkki (K)	27
7.2.2	Hydraulinen kalkki (Kh)	28
7.2.3	Sementti (S)	29
7.2.4	Runkoaine	30
7.2.5	Vesi	30
7.2.6	Laastin sekoitus	31
7.3	Työ	31
7.3.1	Kuorien sidonta	35
7.3.2	Kiven työstö	37
8	Kivimuurien rakenteellinen mitoitus	38
8.1	Muurattujen rakenteiden mitoitusohjeiden soveltaminen luonnonkivirakenteille	42
8.2	Pohjapaine	44
8.3	Kokonaisvakavuus	44
8.4	Reunajännitys	46
8.5	Muurin sisäinen mitoitus	48
8.6	Muurin kriittinen korkeus	52
8.7	Leikkausjännitys	52
8.8	Aukkojen katekivet	53
8.9	Kylmämuurit	54
8.10	Kaariholvit	55
8.11	Tukimuurit	58
9	Muurin yleisimpiä korjaus- ja vahvistustapoja	63
9.1	Saumaus	63
9.2	Syvätäyttö, syväsaumaus	64
9.3	Muurin uudelleen kokoaminen	66
9.4	Muita toimenpiteitä	67
10	Perustaminen	69
11	Vesikatteet ja pintaveden ohjaus	70
12	Yhteenveto	73
	Lähteet	74
	Liitteet	
	Liite 1. Suomen kivilajeja	

Liite 2. Kivilajien esiintyminen Suomen kallioperässä

Liite 3. Tukimuurin korjausesimerkki

Lyhenteet ja käsitteet

ICE	Insinööriliitto Yhdistyneissä Kuningaskunnissa. Institution of Civil Engineers.
Kiilakivi	Pieni kivi, jota käytetään isompien kivien tukemiseen ja kolojen täyttämiseen muurissa.
Lustasuunta	Kallion luonnollinen halkeamissuunta.
Massiivimuri	Muuri, jonka koko poikkileikkaus kantaa kuormia.
MEXE	Sillan kantokyvyn arviointiin kehitetty menetelmä. The Military Engineering eXperimental Establishment.
Rautasauma	Saumausraudalla tasoitettu laastisauma.
RIL	Rakennusinsinööriliitto, tässä työssä viittaa sen julkaisuihin.
Sidekivi	Muurin kuoria toisiinsa sitova, kuoresta toiseen ulottuva kivi.
SILKO	Sillan korjausohje. Tiehallintoviraston julkaisuja.
Sydän	Katso ydin.
Ydin	Valumuurin laastista ja täytekivistä muodostuva sisus, jota ei saa kuormittaa.

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää kivimuurien rakenteellisiä ominaisuuksia pääasiassa korjausrakentamisen tarpeisiin. Tavoitteena on koota ohjeistusta kivimuurien suunnitteluun, korjaukseen ja rakentamiseen.

Suomenkielistä kivimuurien rakentamiseen ja suunnitteluun keskittyvää ohjeistusta on ollut hajanaisesti saatavilla, ja sitä on jouduttu etsimään eri lähteistä pieninä palasina. Siksi työssä pyritään kokoamaan ja muokkaamaan suunnittelussa tarvittavaa tietoa yhteen paikkaan.

Luonnonkivimuureille ei ole olemassa suunnittelustandardia, kuten esimerkiksi teräsbetoni- tai puurakenteille. Muurattujen rakenteiden suunnitteluohjeet soveltuvat luonnonkivirakenteille vain osittain, sillä kivimuureissa ”muurauskappaleen”, eli kiven koko, muoto, tukipinnat, laastisauman paksuus ja muoto, sekä materiaalien lujuudet poikkeavat tiilirakenteille tehdyistä taulukoista. Siksi muurattujen rakenteiden suunnitteluohjeiden suora soveltaminen ei yleensä ole mahdollista. Tämä jättää kivimuurien suunnittelijalle paljon vastuuta ja miettimistä.

Tässä opinnäytetyössä kootaan pääasiassa kirjallisuustutkimuksena kivimuurien suunnitteluun tarvittavia lähtöarvoja, keskeisiä rakennustyön periaatteita ja lujuuslaskentamalleja. Valitettavasti käytännön rasituskokeita kivimuureissa lukuisien eri muuttujien merkityksestä valmiin rakenteen lujuuteen ei tähän työhön saada liitettyä.

Työssä keskitytään korjaussuunnittelun lähtökohdasta perinteisiin rakennusmenetelmiin. Esimerkiksi betonitaustaa vasten rakentaminen, kivikorit ja laattaverhoukset rajataan tämän työn ulkopuolelle. Vanhat rakenteet poikkeavat usein uusista rakennusta-voista, joten niiden korjaussuunnittelu vaatii erilaista syventymistä ja harkintaa. Perinteisiä menetelmiä voidaan tietenkin soveltaa myös uusien muurien rakentamiseen.

Historialliset ja arkkitehtoniset selvitykset kivirakentamisesta rajataan työn ulkopuolelle, sillä varsinkin kirkkojen ja linnojen historiasta on olemassa paljon kirjallisuutta.

Opinnäytetyö tehdään Insinööritoimisto Pentinmikko oy:n tukemana. Insinööritoimiston erityistä osaamisalaa on vanhojen arvorakennusten korjaussuunnittelu. Työstä toivo-

taan ”käsikirjaa”, jolla uusi korjausrakennesuunnittelija pääsee kivistä rakentamisen periaatteiden lähteille. Erityisesti vanhojen kirkkojen ja linnojen korjaussuunnittelun yhteydessä joudutaan perehtymään myös kivistä rakenteisiin.



Kuva 1. Vanhan navetan korjausta [3]

2 Kivimuureista

Kivimuurit ovat varhaisimpia ihmisten käyttämiä rakenteita. Muureja ei perinteisesti ole suunniteltu insinöörityönä, vaan rakentajat ovat tehneet niitä kokemuksen perusteella yrityksen ja erehdyksen kautta. Heikoimmat muurit ovat sortuneet jo rakennusvaiheessa, ja vahvimmat ovat säilyneet tuhansia vuosia. Materiaalina hyvälaatuinen kivi on lähes ikuista, mutta työn laatu hyvien maaperäolosuhteiden ohella ovat ratkaisevia tekijöitä muurien lujuudelle.



Kuva 2. Nubian 1200 eaa. rakennetut pyramidit Sudanissa. [27]

Suomen vanhimmat kivilinnat ja kirkot ovat peräisin varhaiskeskiajalta. Ne ovatkin vanhinta säilynyttä rakennuskantaa. Esimerkiksi Turun ja Viipurin linnojen rakentaminen aloitettiin 1200-luvun lopulla. Kivestä rakennetut kartanot, kaupunkirakennukset ja navetat maaseudulla, kanavat ja kisivillat ovat myös merkittävää rakennushistoriaa.



Kuva 3. Jomalan kirkko Ahvenanmaalla on Suomen vanhin muurattu rakennus. [kuva Wikipedia]

3 Yleisimmät kivimuurityypit

Kivimuureja voidaan rakentaa erilaisista kivistä monella tavalla, jolloin myös muurien rakenteessa on suuria eroja. Muureja voidaan jaotella rakenteellisesti tai ulkonäöllisesti. Siksi jako ei ole tarkka, vaan sama muuri voidaan jaotella useammallakin tavalla. Tavallisimpia muurityyppejä on lueteltu seuraavassa:

3.1 Pyörökivimuuri eli maakivi- tai peltokivimuuri

Pyörökivimuureissa kiveä ei ole muokattu, vaan ne on tavallisesti laastin ja kiilakivien kanssa muurattu lähistöltä löytyneestä luonnon muovaamasta kivistä.



Kuva 4. Pyörökivimuuria Hämeenlinnassa.

3.2 Kylmämuurit eli kuivamuurit

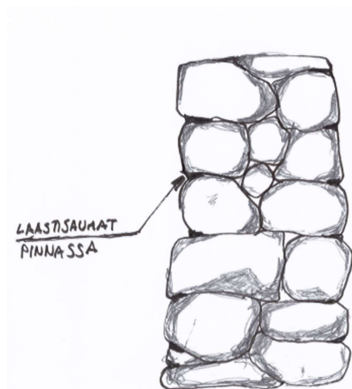
Kylmämuurilla tai kuivamuurilla tarkoitetaan ilman laastia koottua muuria, joka pysyy koossa pääasiassa kitkavoiman ja mahdollisten mekaanisten sidosten avulla. Kestävän kylmämuurin rakentaminen vaatii käytettävästä kivistä riippuen voimakasta työstämistä. [14.]



Kuva 5. Kylmämuuria 1200-luvulta Zimbabwea [27]

3.3 Saumatut kylmämuurit

Saumattut kylmämuurit ovat nimensä mukaisesti kylmämuureja, joissa voi olla esimerkiksi ulkonäöllisistä syistä tai tiivisteenä veden pääsyä muuriin estämässä laastisaumat muurin pinnassa. Tällainen sauma ei kuitenkaan ulotu kovin syvälle muurin sisään. Rakenteellisesti muurin toiminta perustuu tavallisen kylmämuurin tavoin kivien väliseen kitkaan, eikä laastille oleteta siirtyvän kuormia. Saumoissa tulee käyttää pakkasen kestävää laastia. [9 s.5-6.]

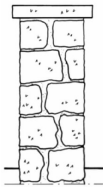


Kuva 6. Saumattu kylmämuuri

3.4 Laastilla muuratut kivimuurit

Laastilla muuratut kivimuurit muistuttavat rakenteelliselta toiminnaltaan eniten tiilestä muurattuja rakenteita, vaikkakin saumojen ja muurauskiven lujuus, koko ja muoto saattavat vaihdella. Kivet muurataan pakkasenkestävällä laastilla, joka tasaa muurin kuorimituksia ja tiivistää rakennetta. RT ohjekortti muureista ohjeistaa muuraamaan kivet laastin kanssa 10-50 mm:n saumalla ilman välitöntä kosketusta toisiinsa. Tällöin muurin lujuus perustuu laastin ominaisuuksiin. [9.]

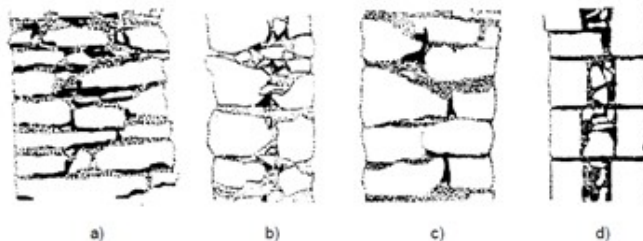
Kivet voidaan laastimuureissakin asentaa RT kortin ohjeesta poiketen myös kosketuksiin toistensa kanssa, kuten jäljempänä erikseen esitetyissä valumuureissa.



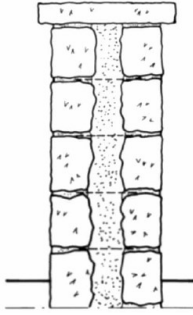
Kuva 7. Laastin kanssa muurattu kivimuuuri [9]

3.5 Kuorimuurit

Kaksipuoleiset muurit valmistetaan tavallisesti kahdesta kantavasta kivikuoresta, joiden välissä voidaan käyttää täytteenä esimerkiksi laastia, kiveä, hiekkaa, tiiltä tai betonia. Kuorien väli voidaan rakenteesta riippuen myös jättää täyttämättä. Kuoret voidaan sitoa toisiinsa sidekivillä, teräsiteillä tai laastilla, kuten alempana erikseen esitellyssä valumuurissa, joka myös luokitellaan kuorimuuriksi.



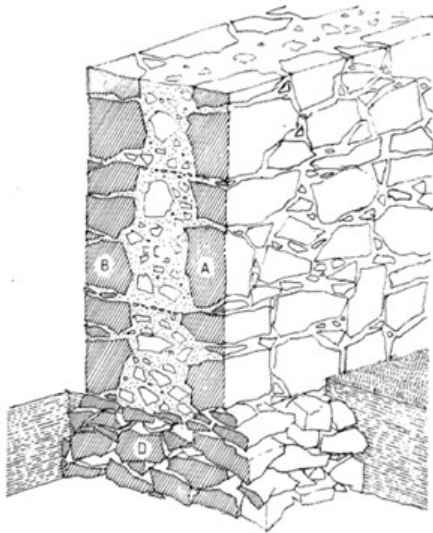
Kuva 8. Erilaisia muurin poikkileikkauksia: a) massiivimuuuri, b) kaksikuorinen muuri ilman limitystä, c) kaksikuorinen limitetty, d) kolmikerroksinen. [12]



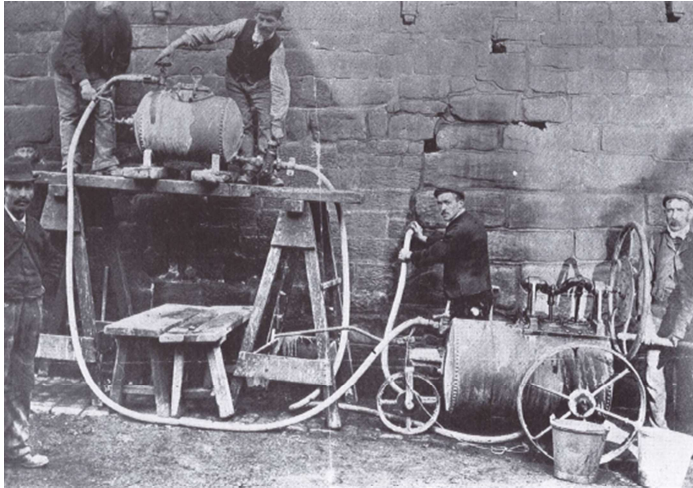
Kuva 9. Ruostumattomilla teräsiteillä vahvistettu kuorimuuri [9]

3.6 Valumuurit

Vanhojen keskiaikaisten kirkkojen ja linnojen rakentamisessa yleisimmin käytetty tekniikka, jossa muurin sisä- ja ulkopintaan työstetään ja ladotaan runkona toimivat kuoret. Sydän valetaan täyteen laastia ja pienempää kiveä siten, että sydänosassakin ovat kivet kosketuksissa toisiinsa ja laasti pursuaa naamakivien saumoihin. Kantavana osana toimivat kuorien muurikivet ja kiilakivet niiden välissä. Valettua ydintä ei saa kuormittaa. [14, s.37.]

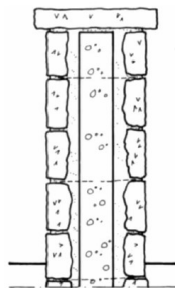


Kuva 10. Vanhan valumuurin rakenne. A. pintamuri, B. taustakuori, C. sydänosa, D. perustus. [24]



Kuva 11. Muurin valutyö käynnissä. [29 s.157]

Uusia muureja rakennetaan myös esimerkiksi betonielementtiä vasten, ja väli täytetään betonilla juottamalla tai maakostealla betonilla. Tällaiset rakenteet ovat ominaisuuksiltaan lähempänä betoniseinää, joten tässä opinnäytetyössä ei niiden rakenteellista toimintaa käsitellä tarkemmin. Kiviseinä voi toimia myös betoniseinää vasten itsenäisenä kantavana kuorena, jos sitä ei valeta kiinni betoniin.



Kuva 12. Teräsbetonirakenteen ympärille tehty kivimuri [9]

3.7 Verkkomuurit

Lohkomalla työstetyistä vaihtelevan muotoisista kivistä rakennettuja muureja, jossa pyritään yleensä tasaleveisiin ja mahdollisimman ohuisiin saumoihin. Vaakasauvoja pyritään välttämään. Verkkomuuuri voi olla joko kylmämuuri tai laastilla muurattu.



Kuva 13. Uutta paikalla louhitusta kivistä rakennettua verkkomuuria Viikissä. [3]

3.8 Paasikivimuurit eli harkkomuurit tai rustikamuurit

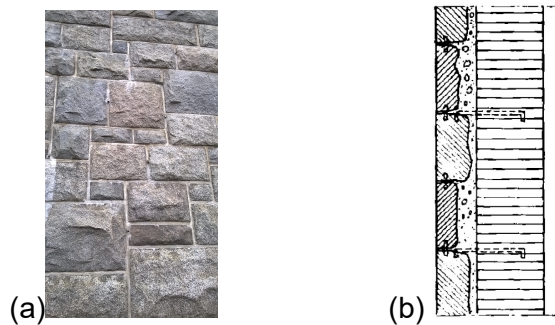
Suurista lohkotuista kivipaasista rakennettu muuri, jossa on jatkuvat vaakasaumat. Suomessa harkkomuurit yleistyivät vasta 1800-luvulla kaupunki- ja kartanorakentamisen myötä [14]. Paasikiviä on käytetty paljon mm. navettojen seinissä ja rantamuureissa.



Kuva 14. Harkkokivinavetan liikkunut seinä [21]

3.9 Harkkosekamuuri

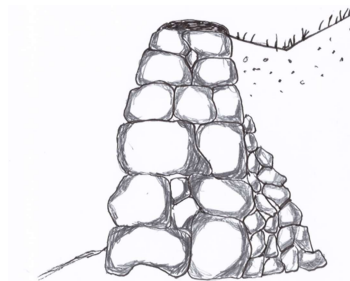
Erikokoisista ja muotoisista kiviharkoista muurattava muuri, jossa yhtenäiset pysty- ja vaakasaumat pyritään katkaisemaan. Harkkosekamuuri rakennetaan yleensä laastin ja terässiteiden avulla ei-kantavaksi verhoukseksi, koska osa kivistä on pieniä. Säännöllisen muotoiset kivet on myös helppo muurata ja saumata raudan avulla. Suomenkielissä lähteissä käytetään harkkosekamuurista joskus myös hämäävää nimitystä rubblemuuri.



Kuva 15. (a) Kallion kirkon muuri Helsingissä. (b) Kiviverhouksen takana on tiilimuuri [23].

3.10 Tukimuurit

Tukimuureja käytetään tukemaan maamassoja. Niiden on kestettävä sivuttaista maanpainetta, ja joskus myös veden ja jään aiheuttamaa painetta tai nostetta esimerkiksi rantavalleissa. Uudemmissa tukimuureissa kivimuuri saattaa olla vain verhouksena esimerkiksi betonisen tukimuurin edessä, jolloin taustan vaakakuormat ottaa vastaan taustan teräsbetonirakenne.



Kuva 16. Tukimuuri

4 Yleisimmät muurien vauriot

Suomessa eniten vaurioita muureihin aiheuttaa veden routiminen perustuksissa ja muurien sisään jäävissä lätäköissä. Tämä aiheuttaa painetta rakenteeseen, mikä synnyttää liikettä saumoihin, halkeilua ja laastin rapistumista. Laastin rapistuessa rakenteeseen pääsee yhä enemmän vettä ja vaurioituminen nopeutuu. [14.]

4.1 Laastin vauriot

Laasti on huomattavasti kiveä huokoisempaa ja heikompaa. Se imee itseensä kosteutta ja on alttiimpi pakkasvaurioille. Veden aiheuttama eroosio kuluttaa laastista sideainetta. Myös muurin liikkeet vaurioittavat kiveä heikompaa laastia, missä suurin osa muurin halkeilusta tapahtuu.

4.2 Halkeamat

Halkeamat johtuvat muurin liikkeistä. Perustusten painumat aiheuttavat muuriin pystysuuntaisia ja vinoja halkeamia. Osa muurin halkeamista ja painumista saattaa olla jo kauan sitten tapahtuneita, joten korjauksen suunnittelun kannalta on oleellista tietää jatkuuko liikkuminen edelleen.

Kasvillisuus vaurioittaa muureja kasvattamalla juuria saumoihin, ja siten laajentamalla rakoja. Muurissa kasvavat kasvit ja sammal ovat myös merkinä kosteudesta. [14.]



Kuva 17. Myös kasvillisuus vaurioittaa muureja. [31 s.10]

4.3 Pullistumat, kallistumat ja muut liikkeet

Kallistumat muurissa johtuvat tavallisesti perustusten vaurioista tai maapohjan painumisesta. Halkeilun ja kallistumisen etenemistä voidaan seurata mittaamalla muuriin merkittyjä kiintopisteitä tai esimerkiksi kipsisilloilla. Myös muurin perustamistapa on syytä selvittää ennen suurempiin toimenpiteisiin ryhtymistä.

Pullistumat muureissa ovat tavallisesti seurausta muuriin kerääntyneen veden routimisesta vaakasuuntaan. Vaarallisimpia muurin vakaudelle ovat pullistumat muurin alaosassa. [14], [19.]



Kuva 18. Repeämä muurin holvissa. Bastioni Seth Suomenlinnassa. [kuva Insinööritoimisto Pentinmikko]

4.4 Sortumat

Rakennuspohjan routiminen tai kuivuminen saattaa aiheuttaa perustusten painumista ja vastaavia vaurioita. Muureja on rakennettu savimailla myös puupaalujen ja hirsiriinoiden varaan, joiden lahotessa myös muuri painuu ja vaurioituu.

Sortunutta muuria voidaan koota uudelleen, mahdollisesti uusille tai vahvistetuille perustuksille. Oikean korjaustavan valitsemiseksi pitäisi vaurion laajuus sekä vaurioitumisen aiheuttaja ja syy selvittää mahdollisimman luotettavasti.



Kuva 19. Salaojituksen jälkeen sortunut navetan seinä. [3]

Muita vaurion aiheuttajia ovat myös muuttuneet kuormitukset joko käytön tai muuriin liittyvien rakenteiden, esimerkiksi kattorakenteiden vaurioitumisen tai siirtymien takia.



Kuva 20. Siteeksi käytetty terästappi laajenee ruostuessaan ja vaurioittaa kiveä. [29 s.172]



Kuva 21. Epätasaisen kattokuorman aiheuttama kallistuma ja halkeama Porvoon tuomiokirkon muurissa. [32 s.84]

5 Vaurioiden kartoitus

Muurien vauriot paljastuvat yleensä silmämääräisessä tarkastelussa. Muurin vakauteen liittyvät vauriot, kuten pullistumat, siirtymät, sortumat ja halkeilu ovat helposti havaittavissa; samoin laastisaumojen pintavauriot ja kosteus. Valumuurin ytimen ja laastisaumojen syvempien osien kunnan havaitseminen vaatii jonkin verran avauksia. Myös kuorimuurien välisten sidosten ja kivien välisten kitkapintojen arvioiminen onnistuu vain rakenteita avaamalla.

Vaurioiden lisäksi tutkitaan niiden aiheuttaja ja syy. Aiheuttaja saattaa olla esimerkiksi jäätyvä vesi, mutta oikean korjaustavan valitsemiseksi on oleellista selvittää syy miksi vesi pääsee ja kerääntyy rakenteeseen. Jos itse syytä ei korjata, on tehtävän korjauksen hyöty lyhytaikainen.

Historiallisesti arvokkaiden muurien korjaus vaatii omat kulttuurihistorialliset selvitykset ja dokumentoinnit, sillä useat vanhat muurit on suojeltu muinaismuistolain mukaan. Historiaselvitykset eivät kuitenkaan yleensä ole rakennesuunnittelijan tehtäviä. [47.]



Kuva 22. Laastisaumojen kuntoa voidaan tarkastaa esim. harjateräksellä tötkkimällä. [43]

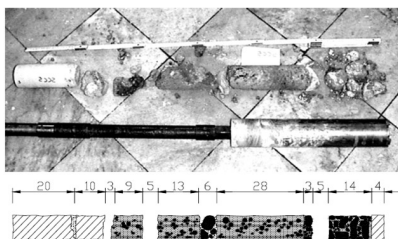
Muurien tarkastuksiin voidaan käyttää tilanteeseen sopivia menetelmiä, mutta tärkeimpiä ovat silmämääräiset tarkastukset sekä halkeilun ja liikkeiden seuranta. Myös saumojen laastin ja vedenohjauksen seuranta on oleellista. Laastin rapautumista tutkitaan raaputtamalla ja piikkaamalla huonoa laastia irti. Näin saadaan käsitys siitä kuinka syvälle muuriin korjaukset tulisi ulottaa.



Kuva 23. Halkeilun etenemisen seuranta [30 s.63]

Laastien vauriot voivat johtua useista eri syistä, joista tavallisin ovat kosteus. Jos suurempia laastikorjauksia tulee tehtäväksi, on vanhojen laastien ominaisuuksia mahdollista selvittää laboratoriotesteillä. Niillä voidaan selvittää laastin side- ja runkoaineen koostumus, lujuus ja muita ominaisuuksia.

Perustuksiin ja tukimuureihin liittyvissä ongelmissa tarvitaan myös geoteknistä suunnittelua. [14], [19], [47.]



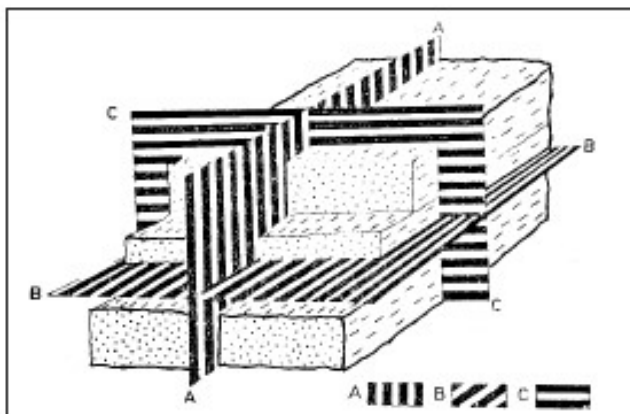
Kuva 24. Kairausnäyte vanhasta muurista [13]

6 Kiven hankinta

Muurin rakentamiseen tai korjaamiseen tulee varata riittävästi hyvälaatuista rakennuskiveä, jotta työmaalla on mahdollista suorittaa valintaa ja työstöä. Kiven tulee olla puhdasta, eli ylimääräistä savea, multaa, sepeliä tms. ainesta ei saa olla kiven seassa. Mahdollisimman suuren osan työmaalle tulevasta kivistä on oltava käyttökelpoista.

Vanhojen muurien korjauksissa käytettävän uuden kiven tulee yleensä olla ulkonäöltään ja laadultaan mahdollisimman lähellä alkuperäistä. Siksi on hyvä käyttää mahdollisuuksien mukaan läheltä saatavaa paikallista kiveä, kuten aikoinaan on tehty. Mikä tahansa louhe ei kuitenkaan sovellu rakennuskiveksi. Räjätettäessä kiviin syntyy halkeilua ja vaikeammin havaittavaa mikrohalkeilua, jotka heikentävät kiven lujuutta. Kivilouhoksilla käytetään hienostuneempia irrotusmenetelmiä kuin useimmilla louhintatyömailla, joilla on tarkoitus vain päästä nopeasti eroon häiritsevistä kalliosta; panokset yms. mitoitetaan eri tavalla.

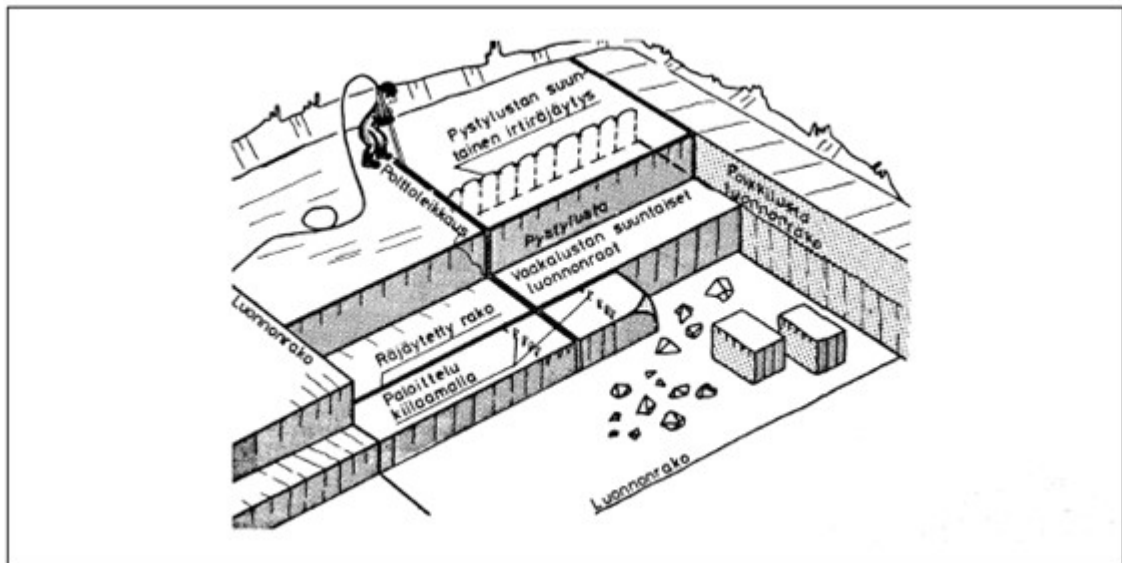
Kunnon rakennuskiveä louhittaessa otetaan lustan suunnat huomioon, jolloin syntyvät pinnat noudattavat kiven luonnollista mineraalien suuntautumista. Tällöin kivessä on valmiiksi käyttökelpoisia pintoja, ja kiven työstäminen on helpompaa. Hyvästä kivistä rakentaminen on nopeampaa ja muurista saadaan lujempi pienemmällä työstämisellä. Huonosta kivistä ei usein synny hyvää muuria mitenkään.



Kuva 25. Kalliolle ominaiset lohkosuunnat. A= pystylusta, B= vaakalusta, C= poikkilusta. [15, s.16]

G. E. Aspin Huonerakenteiden oppi-kirjassa vuodelta 1904 todetaan, että ”kivet on aina veistettävät sillä tavoin, että ne muurissa tulevat samaan asentoon kuin vuoressakin, mutta holveissa ne asetetaan niin, että paino tulee kohtisuoraan lustoa vastaan” [41 s.16]. Tämä onnistuu työmaalla vain hyvälaatuisesta rakennuskivestä.

Pienemmät kaupalliset kivilouhokset ovat käymässä harvinaisiksi samalla kun rakennuskiven tuonti Aasiasta lisääntyy. Siksi sopivan kiven löytäminen korjauskohteisiin voi joskus olla yllättävän hankalaa. Louhintapaikkoja on esitetty liitteessä 2.



Kuva 26. Graniitin louhinta. [15, s.17]

7 Muurin lujuuteen vaikuttavia ominaisuuksia

Kivimuurin rakenteellisiin ominaisuuksiin vaikuttaa pääasiassa materiaalien ominaisuudet ja työn laatu. Oleellista on myös perustustyö sekä routimisen estäminen pohjarakenteessa ja muurin sisällä. Hyvälaatuinen kivi on oikein käytettynä luja ja lähes ikuisen rakennusmateriaali. Määrääväksi ominaisuudeksi lujuudelle ja käyttöiälle tulee yleensä laasti, liittyvät rakenteet tai työn laatu.

7.1 Kivi

Vanhoissa kivimuureissa käytetty kivi on pääasiassa rakennuspaikan läheisyydestä kerättyä tai louhittua, joten kivilaji ja materiaalin laatu usein vaihtelee samassakin muurissa. Kivilajeja harvemmin määritellään työmailla geologisten määritelmien mukaan, joten lähes mitä vain kiveä saatetaan kutsua graniitiksi tai harmaakiveksi mm. värin perusteella. Yleinen kaupallinen luokittelu jakaa rakennuskivet usein karkeasti graniittiin ja marmoriin. Suomessa käytetyt rakennuskivet ovat pääasiassa magmakiviä (esim. graniitti) tai metamorfisia kivilajeja (gneissi).



Kuva 27. Kivilajiltaan vaihtelevaa muuria Halikon kirkossa. [Insinööritoimisto Pentinmikko oy]

Kivilajien lujuudessa on suuria eroja, kuten samankin kivilajin sisällä mm. louhintasuunnasta ja rapautuneisuudesta johtuen. Koska muurin rakentamiseen on usein käytetty erilaisia kivilajeja tai materiaalin ominaisuudet muuten vaihtelevat, joudutaan suunnitteluarvoja arvioimaan materiaalitulukoiden avulla. Rakentamisessa käytetty kivi on tietenkin asentajan mahdollisuuksien mukaan valikoimaa kiveä, mutta riippuen kivikasasta ja työmaasta tämä valinnan mahdollisuus voi olla suurempi tai pienempi. Käytännössä asentajan valinta kohdistuu useimmin kiven kokoon, muotoon ja työstettävyyteen. Siten lujuudeltaan parhaat kivet saattavat myös tulla hylätyiksi vaikeasti työstettävänä. Toisaalta myös rapautuneimmat kivet karsiutuvat rakennusvaiheessa.

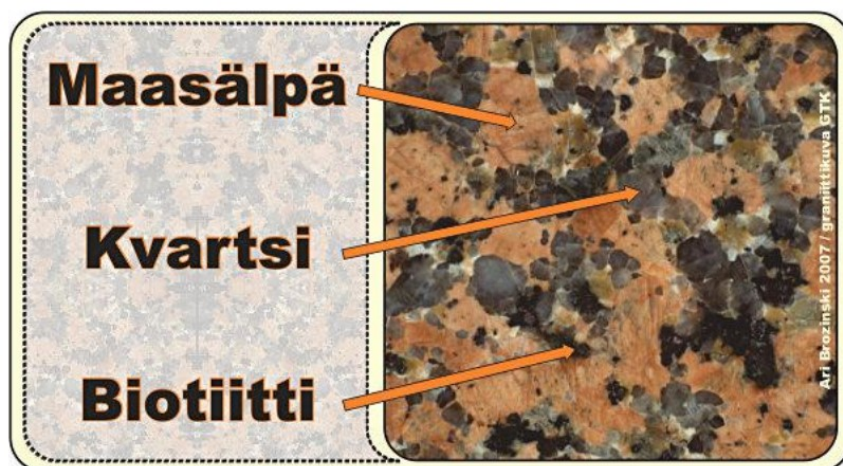
Uudemmissa kivilaatoissa, jotka tulevat suuremmilta louhoksilta, materiaalin määritys ja laadunvalvonta on jo huomattavasti tarkempaa ja SFS standardit on olemassa ainakin nupu-, noppa ja reunakiville. Mikäli muurikivi tulee standardeja noudattavalta louhokselta, voidaan kiven olettaa olevan suhteellisen tasalaatuista. [2, s. 15 ja 35.]

Taulukko 1. Luonnonkiven testausstandardeja.[6]

Ominaisuudet	EN-standardit	Aikaisemmin käytetyt standardit	EN ja DIN -standardien vastaavuus toisiinsa nähden
Tiheys ja huokoisuus	SFS-EN 1936:2006	DIN 52102	Pieniä yksityiskohtaeroja
Vedenimukyky	SFS-EN 13755:2008	DIN 52 103	Pieniä yksityiskohtaeroja
Puristuslujuus	SFS-EN 1926:2006	DIN 52 105	Pieniä yksityiskohtaeroja
Pakkasenkestävyys	SFS-EN 12371:2010	DIN 52 104	Pieniä yksityiskohtaeroja
Kulutuskestävyys	SFS-EN 14157:2004	DIN 52 108	Identtiset
Taivutuslujuus	SFS-EN 12372:2006	DIN 52 112	Pieniä yksityiskohtaeroja

Kiven lujuus riippuu muun muassa kivilajista. Kiven rapautuneisuus, raekoko, suuntautuneisuus ja halkeilu vaikuttavat myös lujuuteen. Kivet voivat olla tasarakeisia tai hajarakeisia eli porfyyrisiä, mikä vaikuttaa mm. työstettävyyteen. Suuntautuneet kivet lohkeavat huomattavasti helpommin liuskeisuuspintojen suuntaan kuin niitä vastaan. Pie-nirakeiset kivet ovat tiiviimpiä ja lujempia kuin suurirakeiset. Kiven huokoisuudella on suuri merkitys pakkasenkestoon. [8.]

Kivilaji määritellään kiven mineraalikoostumuksen avulla, mutta eri kivilajeilla saattaa olla myös sama mineraalikoostumus. Silloin ominaisuudet vaihtelevat kiven syntymsyvyuden ja jähmettymistavan mukaan. Esimerkiksi raskas musta syväkivi gabro ja juonikivi diabaasi voivat olla mineraalikoostumukseltaan samanlaiset. Gabro on karkearakeista ja suuntautumaton, kun taas diabaasin ominaisuudet vaihtelevat sen mukaan, onko se jähmettynyt juonen keskellä vai reunalla. Myös graniitti ja gneissi muodostuvat keskenään lähes samoista mineraaleista.



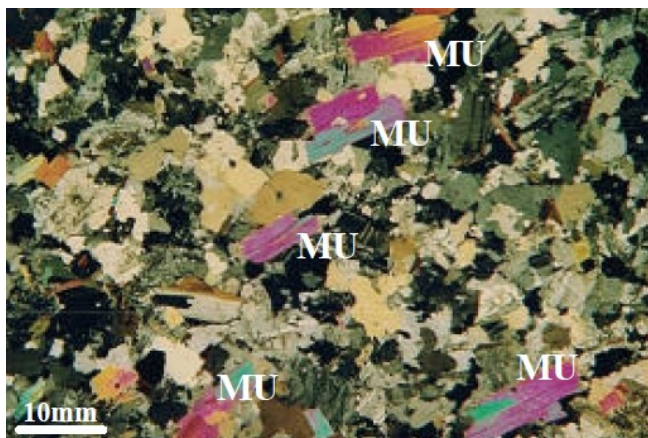
Kuva 28. Graniitin mineraalirakennetta. [24]

Syväkivet ovat syntyneet syvällä maan kuoressa hitaasti miljoonien vuosien aikana kiteytymällä. Mineraaleilla on ollut aikaa hakea paikkansa ja muotonsa, jolloin kivet ovat yleensä selvästi rakeisia eikä niissä ole suuntautumista tai onteloita. [8.]

Syväkivet erotetaan lähinnä niiden värin perusteella vaaleasta tummimpaan (kuvat liitteessä 1) Kivien ominaispaino kasvaa samassa järjestyksessä, ja samalla myös niiden työstäminen muuttuu hankalammaksi

- graniitti
- dioriitti
- gabro
- peridiotiitti.

Jos muurin kivi on lajiltaan yhtenäistä, voidaan geologisella kivilajin määrittelyllä tai koekappaleita koekuormittamalla saada tarkempia arvioita kiven lujuudesta. Usein vaihtelu kuitenkin on niin runsasta, että kovin tarkkaan kivilajien analyysiin ei kannata ryhtyä kuin erikoistapauksissa. Suuntaviivoja voi arvioida kiven ulkonäön perusteella kivilajien ominaisuustaulukoista. Vanhat muurit ovat sijainnista riippuen usein myös tummuneet lian ja ilmansaasteiden takia, joten puhdistamattoman kiven pinta saattaa näyttää yhtenäisen tumman harmaalta, vaikka muuri olisi alun perin ollut hyvinkin kirjava. Siksi ulkonäköön ja kiven väriin perustuvaan arviointiin pitää suhtautua varovaisesti. Rakennushistorian ja paikallisten kiviesiintymien tuntemuksella pääsee lähemmäksi oikeita suunnitteluarvoja.



Kuva 29. Mineraalien suuntautumista graniitissa [4, s.23]

7.1.1 Puristuslujuus

Kiven puristuslujuutta voidaan testata DIN 52105, tai uudemman SFS-EN 1926:2006 standardin mukaan sahatuista 50x50x50mm:n koepaloista kolmeen suuntaan puristamalla. Suomalaisten rakennuskivien puristuslujuus on yleensä niin suuri, että kiven puristuslujuus harvoin tulee määrääväksi muurin kestävyydelle. Kiven puristusrutto on muureissa harvinainen vaurio. Graniitin puristuslujuus vaihtelee 150-300 MPa:n välillä, mikä on moninkertainen lujuus esimerkiksi betoniin verrattuna. Muurin rakenne yleensä myös kestää hyvin muutaman kiven halkeamisen tai murtumisen. Kuten tiilimuureissakin, on muutaman kiven poistaminen muurin keskeltä usein kokonaisuuden kannalta merkityksetöntä, sillä kivet holvaantuvat nopeasti uudelleen löytäessään uusia tukipintoja. Muureissa kuormat ottaa kuitenkin vastaan koko rakenne saumoineen, joten kokonaislujuus on paljon heikompi kuin pelkän kiven lujuus. Normaalisti muurit hajoavat pohjan tai saumojen pettäessä eivätkä niinkään kiven murtumiseen.

Kivilaatu	Brutto- tiheys	Huokoi- suus	Vedenimu- kyky	Puristus- lujuus	Taivutus- vetolujuus	Kulutus- kestävyys (Böhm)	Kovuus	Kimmo- moduuli	Lämmön- johtavuus	Lämpölaaje- neminen
	kN/m ³	til. %	p-%	MN/m ²	MN/m ²	cm ³ /50 cm ²	Mohs	MN/m ² x 10 ³	W/km	1/°C x 10 ⁻⁶
Graniitti	25...28	0,4...1,5	0,1...0,5	160...300	12...20	5...8	6	30...60	0,6...1,0	5...9
Syeniitti	26...29	0,4...1,5	0,1...0,5	160...300	12...20	4...9	5...6	50...60	0,5...0,8	4...7
Gabro	28...30	0,5...1,2	0,1...0,4	170...300	12...22	3...9	5...6	110...130	0,5...0,8	4...7
Dioriitti	28...30	0,5...1,2	0,1...0,4	170...300	12...22	3...9	5...6	110...130	0,5...0,8	4...7
Diabaasi	28...29	0,3...1,1	0,1...0,4	180...280	15...25	5...8	—	—	—	—
Kalkkikivi	17...26	0,5...3,0	0,2...10,0	20...90	5...10	—	3	—	0,3...0,8	3...7
Hiekkakivi	20...26	0,5...2,5	0,2...9,0	30...180	3...15	10...14	5...6	8...20	0,2...0,8	2...7
Gneissi	26...30	0,4...2,0	0,1...0,6	160...280	—	4...10	—	—	—	—
Marmori	26...29	0,5...2,0	0,2...0,6	80...180	6...20	15...40	4	50...80	0,3...0,7	3...6
Liuskeet	25...28	1,0...5,0	0,1...0,5	100...200	10...35	4...15	4...7	10...80	0,2...0,8	2...7
Vuolukivi	29...30	0,1	—	20...30	16...17	—	2...3	30...35	0,6...0,7	20

Kuva 30. Kiven ominaisuuksia kivilajeittain [7, s.18]

7.1.2 Tiheys

Kiven tiheys on yleensä kutakuinkin suhteessa sen puristuslujuuteen, mutta poikkeuksen tekevät ainakin hienorakeiset marmori ja vuolukivi, jotka ovat tiheitä, mutta kestävät monia muita kiviä heikommin puristusta. Suomalaisten kiven ominaispaino on tyyppillisesti 25-30 kN/m³, eli kuutiometri kiveä painaa noin 27 kN. Nyrkkisääntönä voidaan pitää tiheyden kasvamista värin tummuessa. Tietoa kiven tiheydestä tarvitaan rakenteen omaa painoa ja nostokaluston mitoitusta arvioitaessa. Omapaino on kiven tärkeimpiä ominaisuuksia kitkavoimia laskettaessa.

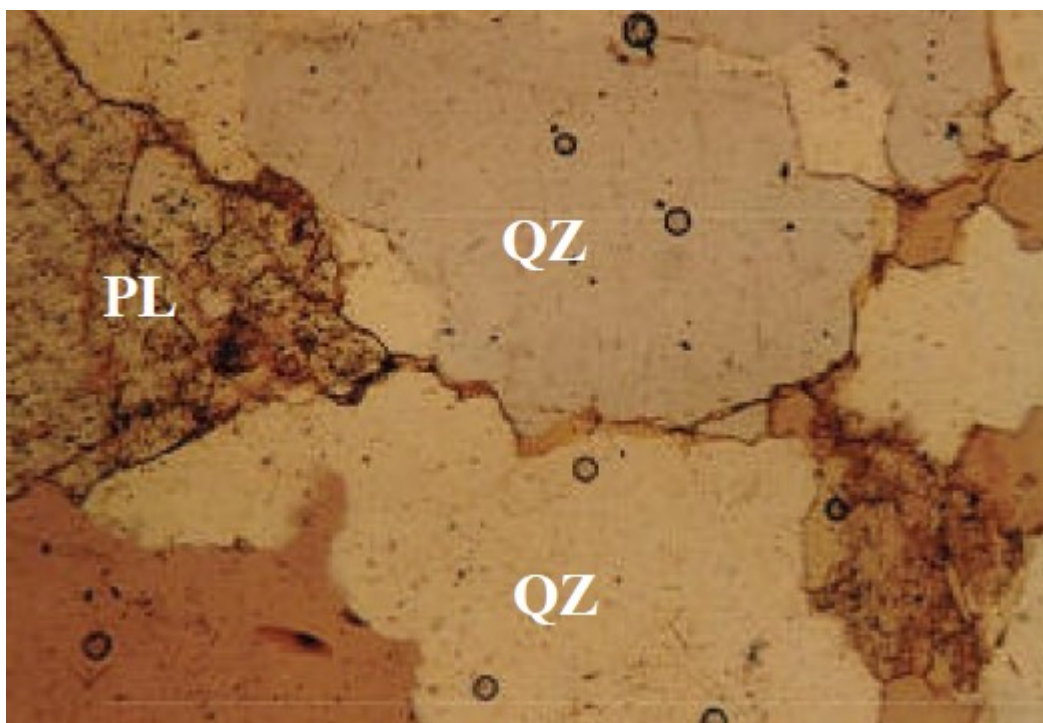
7.1.3 Kimmokerroin eli kimmomoduuli

Kiven kimmokerroin vaihtelee suuresti kivilajista riippuen välillä 30000-110000 MPa. Kiven kimmokerrointa tarvitaan muun muassa kivilaattojen taipumien laskentaan.

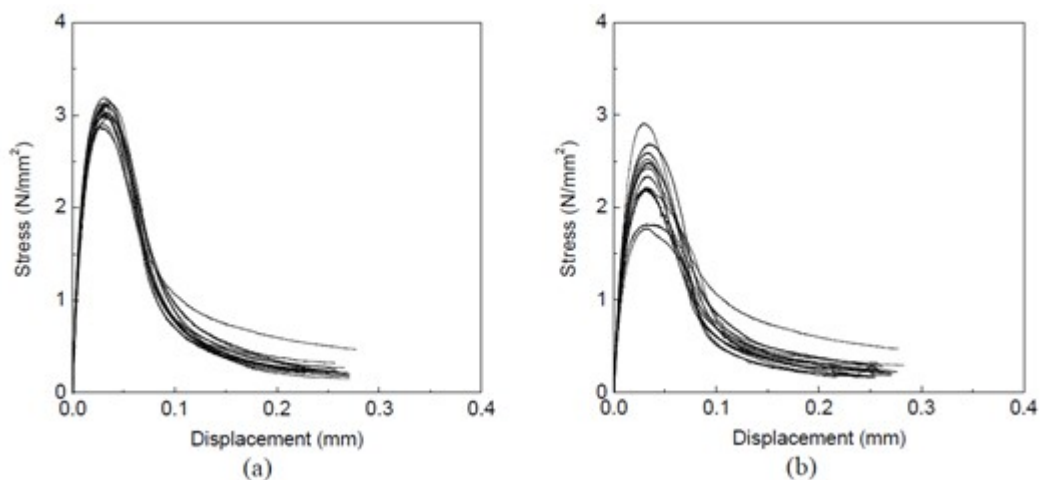
7.1.4 Vetolujuus

Muurattu rakenne ei lähtökohtaisesti kestä vetorasitusta, joten muut tekijät kuten puristuslujuus ja työn laatu tulevat muurien lujuudessa määrääviksi ominaisuuksiksi. Kiven taiputusvetolujuudella on kuitenkin merkitystä muun muassa aukkojen ylityskiviä mitoitettaessa. Kiven halkaisulujuus riippuu kiven vetolujuudesta. Muureissa kiven halkaisumurto on huomattavasti puristumurtoa yleisempi kiven vaurioitumistapa.

Kiven vetolujuuden määrittämisessä on hankaluutena kiven rakenne, jossa kiven mineraalien jakautumisen ja suuntautumisen vuoksi vetolujuus on usein erisuuruinen eri suuntiin mitattaessa. Suuntautuneen mineraalirakenteen rajapinnoissa esiintyy usein mm. kiven lämpömuodonmuutoksista aiheutunutta mikrohalkeilua, joka vaikuttaa kiven lujuuteen. Taiputusvetolujuus testataan koekappaleista standardin DIN 52112:n mukaan, tai uudemman standardin SFS-EN 13161:2008 mukaisesti. [6.]



Kuva 31. Mikroskooppikuvassa näkyy mikrohalkeilu kivessä mineraalien välissä [5, s.24]



Kuva 32. Mineraalien suuntautumisen vaikutusta graniitin lujuuteen kuormituskokeissa, siirtymä rasituksesta [a] leikkauspinnan suuntaan (b) sitä vastaan [5, s.43]

Monista muuttujista johtuen on esimerkiksi graniitin taivutusvetolujuudeksi taulukoitu arvot 6-25 MPa. Vaihtelu on siis hyvin suurta, vaikka graniittia pidetään lähes suuntautumattomana kivilajina. Liuskeilla vastaavat arvot ovat 8-27 MPa.

Lujuuslaskennassa on syytä käyttää vaihtelun runsauden takia enintään matalimpia vetolujuuden taulukkoarvoja, ellei oikean suuntaisilla vetokokeilla pystytä osoittamaan muuta esimerkiksi yksittäisille aukkojen ylityskiville.

7.1.5 Huokoisuus ja vedenimukyky

Kiven huokoisuus ja vedenimukyky vaikuttavat kiven pakkasenkesto-ominaisuuksiin. Riittävän tiivis kivi ei yleensä ime vettä sisäänsä ja kestää siten pakkasta. Useimmat suomalaiset rakennuskivet kestävät hyvin pakkasta.

Vanhojen muurikivien pakkasenkesto-ominaisuuksia ei tarvitse tutkia, ellei erityistä rapautumista ole havaittu. Uusien rakennuskivien pakkasenkestoa mitataan SFS-EN 12371:2010 kokeella. Jos vedenimukyky jää alle 0,5 painoprosentin pidetään kiveä pakkasenkestävänä. Suuremmilla arvoilla tarvitaan lisätutkimuksia vedellä täyttymisasteesta tai kristallisoitokoe.

Taulukko 2. Ruotsin ratahallinnon suunnitteluarvoja kivikaarisiltujen materiaaleille [1 s.3]

Holvikivet			Laasti		
Puristuslujuus	300	MPa	Puristuslujuus ja kimmokerroin lujuusluokan C12/15 mukaan		
Kimmokerroin	66	GPa	Vetolujuus	0	MPa
Kitkakerroin holvikiven ja laastin välillä					0,5
Puristuslujuuden osavarmuuskerroin murtorajatilassa					1,5
Kimmokertoimen osavarmuuskerroin murtorajatilassa					1,2

7.1.6 Muita kiven ominaisuuksia

Kvartsisia ”ukonkiviä” käytettiin navetoiden ja tallien perusmuureissa, sillä kvartsit kestävät hyvin lantaveden aiheuttamaa kemiallista rasitusta [14 s.26].

Kiven muodolla on suuri vaikutus rakennustyöhön ja siten myös lopullisen muurin lujuuteen. Luonnon muovaamilla kivillä on pyöreämmät muodot kuin louhituilla, joten ne pääsevät helpommin kääntymään ja kiertymään rakenteessa. Pyöreää kiveä ei yleensä työstetä paikalleen istuvaksi, joten kosketuspinnat jäävät pienemmiksi, ja siten myös muuria koossa pitävät kitkavoimat. Siksi pyörökivimuurit valmistetaan tavallisesti laastin avulla.

Suuremmalla kivellä saadaan saumojen määrää vähennettyä, mutta toisaalta saumojen suurin leveys tai työstämisen määrä kasvaa helposti. Kiven koolla on suuri merkitys myös nostotekniikkaan. Ns. käsikiviä (engl. *manstone*) voi liikutella käsivoimin, mutta isompiin tarvitaan järeämpää nostokalustoa.

7.2 Laasti

Laastia voidaan käyttää kivimuureissa tiivistämässä rakennetta. Laastia valmistetaan erilaisista sideaineista, runkoaineesta ja vedestä. Kaikilla aineksilla ja niiden välisellä suhteutuksella on osuutensa laastin ominaisuuksiin.

Luonnonkiven puristuslujuus on jopa monikymmenkertainen laastin puristuslujuuteen. Kivimuurissa laasti kantaa kuormia ainoastaan jos kiviä ei asenneta kosketuksiin toistensa kanssa. Näin saatetaan tehdä esimerkiksi harkkokenkämureissa, kuten RT-

ohjekortti 89-10646 ohjeistaa. Tämä on yleinen tapa käytettäessä pientä tai sahattua kiviharkkoa.

Kuitenkaan pääsääntöisesti ei hyvin rakennetussa luonnonkivimuurissa laastilla ole kantavaa merkitystä toisin kuin tiilimuureissa. Niissä tiilen ja laastin kuormituskestävyydet ovat samaa suuruusluokkaa. Toisaalta kivimuuria mitoitettaessa ei laastinkaan puristuskestävyyttä tule ylittää.

Laastin tärkein rakenteellinen merkitys on tiivistää muurin saumat ja kolot. Kun veden pääsy muurin saumoihin ja sisälle estetään laastilla, ei routiva vesi pääse rikkomaan rakennetta. [14 s.37]

Kuitenkaan laastit eivät ole täysin tiiviitä, vaan päästävät jonkin verran vettä lävitseen muun muassa viistosateella. Huokoinen laasti myös päästää kosteutta haihtumaan muurista, valitettavasti usein kuitenkin vähemmän kuin vettä sisään.

Vanhimmissa muureissa käytetty laasti on tavallisesti ollut kalkkilaastia. Korjauksissa tulisi yleensä käyttää alkuperäistä vastaavaa laastia. Kuitenkin vanhoissakin laasteissa on laatueroja epätasaisen seoksen, huuhtoutumisen ja aiempien korjausten vuoksi. Vanhat laastit ovat myös ehtineet kovettua jopa satoja vuosia, joten uuden vastaavan korjauslaastin ominaisuudet poikkeavat myös tältä osin vanhasta.

Restaurointilaasti ei saisi olla vanhaa laastia lujempaa ja tiiviimpää, kuin erityisesti harkittavissa paikoissa. Esimerkiksi voimakas sementtilaasti on liian kovaa. Se ei elä vanhan rakenteen mukana ja saa helposti aikaan uusia vaurioita. Siksi alun perin kalkkilaastilla rakennetun muurin korjauksen yhteydessä vanhojen paikkausten liian sementtipitoinen laasti poistetaan, jos se on helposti irrotettavissa. Luonnonkivimuurien korjauksissa voidaan käyttää hydraulisia kalkkilaasteja tai kalkkisementtilaasteja, kuitenkin pienellä sementtisuhteella. Maanrajassa voi sementtiä olla enemmän sen paremman kosteudenkestävyyden vuoksi. [14 s.30 – 34.]



Kuva 33. Hyvin muhinutta ja sekoitettua kalkkilaastia. [18 s.67]

Kalkkilaastit ovat joustavampia ja kestävät sementtilaasteja paremmin vetorasitusta. Ne myös halkeilevat vähemmän kuivuessaan.

Laasteista käytetään suunnitelmissa normaalia laastin suhdemerkintää, esim.: KKh60/40/650, missä kalkkia on 60 paino-osaa, hydraulista kalkkia 40 paino-osaa ja hiekkaa 650 paino-osaa. Lisäksi ilmoitetaan runkoaineen maksimiraekoko. [17.]

Laastityyppi	Tiheys (kg/m ³)	Huokoisuus (tilavuus-%)	Vesihöyrynläpäisevyys (10 ⁻¹² kg/msPa)	Vedenläpäisevyys (l/m ² vrk)	Puristuslujuus (MPa)	Lämpölaajeneminen (10 ⁻⁶ 1/K)	Lämmönjohtavuus (W/mK)
K-laasti	1700	18–40	20–15	55	3-8	7-9	0,8
KS-laasti	1800	20–35	17–6,5	2,2–7,3	3-15	8-14	0,9
S-laasti	2000	15–30	10-2	2,3	5-15	8-14	1

Kuva 34. Laastityyppien ominaisuuksia [23 s.10]

7.2.1 Kalkki (K)

Kalkkivilouhoksia on ollut muun muassa Sipoossa ainakin 1600-luvulta lähtien. Sieltä louhittiin suuria määriä kalkkikiveä Suomenlinnan laasteihin ja Keravalla 1869 aloittaneen Suomen ensimmäisen sementtitehtaan tuotantoon. [32 s.66.]

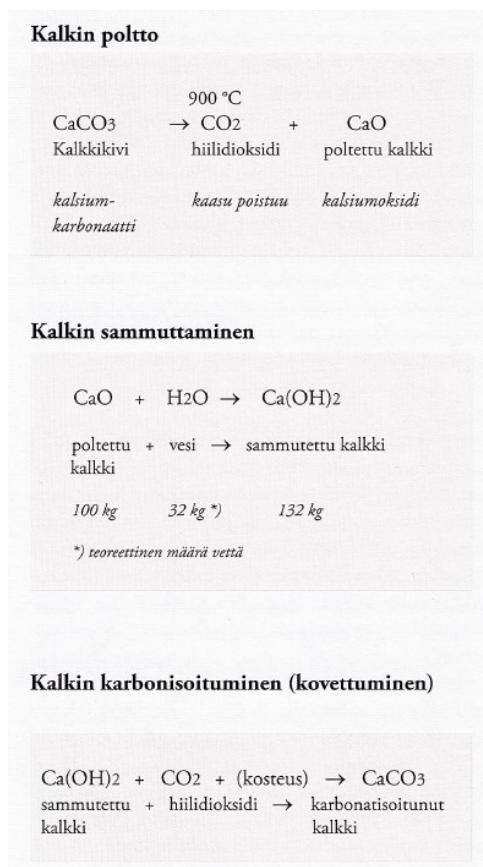
Kalkkia valmistetaan polttamalla kalkkikiveä vähintään 900 asteessa 2-3 päivää. Poltto poistaa kalkkivestä hiilidioksidin. Polton jälkeen kalkki voidaan sammuttaa eri tavoin.

Kuivasammutettu, eli ilmakalkki valmistetaan lisäämällä poltettuun kappalekalkkiin vain vähän enemmän vettä kuin sammuttamiseen teoriassa tarvitaan. Näin syntyy hienojakoista jauhetta. Kuivasammutettu kalkki vaatii kovettuakseen ilmaa ja hiilidioksidia. Siksi sitä voidaan säilyttää ilmatiiviissä astiassa ohuella vesikerroksella peitettynä. Vastaa sementtiä tai hydraulista kalkkia lisäämällä siihen syntyy hydraulisia ominaisuuksia, eli se vaatii kovettuakseen vettä.

Märkäsammutettu kalkki eli hautakalkki valmistetaan käyttämällä poltetun kalkin sammuttamiseen nimen mukaisesti huomattavasti enemmän vettä. Näin syntyy kalkkiliettä, jota seisotetaan useita kuukausia tai jopa vuosia matalassa astiassa tai maa-kuopassa. Vähitellen liete muuttuu kalkkitaikinaksi, jonka vesipitoisuus on n. 60 painoprosenttia. Laasti sisältää suurempia kalkkirakeita kuin kuivasammutettu kalkki, mutta taikina on heti sekoittamisen jälkeen käyttövalmista. [17 s.4], [18.]

Puhdas kalkkilaasti, joka kovettuu ainoastaan hiilidioksidin vaikutuksesta, kovettuu paksun kivimuurin sisässä hyvin hitaasti, tai ei ollenkaan. Siksi puhdas kalkkilaasti ei ole paras ratkaisu valumuurin korjauksiin. Märkä korjauslaastikin routii muurin sisällä saaden aikaan liikettä ja halkeilua. Tiivis luonnonkivi ei ime itseensä kosteutta laastista kuten tiili, joten saumoihin pääsevä kosteus ei tasaannu laastisaumasta. Siksi luonnonkivimuureissa laasti on altis pakkasvaurioille. [18 s.50], [47.]

Kalkkilaasti myös rapautuu happojen vaikutuksesta, joten sitä ei tulisi käyttää eläinsuojissa tai lannan ja virtsan kanssa kosketuksiin tulevilla paikoilla [26 s.106.]



Kuva 35. Kalkkikiven poltto, sammutus ja kalkin kovettuminen kemian kaavoin [18 s.14]

7.2.2 Hydraulinen kalkki (Kh)

Hydraulinen kalkki saadaan polttamalla ja sammuttamalla kalkkikiveä, jossa on savea epäpuhtautena. Hydraulinen kalkki lisää kalkkilaastin lujuutta ja kestävyyttä. Hydraulisia ainesosia sisältävä kalkkilaasti kovettuu reagoidessaan veden kanssa, eli nopeammin kuin puhdas kalkkilaasti. Se kestää myös puhdasta kalkkilaastia paremmin kosteutta. Hydraulinen kalkki kuivuu hitaammin kuin sementti ja sisältää vähemmän hydraulisia ainesosia. Sen loppulujuus on vain puolet sementin loppulujuudesta. Koska hydraulinen kalkkilaasti muistuttaa ominaisuuksiltaan enemmän vanhoja laasteja, se sopii hyvin vanhojen kivimuurien korjaamiseen.

Poltetusta hydraulisesta kalkista käytetään englanninkielistä lyhennettä NHL (*natural hydraulic lime*). Numero lyhenteen perässä viittaa puristuslujuusluokkaan, esim. 5 tarkoittaa puristuslujuutta 5-15 MPa 28 vrk:n iässä. [16.]

Hydraulista kalkkilaastia käytettäessä on ilman ja korjattavan pinnan lämpötilan oltava vähintään +5°C koko työn ajan, ja kaksi viikkoa sen päätyttyä [20].

Kalkkasideaine	Hydraulisia aineosia (paino-%)	Puristuslujuus MPa 28 vrk EN- normin luokitus	
Ilmakalkki	0–8	Ei vaatimuksia	
Lievästi hydraulinen	8–12	Luokka 2	2–7
Hydraulinen	12–18	Luokka 3,5	3,5–10
Voimakkaasti hydraulinen	18–35	Luokka 5	5–15
Luonnonsementti	45–55	Ei tietoa	
Portlandsementti CEM IIA	80–94	Betonin luokitus Luokka 32,5	35–52

Kuva 36. Erilaisten kalkkien ja sementtien hydraulisen aineksen pitoisuus ja puristuslujuus [18 s.19]

7.2.3 Sementti (S)

Sementtilaasti on lujempaa, tiiviimpää ja joustamattomampaa kuin vanhat kalkkilaastit. Sementtilaastin tiiviys voi estää kosteutta pääsemästä ulos rakenteesta. Se ei myöskään ime kosteutta kuten kalkkilaastit, joten rakenteeseen päässyt vesi joutuu imeytymään entistä pienempään tilavuuteen vanhaa laastia. Siksi sementtilaastikorjaukset saattavat vaurioittaa ympäröiviä, myös aiemmin hyvässä kunnossa olleita vanhoja laasteja. Sementtilaastien lämpömuodonmuutokset ovat myös suuremmat kuin kalkkilaasteilla, mikä voi johtaa halkeiluun tai tartunnan peittämiseen. [18 s.52], [25 s.46.]

Voimakkaita sementtilaasteja tulisi välttää vanhojen muurien korjauksissa, mutta uusiin kunnan anturan päälle rakennettaviin muureihin niitä voidaan käyttää.

Vanhoissakin muureissa on käytetty sementtilaasteja, mutta vanhat sementit poltettiin kalkkikivestä matalammassa lämpötilassa kuin nykyiset portlandsementit ja olivat karkeampirakeisia. Tämän takia niiden ominaisuudet muistuttavat enemmän nykyisiä hydraulisia kalkkeja. [18 s.19.]

Myös muuraussementti poikkeaa portland-sementistä. Se on seos hienoksi jauhattua sementtiä ja polttamatonta kalkkikiveä, sekä muutamia lisäaineita. [47.]

Kalkkisementtillaastilla on parempi kosteuden kesto kuin puhtaalla kalkkilaastilla, siksi vähän sementtiä sisältävän laastin käyttö voi olla järkevää kosteusrasitetuissa paikoissa. Tarvittaessa sementtinä voidaan seoksessa käyttää valkosementtiä ja lisäksi käyttää väripigmenttejä, joilla laastin väri saadaan muistuttamaan alkuperäistä laastia. Parhaiten sementtillaastit sopivat uusiin harkkocivimureihin.

7.2.4 Runkoaine

Laastin runkoaineena käytetään sopivan karkeaa hiekkaa ja pakkasenkestävyyttä parannetaan hienojakoisella fillerillä. Hienojakoinen aines täyttää laastiin jääviä pieniä onkaloita ja vaikeuttaa veden pääsyä kovettuneeseen laastiin. Runkoaineen merkitys laastin pakkasenkestävyyteen on suuri varsinkin kalkkilaasteilla. [16.]

Ainakin 1940-luvulla suositeltiin kalkkilaastiin käytettäväksi huokoista tasarakeista hiekkaa, jotta ilma pääsisi myös laastisauman sisäosiin ja parantaisi ilman hiilidioksidin perustuvaa laastin kovettumista [26 s.106].

Laastien valmistuksessa runkoaineen raekokojakaumien vaikutusta laastin ominaisuuksiin ei ole hyödynnetty yhtä hyvin kuin betoniteollisuudessa. Vanhoissa muureissa käytetty lihava kalkkilaasti sisältää suhteessa paljon kalkkia, mutta osa siitä on usein karkeaa ja huonosti palanutta kalkkikiveä. Silloin osa kalkistakin toimii laastissa lähinnä runkoaineena ja osa runsaasta hienojakoisesta kalkista fillerinä. [18.]

Museoviraston valumuurin korjausohje suosittelee kiviaineksen läpäisyprosentiksi 0,125 mm:n seulalla 15-20%:a. Tähän päästään lisäämällä max. $\Phi 4$ mm:n muuraushiekkaan 30% luonnonfilleriä. [47.]

7.2.5 Vesi

Laastiin käytettävän veden tulisi olla puhdasta suolatonta vettä. Oikealla vesimäärällä on suuri merkitys työn kannalta, sekä kiven puhtaana säilymiseen. Liian löysä laasti sotkee kivet, joita on lähes mahdoton puhdistaa jälkikäteen.

7.2.6 Laastin sekoitus

Laastin kunnollinen sekoittaminen on oleellista hyvän lopputuloksen aikaansaamiseksi. Laastiin tulisi saada ilmaa 5-8 %:a. Sekoittamiseen suositellaan tasosekoitinta tai porakoneeseen kytkettävää lautassekoittajaa. Alkusekoitus voidaan tehdä myös betonimyllyllä, mutta sen jälkeen tulisi käyttää vielä porakonesekoitinta. Vanhemmat ohjeet suosittavat betonimyllyä käytettäessä lisäämään rumpuun nyrkinkokoisia kiviä. [18], [26], [47.]



Kuva 37. Laastityöt vaativat talvella sääsuojauksen ja lämmityksen.

7.3 Työ

Muuten on kivi asetettava niin, että se lepää "maollansa", eikä kiiku viereisten kivien nojalla, sillä silloin se saattaa tunkea viereisiä kiviä sivulle ja siten heikentää muuria [41 s. 17].

Rakennustyön laatu on merkittävin muurin ulkonäköön ja lujuuteen vaikuttava tekijä. Kivimuurista saadaan tiivis ja luja hyvällä sommittelulla, kivien työstämisellä paikalleen tarkemmin sopiviksi sekä kiilakiviä oikein käyttämällä. Muurin rakentajalta vaaditaan ymmärrystä tarvittavista kivien tuki- ja naamapinnoista sekä niiden suunnista. Nostotekniikan hallinta, eli kiven painopisteen arvioiminen oikeassa asennossa tapahtuvaa

kiven nostoa varten on oleellinen osa muurin rakennusta. Myös hyvät pohjatyöt ja perustukset ovat oleellinen osa muurin rakentamisessa.



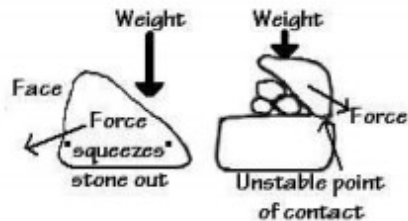
Kuva 38. Bulkeley Bridge työn alla Connecticutissä [5, s.7]

Kiven suuntautuminen ja työstettävyys hakkaamalla ovat merkittäviä aikatauluun ja muurin ulkonäköön vaikuttavia ominaisuuksia, mutta hankalampaakin kiveä voi halkaista mm. poraamalla ja kiilaamalla. Kiven lujuusominaisuudet vaihtelevat kiven mineraalien suuntautumisen mukaan, mutta yleensä muuria rakentava kivimies keskittyy kiven geometriaan ja kokoon, joten kiven suuntautumista mietitään vain muodon ja työstämisen kannalta. Siksi suhteellisen tasalaatuisestakin kivistä tehdyissä muureissa kiven lujuusominaisuudet usein vaihtelevat asennussuunnan mukaan.

Muureissa yleensä pyritään suhteellisen tasapintaiseen julkisivuun, josta ei pistä teräviä särmiä ulos. Vielä tärkeämpää on, että muurin sisään ei saisi jäädä kovin kaltevia vaakasaumoja, jotka lisäävät rakenteen sisäisiä vaakavoimia ja heikentävät koko muuriin lujuutta. Tätä on esitetty kuvassa 36.

Kivet sommitellaan lujaksi rakenteeksi ottaen huomioon niiden muoto, koko ja työstettävyys. Pitkiä yhtenäisiä pystysaumoja pyritään katkaisemaan, jotta kivet holvaantuisivat paremmin toisiinsa. Tavoitteena on, että jokaisessa risteyskohdassa kohtaisi vain kaksi saumaa, sillä useat samassa kohdassa risteävät saumat heikentävät muuria. Usein sama asia ilmaistaan suosituksella, että ylempi kivi tukeutuisi kahteen alempaan

kiveen. Tämä siksi, että kivimuri lähes aina murtuu saumoistaan, ja tällaisessa solmukohdassa niitä keskittyy useita pienelle alueelle. Kuitenkin isoimpien kivien tulisi olla muurin alaosassa. Muurit rakennetaan hieman ylöspäin ohentuviksi, jotta kivien painopisteet eivät karkaa ulospäin. [3.]



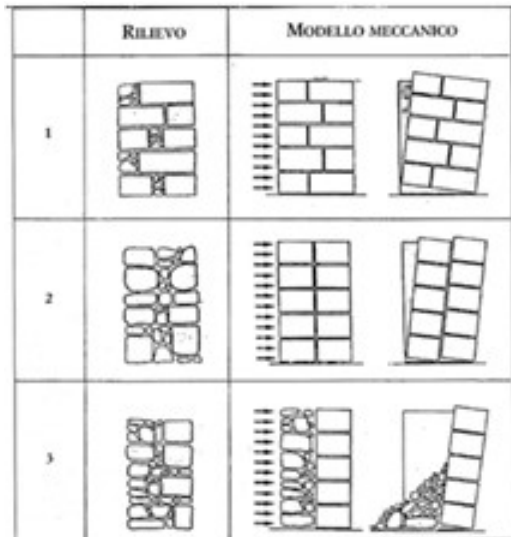
Kuva 39. Esimerkkejä huonosta kiviasennuksesta: Vasemmalla kuorma puristaa puutteellisesti työstetyn kiilamaisen kiven ulos muurista, oikealla riittämätön kiven pohjapinta ja kömpelö kiilaus, joka laakeroi kiven. Tällöin pystykuorma puristaa ulos muurista. [42]

Ylemmän ja alemman kiven väliin pitäisi saada aikaiseksi riittävä kosketuspinta kiven tasapainoa ja sivusuuntaista kitkavoimaa varten. Riippuen kiven koosta ja painopisteestä sen tulisi olla ainakin kolmannes syvyysuuntaisesta mitasta. Yleensä lujin muuri saadaan kun kivet makaavat pisimmällä sivullaan siten, että kiven pisin sivu on muurin syvyysuuntaan. Jos kosketuspinnan riittävyys epäilyttää, voidaan joissain paikoissa käyttää esimerkiksi ruostumattomia harjateräksiä siteenä. Aiemmin käytettiin sulaan sinkkiin tai pikeen kastettuja rauta-ankkureita, tai kiviin hakattuun lohenpyrstöliitosta muistuttavaan koloon kaadettavaa sulaa lyijyä. Käytännössä kivien väliset tartunnat sijoittelee kivimies tarpeen mukaan työn edetessä, siksi myös asentajan on ymmärrettävä mitkä kohdat saattavat olla kriittisiä.

Kaksikuorisessa muurissa myös muurin läpi ulottuvat sidekivet vaikuttavat huomattavasti rakenteen kestävyys. Valmiista muurista niiden osuutta ei näe ilman rakenteen avausta.



Kuva 40. Kiila-ankkurit helpottavat kiven nostoa.



Kuva 41. Kuorien limityksen merkitys rakenteen toiminnalle. Poikkileikkaus vasemmalla. Rakennemalli ja toiminta kuormituksessa oikealla. [13]

Käytettävät kiilakivet lyödään tiukasti koloihinsa, eivätkä ne saa jäädä heilumaan. Kiilakivien tulisi olla sopivan kokoisia koloonsa, eikä kiilakiviä kiilata toisilla kiiloilla. Joskus valujen yhteydessä voidaan käyttää myös asennuksen aikaisia puu- tai teräskiiloja.

Työn onnistumiseen vaikuttaa käytettävissä olevan kiviaineksen ohella myös tekijän ammattitaito, aikataulu, nostokalusto, työmaan olosuhteet sekä useat inhimilliset tekijät: Kokenut ammattilainenkin saattaa tehdä räntäsateella kovassa kiireessä ja huonolla hinnalla mutaisesta kiviläjästä, edellisen palkan jäätyä saamatta varsin erilaisen muurin kuin rauhassa kauniina alkukesän päivänä hyvin toimivalla työmaalla. Tällaisten muutujien merkitystä kivimuurin lujuudelle on tutkittu valitettavan vähän, mutta ne on syytä ottaa huomioon muuria rakennettaessa.



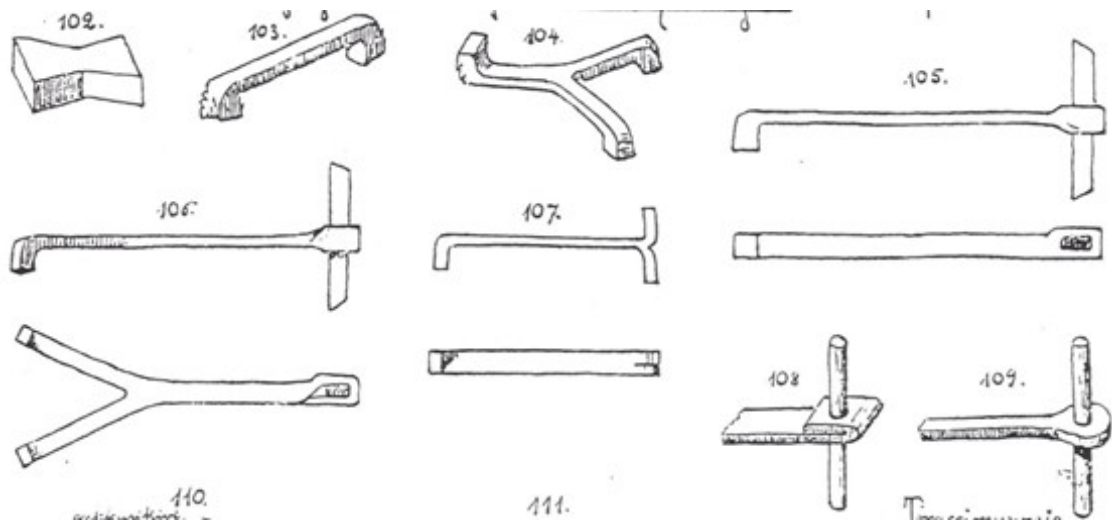
Kuva 42. Huonon rakentamisen takia sortunut tukimuuri [4]



Kuva 43. Yliopiston verkkomuuria, Siltavuorenpenger

7.3.1 Kuorien sidonta

Muuratun rakenteen toiminta riippuu merkittävästi siitä kuinka muuri on toteutettu: Onko muuri yhtenäinen vai kuorista koostuva, ja kuinka kuoret on sidottu toisiinsa. Tätä on vaikea nähdä muurista päällepäin, mutta lujuuslaskennan kannalta tieto on oleellinen. Kuorien väliset sidekivet tasaavat rasituksia kuorien välillä. Kuvista 40 ja 46 näkyy malleja muureista ja niiden murtumismekanismeja, sekä sidekivien määrän ja sijoittelun vaikutuksista muurin lujuuteen. Muurin läpi ulottuvien sidekivien sijasta voidaan vaakavoimia tasaamaan käyttää myös terästankoja. Vanhoissa muureissa käytetyt rautaiset siteet saattavat olla ruostuneita, jolloin niillä ei enää ole sitovaa merkitystä. Ruostuessaan teräksen tilavuus laajenee, jolloin ruosteiset siteet saattavat aiheuttaa halkeilua laastiin ja kiviin. Uusia terässiteitä käytettäessä tulee niiden olla ruostumatonta terästä. Jos terässiteisiin kohdistuvat kuormitukset tunnetaan, voidaan myös terässiteet mitoitaa teräsrakenteiden suunnittelunormi SFS-EN 1993:n mukaan. Tämä voi olla tarpeen erikoiskohteissa. Yleensä muurien lujuus pyritään saavuttamaan kivityön menetelmillä ja mahdollisimman vähillä teräksillä.

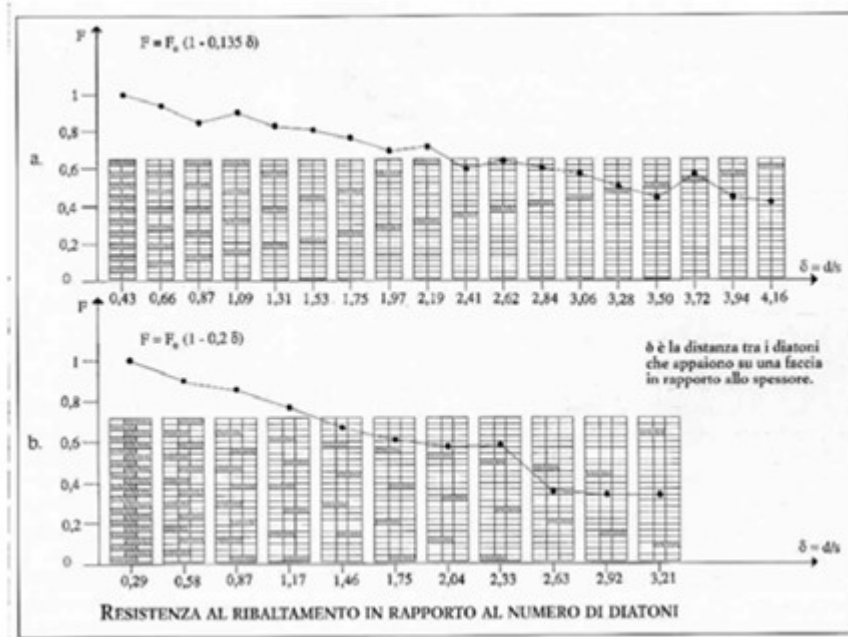


Kuva 44. Vanhoja kramloja ja ankkurirautoja. [41]

Kuvassa 45 näkyy vanhan navetan sortuneen seinän kaksikuorista rakennetta, jossa sisä- ja ulkokuoret toimivat itsenäisinä kantavina kerroksina ilman välisiteitä. Vanhoissa rakenteissa on harkinnan mukaan saatettu tarkoituksella jättää kuorienvälinen sidonta tekemättä, koska kuoria yhdistävät sidekivet toimivat myös kylmäsiltaan. Navetoissa kivikuorien väli täytettiin usein esimerkiksi hiekalla.



Kuva 45. Kaksikuorista muuria, joista ulompi sortunut [kuva P. Mäkinen]



Kuva 46. Kuorien limitysten sijainnin ja lukumäärän vaikutus muuratun rakenteen kantavuuteen. [13]

7.3.2 Kiven työstö

Kiven työstöllä saadaan kiven välistä kontakti- eli kitkapintaa lisättyä. Mitä tarkemmin saumat sovitetaan yhteen, sitä suuremmat tukipinnat kiven väliin saadaan ja kivet pääsevät kiertymään ja liikkumaan vähemmän toisiinsa nähden. Kun kivet ovat paremmin toisiinsa sidoksissa ja tukipinnat kunnossa, ei rakenne ole niin nurjahdusaltis. Mekaanisia sidoksia, kuten kuvassa 48 ei yleensä ole tarkoituksenmukaista työstää kiven välille liiallisen työmäärän vuoksi. Toisaalta uusi polttomoottorisahoihin innostunut asentajasukupolvi saattaa muuttaa tilannetta tulevaisuudessa. Yleensä sahattupintaista tai -särmäistä kiveä ei kuitenkaan pidetä luonnonkivimuureihin soveltuvana lähinnä ulkonäöllisistä syistä. Siksi kivet tulisi työstää hakkaamalla ja lohkomalla, tai ainakin käsitellä näkyviin jäävä sahapinta piikkaamalla.



Kuva 47. Kiven työstöä lekalla ja meisselillä. [15]



Kuva 48. Tarkasti työstettyä kiveä 1400-luvulta, Machu Picchu. [Kuva: rutasha.com]



Kuva 49. Hienostuneemmat työstömenetelmät eivät aina vaadi kallion räjäyttelyä. Bet Giyorgis kalliokirkko 1200-luvulta, Etiopia [Kuva: afar.com]

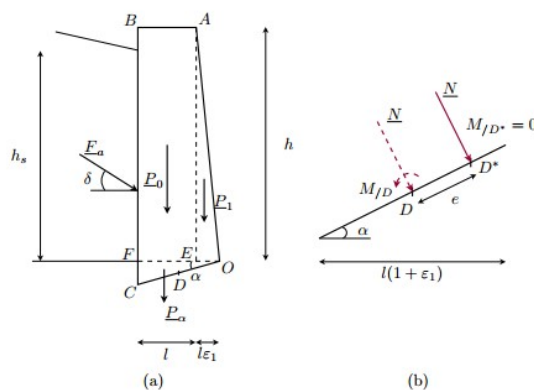
8 Kivimuurien rakenteellinen mitoitus

Muurattujen rakenteiden kantokyvyn arvioiminen on yleensä varsin komplisoitu tehtävä. Rakenteen sisäisestä epähomogeenisuudesta johtuen jännitysmuodonmuutostilat vaihtelevat huomattavasti rakenteen eri osissa. [10 s.111.]

Kivimuurit voidaan mitoittaa, mutta tällöin joudutaan rakennemallia usein yksinkertaistamaan huomattavasti. Pätevää suunnittelunormia mitoitukseen ei ole olemassa, joten rakenteen kestävyys arviointi jää suunnittelijan vastuulle. Kivimuri koostuu yksinkertaisesti kivistä ja saumoista, mutta saumat voivat olla erisuuntaisia laastisaumoja tai kuivasaumojia, ja kivien välillä voi olla erilaisia kosketuspintoja. Siksi suunnitteluarvot joudutaan aina arvioimaan tapauskohtaisesti.

Kuvassa 49 näkyvä kirkon muuri on oikeasti monoliittinen ja sen laskentaan voitaisiin suoraan käyttää kiven suunnittelulujuuksia. Kuvan 48 tarkasti työstetyillä mekaanisilla sidoksilla ja "luusaumoilla" rakennettu muuri voitaisiin myös mitoitaa lähes kiven lujuuksilla, mikäli sidokset ulottuisivat kaikkiin suuntiin läpi muurin. Myös tavallisissa useista kivistä ja vaihtelevan kokoisista saumoista muodostuvissa muureissa rakenne joudutaan käytännön laskennan helpottamiseksi usein mallintamaan yhtenä kappaleena, jonka lujuus yritetään arvioida mahdollisimman hyvin kokonaista rakennetta vastaavaksi. Rakenteen lujuutta voidaan arvioida kiven lujuuteen vertaamalla, ottaen huomioon kiven välisten todellisten kitkapintojen osuudet suhteessa "rakojen" osuuteen. Kuitenkin on huomioitava, että täydellisessäkin kosketuksessa kivien välillä esimerkiksi sauman leikkauslujuus ei ole sama kuin ehjän kiven, vaan se riippuu kivien välisestä kitkasta.

Rakenteen vinoudet ja epäkeskisyydet on huomioitava myös mitoituksessa. Muurit rakennetaan ylöspäin oheneviksi, minkä tarkoituksena on viedä epäkeskisyyksiä varmalle puolelle. Suunnittelussa on jatkuvasti käytettävä tervettä harkintaa. Jos esimerkiksi havaitaan muurin olevan selvästi pullistunut tai kallellaan, joudutaan epäkeskisyydet ottamaan tarkasti huomioon. Toisaalta hyväkuntoisen ja satoja vuosia pystyssä pysyneen muurin voidaan yleensä olettaa olevan hyvin rakennettu ja tasapainoinen. Uusia muureja mitoitettaessa joudutaan varmuuksia puolestaan kasvattamaan.



Kuva 50. Tukimuurin epäkeskisyyksiä. [39 s.115]

Vanhoissa hyväkuntoisissa valumuureissa on usein niin paljon sisäisiä sidoksia ja holvautuvuutta, että tarkasteluksi riittää pelkkä kokonaisvakavuuden tarkastelu. Kuitenkin, jos kuoret ja välitöytö tai kuoret keskenään toimivat hyvin eri tavoin voidaan joutua tekemään sisäisiä tarkasteluja. [14.]

Tiilimuurien laskentaan on laadittu paljon kuormituskokeisiin perustuvia taulukoita, joissa eri muuttujille kuten laastille, sauman paksuudelle, aukkojen koolle ja sijainnille on omat kertoimensa. Valitettavasti vastaavia luotettavia taulukoita tai kertoimia luonnonkivirakenteiden eri muuttujille ei ole olemassa, eikä tiilirakenteiden taulukoita voi näihin soveltaa. Ainoita hieman vastaavaan taulukointiin pyrkiviä luonnonkivirakenteen lujuuden määrittelymenetelmiä on kaarisiltojen kantokyvyn arvioimiseen kehitetty yksinkertaistettu mexe-menetelmä. Menetelmä määrittelee mm. materiaalikertoimen ja laastikertoimen, joka huomioi saumat, laastin kunnon, halkeilun jne. Näitä kertoimia voidaan käyttää harkinnan mukaan suuntaa antavina muurin lujuuslaskennassa (taulukot 1-4), mutta mitään joka paikkaan soveltuvia totuuksia ne eivät ole. [44 s.318.]

Kuitenkin menetelmä antaa suuntaviivoja siitä kuinka eri muuttujien osuutta kivirakenteessa voidaan huomioida. Samoin tulee kiven työstöä ja muuri tiiveyttä arvioida suunnittelulujuuksia harkittaessa. Esim. jos kivien kosketuspinta on noin 10 prosenttia vaakasauman pinta-alasta, täytyy tämä huomioida jännityksen laskennassa.

Taulukko 3. Mexe-menetelmän mukainen sauman paksuuskerroin [44 s.318]

Sauman paksuus	Paksuuskerroin
Alle 6mm	1,0
6-12,5 mm	0,9
Yli 12,5 mm	0,8

Taulukko 4. Mexe-menetelmän mukainen laastikerroin [44 s.319]

Laastin kunto	Laastikerroin
Hyvä	1,0
Irtonainen tai mureneva	0,9

Taulukko 5. Mexe-menetelmän mukainen syvyyskerroin [44 s. 319]

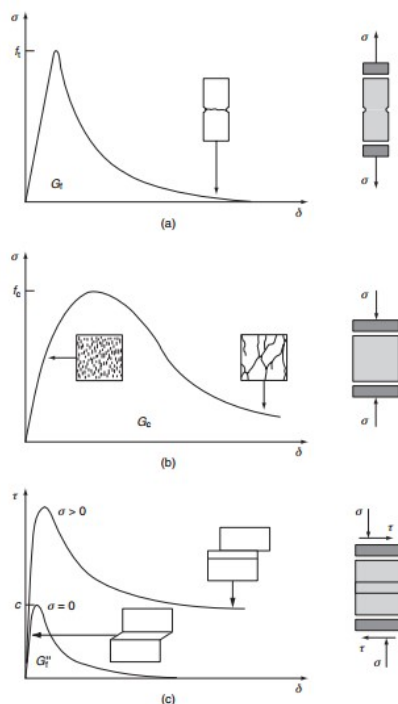
Sauman kunto	Syvyyskerroin
Hyvä, täydet saumat	1,0
Laastittomia saumoja, saumat huonossa kunnossa tai vajaasti täytetty sauma alle 12,5 mm	0,9*
Vajaasti täytetyt saumat > 12,5 mm.	0,8*
Yli kymmenys holvin paksuudesta vajaasti täytettyjä saumoja.	Insinöörin oma harkinta
*interpolointi arvojen välillä sallittu	

Taulukko 6. Mexen mukaiset suositellut kuntokerroimet [44 s.319]

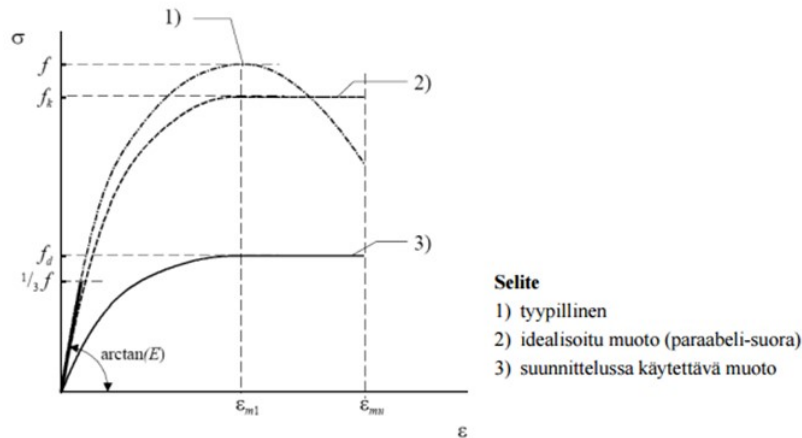
Vaurio	Suosittelu kuntokerroin
Pituussuuntaista halkeilua perustusten painumisesta	0,4 (halkeamaväli <1 m) 0,4-0,6 (halkeamaväli >1 m)
Poikittaista halkeilua tai kaaren muodonmuutoksia, jotka johtuvat holvin osittaisesta pettämisestä tai tukien liikkumisesta	0,6-0,8
vinohalkeamia	0,3-0,7
Halkeamia lähellä kaariseinämän neljännessä	0,8
Huom. Jos kuntokerroin jää alle 0,4:n tulisi korjauksia tai uudelleenrakennusta harkita välittömästi.	

Jonkin verran yksittäisiä kuormituskokeita ja väitöskirjoja kivimuurien rakenteellisesta toiminnasta on tehty, ja niiden pohjalta kehitelty mm. Englannissa laskentaohjelma kylmätukimuurien lujuuslaskentaan. Kuitenkin kivilajeissa ja työtekniikoissa on niin suuria eroja, että saadut tulokset eivät ole yleispäteviä luonnonkivimuurien mitoittamiseen.

Muurien ulkoiset kuormat puolestaan voidaan laskea normaalisti esimerkiksi kuormituskorin SFS-EN 1991 mukaan, samoin mm. muurien betonianturoiden mitoituksessa noudatetaan betonirakenteiden suunnittelunormia SFS-EN 1992.



Kuva 51. Lähes hauraiden materiaalien tyypillinen käyttäytyminen yksisuuntaisessa (a) veto- (b) puristus- ja (c) leikkausrasituksessa. [44 s.323]



Kuva 52. Suunnittelunormin SFS-EN 1996-1-1 mukainen puristetun muuratun rakenteen jännitys-muodonmuutoskuvaaja [11 s.34]

8.1 Muurattujen rakenteiden mitoitusohjeiden soveltaminen luonnonkivirakenteille

Muurattuja rakenteita käsittelevä suunnittelustandardi SFS-EN 1996-1-1 asettaa soveltamisen ehdoksi että muurauskappaleiden tulee olla standardin mukaisia tiiliä tai harkkoja. Luonnonkivimuureista ainoastaan laastiharkkomuurit, joissa kivet eivät ole suoraan kosketuksissa toisiinsa soveltuvat tähän luokitteluun. Siksi eurokoodin kaavoja voidaan niiden laskentaan joiltain osin soveltaa harkiten. Harkinnassa on huomioitava eroavuuksia tiilen ja luonnonkiven materiaaliominaisuuksien välillä, sekä siinä kuinka ne vaikuttavat rakenteen toimintaan kokonaisuutena. Jotkin heikommat ja imukykyisemmät luonnonkivetkin saattavat muistuttaa ominaisuuksiltaan esim. tiiviitä kalkkihiekkatiiliä.

Koska laastin lujuusominaisuudet ovat kiveä heikommat, jää laasti määrääväksi tekijäksi harkkomuurin lujuudelle. Laastin puristuslujuus on vain murto-osa kiven puristuslujuudesta. Luonnonkivi on huomattavasti tiiltä tiiviimpää, mikä heikentää laastin ja muurauskappaleen välistä tartuntaa. Laastin vetolujuus tai tartuntalujuus saattaa pettää, jolloin laasti irtoaa kiven pinnasta ja kivet pääsevät vapaasti liukumaan. Luonnonkiviä muurattaessa on tärkeää pestä kivet etukäteen kunnollisen tartunnan aikaansaamiseksi. Koska kivi ei ime itseensä vettä ja siten tasaa kosteutta, on hyvä jälkihoito tärkeää laastin halkeilun estämiseksi.

Luonnonkiville käytettävät laastit ovat usein kovia, jolloin rakenteelta puuttuu joustamiskykyä. Tämä voi johtaa muun muassa liikuntasaumojen tarpeen lisääntymiseen.

Muuratun rakenteen puristuslujuuden ominaisarvo saadaan SFS-EN 1996-1-1:n mukaan kaavasta (1). Vastaavat leikkaus- ja muiden lujuuksien laskentakaavat saadaan samasta standardista.

Puristuslujuuden ominaisarvo (f_k):

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (1)$$

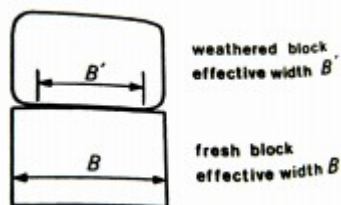
jossa K on vakio, jolla huomioidaan taulukon mukaan aukkoja, laastikerroksen paksuutta ja laastityyppiä.

α ja β ovat vakioita, joilla myös huomioidaan laastityyppi ja muurauskappaleen ominaisuudet sekä aukkotyyppi.

f_b on muurauskappaleen puristuslujuuden keskiarvo voiman suunnassa

f_m on laastin puristuslujuus.

Harkintaa on käytettävä muun muassa määrittäessä suunnitteluarvoja muurauskiven ominaisuuksille. Luonnonkiven ja laastin hyvin erilaiset puristuslujuudet vaikuttavat huomattavasti kokonaisuuden toimintaan. Varmalla puolella on käyttää yksinomaan laastin suunnittelulujuuksia. Jos kivien välillä on olemassa kosketuspintaa, muuttuu rakenteen käyttäytyminen ainakin puristusjännitysten osalta.



Kuva 53. Kiven tehollinen ja teoreettinen leveys [39 s.33]

8.2 Pohjapaine

Muurin rakenne perustuu kivien holvautumiseen, jolloin kuormituksen voidaan olettaa olevan lähes tasaisesti jakaantunut muurin pohjalla. Kuormitus muurin alareunassa ei saa ylittää muurin arvioitua puristuslujuutta, eikä anturassa geoteknisten selvitysten perusteella saatua maapohjan kantavuutta. Kiven halkaisuvetolujuus ei saa myöskään ylittyä. Geoteknisen kantavuuden mitoittamiseen käytetään suunnittelustandardia SFS-EN 1997-1.

(1) P Murtorajatilassa raudoittamattomaan muurattuun seinään kohdistuva mitoitusvoima N_{Ed} tulee olla enintään yhtä suuri kuin seinän pystykestävyyden mitoitusarvo N_{Rd} :

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (6.1)$$

(2) Yksinkertaisen seinän pystykuormien mitoituskestävyys yksikköpituutta kohden N_{Rd} saadaan yhtälöstä:

$$N_{Rd} = \Phi t f_d \quad (6.2)$$

missä:

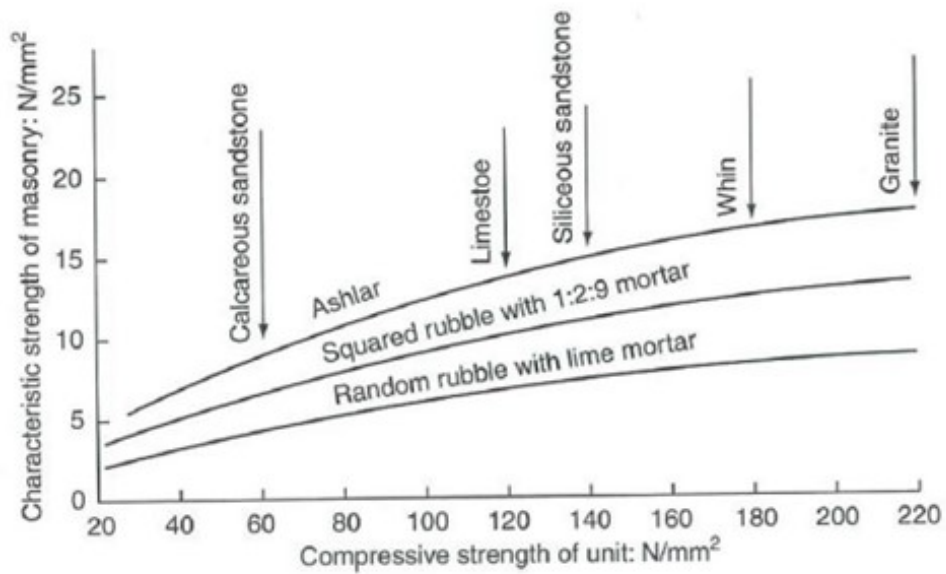
- Φ on kohdasta 6.1.2.2 saatava hoikkuuden ja kuormituksen epäkeskisyyden huomioon ottava kestävyyden pienennyskerroin tilanteen mukaan seinän ylä- tai alapäässä Φ_i tai seinän keskellä Φ_m
- t on seinän paksuus
- f_d on kohdista 2.4.1 ja 3.6.1 saatava muurin puristuslujuuden mitoitusarvo.

Kuva 54. SFS-EN 1996-1-1:n mukainen pystykuormitetun muuratun seinän mitoitus [11 s.50]

8.3 Kokonaisvakavuus

Valumuurin kokonaisvakavuus lasketaan lujuusopin peruskaavoilla, mutta toimiakseen mitoituksen mukaan on muurin oltava hyvin rakennettu ja kunnossa. Muurin tulee olla yhtenäinen ja mahdollisimman hyvin limitetty kaikkiin suuntiin. Sidoksien tulee ulottua muurin läpi ja kivien olla riittävän suuria. Myös perustusten ja vesikatteen tulee olla kunnossa.

Koska vain pieni osa yksittäisen kiven pinta-alasta on todellisuudessa kosketuksissa toiseen kiveen, joudutaan sallittua jännitystä rajaamaan tuntuvasti kiven lujuutta pienemmäksi. Todellinen arvo riippuu rakenteesta ja materiaaleista, mutta suomalaisessa lähteessä käytettiin valumuurille esimerkkinä arvoa 0,8 MPa. Laastin suurin kestävyys ei saa myöskään ylittyä. ICE:n taulukossa (kuva 55) graniitin ja kalkkilaastin yhdistelmälle voisi mitoittaa moninkertaisesti puristusta. [14 s. 38.] Sallittua arvoa pitää arvioida kivien kosketuspintojen osuuden ja materiaaliominaisuuksien mukaan



Kuva 55. ICE:n listaamia muurien ominaislujuuksia kiven ja laastin mukaan. [5 s.36]

Pystykuorman ja momentin vaikuttaessa rakennemalliltaan monoliittiseen muuriin voidaan käyttää seuraavia peruskaavoja.

Puristetun puolen jännitys ei saa ylittää sallittua jännitystä:

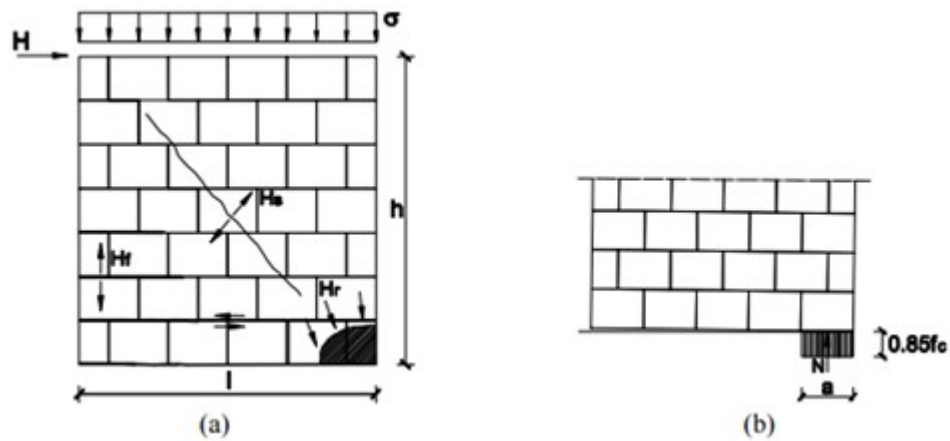
$$\sigma_{Ed} = \frac{N_d}{A} + \frac{M_d}{W} \quad (2)$$

ja vastaava ”vedetyn” puolen jännitys:

$$\sigma_{Ed} = \frac{N_d}{A} - \frac{M_d}{W} \quad (3)$$

Missä A on muurin tarkasteltavan vaakapoikkileikkauksen pinta-ala, N_d on pystykuorman suunnitteluarvo oma paino mukaan lukien. M_d on esimerkiksi tuulikuorman aikaansaama suunnittelumomentti ja W on muurin tarkasteltavan vaakaleikkauksen taivutusvastus.

Rakenteeseen ei saisi syntyä vetojännitystä, joten kaavan 3 tuloksen pitäisi pysyä positiivisena.

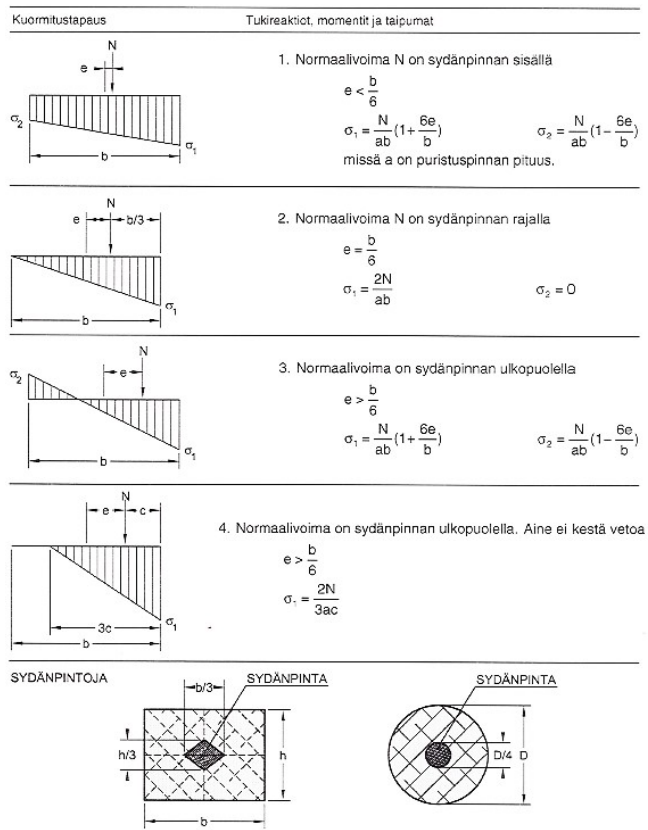


Kuva 56. Muuratun rakenteen murtumistapoja (a) ja kaatuminen (b). [5 s.105]

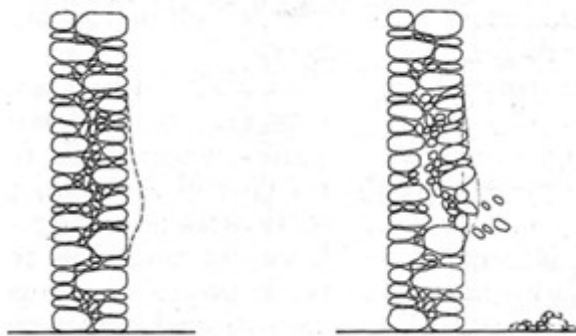
8.4 Reunajännitys

Reunajännityksen laskentakaava riippuu normaalivoiman sijainnista muurin poikkileikkauksessa. Eli siitä, onko kuormitus sydänpinnan sisällä, rajalla vai ulkopuolella. Kullekin tapaukselle on omat laskentakaavansa. Tähän opinnäytetyöhön ei ole tarkoituksenmukaista kirjoittaa useita sivuja laskentakaavoja jotka ovat löydettävissä lähteistä, joten reunajännityksen kaavat ja sydänkuvion määrittely on esitetty kuvassa 55.

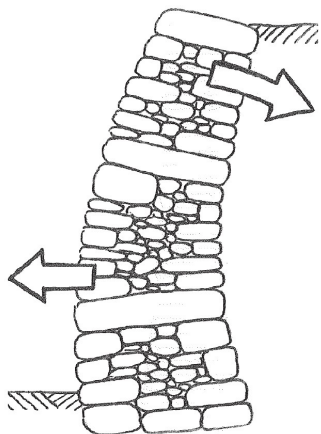
Olennaista on, että muurattua rakennetta ei saa mitoittaa kestävänsä vetojännitystä, vaan tämä on otettava tarvittaessa vastaan esimerkiksi terästangoilla. Kuitenkin lähtökohtaisesti vetojännityksen muodostumista pyritään välttämään. Muuri pysyy kauttaaltaan puristettuna kun kuorman resultantti pysyy poikkileikkauksen sydänkuvion sisäpuolella. [39.] Kaksikuorisessa muurissa, jossa vain toinen kuori on kuormitettu, voidaan tehdä paikallinen tarkastelu myös ainoastaan kyseiselle kuorelle, mikäli se toimii itsenäisenä kantavan kuorena. Tällöin mahdollisten sidekivien vaikutus toiseen kuoreen tulee arvioida erikseen.



Kuva 57. Reunajännityksen laskentakaavoja [22 s.60]



Kuva 58. Kaksikuorisen muurin muodonmuutos ja murtuminen. [13]



Kuva 59. Tukimuurin nurjahdus [40]

8.5 Muurin sisäinen mitoitus

Sisäistä mitoitusta käytetään, kun muurin eri osat toimivat keskenään erilailla. Esimerkiksi mikäli kuorimuurien väli on täytetty hiekalla, täytteessä on aukkoja tai kalkkilaastista on huuhtoutunut sideaine pois veden mukana. Tällöin reunojen kuorimuureille syntyy sivupainetta muurin sisäisestä irtoaineksesta, kuten maanpaineesta tukimuureihin. Sivupaineeseen vaikuttaa täyteaineen paino ja korkeus sekä sisäinen kitkakulma. Myös täyteen leveys vaikuttaa sivupaineen suuruuteen ns. rajapainekorkeuden ylitytyä. [14.]

Jos sydänosa on kuitenkin ladottu asianmukaisesti kunnolla täyteen kiveä, ei laastin pois huuhtoutuminenkaan välttämättä vaikuta suuresti muurin kestävyYTEEN.

Muurin sisäiseen mitoitukseen voidaan käyttää esimerkiksi seuraavassa esitettyjä Professori Matti Ollilan laskentakaavioita. Tarkastelun numeeriset arvot eivät kuitenkaan ole suoraan yleisesti sovellettavissa monien eri muuttujien vaikuttaessa muurin käyttäytymiseen. [14.]

$$P(h) = P_{h,max} * \left(1 - e^{-\frac{h}{h_0}}\right) \quad (4)$$

$$P_{h,max} = \frac{\gamma_t b}{4\mu} \quad (5)$$

$$h_0 = \frac{b}{4\lambda\mu} \quad (6)$$

missä:

$P_{h,max}$ = rajapaine

μ = seinäkitkakulma = $\tan\varphi$

φ = täyteaineen kitkakulma

λ = painekerroin = $1 - \sin\varphi$

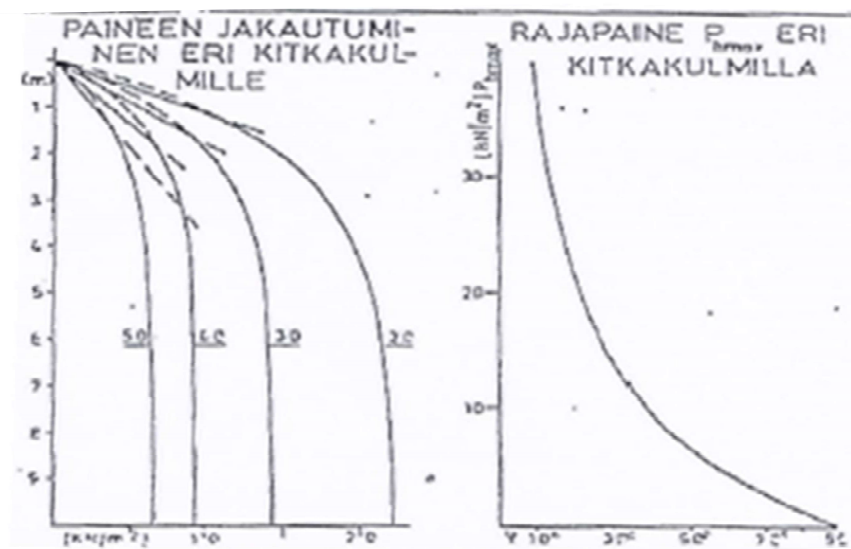
γ_t = täyteaineen tilavuuspaino

h = muurin korkeus

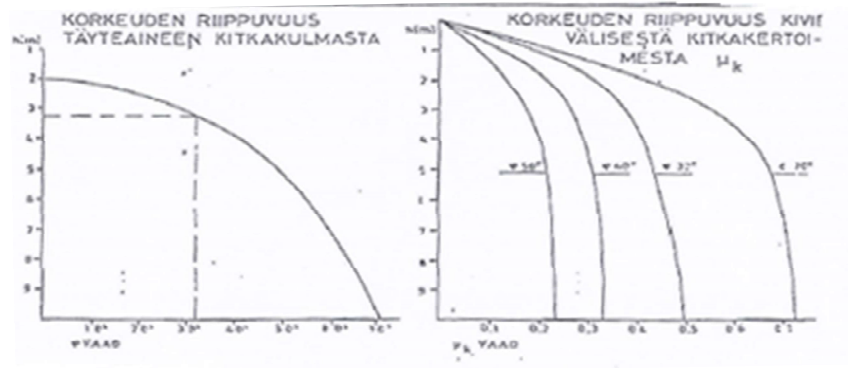
b = muurin sisämitta

γ = kiviseinän tilavuuspaino

a = kiviseinän leveys



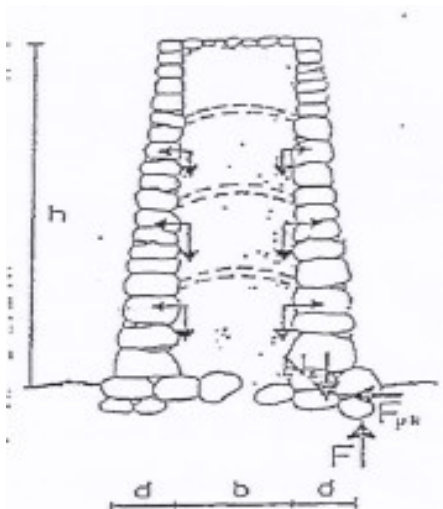
Kuva 60. Kuorimuurin irtonaisen täyteen kitkakulman vaikutus paineeseen muurin sisällä [14]



Kuva 61. Kitkan vaikutus muurin kriittiseen korkeuteen. [14]

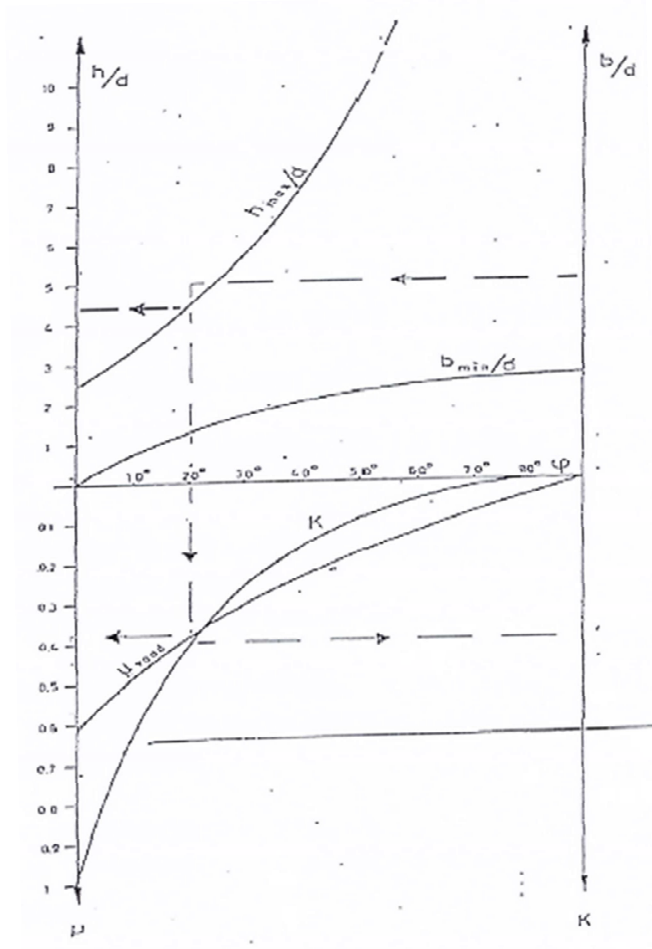
Taulukko 7. Maa-ainesten kitkakulmien ominaisarvoja. [28 s.27], [46]

Maalaji	Kitkakulman ominaisarvo löyhässä tilassa	
	Pyöreät rakeet	Särmikkäät rakeet
Sora	32	35
Hiekka	30	33
Karkea siltti	27	30
Moreeni	34	
Sepeli		30
Louhe		38



Kuva 62. Merkinät b, d ja h taulukon 8 käyttöön. [14]

Taulukko 8. Kuoren ja täytön, sekä korkeus/paksuus suhteen yhteys täytön kitkukulmaan. Ollilan käyrästä. [14]



Parametrit

d	[m]	kiviseinän paksuus
b	[m]	välitäytteen paksuus
h	[m]	muurin vapaa korkeus
φ		täytteen sisäinen kitkukulma
K		täytteen vaakasuora sivupainakerroin
μ		kiviseinän vaakasuora kitkakerroin
$\gamma_p \setminus \gamma_t$		kiviseinän ja täytteen tilavuus painojen suhde (= 2 viereisessä kuvassa)

Esimerkki

$$\begin{aligned}
 d &= 0.6 \text{ m} & b/d &= 5 > 1.3 \\
 b &= 3.0 \text{ m} \\
 \varphi &= 20^\circ & \rightarrow h_{\max}/d &= 4.5 \rightarrow h_{\max} = 4.5 \times 0.6 = 2.7 \text{ m} \\
 & & \mu_{\text{vaad.}} &= 0.38 < 0.1 \quad ?
 \end{aligned}$$

Kuva 63. Parametrit taulukon 8 käyrästäön käyttöön, sekä esimerkki käyrien lukuun.

8.6 Muurin kriittinen korkeus

Määräävä tekijä muureissa on yleensä muurin hoikkuus, eli korkeuden ja paksuuden suhde [10 s.23].

Kaksikuorisissa muureissa kuorien sitoutuminen toisiinsa on hyvin oleellinen lujuteen vaikuttava tekijä. Tämä näkyy kuvassa 46. Jos kuoret ovat irralliset ja vain harvoista kohdista toisiinsa sidotut, jäävät kivien tukipinnat helposti pieniksi ja kuori saattaa päästä nurjahtamaan. Hyvällä kuorien sidonnalla ja kivien työstämisellä saadaan sen sijaan koko muuri toimimaan lähes yhtenäisesti.

Muurin kriittinen korkeus muodostuu kaatumisvarmuuden, kivien välisten kitkakertoimen, ytimen ja kuorien leveyden suhteen, sekä valumuureissa täyteaineen kitkakulman, täytteen ja kiviseinän tilavuuspainojen suhteen. Kriittistä korkeutta voidaan tarkastella esimerkiksi professori Ollilan käyrästöjen avulla. Vastaavia käyrästöjä on olemassa muun muassa yksinkertaisten tukimuurien kriittisen korkeuden ja pohjan leveyden arvioimiseen. Niitä on esitetty kuvassa 79. Tukimuurienkin kuormat, kitkakulmat ja monet muut ominaisuudet vaihtelevat, joten yleensä tapauskohtaiset tarkastelut ovat välttämättömiä.

Kuorien sidonta estää muurin leviämistä ja nostaa muurin kriittistä korkeutta, mutta tekee myös staattisesta tarkastelusta monimutkaisempaa [4], [14].

8.7 Leikkausjännitys

Muurin sisäisen leikkauslujuuden laskennassa hankaluutena on kivien välisen kiertymiskyvyn arvioiminen. Kuitenkin tiiviissä hyvin rakennetussa muurissa kiertyminen on vaikeampaa kuin harvassa.

Coulombin kaava paikalliselle sauman leikkausjännitykselle on

$$\tau = c + \mu\sigma \quad (8)$$

Missä τ on leikkausjännitys kivien välissä, c on leikkauslujuus ilman pystykuormaa (koheesion vaikutus), kylmämuureissa c voidaan olettaa nolllaksi, laastimuureissa c :tä voi-

daan käyttää laastin mukaan. σ on leikkaustasoa vastaan kohtisuoran puristusjännityksen mitoitusarvo, eli muureissa tavallisesti pystykuorman vaikutus. Kaavassa μ on kivien välinen kitkakerroin. Puristusjännityksen laskentaa varten pitää kylmämuurissa arvioida kivien välinen kosketuspinta pääasiassa kivityön laadun perusteella riittäviä varmuuksia käyttäen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää täyttä muurin poikkileikkausta jännityksen laskentaan, mutta vastaavasti pienentää tuntuvasti sallittua leikkausjännitystä, kuten aiemmin valumuurin kohdalla.

Kivien väliset kitkakertoimet selviävät varmimmin käytännössä mittaamalla, mutta helpoimmin niitä voidaan riittävä varmuus huomioiden arvioida myös taulukkoarvoista. Kitkaan vaikuttaa kiven ominaisuuksia enemmän pinnan työstö ja karkeus.

Vertailun vuoksi: Muurattujen rakenteiden suunnittelunormi SFS-EN 1996 käyttää muuratun rakenteen vetolujuuden ominaisarvon määrittelyssä μ :tä vastaavana kertoimena 0,4:ää käytettäessä EN 998-2:n mukaista yleislaastia. Lisäksi vetolujuuden ominaisarvon ylärajaksi rajataan korkeintaan 0,065 kertainen muurauskappaleen puristuslujuus tai korkeintaan 1 N/mm² muurauskappaleen puristuslujuuden ollessa yli 5 N/mm². [11 s.31] [46 s.36.]

Lähdekirjallisuudessa oli kuormituskokeissa saatu μ :n arvoja väliltä 0,63-0,69 riippuen kivien materiaalista ja pintarakenteesta [12 s.137].

Kivien välisen kosketuspinnan ja kallistuksen arvioiminen valmiista rakenteesta on epävarmaa. Siksi leikkausjännityksen laskennassa joko muurin tehollinen pinta-ala tai sallittu jännitys on rajattava tarpeeksi matalaksi. Vanhoissa kuorellisissa muureissa voi ulkokuorissa käytettyjen kivien välissä olla täyteenä esimerkiksi kiveä, hiekkaa, tiiltä, laastia tai savea.

8.8 Aukkojen katekivet

Muurin pienten aukkojen ylityksiin käytettävät katekivet mitoitetaan palkkeina, joissa kiven taivutusvetolujuus ei saa ylittyä.

$$W_{vaad} > \frac{M_d}{\sigma_{sall.}} \quad (9)$$

missä: σ_{sall} on kiven taivutusvetolujuuden suunnitteluarvo. W_{vaad} on kiveltä vaadittu taivutusvastus. Taivutusvastuksen kaava:

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (9)$$

Tästä voidaan ratkaista vaadittava kiven leveys b ja korkeus h .

Jos ylityskivet ovat poikkileikkaukseltaan muun kuin suorakaiteen muotoisia, tulee niiden tehollista poikkileikkausta arvioida tapauskohtaisesti.

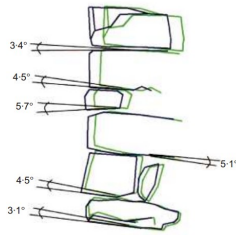
8.9 Kylmämuurit

Lujuuslaskennassa varsinkin verkkomuurien rakennetta joudutaan yksinkertaistamaan erittäin voimakkaasti, sillä tuntemattomia muuttujia on liian paljon yksityiskohtaiseen laskentaan. Käytännön kuormituskokeitakin on tehty liian vähän kaikkien erityyppisten muurien ja niiden sisäisten muuttujien suhteiden tuntemiseksi. Kylmämuurien toiminta perustuu kivien väliseen kitkaan, sekä pohjakivien ja maapohjan väliseen kitkaan.

Kylmämuureja voidaan mallintaa makro- tai mikromekaanisella tavalla, joista ensimmäinen tarkastelee rakennetta jatkuvana kappaleena ja jälkimmäinen yhdistelmänä kappaleita [36].

Kylmämuurin lujuuteen vaikuttaa muurin tiiveys, eli kivien väliin jäävä tyhjä tila joka vaihtelee kiven ja työn laadusta ja koosta riippuen. Muurin tiiveys on suhteessa kivien väliseen kitkapintaan, vaikka ei suoraan kitkapinnan osuutta kerrokaan. Tyhjän tilan osuutta on arvioitu punnitsemalla koemuurien kivet ja vertaamalla tulosta kiven tiheyteen ja muurin tilavuuteen. Ranskassa tehdyissä kokeissa on arvioitu tyhjän tilan osuutta koemuureista seuraavasti: Pienistä kivistä rakennetulla muurilla tyhjän tilan osuus oli noin 25 prosenttia, ja isoista kivistä rakennetulla noin 15 prosenttia. Huono työn tai kiven laatu kasvattaa tyhjän tilan osuutta. Tyhjän tilan takia kivet pääsevät kiertymään toisiinsa nähden, jolloin kosketuspinnat ja kuormien painopisteet muuttuvat. Kyseiset koemuurit oli rakennettu Ranskassa litteähköistä vaakaan asennetuista kalkkikivistä ja liuskeista. Tulokset eivät siten ole kovin hyvin vertailukelpoisia suomalaisten suurista epäsäännöllisistä kivistä rakennettujen muurien kanssa. [36].

Pystykuormitetun kylmämuurin tavalliset murtotavat ovat nurjahdus tai kaatuminen pohjien pettäessä.

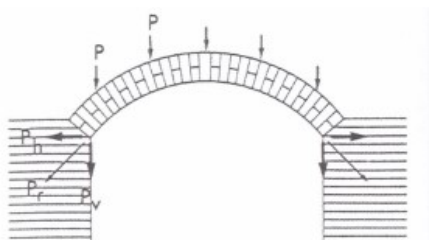


Kuva 64. Kivien välisiä kulman muutoksia rasiuskokeessa [36]

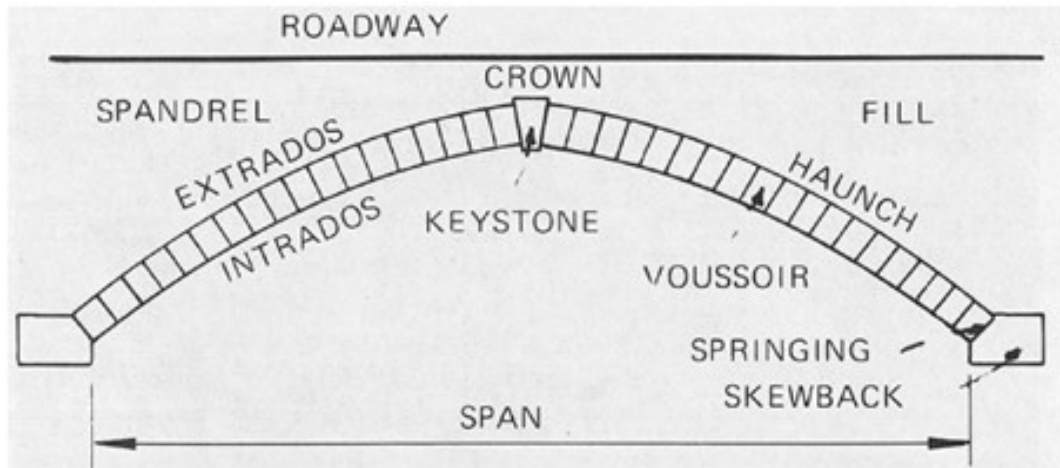
8.10 Kaariholvit

Kivimuureissa on käytetty kaariholveja aukkojen ylityksiin, mutta kivrakenteisia holveja on käytetty myös välipohjina ja kattorakenteina, siltoina jne.

Holvikaaret suunnitellaan siten, että kaareen muodostuu ainoastaan puristusjäännityksiä. Holvikaari kestää hyvin tasaista kuormaa, mutta pistemäisille kuormille joudutaan kaaren oikea muoto hakemaan erikseen siten, että puristusvyöhyke pysyy kaaren keskellä. Hankalimpia ovat liikkuvat pistemäiset kuormat, kuten akselipainot silloilla. Kaaresta syntyy sen muodosta riippuen usein myös vaakakuormia holvin kantaan. Yleensä mitä matalampi kaari, sitä suuremmat ovat vaakavoimat kannassa ja puristus lakikivessä. Kaarien muodon merkityksestä holvin kantavuuteen on olemassa paljon malleja, kuten myös laskentatapoja ja laskentaohjelmia holvien kuormituskestävyydelle. Niitä voidaan käyttää muun muassa kivisiltojen sallittujen akselikuormien laskentaan. Aiheesta on tehty paljon tutkimuksia ja opinnäytetöitä, mutta ne ovat liian monimutkaisia tässä läpikäytäväksi. Kuvissa 69 ja 70 näytetään tavallisimpia holvien vaurioita.



Kuva 65. Kuormien siirtyminen kaariholvissa. [49]



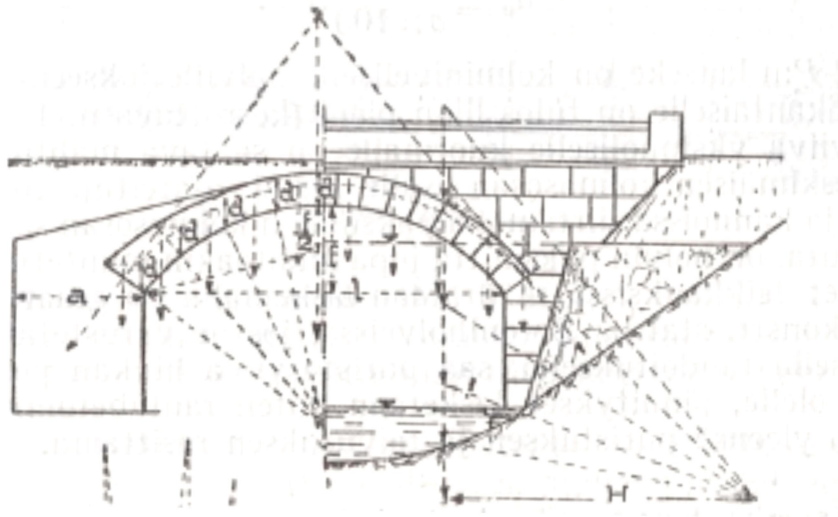
Kuva 66. Kaaren englanninkielistä termistöä. Keystone= lakikivi, skewback= anfangi tai olka [1 s.8]



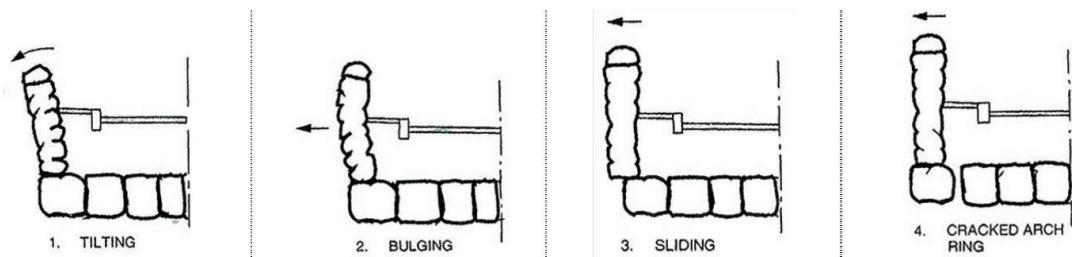
Kuva 67. Kylmä-holvitunneli, Saint-Romain-au-Mont-d'Or Ranskassa 1800-luvulta. [38]

Holvikaaret voivat toimia muurissa kuoria yhteen sitovana osana.

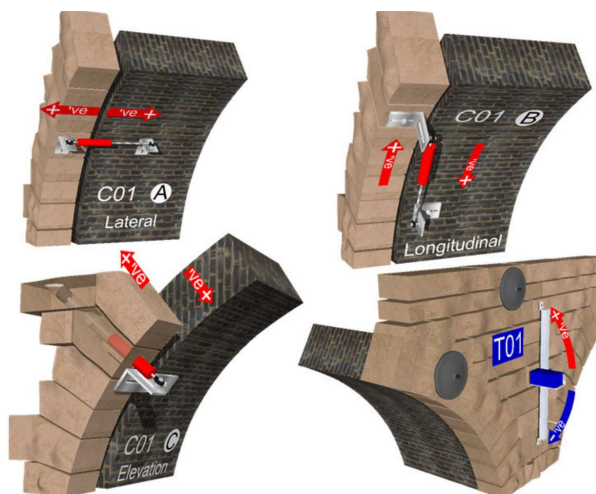
Muureissa saatetaan joutua tarkastelemaan, ettei holvien läheisyyteen synny liian suuria paikallisia vaakarasiuksia. Näin saattaa käydä, jos holvi on sijoitettu liian lähelle muurin päätä. Silloin muurin lyhyellä päällä ei ole tarpeeksi omaa painoa vastustamaan kaaresta tulevaa vaakavoimaa, eivätkä vaakavoimat ehdi holvaantua ajoissa alaspäin rakenteeseen.



Kuva 68. Osa siltaholvin suunnitteluohjeesta 1920-luvulta. [50]



Kuva 69. Kaariholvien vaurioitumistavat 1.kaatuminen, 2.nurjahdus, 3. Liukuminen, 4. Kehän halkeaminen. [35]

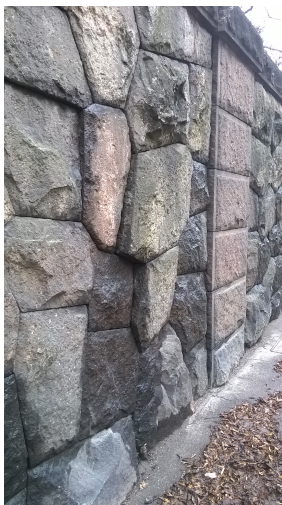


Kuva 70. Holvin sisäisiä liikkeitä ja niiden mittaustapoja [35 s.17]

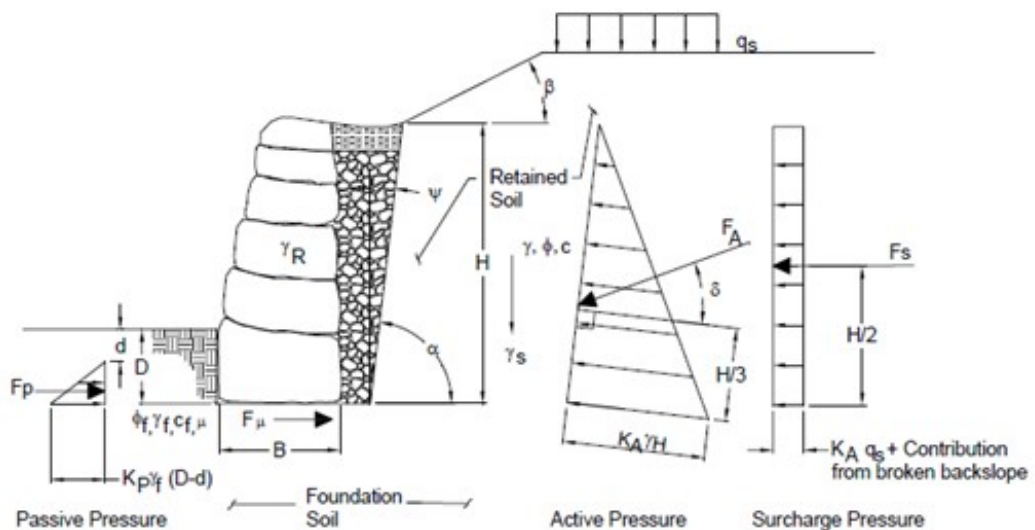
8.11 Tukimuurit

Tukimuurin on kestettävä taustan vaakasuuntainen maanpaine ja ylhäältä tuleva pystysuormitus. Muurin pohja tai tausta ei saa päästä routimaan. Routimista voidaan ehkäistä salaojituksella, sekä ylä- ja alapuolisen maanpinnan vedenohjauksilla.

Tukimuurin kuormituksen laskennassa noudatetaan geoteknisen suunnittelunormin SFS-EN1997-1 ohjeistusta ja yleisiä kuormitusnormeja SFS-EN 1991.



Kuva 71. Pullistuma Kallion paloaseman tukimuurissa.



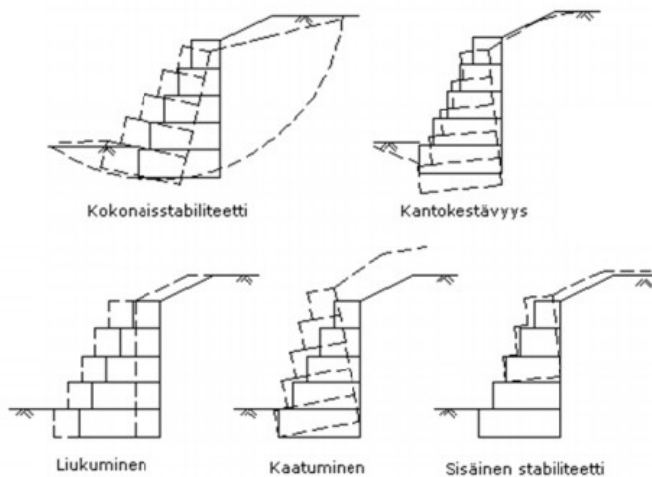
Kuva 72. Tukimuurin mitoitukseen vaikuttavia kuormia [4. s.75]

Taulukko 9. Pohjakiven ja maapohjan välisiä kitkakertoimia [4 s.80]

Pohjakiven karheus	Pohjan maa-aines	Arvioitu kitkakerroin μ
Karkea	hiekkä $\Phi=36^\circ$	0,7
Sileä, kulmikkaat kivet	jäykkä siltti tai savi $\Phi=30^\circ$	0,4
Karkea	hieman rapautunut kallioperä $\Phi=36^\circ$	0,6
Karkea	300mm paksu murskekerros $\Phi=40^\circ$	0,8
Sileä, kulmikkaat kivet	300mm paksu pohjatäyttö 0/50mm $\Phi=35^\circ$	0,7

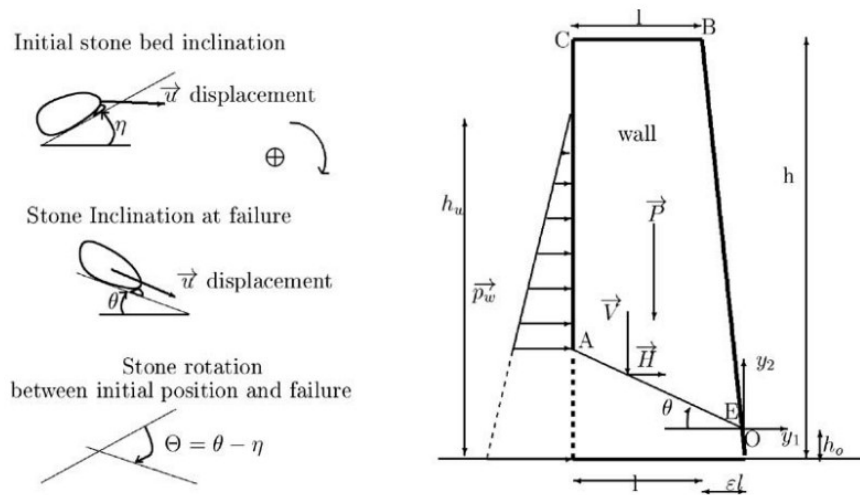
Kylmät tukimuurit murtuvat tavallisesti kaatumalla tai kivien liukuessa paikoiltaan, kivien samalla kiertyessä toisiinsa nähden. Yleensä murto tapahtuu muurin alimmassa kolmanneksessa. Laskennassa murtokohdaksi voidaan olettaa muurin pohja, missä kuormat ovat suurimmat ja tulos siten varmalla puolella. Lisäksi saattaa olla tarpeen tarkastella kokonaisstabiileetti liukupinta-analyysinä. [40],[48.]

Kylmä tukimuri ja laastilla muurattu tai valettu tukimuri toimivat samalla periaatteella, mutta laasti estää murtoonsa asti kivien välisiä kiertymiä. Samoin muurin leikkauslujuus riippuu laastin lujuudesta ja kunnosta.

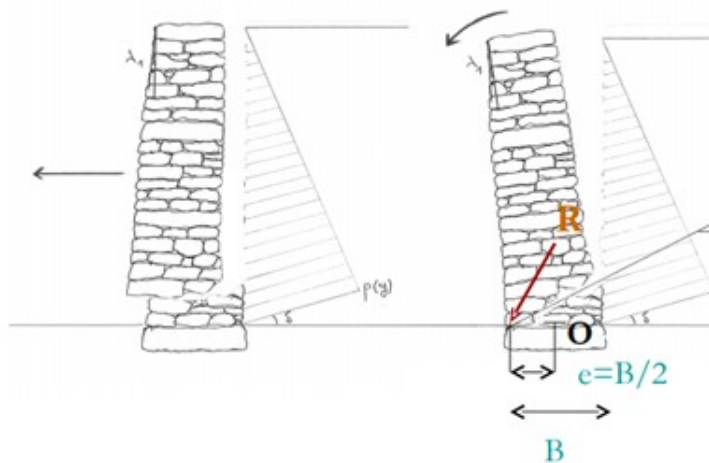


Kuva 73. Yleisiä tukimuurin murtomekanismeja. [48 s.131]

Kuvissa 70-73 on esitetty kylmän tukimuurin murtotapoja ja laskennassa käytettävää geometriaa.



Kuva 74. Kylmän tukimuurin geometria murtotilassa. Pohjakivien kallistuma η alkutilanteessa ja murtossa, sekä Θ kiven kiertymä alkutilanteen ja murron välillä. [40]

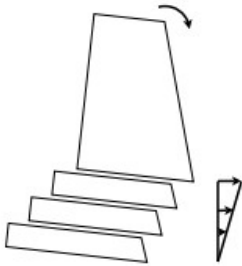


Kuva 75. Tukimuurin leikkausmurto vasemmalla ja kaatuminen oikealla [37].

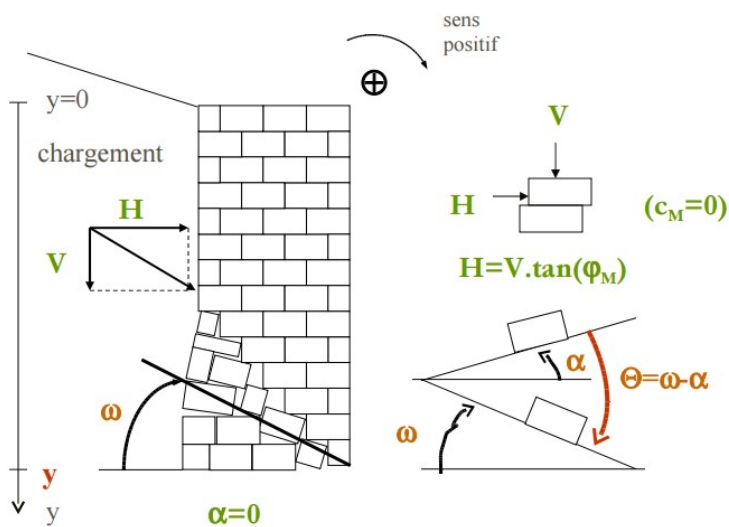
Varmuuskerroin muurin kaatumista vastaan saadaan kaavasta (7) jakamalla muuria pystyssä pitävä momentti sitä kaatavalla momentilla. Tämän kertoimen tulee pysyä suurempana kuin 1,5.

$$F_r = \frac{M_s}{M_r} \quad (7)$$

Kaavassa (7) F_r on kerroin kaatumista vastaan, M_s muuria pystyssä pitävä suunnittelumomentti M_r muuria kaatava suunnittelumomentti [39 s.24].

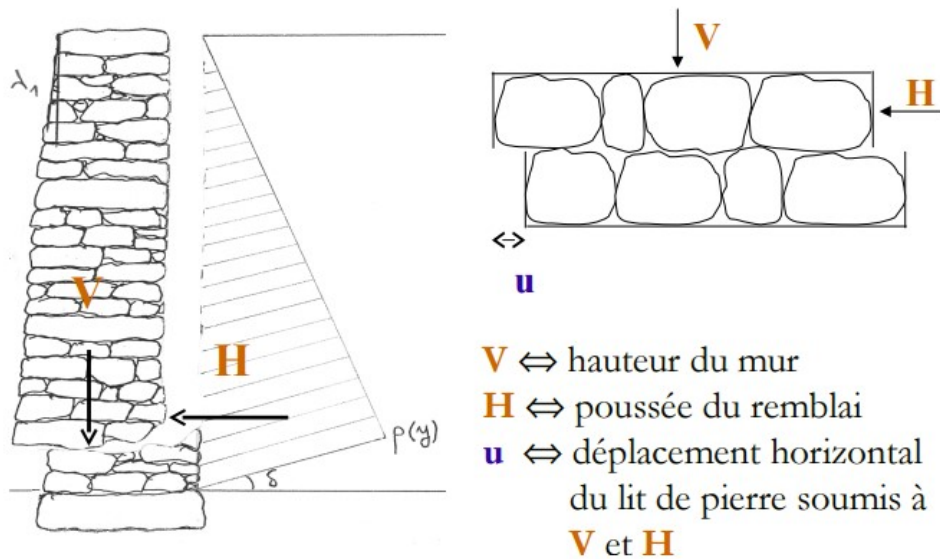


Kuva 76. Kuormituskokeissa havaittu todennäköinen murtumismalli tukimuurille. [39 s.167]



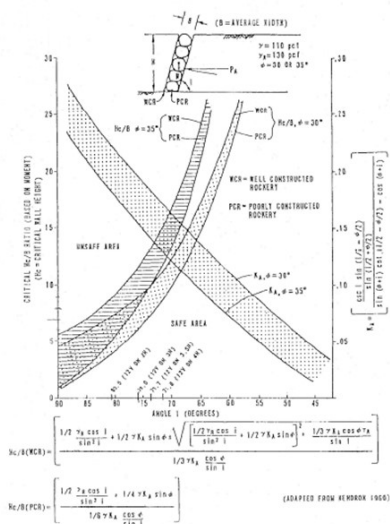
$$F_g(y, \omega) = \frac{V(y, \omega) \cdot \tan(\varphi_M - \omega)}{H(y, \omega)}$$

Kuva 77. Muurin sisäinen liukuma. F_g = varmuuskerroin sisäisen leikkauslujuuden laskentaan. [37]



Kuva 78. Tukimuurin leikkausmurto. V = muurin korkeus, H = vaakakuorma penkeereestä, u = liukuneen kiven sivuttaissiirtymä [37]

Kivisiä tukirakenteita on käytetty paljon myös vesistöjen läheisyydessä: kanavissa, silloissa ja rantavalleissa. Tällöin on huomioitava taustan maatyön lisäksi myös mm. veden aiheuttama noste, jäiden paine, veden aiheuttama eroosio pohjarakenteille ja taustalle. Käytettävän kiven tulee tällöin olla tiivistä, hyvin pakkasenkestävää ja massiivista, jotta kiven oma paino riittää tasapainottamaan kuormien aiheuttamat rasitukset.



Kuva 79. Kivisen tukimuurin kriittinen korkeus/syvyysuhde. PCR= huonosti rakennettu tukimuri (poorly constructed rockery, WCR= hyvin rakennettu (well constructed rockery). [4 s.21]

9 Muurin yleisimpiä korjaus- ja vahvistustapoja

Ensimmäinen ja tärkein vaihe muurien korjauksissa on suojata se enemmältä vaurioitumiselta eli estää veden pääsy muuriin. Riippuen kohteesta ja tehtävistä toimenpiteistä voidaan tähän käyttää tilapäisiä tai pysyviä ratkaisuja. Tämän jälkeen rakenne olisi saatava kuivaksi, joko odottamalla sen luonnollista kuivumista mieluiten kaksi vuotta, tai vaihtoehtoisesti käyttämällä keinotekoisia kuivatusta. [47.]

Historiallisesti arvokkaan muurin korjauksessa ei saisi muuttaa muurin alkuperäistä rakennetta tai sen rakenteellista käyttäytymistä. Myös ulkonäkö tulisi pitää mahdollisimman samanluonteisena. Uuden ja vanhan rakenteen tulisi kuitenkin olla erotettavissa toisistaan esim. syvyysuuntaisella merkkauksella. Tehtävän korjaustoimenpiteen tulisi myös olla myöhemmin korjattavissa, eli käytettävät rakenteet ja materiaalit on valittava tämä huomioiden. [47.]

9.1 Saumaus

Pintasaumausta käytetään, kun vauriot eivät ole edenneet syvälle rakenteeseen. Saumausta voidaan käyttää myös suojaamaan laajemmin vaurioitunutta rakennetta tilapäisesti, jos sen kunnollinen korjaaminen ei ole esimerkiksi taloudellisista syistä vielä mahdollista.

Jos muurissa on rakenteeseen vettä ohjaavia saumoja tai ”hyllyjä”, voidaan niitä muokata ulospäin kaataviksi joko laastisaumalla tai kiveä työstämällä.

Pintasaumauksessa vaurioitunut pintalaasti, lika ja kaikki irtonainen aines poistetaan ehjään laastiin saakka ja pinnat puhdistetaan. Saumat täytetään laastilla sullomalla tai injektoimalla, ja pinta käsitellään halutun näköiseksi. Jos muurin sisään on mahdollista päästä kosteutta, tulisi liian tiiviiksi vedettyjä rautasaumoja välttää. Laastina käytetään alkuperäisen kaltaista pakkasen kestäväää hydraulista kalkkilaastia tai kalkkisementtilaastia. Vanha laasti imee uudesta laastista kosteutta, joten pintojen kostutus etukäteen on tarpeellista. Kivi ei saa kuitenkaan olla märkä saumattaessa. Myös hyvä jälkihoito on tarpeen kuivumishalkeilun estämiseksi. [23 s. 17], [21 s.26.]

9.2 Syvätäyttö, syväsaumaus

Syväsaumaus on valumuurien korjausmenetelmä, jossa muurin pintaa ei tarvitse purkaa. Siksi muurin ulkonäköön ei tule muutoksia mikäli työ suoritetaan huolellisesti. Syvätäyttö on tarpeen, kun valumuurin laasti on vaurioitunut pintasaumaa syvemmältä. Syvätäyttö voidaan tehdä kevyesti poistamalla vain irtoava rapautunut aines ja humus, tai hyvin pahasti vaurioituneen ytimen tapauksessa jättämällä ainoastaan ulkokuoret pystyyn, ja valamalla sydänmuuri kokonaan uudestaan.

Vaurioitunut laasti, kasvillisuus ja lika poistetaan saumoista terveeseen laastiin saakka tai vähintään 100 mm:n syvyyteen. Muurin pinnasta irrotetaan kiilakiviä, ja rapautunut laasti poistetaan syntyneistä koloista puhallettavalla ilmalla. Sisuksista voidaan myös pestä humus ja irtonainen aines pois kuumalla vedellä ja kovalla paineella. Tämän jälkeen lätköt poistetaan paineilman avulla. Liiallista veden käyttöä on kuitenkin vältettävä.

Aiemmissa korjauksissa käytetyt vanhat sementtipitoiset korjauslaastit voidaan poistaa, jos se on helposti ja muuria vaurioittamatta mahdollista. Laastia poistettaessa koetetaan alkuperäisiä kiilakiviä kohdella varovasti; samoin valumuurien täytekiviä. Tarvittaessa muuria tuetaan kiilakiviä lisäämällä tai työnaikaisesti puu- tai teräskiiloilla. [1], [47.]

Ennen laastitäyttöä muurin annetaan kuivahtaa, mutta sen tulisi kuitenkin jäädä hieman kosteaksi. Tavallisesti käytettävässä kevyemmässä syväsaumauksessa onkalot pumpataan täyteen laastia ja saumoihin lisätään kiilakiviä. Näin muuri saadaan yhtenäiseksi, eikä sisään jää vettä kerääviä koloja. Laastina voidaan käyttää tapauskohtaisesti hydraulista kalkkilaastia tai kalkkisementtillaastia.

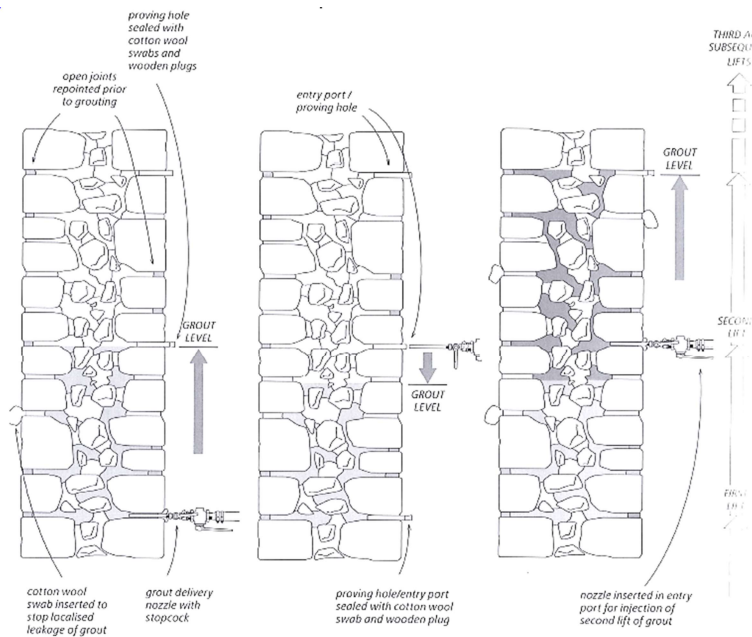
Raskaammassa syvätäytössä voidaan jopa koko muurin ydin valaa uudelleen. Tähän tulisi ryhtyä ainoastaan vakavien vaurioiden yhteydessä. Tällöin onkalon pohjalle pumpataan syvätäyttöpumpulla laastia, ja samanaikaisesti ladotaan pestyjä täytekiviä takaisin muuriin, suurimmat muurin alaosaan. Työtä jatketaan niin, että laasti täyttää kaikki kivien väliset saumat ja kolot ja pursuu ulos pintasaumoista. Kiilakiviä lisätään jatkuvasti saumoihin. Tarkoituksena on, että korjauksen jälkeen muurissa on kolot täynnä laastia, sekä kivi kiveä vasten. [14] [47.]

Muurin sisäisen tuuletuksen ja kuivumisen varmistamiseksi muurin sisään suositellaan jätettäväksi koloja pystysumoihin tai vaihtoehtoisesti ulospäin kaatavia 35-50 mm paksuja pahviputkia tasaisin välein n. 1 kpl/m².



Kuva 80. Laastin pumppausta muurin aukkoihin Suomenlinnassa. [21 s. 98]

Laastin hieman kovettuttua yli pursunnut laasti pestään pois hiljaa valuvalla vedellä, pintasaumat tiivistetään ja viimeistellään alkuperäisen kaltaisiksi. Kovettunut kalkkilaastikin tarttuu lujasti kiven pintaan, joten roiskeita ei saa jättää sateen pestäväksi. Jos pintasaumoja ei haluta täyttää, voidaan niitä tukkia työn ajaksi, tai tehdä täyttö kerroksittain niin, että pumppaus lopetetaan juuri ennen laastin pursuamista ulos. Laastia voidaan myös värjätä alkuperäisen kaltaiseksi. Kunnollinen pinnan jälkihoito on tärkeää myös syvätäytössä. [23 s. 18], [18 s. 98], [14], [47.]



Kuva 81. Periaatepiirros vaiheittaisesta valumuurin syvätäytöstä. [29 s.160]

9.3 Muurin uudelleen kokoaminen

Muurin uudelleen kokoaminen on niin sanottu raskas korjausmenetelmä. Uudelleen kokoamista käytetään, kun osa muurista on sortunut, pahasti pullistunut tai revennyt. Usein riittää vain vaurioituneen kuoren tai sen osan uudelleen kokoaminen. Ennen toimenpiteisiin ryhtymistä on arvioitava purettavan alueen laajuus tutkimalla vaurioita, ympäröivän rakenteen holvautuvuutta ja työn laatua. Muureissa voi olla aiempia huonosti tehtyjä korjauksia, aukkojen täyttöjä tai muita muusta muurista poikkeavia kohtia, joissa vauriot sijaitsevat. Tällöin joudutaan arvioimaan onko purettavan kohdan ulkonäköä syytä pitää entisellään vai sulauttaa ympäröivään muuriin. Tämä jää arkkitehtien ja museoväen arvioitavaksi. Korjattavasta muurin osasta tulisi kuitenkin saada vähintään yhtä luja kuin ympäröivä muuri. Siksi kuorta ei saa ohentaa, ja sidekiviä saattaa olla syytä lisätä. Holvautuvuus järjestetään ensisijaisesti kivityöllä, mutta mikäli se ei onnistu käytetään kiven välisiä ruostumattomia terässiteitä. Kiviä joissa ei ole kunnollista tukipintaa joudutaan vaihtamaan tai ainakin työstämään. Jouduttaessa lisäämään uusia kiviä tulisi niiden olla mahdollisimman alkuperäisen kaltaisia.

Purettaessa muuria kaikki kivet numeroidaan, ja tarvittaessa valokuvataan ja merkitään vaaka- tai pystylinjoja uudelleen kokoamista helpottamaan. Myös kiilakivien muotoon ja lukumäärään on syytä kiinnittää huomiota alkuperäisen kaltaisen yleisilmeen säilyttämi-

seksi. Jos suunnitelmissa ei muuta edellytetä, niin kuorien väliseen sidontaan käytetään sidekiviä vähintään kuten alkuperäisessä rakenteessa. [47.]

Tarvittaessa ympäröivää muuria on vahvistettava ennen purkutöitä. Valumuureissa voidaan purettavan osan ympäristö ensin vahvistaa syväsaumauksella, muutoin voidaan lisätä kiiloja ja käyttää ulkoisia tukia, vetotankoja tms.

Jos muurissa on alun perin käytetty esimerkiksi hiekkatäyttöä, joudutaan uudelleen kokoamisessa myös pohtimaan miten täytön kanssa menetellään.



Kuva 82. Numeroituja kiviä navetan seinässä. [3]

9.4 Muita toimenpiteitä

Yksittäisiä irtokiviä tai liikkuneita kiviä voidaan mahdollisuuksien mukaan kiilata tai valaa takaisin paikoilleen. Rikkoutuneita kiviä voidaan vaihtaa, paikata, pultata ja injektoida erikoispaikoissa, joissa yksittäisen kiven ulkonäöllä on suurempi merkitys.

Joskus on käytetty erilleen pullistuvien tai kallistuvien kuorien yhteen pulttausta. Pulttaus ei poista vaurion syytä, mutta saattaa toimia joissain tapauksissa tukena rakenteelle. Pulttausta voidaan käyttää myös ehjässä muurissa sisäisiä vaakavoimia tasamaan, jos kuormitusta muutetaan, sidekiviä ei alun perin ole käytetty riittävästi tai vanhat rautasiteet ovat ruostuneet.



Kuva 83. Pulttaamalla vahvistettua muuria Suomenlinnassa.

Jos muurin kantokyky vaikuttaa vaurioiden vuoksi alentuneen, voidaan muurille tulevaa kuormitusta joutua keventämään. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi tilapäisillä käyttörajoituksilla tai muilla kuormaa jakavilla rakenteilla. Tukimuurien taustatäyttöjä voidaan keventää, lisätä salaojia yms. Muurin suojaus ulkoisilla rakenteilla on myös mahdollista.

Oma lukunsa ovat myös luonnonkivellä verhotut tiilimuurit, joiden luonnonkiviverhouksia on rakennettu uudelleen mm. Helsingin rautatieaseman tornissa, Tampereen tuomiokirkossa ja Kallion kirkossa ”tuuletuskanaviston” tekemistä varten. Niissä tiivis ja kylmäpintainen kivi sekä ohut laastisauma eivät päästä laastiin ja taustan tiilimuuraukseen päässyttä kosteutta haihtumaan riittävän nopeasti, jolloin rajapintaan syntyy rakennetta vaurioittavaa painetta veden jäätyessä. Korjauksessa kiveys on purettu ja sen taakse tiilikerrokseen piikattu tuuletuskanavat. Aseman tornissa on lisäksi asennettu lämmityskaapelit kuivumista nopeuttamaan. [23.]



Kuva 84. Siltakaaren tuenta teräskiskoilla [35 s.16]

10 Perustaminen

Luonnonkivimuurit vaativat kunnan perustukset, kuten muutkin rakennukset. Kuormista aiheutuva paine ei saa ylittää maapohjan kantavuutta. Maa perustusten alla ja ympärillä ei saa päästä routimaan. Luonnonkivirakenteiden omapaino on suuri, joten pohjan kantavuus on merkityksellinen.

Vanhat kivimuurit on tavallisesti rakennettu joko kallion, laastittoman kiviladelman tai savimailla puupaalujen ja hirsiarinan varaan. Perustusten leveys ja syvyys vaihtelee maapohjan kantavuuden mukaan.

Uusia muureja perustettaessa tai vanhoja korjattaessakin saatetaan tarvita geoteknisiä selvityksiä mm. maapohjan kantavuudesta, routivuudesta ja pohjaveden pinnan korkeudesta

Uusia muureja voidaan rakentaa normaalisti mitoitettujen betonianturoiden varaan, mutta vanhojen perustusten vahvistaminen on monimutkaisempaa. Jo painuneita hirsiarinoitten ja puupaalujen varaan rakennettuja muureja on tarvittaessa vahvistettava

tapauskohtaisesti joko injektoimalla kivien väliset tyhjät tilat betonivaluilla, paaluilla tai muilla pohjarakennuksen menetelmillä. Näissä noudatetaan menetelmälle ja materiaalille asetettuja vaatimuksia ja ohjeita.

Puupaalut ja -arinat ovat herkkiä maaperän kosteuden vaihteluille. Rakennus- ja kaivutyöt saattavat muuttaa pohjaveden korkeutta maaperän kosteusoloja myös etäämpänä. Varsinkin pohjaveden pinnan aleneminen saattaa lahottaa pohjarakenteisiin käytettyä puuta hyvinkin nopeasti. Vesiolosuhteita ei tule tarpeettomasti muuttaa tällaisissa tapauksissa. Muuttuvissa olosuhteissa voidaan käyttää muurin suojana esimerkiksi savisaartoa, jossa sopiva alue muurin ympäriltä eristetään tiiviillä maahan upotettavalla savivallilla. Tiivis savi estää veden kulkeutumista vallin läpi ja pitää kosteuden tasapainossa arinan kohdalla. Savivalli(e)n kaivusvyvyys ja sijoittelu on harkittava ympäristön, maaperän laadun ja paikallisten vesiolosuhteiden mukaan. Saven tulee olla tasalaa-tuista ja riittävän notkeaa, jotta se saadaan kunnolla tiivistettyä. Saven sijasta voidaan käyttää myös bentoniittimattoa, joka paisuu kosteuden vaikutuksesta ja toimii eristävä-nä kerroksena. [47.]



Kuva 85. Kallionvarainen perustus, Machu Picchu. [www.inkas.com]

11 Vesikatteet ja pintaveden ohjaus

Kivimuurin sisään pääsevä vesi aiheuttaa jäätyessä laajetessaan muuria vahingoittavaa painetta. Siksi muurit tulee suojata sateelta kattamalla. Samoin tulee pintavedet ohjata pois muurin juurelta.



Kuva 86. Pälkäneen Pyhän Mikaelin kirkko ilman vesikatetta. [kuva shl.fi]

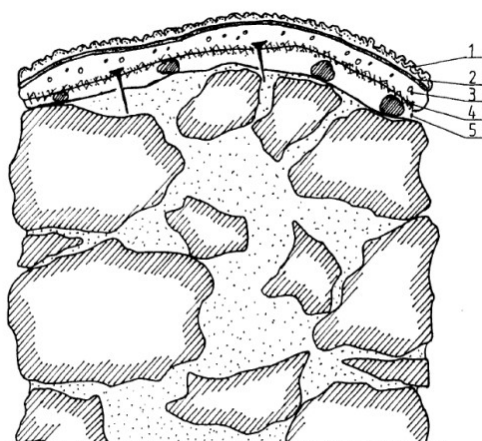
Muurin kattamiseen voidaan käyttää tapauskohtaisesti erilaisia vaihtoehtoja.

Vanhoissa erillisissä linnanmuureissa, joissa ei ole rakennuksen vesikattoa suojana on usein käytetty vedeneristeenä tuhta ja tiivistä savea. Niissä muurin yläosa on tiiviisti ladottu, ja kallistettu. Tämän päälle on asennettu savi, tuohi- ja savikerrokset. Tiivis märkä savi toimii vedeneristeenä, mutta se ei saisi päästä välillä kuivumaan. Siksi saveen päälle on tehty paksu nurmikerros pitämään savea kosteana. Tällaisia nurmikatteita käytetään edelleen muun muassa Suomenlinnan muurien kunnostuksissa.

Muureja kunnostettaessa voidaan erillinen vesikate rakentaa muurin päälle omalla rungollaan tai kate voidaan piilottaa muurin sisään. Naamioitu vesikate tehdään esimerkiksi 300 mm muurin yläreunasta alaspäin. Vedeneristeen alle jätetään tuuletusrako, jotta viistosateen tuoma tai muuriin aiemmin kerääntynyt kosteus pääsee haihtumaan. Vedeneristeeseen ja sen alapuolisiin kerroksiin tehdään asianmukainen kaato. Lopuksi vedeneristeen päälle voidaan latoa kiviä, turvetta tms. kateen naamioimiseksi. [14.]



Kuva 87. Savi-tuohi katetta osittain avattuna Suomenlinnan muurilla.



1. SIROTEKERROS
2. VESIERISTYS
3. SAÄNKESTÄVÄ BETONI
4. MUOTTIVERKKO
5. TUULETUSRAKO

Kuva 88. Yksi tapa muurin kattamiseen. [24 s.40]

12 Yhteenveto

Hyvin rakennetut kivimuurit voivat säilyä oikein huollettuna jopa tuhansia vuosia. Muurin lujuuteen vaikuttavat monet eri tekijät, joista rakennustyön osuus on tärkein. Siksi kivimuureille ei ole käytettävissä suunnittelustandardeja. Uusien muurien suunnittelua ja rakentamista, sekä vanhojen muurien korjauksia varten tarvitaan tuntemusta siitä, mitkä tekijät rakennustyössä ja materiaaleissa ovat erityisen oleellisia. Tällaisia ominaisuuksia on tässä opinnäytetyössä pyritty selventämään rakennesuunnittelun ja korjausrakentamisen näkökulmasta.

Vanhoja muureja on kunnostettu ja joudutaan kunnostamaan jatkossakin. Toisaalta esimerkiksi valumuurien kunnostusmenetelmät ovat kehittyneet viime vuosikymmeninä, mutta kokemusperäinen tietämys luonnonkivimuureista on usein jäänyt rakentajille ja urakoitsijoille. Vanhojen tekijöiden jäädessä pois kuvioista on uusien alalle tulijoiden ensin perehdyttävä kivirakenteisiin ja niiden toimintaan. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tarjota siihen eväitä ainakin akuutiksi ensiavuksi.

Lähteet

- 1 On engineering methods for assessment of load capacity of stone arch bridges. Kristoffer Holmström. Chalmers University of Technology, master's thesis, 2010
- 2 Luonnonkivirakenteiden suunnitteluohje. Pekka Mesimäki. Kiviteollisuusliitto ry, 2000.
- 3 Kivimies Pertti Mäkinen, haastattelu, valokuvat ja muurikierros 16.4 2015
- 4 Rockery design and construction guidelines. FHWA-CFL/TD-06-006, 2006.
- 5 Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls. Fátima Moreira de Vasconcelos à Universidade do Minho para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, 2005
- 6 Finstone internetsivu (luettu 31.3.2015):
<http://www.suomalainenkivi.fi/luonnonkivialan-standardisointi-ja-cekmerkinta/luonnonkivituotteiden-testausmenetelmastandardeja>.
- 7 RT ohjetiedosto 30-10314. Luonnonkivet, suomalaiset rakennuskivet
- 8 Suomen kansallisen geologian komitean internetsivu (luettu 8.4.2015)
<http://www.geologia.fi>
- 9 RT ohjetiedosto 89-10646. Muurit ja tukimuurit
- 10 Muuratut rakenteet, RIL 99. Helsinki 1975
- 11 SFS-EN 1996-1-1. Eurokoodi 6. Muurattujen rakenteiden suunnittelu. Raudoitettuja ja raudoittamattomia rakenteita koskevat yleiset säännöt. 2012.
- 12 Assesment of the in-plane shear strength of stone masonry walls by simplified models. G. vasconcelos, P.B. Lourenco. University of Minho, Department of Civil Engineering, Portugal.
- 13 State of the Art of Research on Historic Structures in Italy. L. Binda & A. Saisi. Dept. of Structural Engineering - Politecnico of Milan. Italy
- 14 Kivinetat Finn Vernadoc 2009 – kivinetakinkerit. Toim. Markku Mattila. Ruoveden kunnan sivistystoimi, Suomen ICOMOS, Kansanrakentamisen komitea. + luentomoniste Rakennusinsinööri Eero Kotkaksen osuudesta: Luonnonkivimuuri-en mitoitus, rakennus- ja korjaustekniikka.

- 15 Silko 1.501 Luonnonkivi verhouksmateriaalina – yleiset laatuvaatimukset. Liikennevirasto Taitorakenneyksikkö 12/2014
- 16 Julkisivurappaus oy:n internetsivu: www.julkisivu.com. (luettu 22.10.2015)
- 17 HYB-Märkälaastit ja kalkkimaalit, Hyvinkään betonin laastiesite 2001
- 18 Laastit vanhoissa rakenteissa. Thorborg Von Konow. Suomenlinnan hoitokunta. 2006.
- 19 RT 89-11184, Muurien ja tukimuurien korjaaminen 2015
- 20 Olavinlinnan muurinkorjaus ja tiiliosien konservointi 2013-2016 alustava työselytys. Museovirasto, kulttuuriympäristön hoito, restaurointi
- 21 Luonnonkiviset rakenteet – Kivinavetat. Pohjois-Pohjanmaan korjausrakentamiskeskus. Korjausohjeita 31.10.2004
- 22 Rakentajain kalenteri 2002. Rakennustieto oy 2001
- 23 Korjatun luonnonkivijulkisivun kosteustekninen toiminta. Diplomityö. Noora Mäki-Ruuti. Tampereen Teknillinen Yliopisto 2010
- 24 Ruotsinsalmen linnoituksen ruutikellarien 82 ja 83 raunioiden historia- ja kunnosselvitys. Antti Ahola. Opinnäytetyö 2011. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma
- 25 Historiallisten kivirakenteiden laastit. T. Perander, T Råman, M. Kanerva, R. Vahnenen. 1985. VTT:n tutkimuksia 341
- 26 Rakennusten korjaus ja kunnossapito. Urho Orola. 1943. Pellervo-seura
- 27 Nairaland forum internet-sivu. <http://www.nairaland.com/2207723/architectural-wonders-pre-colonial-africa-pics>. Luettu 4.11.2015
- 28 RIL 121-2004. Pohjarakennusohjeet
- 29 Practical Building Conservation. Stone. English Heritage 2012
- 30 Conservation of Building and Decorative Stone Volume 2. J. Ashurst, F.G. Dimes. Butterworth-Heinemann 1990
- 31 Congres International sur la Consvration da la Pierre et autres Materiaux. Paris, Unesco 1993

- 32 Porvoon tuomiokirkko, Jälleenrakennustöiden dokumentointi 2006-2008. Toim. U. Rahola ja T. Sonninen. Konservointi T. Sonninen 2010
- 33 Retkeilijän kiviopas. Geologian tutkimuskeskus 2010
- 34 Atkinsglobal internetsivu: <http://www.atkinsglobal.com/~media/Files/A/Atkins-Global/Attachments/sectors/roads/library-docs/technical-journal-4/limit-equilibrium-assessment-of-drystone-retaining-structures.pdf>. Luettu 6.11.2015
- 35 Spandrel Walls, Managing the Risks. Lessons learnt. Network Rail 2012
- 36 Assessing the two-dimensional behavior of drystone retaining walls by full-scale experiments and yield design simulation. A.S. Colas, J.C. Morel, D.Garnier. 2012 Universite de Lyon, Departement Genie Civil et Batiment, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'état, Vaulx-en-Velin, France.
- 37 Etude des Murs de Soutenement en Maçonnerie de Pierres Seches. B. Villemus. Internet-sivu: http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/03_ethude_des_murs_de_soutenement__cle5f6949.pdf. Luettu 6.11.2015
- 38 Kylmämuuri internet-sivu: <http://www.pierreseche.com>. Luettu 6.11.2015
- 39 Mecanique des murs de soutènement en pierre seche: Modelisation par la calculation a la rupture et experimentation echelle. A. S. Colas. Universite de Lyon. 2009
- 40 Experimental assessment of dry stone retaining wall stability on a rigid foundation. B. Villemus, J. C. Morel, C. Boutin. , Ecole Nationale des Travaux Publics de l'état 2007
- 41 Huonerakenteiden oppi. G. E. Asp. 1904, TKK:n uusintapainos 1992.
- 42 A Guide to the Commissioning, Inspecting and Assessing of Dry Stone Walling. Dry Stone Walling Association of Great Britain
- 43 CO2OL Bricks, avoin seminaari 2010. Luentomateriaalia. http://www.co2olbricks.eu/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Events/120509_helsinki/03_Lahdensivu_Rakenusfysiikka_ja_rakennussuojelu_tulostus.pdf
- 44 ICE manual of bridge engineering. 2008
- 45 RIL 206-2010. Muurattujen rakenteiden suunnitteluohe
- 46 Liikenneviraston ohjeita 9/2010. Tiepankereiden ja –leikkausten suunnittelu

- 47 Valumuurien korjausohje. E. Naakka, S. Mentu, I. Kaskinen. Museovirasto. Rakennushistorian osasto 1995
- 48 Geolujitetut maarakenteet. Tiegeotekniikan käsikirja. Liikennevirasto 2-2012
- 49 Tiili - Perustietoa arkkitehtipiskelijälle. TKK arkkitehtiosasto rakennusoppi 2003
- 50 Teknillinen käsikirja. M. J. A. Forsblom. K. J. Gummerus oy 1929

Suomen kivilajeja



Graniitti [8]



Dioriitti [8]



Gabro [8]



Diabaasi [8]



Peridotiitti [8]

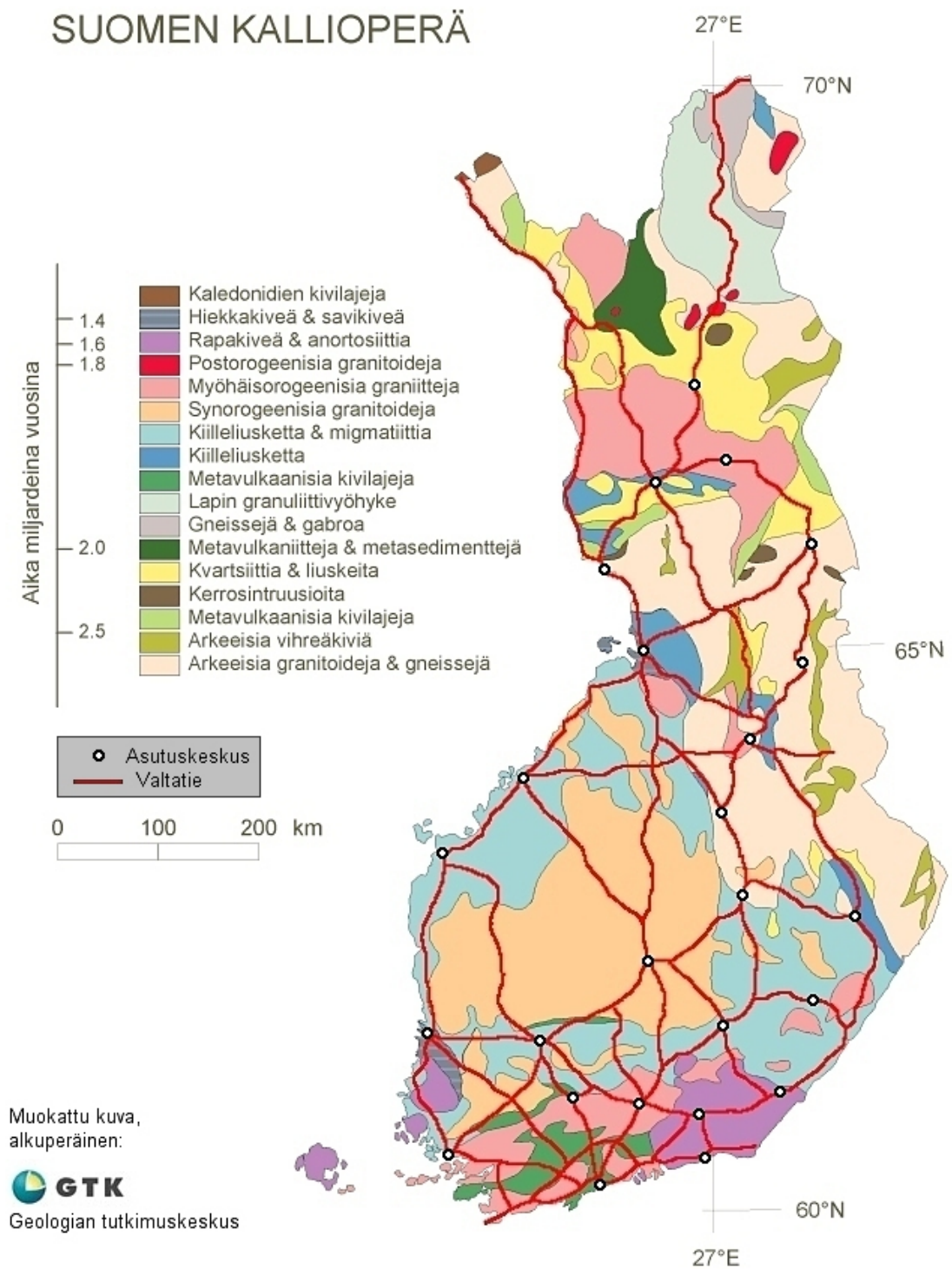


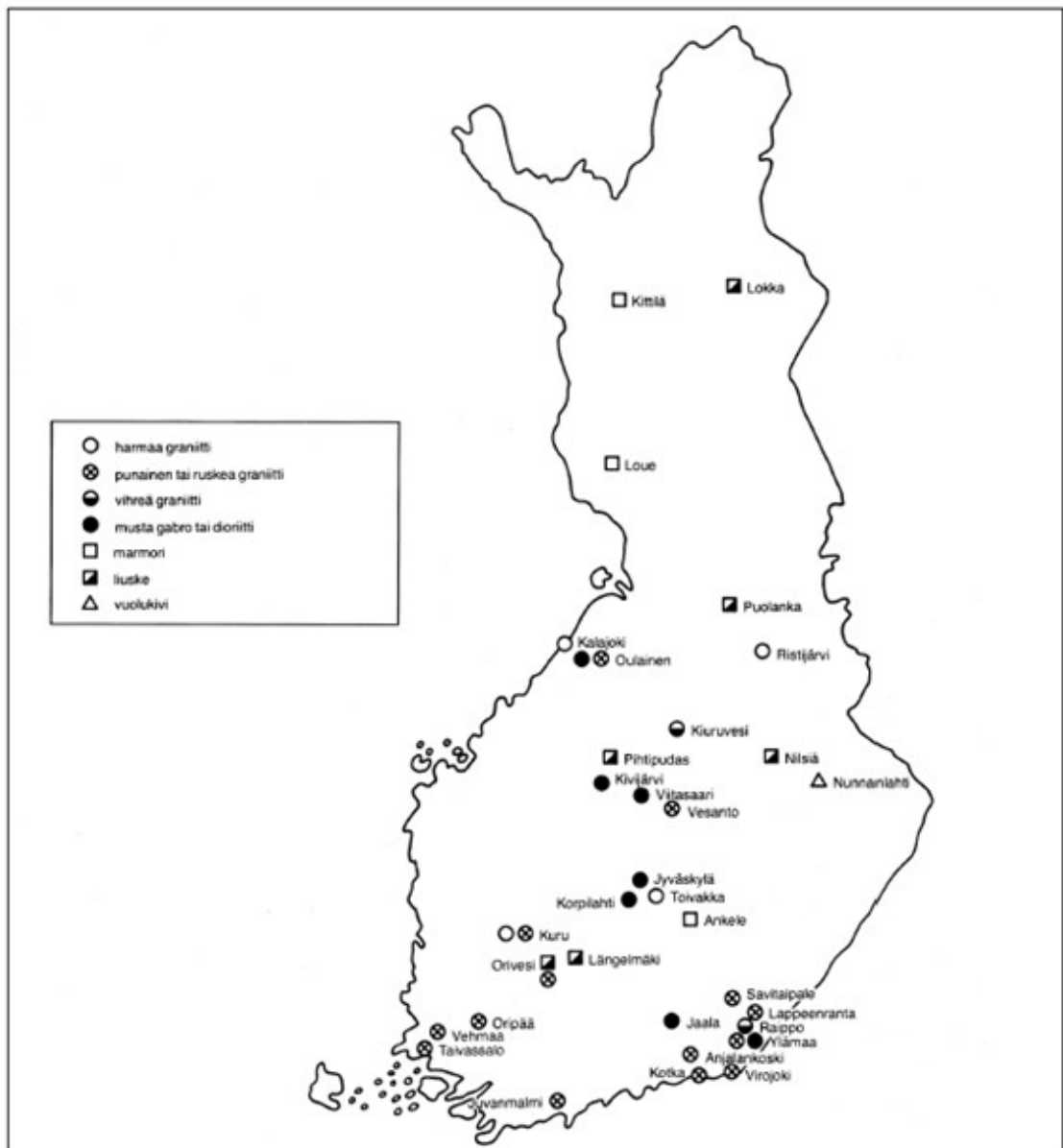
Gneissi [8]



Kiilleliuske [8]

Kivilajien esiintyminen Suomen kallioperässä





Rakennuskiven louhintapaikat [15]

