

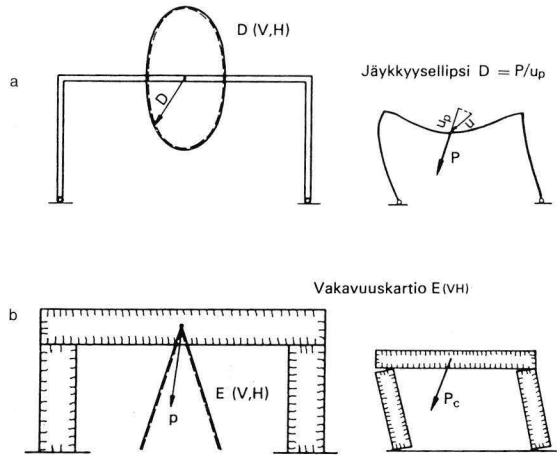
Kivirakenteiden sortumisvaara, korjaus ja entisöinti

1. Johdanto

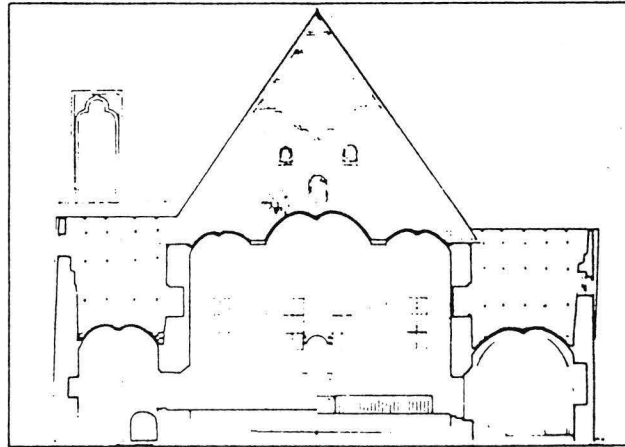
Vanhojen rakennemuistomerkkien säilyvyyden ylläpito on kiihtyvien muutospaineiden, kuten saasteen ja liikenteen rasitusten vuoksi, vuosi vuodelta vaikeutunut. Tämä koskee varsinkin keskiaikaisia muurattuja rakenteita. Sattuneet odottamattomat sortumiset muodostavat vakavan haasteen, joka pakottaa kiinnittämään huomiota rapautumisen ja raunioitumisen loppuvaiheeseen, itse sortumaan. Sen ennakoimista ja ehkäisemistä, rikkomatta rakennuksen arvoa historiallisena muistomerkkinä, on seuraavassa yritetty valaista sortumamekaniikan avulla.

Muuratut rakenteet ja nimenomaan perinteiset kivirakenteet poikkeavat olennaisesti nykyään käytetyistä teräs-, puu- ja jännitetyistä betonirakenteista. Jälkimmäisten perikuvana voidaan pitää kimmoisesti joustavaa palkkia. Ero kimmoisten rakenteiden ja muurattujen rakenteiden välillä ilmenee selvimmin kimmoksen kaaren eli jousen ja irrallisista neljäkaskivistä kootun kivikaaren käyttäytymisessä. Jousi katkeaa kun viritysvaikutus kasvaa niin suureksi, että jousen *kriittinen jännitys* eli murtolujuus saavutetaan. Lujasta kivilaadusta tehdyn kivikaaren vakavuus ja koossapysyminen sen sijaan edellyttää riittävän raskasta omapainoa, ja se sortuu kun siihen vaikuttaa *kriittiseen suuntaan* riittävän suuri lisäkuorma (kuva 1). Kimmoksen yhtenäisen rakenteen kantavuuden määrää siten kuormituksen suuruus ja *lujuus*, kun taas muurattujen rakenteiden kantavuuden määrää pelkästään *kokonaiskuormituksen suunta* eikä suuruus. Kullakin rakennusaineella ja kullakin rakennustekniikalla on siten myös oma teoreettinen perustansa, oma tasapaino-oppinsa eli statiikkansa, jonka mukaan suunnittelu ensi kädessä tapahtuu. Siten yhtenäisten teräs-, puu- ja betonirakenteiden suunnittelu tapahtuu ensi kädessä kimmostatiikan perusteella, kun taas muurattujen, ei monoliittisten rakenteiden suunnittelu on suoritettava kivirakennustatiikan mukaan. Nämä statiikat vaikuttavat suoraan myös rakennusten ulkoiseen muotoon. Siten ovat kimmostatiikan perikuvien, jatkuvan palkin ja ulokepalkin, leimaamat suunnittelijat mieltyneet kaapistomaisiin rakennelmiin, joita koristavat ulosvedettyjä laatikoita muistuttavat ulokkeet. Näillä on menestyksellisesti pystytty pilaamaan kaupunkikuvia, niin meillä kuin muuallakin Euroopassa. Onneksi näiden luomusten elinikä ei ole kovin pitkä.

Toisaalta voimme vieläkin ihailla vuosituhansia kestäneitä kivirakennuksia. Muodon ja kantavien voimien yhteys- ja vuorovaikutus ilmenevätkin täydellisimmin muuratuissa kaari- ja holvirakenteissa. Näihin rakenteisiin ei voida soveltaa yhtenäisten monoliittisten eli kiinteiden rakenteiden kimmoteoriaa. Esimerkiksi kuvan 2 esittämien Mynämäen keskiaikaisten kirkonholvien kimmoinen analysointi osoittaisi, että holvikuorien momentit olisivat niin suuria, ettei mikään järkevä mitoitus voisi onnis-



Kuva 1. Portaalikehä, a) teräsrakenne, b) kivrakenne.



Kuva 2. Mynämäen kirkon holvit.

tua. On ihme, että kuoret raudoittamatta kestävät. Jos oltaisiin johdonmukaisia ja noudatettaisiin voimassa olevia normeja, pitäisi vaatia, että kaikki nämä keskiaikaiset holvit yleistä turvallisuutta vaarantavina hajoitettaisiin maan tasalle.

Kiinteistä rakenteista poikkeavasti on muratun rakenteen luonteenomaisuutena sen pinnalla esiintyvät halkeamat. Tämä halkeamien suonisto kuvaa sisäisten voimien eli jännitysvuon kulkua. Mutta samalla sen muutokset saattavat paljastaa rakennuksen vakavuutta vaarantavan prosessin käynnistymisen, ja siten halkeamamuodostus voi ennakoida rakenteen sortumista. Kirjoituksen tarkoituksena onkin valottaa halkeamajärjestelmien merkityksen tulkittamista sekä rakennevarmuutta että entisöimistä silmäläpäitien.

2. Kivirakenteiden statiikat

Muurattujen rakenteiden vauriot kohdistuvat ensi kädessä laastiin, joka lämpövaihte-
luiden, kosteuden sekä veden ja sen jääytymisen vaikutuksesta ajan mittaan rapautuu.
Meidän ilmastossamme ovat jään halkeamia laajentava vaikutus sekä maanvaraisten
muurien maan routimisen vaikutus varteenotettavia vaaratekijöitä. Tornirakenteissa
on salamanisku vaarallinen, varsinkin jos salama etenee pitkin ukkosilman vedellä
täyttämää halkeamaa. Lämpötilan kohotessa tällöin jopa 1800:aan celsiusasteeseen,
siitä johtuva äkillinen höyrykehitys aiheuttaa muurauksessa vakavia vaurioita. Eril-
lisen ongelman aiheuttavat viime vuosisadan vaihteessa rakennetut vallirakennelmat,
joissa muuratut kasematit on peitetty maalla. Näissä on veden kalkkilaastia liudentava
vaikutus aiheuttanut eteneviä sortumia.

Muurattujen rakenteiden kantavina alkioina ovat muurauskivet, joiden lujuus mo-
nenkertaisesti ylittää laastin lujuuden. Varsinkin laastin vetolujuus on siksi pieni,
ettei sitä tarvitse ottaa huomioon. Sen mukaan muurattua rakennetta voidaan pitää
kosketuksessa olevien kivien puolikiinteänä kokoelmana. Kivet otaksutaan äärettö-
män jäykiksi ja lujiksi, mikä ehto kivirakenteissa yleensä on täytetty. Saumoissa
vaikuttavat puristus ja kitka, mutta eivät vetovoimat.

Kivirakenteiden klassinen eli diskreetti statiikka [1] [2] perustuu siten kahteen
saumoja koskevaan ehtoon

A Saumoissa ei esiinny vetoa. Normaalijännitys σ saumassa on aina puristava
tai 0

$$\sigma \leq 0 \quad 1)$$

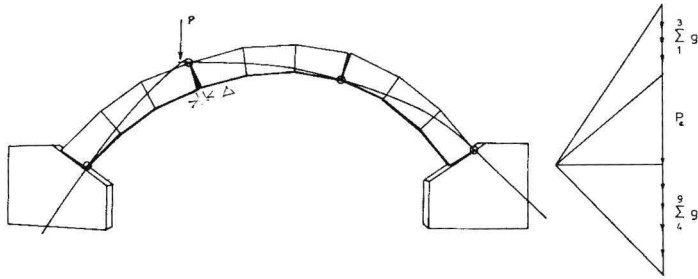
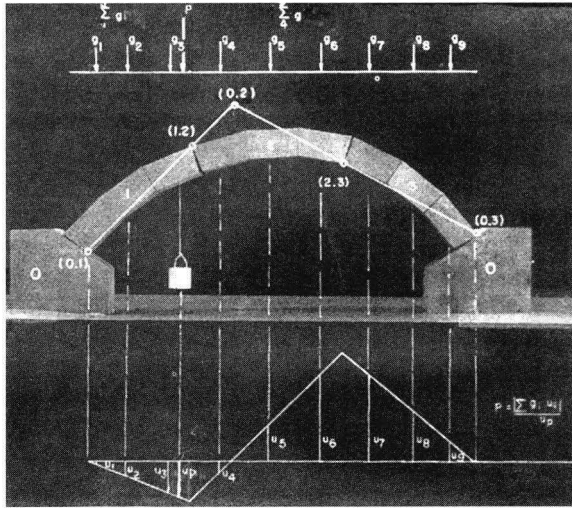
B Läpätunkemattomuus: Saumasiirroksen eli saumavälyksen leveys Δ on aina posi-
tiivinen tai 0

$$\Delta \geq 0 \quad 2)$$

Toispuoliset ehdot, vedon poissulkeminen saumoissa ja niihin liittyvä läpätunke-
mattomuusehto erottavat tämän statiikan täysin sovinnaisesta kimmoisen kiinteän ra-
kenteen statiikasta.

Irrallisten kivien muodostaman puolikiinteän rakenteen koossapysyvänä voimana
on painovoima, joka synnyttää saumoihin puristusta. Vakaiden kuormien joukko muo-
dostaa vakavuuskartion tai pyramidin (kuva 1b). Kriittisen rajan muodostaa vaka-
uuspyramidin vaippapinta, johon myös kuuluu pyramidin kärki, joka vastaa 0-kuor-
maa. Tämä merkitsee, että päinvastoin kuin kiinteä rakenne, kivirakenne hajoaa pai-
nottomassa tilassa, aivan kuin valtamerien syvänteiden paineesta veden pinnalle nos-
tetut merihirviöt. Stabiilisuusraja voidaan määrätä yksikäsitteisesti. Kinemaattisesti
tämä voidaan suorittaa yhden vapausasteen mekanismin avulla (kuva 3). Yksinkertainen
tapaus on kohdassa 3 käsitelty muurin kaatumisen, jolloin vapausasteena on
kallistuman kulma α .

Klassisen teorian edellytykset toteutuvat selvimmin työstetyistä neljäkäsikivistä
kootuissa kaari- ja holvirakenteissa. Kaaren jännitysvuo voidaan kuvata nk. puristus-
viivan avulla. Annetulle kuormitukselle voidaan piirtää lukematon määrä puristusvi-
voja. Mutta jos löytyy edes yksi puristusviiva, joka pysyy kaaren sisällä eikä sivua
sen reunoja, kaari on stabiili. Jos kuormien keskinäistä suhdetta muutetaan riittävästi,
kaari sortuessaan muuttuu nivelmekanismiksi, jossa nivelet sijaitsevat kivien sau-
moissa (kuva 3). Ylläoleva sääntö on yleinen: jos kivirakenteelle löytyy edes yksi
tasapainotila, jossa puristusvuo pysyy rakenteen sisällä, rakenne on stabiili. Tämä

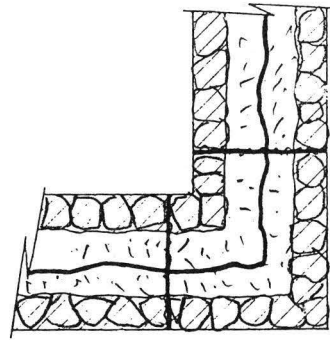
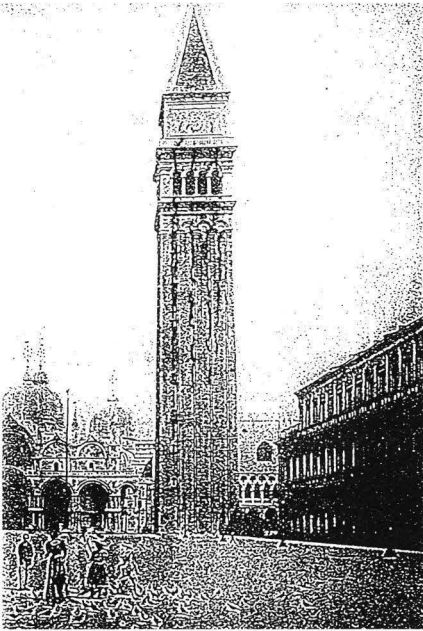


Kuva 3. Kaaren rajatilan mekanismi ja puristusviiva.

antaa suunnittelijalle tavattoman vapauden ja se selittää esim. gotiikan rakennusten ylen suuren muutorikkauden.

Vaikka klassinen teoria hyvin hallitsee laadukkaiden rakenteiden, kuten työstetyistä kivistä koottujen kivirunkojen ja holvien käyttäytymistä, se ei sellaisenaan pystynyt selittämään työstämättömistä kivistä koottujen muurien odottamattomia sortumia. Esimerkkinä mainittakoon Venetsian kuuluisan San Marcon kellotornin sortuminen. Torni oli 1000-vuotisen elinikänsä aikana kestänyt sekä salamaniskuja että hirmumyrskyjä, kunnes se kallistumatta hajosi laajenevien pystyhalkeamien vaikutuksesta 1902 maan tasalle (kuva 4).

Pienistä epäsäännöllisistä kivistä muurattua rakennusta voidaan laastin heikkouden tai rapautumisen vuoksi pitää jatkumona, joka ei kestä vetoa missään, kun halkeamat eivät rajoitu kiviin saumoihin [3], [4]. Tämän viime vuosikymmenien aikana kehitetyn *vetoakestäättömän jatkumon statiikan* edelläkävijänä voidaan pitää P. Delangen *puolinesteen teoriaa*, jonka hän esitti julkaisussaan »Statica e Meccanica de semifluidi», 1786. Neste kestää hydrostaattista painetta, jolloin kuutioalkion kuuteen sivupintaan vaikuttaa yhtä suuri puristusjännitys. Puolinesteessä vaikuttaa kuutioalkion sivuihin myös vain puristusta, mutta kolmessa kohtisuorassa suunnassa vaikuttavat puristusjännitykset saattavat olla eri suuria muodostaen puristuskentän. Siten jos pu-



Kuva 4. a) Venetsian kampaniilin halkeaminen, b) Pystysuorat halkeamat muurin nurkassa.

ristusjännitys häviää yhdessä suunnassa puhumme kaksiakselisesta puristuskentästä, jos taas puristusjännitys häviää kahdessa kohtisuorassa suunnassa puhumme yksiakselisesta eli säteettäisestä puristuskentästä. *Vetokestämättömän jatkumon teoria* perustuu kahteen toispuoliseen ehtoon

A'. Missään rakenteen pisteessä (x) ei voi esiintyä vetojännityksiä $\sigma(x)$

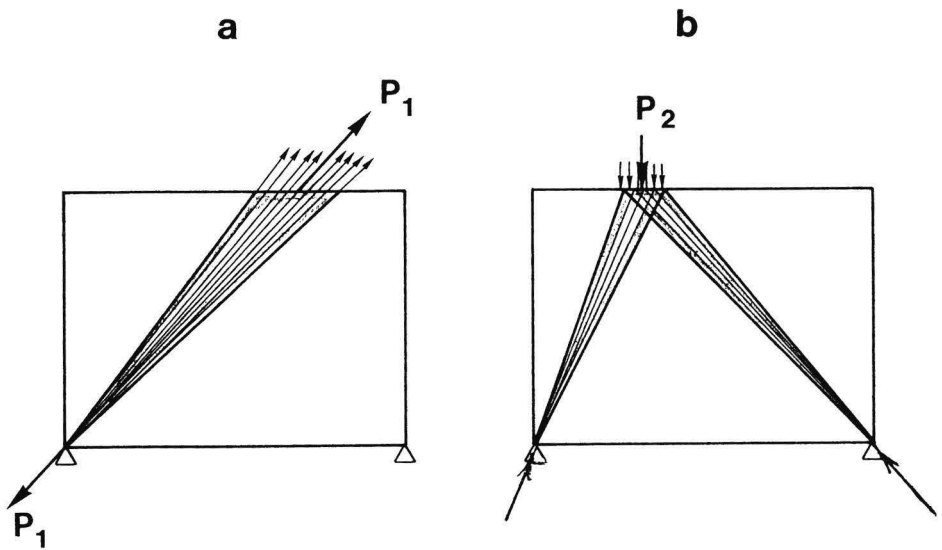
$$\sigma(x) \leq 0 \quad 1')$$

B'. Läpätunkemattomuus: Syntyneen halkeaman leveys Δ on aina positiivinen tai 0

$$\Delta \geq 0 \quad 2')$$

Tällä muurattujen rakenteiden puolinnostatiikalla on eräitä erikoispiirteitä, jotka eivät ekspliiittisesti ilmene klassisessa teoriassa. Kiinteiden rakenteiden stiiikassa rakennuksen kantava osa on aina tunnistettavissa ja se on riippumaton kuormien vaikutuspisteistä. Vetoakestämättömän jatkumon kantava rakenne sen sijaan on täysin riippuvainen kuormituksesta ja käsittää vain osan rakennuksesta. Rakennus jakaantuu kahteen osaan, puristuskenttien muodostamaan kantavaan osaan ja siitä irronneeseen lähinnä jännityksettömään osaan (kuva 5). Jokainen muuriin vaikuttava mahdollinen puristuskentän synnyttävä kuormitus vastaa siten omaa kantavaa rakennetta, jota halkeamat erottavat ei-kantavasta osasta. Vakavuuden toteaminen jatkumostatiikan perusteella on paljon vaikeampaa kuin klassisen teorian perusteella, koska poisjäävät osat ja niitä erottavat halkeamat eivät ole etukäteen tiedossa.

Ylläesitetetyt stiiikat kuvaavat muurattujen rakenteiden käyttäytymistä likimääräisesti. Seuraavassa tarkastamme muurausta pirstovien tekijöiden vaikutusta rakenteen vakavuuteen vetoakestämättömän jatkumon stiiikan valossa, koska tämä parhaiten kuvaa kantavien muurien vaikeasti hallittavia vauriomekanismeja. Rajoitumme eräisiin esimerkkitapauksiin.



Kuva 5. Jokaista kuormitusta P_1 , P_2 vastaa oma kantava rakenne säteittäisine jännityskenttineen (varjostettu). a) Vedetty vaate b) Paikallisesti puristettu muuri.

3. Muurin kallistuminen

Maapohjan peräänantaminen on usein aiheuttanut kivimuurien kallistumisen, mikä on johtanut niiden kaatumiseen. On paljon kallellaan olevia muurattuja seiiniä ja torneja, ja usein herää kysymys, milloin rakenteen kaltevuus on saavuttanut kriittisen rajan. Jos tasapaksu muuri on kiinteä, poikkileikkaukseltaan suorakaide, jonka korkeus on H ja paksuus B (kuva 6), tämä kaatuu, kun kaltevuus α on sellainen, että painovoiman resultantti on suorakaiteen lävistäjän suuntainen, jolloin (kuva 7)

$$\operatorname{tg} \alpha = B/H \quad 3)$$

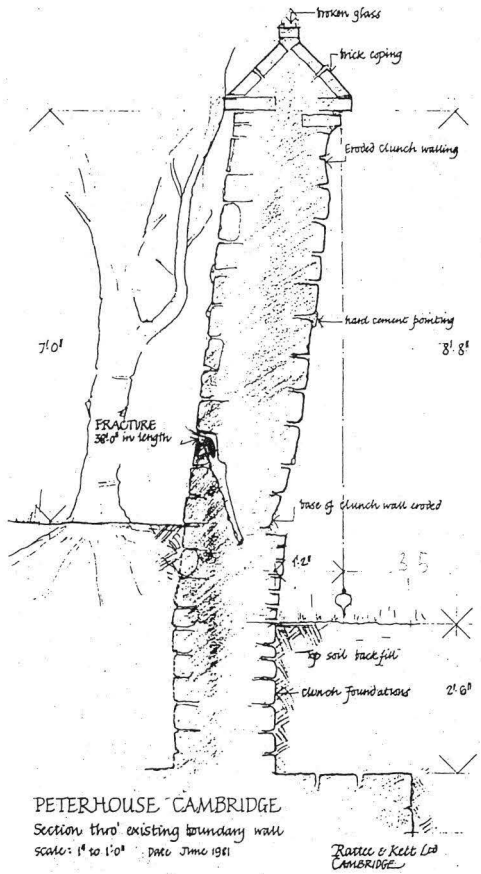
Jatkumostatiikan mukaan suorakaide ei kallistu kokonaisuutena, vaan vinohalkeaman ansiosta siitä irtoaa kannassa kolmionmuotoinen osa, joka pysyy paikallaan (kuva 7). Koska muurista on poistettu kolmio, kantavan rakenteen painopiste siirtyy suorakaiteen keskipisteestä kaltevuuden suuntaan, jolloin kaatumisvaara kasvaa. J. Heymanin [5] suorittaman selvityksen mukaan kriittinen kaltevuus pienenee tällöin arvosta B/H arvoon

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,728 B/H \quad 4)$$

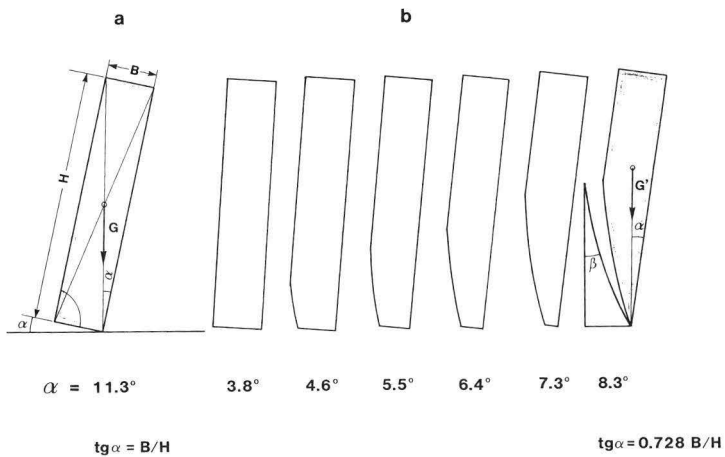
mikä vastaa kulmaa $\alpha^\circ = 48 B/H$. Kriittisen kaltevuuden reduktio on siten varsin tuntuva. Tornissa, jonka vaakaleikkaus on onntto neliö, vastaava reduktio on pienempi.

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,8418 B/H \quad 4')$$

Reduktiota aiheuttavan vinohalkeaman kulma β on tällöin suurempi. Nämä tulokset ilmentävät selvästi vetoakestämättömän jatkumon kantavaa rakennetta supistavaa vaikutusta. Edellä kuvatun muuriakselin suuntaiset vinohalkeamat ennakoivat kriittisen rajatilan lähestymistä, joten niihin on kiinnitettävä erikoista huomiota. Tälle vau-



Kuva 6. Kallistuneen muurin pitkittäinen vinoalkaama [5].

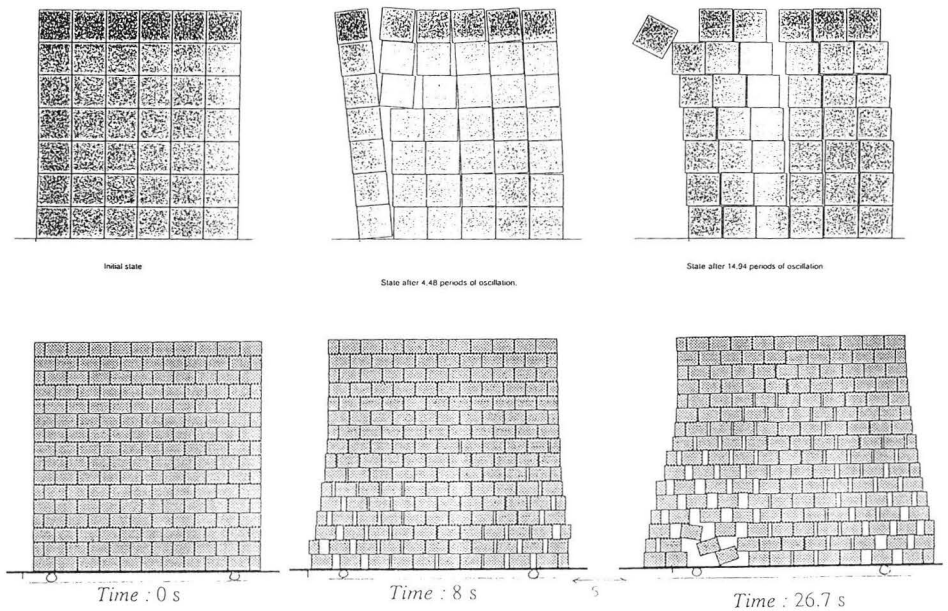


Kuva 7. a) Kiinteän muurin kriittinen kallistuma, kun $B/H = 0,2$, J. Heymanin mukaan [5]. b) Vinohalkeaman ja kallistuman α kasvu kriittiseen tilaan, jolloin $\alpha = 8,3^\circ$, kantava rakenne varjostettu.

riomuodolle altistuvat nimenomaan keskiaikaiset muurit, joissa säännöllisesti muuratujen ulkokuorien välissä on täyttö, joka käsittää kivien tiili- ja laastimurskeen muodostaman enemmän tai vähemmän kovettuneen sydämen [5], jonka lujuus on pieni (kuva 4b).

4. Tärinän vaikutus muuraukseen

Paitsi edellämainittua kantamattomien rakenneosien irtoamisesta johtuvaa vakavuuden pienenemistä on olemassa myös eräs toinen vauriomuoto, joka ei sinänsä aiheuta rakenteen kaatumista, vaan johtaa muurin kaoottiseen hajoamiseen. Näin on asianlaita, jos muuri altistuu toistuvalla dynaamisella vaikutuksella. Liikenteen tärinä samoin kuin suuret seismiset aallot aiheuttavat muurauksessa olevien halkeamien vuorotonta sulkeutumista ja aukenemista. Tämä prosessi ei ole jaksollisesti toistuva, sillä jokaista halkeaman sulkeutumista vastaa kivien välinen yhteentörmäys, jonka iskuvaikutuksesta halkeama laajenee. Tällöin pystysuora painovoima ilmaisee määräävän vaikutuksensa. Laajeneminen koskee ennen kaikkea pystyhalkeamia ja -saumoja. Kivien vaakasaumojen laajenemista ehkäisee painovoiman aiheuttama puristus, mutta pystysuorat iskut vaikuttavat pienentävästi saumojen kitkaan. Siten dynaamiset vaikutukset toispuolisine luotaantuontyvine iskuineen muuttavat rakenteen korostetusti puolines-temäiseen tilaan, jossa laastin välittämät vetovoimat on täysin poistettu. Prosessin edetessä etenkin pystysuorat saumat laajenevat laajenemistaan, mikä lopulta johtaa rakenteen hajoamiseen. Kuvassa 8 on esitetty neljäkaskivipinojen asteittainen hajoaminen vaakasuorasti toistuvan edestakaisen liikkeen johdosta. Hajoamisprosessi on simuloitu tietokoneella J. J. Moreaun kehittämän algoritmin avulla [6]. Vaikka hajoa-



Kuva 8. Kivipinon etenevä hajoaminen alustan vaakasuorassa värähtelyssä J.J. Moreaun mukaan [6].

minen on lähinnä kaoottinen, siihen vaikuttaa kivien latoamisjärjestys. Jos kuutiot on ladottu päällekkäin lomittamatta (kuva 8a), pystysaumojen leviäminen alkaa ylhäältä ja vastaliikkeisiin liittyy myös kallistumisia. Jos tiilenmuotoiset kivet on ladottu lomittain, alkaa muurin leviäminen alhaalta ilman kivien kallistumista (kuva 8b). Kuutiopin hajoamismekanismi onkin ymmärrettävä, koska oman painon aiheuttama puristus yläosan vaakasaumoissa on pienempi kuin alhaalla, joten kitkakulma saavutetaan ensin yläsaumoissa. Kuutiopin simulaatioissa saatu tulos onkin pystytty verifioimaan meillä suoritetuilla kokeilla, mikä samalla vahvistaa J. J. Moreaun algoritmin oikeellisuutta. Lomittain ladotun pinon hajoaminen on sen sijaan paradoksaalinen eikä sille löydy vielä sitovaa mekaanista selitystä. Työstämättömistä kivistä pystytetyt keskiaikaiset muurit vastaavat paremmin kivien lomittaista muurausta, joten niissä rakenteen leviämisen alhaalta käsin pitäisi olla luonnollisempaa. Italiassa, jossa muurattuihin rakenteisiin kohdistuvat ennen kaikkea maanjäristysten vaikutukset, onkin saamamme tiedon mukaan torneissa havaittu halkeilemisen alkaneen alhaalta käsin.

5. Lieriömuotoisen tornin sortumamekanismit

Tarkastamme ideaalitapausta, jossa tornin muuri on ympyrälieriö. Dynaamisten impulssien muurikehän suuntaiset komponentit synnyttävät saumojen ja halkeamien iskuvoimien vaikutuksesta pystysuoria radiaalisia halkeamia.

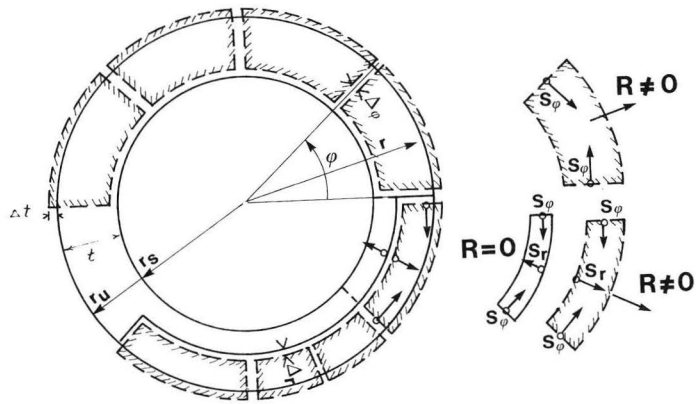
Verraten leveiden pystyhalkeamien takia muurin kimmoisia vaakavenymiä ei tarvitse ottaa huomioon, jolloin muurin kehän laajeneminen Δp tietyllä korkeudella vastaa pystyhalkeamien leveyksien summaa $\Sigma \Delta_\phi$. Muurin radiaalisiiirtymä u_r on sen mukaan säde-etäisyydellä r .

$$u_r(r) = \frac{\Sigma \Delta_\phi(r)}{2\pi} \geq 0 \quad (5)$$

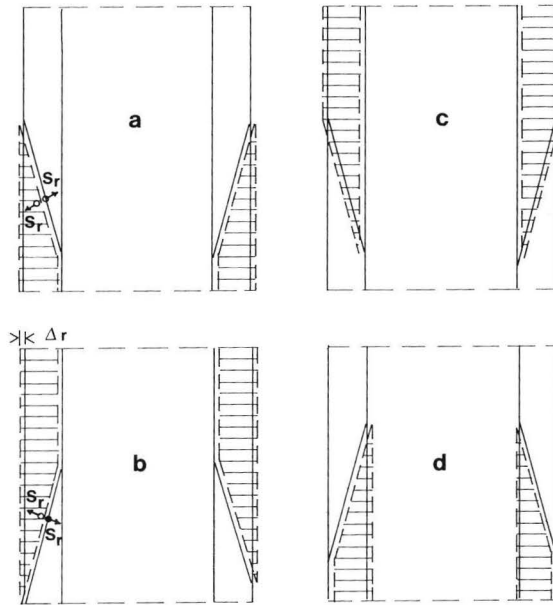
Epäyhtälö johtuu läpätunkemattomuusehdosta, koska jokainen halkeamaleveys Δ_ϕ on positiivinen. Sen vuoksi siirtymät ovat aina positiivisia, siis ulospäin suunnattuja (kuva 8). Jos nyt halkeamat ulottuvat vakioleveyisinä läpi seinän, muuri siirtyy kokonaisuudessaan sillä korkeudella ulospäin vakiomäärällä u_r . Muurin kaarevuuden takia kehäsuurteisilla iskuvoimilla S_ϕ on säteensuuntainen ulospäin työntävä resultantti R , joten tärinän halkeamia kasvattava vaikutus on suurempi kuin suorassa muurissa (kuva 9). Jos halkeamat laajenevat ylhäältä alaspäin, kasvaa myös radiaalinen siirtymä samassa suhteessa. Jos halkeamaleveydet Δ_ϕ muuttuvat säteensuunnassa, ne eivät voi kasvaa ulkopinnasta (r_u) sisäpintaan (r_s) päin, koska tällöin muurin paksuus t (kaavan 5) mukaan pienenee määrällä

$$\Delta t = \frac{\Sigma (\Delta_\phi(r_u) - \Delta_\phi(r_s))}{2\pi} < 0 \quad (6)$$

mikä seinän läpätunkemattomuusehdon mukaan ei ole mahdollista. Radiaalisen halkeaman leveys voi sen vuoksi vain kasvaa säteen suunnassa, mikä kaavan 6 mukaan merkitsee, että muurin paksuus kasvaa: $\Delta t \geq 0$. Kasvu on mahdollinen vain, jos seinämän sisään syntyy muurin kehän suuntaisia pystyhalkeamia. Halkeamien kasvu säteen suunnassa on epäjatkua, askelittainen, halkeamaleveyden pysyessä askeleiden välillä vakiona. Jokaisen muurisektoriosasen tangentialinen pystyhalkeama toimi is-



Kuva 9. Halkeamien Δ vaikutus radiaaliseen siirtymään u_r ja niiden synnyttämät työntövoimat S .



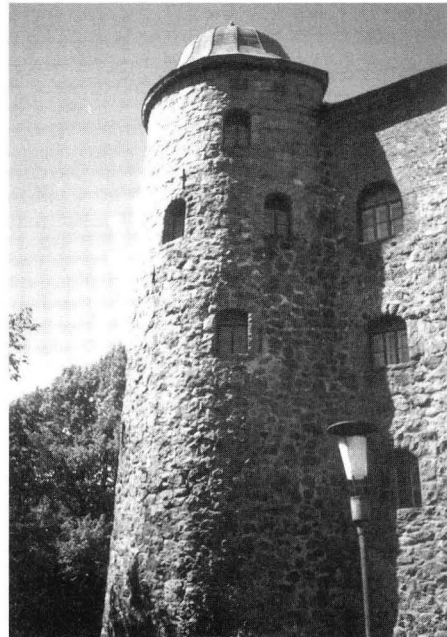
Kuva 10. Ympyrälieriön muotoisen tornin mahdolliset halkeamamekanismit. a ja b toteutuvat, c ja d eivät. Varjostettu alue radiaalisesti haljennut.

kuimpulssin S_r lähtöalkiona, joka työntää yhdessä rengasvoimien S_φ kanssa halkeaman ulkopuolista osaa ulospäin. Tämä voi johtaa ulkokuoren osan irtilohkeamiseen. Yleensä voidaan kuitenkin otaksua, että tangentialisia halkeamia on vain yksi ja säteittäinen halkeama kasvaa jatkuvasti pystysuunnassa tietyistä muurin pinnassa olevasta viivasta lähtien. Tällöin tulevat kysymykseen kuvan 10 vinokartiomekanismit. Muurin sisäosiin, joissa ei esiinny radiaalisia pystyhalkeamia, ei synny myöskään tangentialisia halkeamia, koska niihin kohdistuvat radiaaliset sisäänpäin suunnatut

iskuimpulssit synnyttävät puristavia rengasvoimia radiaalisen halkeilun välttämiseksi. Sen vuoksi ovat mahdollisia kuvan 10 kartiomekanismit a ja b, jotka johtavat tornin välittömään sortumiseen. Toisaalta mekanismit e ja d eivät ole kinemaattisesti mahdollisia, koska ne rikkovat läpätunkemattomuusehtoa vastaan. Radiaalisesti haljennut kuvissa varjostettu osa voi vain liikkua ulospäin, kun taas halkeamaton, kuvassa varjostamaton, osa pysyy paikallaan. Mekanismit a) johtaa tornin ehjän yläosan pystysuoraan painumiseen. Mekanismit b) sen sijaan on mahdollinen tornin pohjakerroksessa, jos siinä on kovettunut muurausjätteen täyte, joka usein löytyy keskiaikaisten tornien juuresta. Mekanismeissa a ja b yhdistyvät tavallaan kallistuneen muurin vinohalkeamamekanismit ja kivipinon leviämismekanismit pystysuorine halkeamineen.

6. Viipurin linnan Paratiisitornin tapaus

Mielenkiintoisen esimerkin tärinän vaikutuksesta tarjoaa Viipurin linnan nk. Paratiisitorni (kuva 11). Tässä on syytä luoda lyhyt katsaus Paratiisitornin rakennushistoriaan, koska se osaltaan valottaa vaurioiden syntyä. Viipurin kivilinnoituksen ensimmäinen rakennusvaihe käsitti jyrkän P. Olavin tornin ja sitä ympäröivän tornista erillään olevan muurin, joka oli rakennettu suoraan karjalaisten valloituksessa palaneen paaluvarustuksen päälle. Toisen rakennusvaiheen käynnisti Kaarle Knuutinpoika, joka oli käskynhaltijana 1442–1448. Silloin rakennettiin ensimmäiset pysyvät rakennukset muurin sisäpuolelle. Arkeologi V. A. Tjulenevin arvion mukaan [7] lounaismuuri jäi tässä rakennusvaiheessa noin kolmanneksen matalammaksi kuin nykyinen korkeus. Tämän muurin kaakkoiskulmaan rakennettiin pyöreä Paratiisitorni. Muuraus tapahtui erillään lounaismuurista. Sen seinämäpaksuus oli n. 1,4 m, joten se oli ainoa tässä vaiheessa rakennettu torni, joka kesti tykistötulita. Sen ulkomuoto ei ole

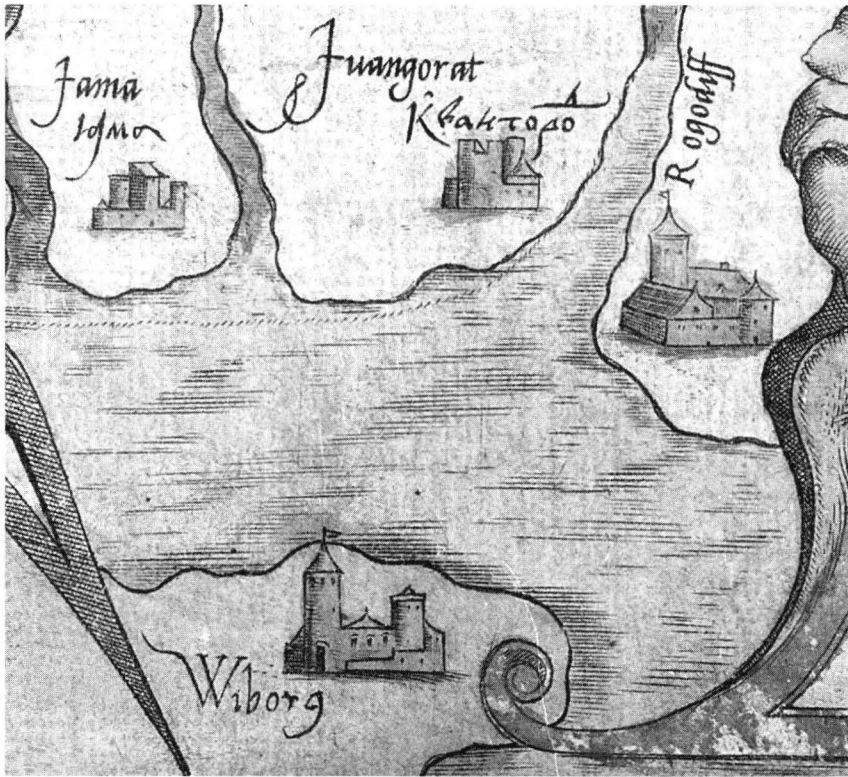


Kuva 11. Viipurin linnan Paratiisitorni.

muuttunut vuoden 1887 jälkeen, jolloin A. Hackman [8] suoritti linnan perusteellisen inventaarion. Silloin torni käsitti viisi kerrosta ja oli 20 m korkea. Kerrosten puulatioita kannattivat alla olevat muuratut holvit. Holvien vaakavoimien tasapainottamiseksi tornin muurit yhdistettiin useilla siteillä, joiden rautaiset ankkuripääät ovat vieläkin näkyvissä muurin ulkopinnassa. Ylimmän kerroksen holvia kannatti yksitoista siroa ruodekaarta, jotka yläpäästään liittyivät ruoderenkaaseen. Koska ikkuna-aukoissa on Tottien ja Sturen vaakunoita, tornin rakentaminen ajoittuu vuosien 1457–1497 väliseen aikaan. Tämä torni oli 1887 ilmeisesti ainoa rakennusosa, joka oli säilynyt sellaisenaan linnan loistokaudelta 1400-luvulla. Se oli samaan aikaan rakennetun Tallinnan Pikk Hermannin kaksoisveli.

Linnan kolmas rakennusvaihe käynnistyi vuoden 1550 vaiheilla. Silloin Kustaa Vaasa vaati, että toisessa vaiheessa keskuslinnoituksen ulkopuolelle rakennetut hoikat tornit on madallettava. Pyhän Olavin tornia oli vahvistettava ja korotettava ja sen yläosa muutettava kahdeksankulmaiseksi. Tähän työhön ryhdyttiin 1560-luvulla, ja vuoden 1563 laskutuksista ilmenee, että ehkä myös Paratiisitornia osaksi purettiin ja sen kiviä käytettiin päätornin vahvistamiseen. Tämän jälkeen ei Paratiisitornin rakenteisiin ole puututtu. Seuraavilta vuosisadoilta on useita linnan kuvituksia, mutta kolmatta rakennusvaihetta edeltäneeltä ajalta ei ollut tiedossa yhtään kuvaa. Vuonna 1978 tehtiin kuitenkin mielenkiintoinen kartografinen löytö. Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusstatiiikan oppituloon käynnistämään kivirakenteiden tutkimusprojektiin liittyvien selvitysten yhteydessä löytyi liettualaisessa Antoni Wiedin rikkaasti kuvitetusta Venäjän alkuperäiskartasta 1540-luvulta myös Viipurin, Narvan ja Inkerin venäläisten linnojen kuvia (kuva 12). Viipurin linna muistuttaa selvästi nykyistä muotoa, vaikka päätorni on tasapaksu ja Paratiisitorni on selvästi viereistä muuria korkeampi. Mutta myös muut läheisyydessä olevat linnojen näköiskuvat muistuttavat enemmän tai vähemmän niiden todellisia esikuvia. Missä määrin näköiskuvat vastaavat originaaleja, ei voida ratkaista yksittäistapauksen perusteella, vaan on tehtävä kaikkia kuvituksia koskeva luotettavuusarvio. Varmistaaksemme kuvitusten autenttisuuden käännyimme Neuvostoliiton tiedeakatemian Leningradin haaraosaston puoleen pyytäen lausuntoa Viipurin ja useiden muiden linnankuvien näköisyydestä. Haaraosastossa toimiva prof. J. Šaskolski vahvisti meidän käsityksiämme. Vaikka linnojen kuvitukset eivät ole tarkkoja, ne välittävät vaikutelman, joka on sitä tarkempi, mitä silmäänpiistävämpiä piirteitä (Viipurin ja Narvan hallitsevat keskustornit) linnassa on. Rakennushistorialliset selvitykset vahvistavat, että Wiedin kuva vastaa sen aikaista linnan rakennusvaihetta, jolloin päätorni vielä oli tasapaksu ja lounaismuuri oli matalampi [7]. Sen mukaan voidaan Wiedin kartan piirrosta pitää Viipurin linnan vanhimpana kuvituksena. Se on ainut kolmatta rakennusvaihetta edeltäneen ajan piirros, joka kuvaa linnan keskiaikaista ulkonäköä ennen 1560-luvulla tehtyjä muutoksia. Kysymykseksi jää, onko Paratiisitornia todella madallettu vai johtuuko tornin suhteellinen ylikorkeus kartassa silloisesta nykyistä matalammasta lounaismuurista. Tjulenev katsoo, että vuonna 1463 tapahtunut purku rajoittuu vain tornin sakaroihin. Sen mukaan Paratiisitornin korkeus ja sen ulkonäkö vastaavat tänä päivänä täysin sen alkuperäistä muotoa 1400-luvulta.

Kun Viipurin linna Suomen valloituksen jälkeen menetti sotilaallisen merkityksensä, alkoi linnan rapautuminen. Tulipalot vuosina 1830 ja 1856 nopeuttivat raunioitumista. J. Ahrenberg teki linnan pelastamiseksi restaurointisuunnitelman, jonka mukaan linna muutettaisiin museoksi ja kirjastoksi, jolloin se olisi siiretty kaupungin haltuun. Valitettavasti Venäjän sotilasviranomaiset päättivät vuonna 1888 edelleen pitää linnan hallussaan ja ryhtyivät itse kunnostamaan sitä 1890-luvulla. Sillä välin



Kuva 12. Viipurin ja sen ympäristön linnoja A. Wiedin alkuperäiskartassa [10].

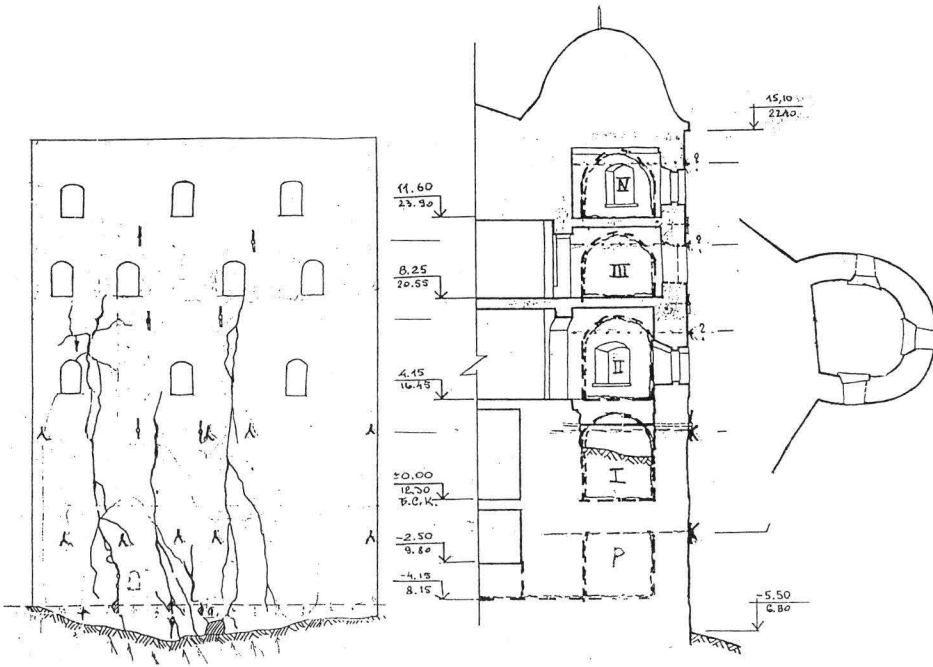
raunioituminen jatkui. Valokuvista päätellen Paratiisitornin neljännen kerroksen holvi samoin kuin osa sen ja kolmannen kerroksen muurista sortuivat ennen Venäjän sotilas-insinöörihallinnon restaurointisuunnitelman valmistumista vuonna 1892. Vuonna 1898 loppuunsaatetussa restauroinnissa linna pelastettiin täydelliseltä tuholta ja sen upea ulkonäkö palautettiin entiseen komeuteen, mutta saneeraus suoritettiin erittäin rajusti. Eniten siitä kärsi juuri Paratiisitorni. Neljän kerroksen sirot keskiaikaiset holvit poistettiin ja korvattiin teräspalkkien varassa olevilla puuvälipohjilla. Kellarikerroksen tilat jäivät kovettuneen rakennusjätteen täyttämiksi ja ensimmäinen kerros täytettiin irtojätteellä. Kolmen ylimmän kerroksen lattian kohdalle asennettiin uusia ankkuroituja siteitä. Tämän lähes 100 vuotta sitten käynnistetyin rakennusvaiheen jäljiltä Paratiisitorni on tänä päivänä. Vaikka tornin sisusta on kokenut täydellisen muutoksen, se on ainoa linnan rakennelma, joka pääpiirteissään on säilyttänyt keskiajalta perityn ulkomuotonsa. Paratiisitornia on sen vuoksi pidettävä erittäin arvokkaana 1400-luvun linnoitus- ja rakennustaidon muistomerkinä.

Tämän kirjoituksen tekijä joutui ensimmäisen kerran tutustumaan tornin vaurioihin kesäkuussa 1991 Suomen ja Ruotsin teknillisten akatemioiden Viipurin linnassa pitämän seminaarin aikana. Tässä ja jälkeenpäin tapahtuneessa tarkastuksessa osoittautui vaurioiden halkeamamekanismi siksi mielenkiintoiseksi, että se luonnostaan kytkeytyi Tampereella käynnistettyyn kivirakenneprojektiin, varsinkin kun Viipurin linna jo ennestään kuului projektin piiriin. Samalla heräsi ajatus, miten Suomen puolelta voi-

taisiin myötävaikuttaa tornia todella uhkaavien vaurioiden korjaamiseen. Tämä asia sai myönteisen käänteen, kun Rakennusinsinööriliiton historiantoimikunta päätti entisen puheenjohtajansa prof. R. Ruson aloitteesta vuonna 1992 ottaa Paratiisitornin korjauksen avustuskohteeksi. Sillä välin oli Viipurissa jo 1990 käynnistetty tornin pelastusoperaatioon liittyvä tutkimus ja suunnittelutyö, jonka suoritti pietarilainen rakennusyritys »Start» ja jota valvoi Pietarin restaurointiviraston »Spetsprojektrestavratsia» Viipurin haaraosasto. Nämä laitokset luovuttivat hyväntahtoisesti historiantoimikunnalle tornin rakennetta ja vaurioiden tutkimusta koskevan arvokkaan materiaalin [10] sekä korjaussuunnitelmat. Historiantoimikunnan aloite ei johtanut konkreettiseen yhteistoimintaan tornin korjaushankkeessa. Siihen oli monta syytä, rakennusalamme syvenevä lama sekä avustettavien restaurointihankkeiden koordinoinnin täydellinen puuttuminen niin Suomessa kuin Venäjälläkin. Lisäksi ilmaantui meillä julkisuudessa tiettyä vastahakoisuutta sitoutua avustushankkeisiin ilman ennakkoehtoja. Tämä on hyvin lyhytnäköinen ja vahingollinen näkökanta, kun huomioon otetaan Viipurin osa meidän historiassamme ja sen muistomerkkien ainutlaatuinen arvo ja runsaus. Venäläisten panosta Viipurin entisöimisessä ei sovi vähätellä, mutta heidän nykyisten resurssiensa niukkuuden takia ovat monet muinaismuistomerkit vaarassa tuhoutua. Sen vuoksi on välttämätöntä, että suomalaiset tukevat sikäläisiä entisöimishankkeita, riippumatta siitä, mikä on Viipurin lopullinen kohtalo. Muuten voi käydä niin, että kaupunki pakkosaneerataan sellaiseksi, ettei sitä Viipuriksi enää voi tunnistaa. Paratiisitornin tapaus on vain yksi esimerkki avustushankkeen kariutumisesta. Tärkeimmät korjaustoimenpiteet tornin pelastamiseksi »Start»-yritys saattoi päätökseen vuonna 1993, jolloin seinämuurin juuri vahvistettiin teräsbetonisella kauluksella, joka oli ankkuroitu peruskallioon paaluilla.

Kuitenkin on mainittava, että historiantoimikunta vastavuoroisesti hankki korjausta valvoville Viipurin viranomaisille ja museolle linnan rakenteita koskevaa arkistomateriaalia ja on välittänyt sille asiantuntijoiden mielipiteitä korjaussuunnitelmasta. Yhteydenpidon tärkein anti on siten ollut informaation vaihto. Eniten on tästä hyötynyt kivirakenneprojekti, kun linnan museon johto mahdollisti tornirakenteen ja sen vaurioiden yksityiskohtaisen tarkastuksen.

Vaurioiden korjauksesta vastaavien elinten selvityksen [10] mukaan torni on perustettu peruskalliokumpareelle, mahdollisesti suurelle kilivilohkareelle, joka on punaista graniittia. Seismisen pohjatutkimuksen mukaan seinän ulkopuolella kallio on melko rikkinäistä gneissia, joten torni sijaitsee graniitin ja gneissin rajavyöhykkeellä. Kumpareen kovera pinta on reunoiltaan jyrkästi kalteva ja sen syvyys maanpinnasta pitkin seinämuurin ulkokehää vaihtelee melkoisesti. Maakerros on täytemaata, harmaata hiesua, jossa on tiili- ja kivisirpaleita. Tornin seinän keskiaikaisen osan muurauksessa on käytetty työstämättömiä graniittilohkareita. Muurin alla kalliopinta on hammastettu. Askelmien välillä on kaltevia pintoja (kuva 16). Vuonna 1988 ensimmäinen kerros tyhjennettiin irtojätteistä n. 2,5 metrin syvyydeltä. Työ piti kuitenkin tällöin keskeyttää sisäpuolella havaittujen, pääasiassa pystysuuntaisten halkeamien takia. Kuvassa 13 on esitetty seinän levitetyn ulkovaipan halkeamat syys-lokakuussa 1991 suoritettujen mittausten ja täydentävien tarkastusten mukaan. Pääasiassa pystysuorat halkeamat läpäisivät muurin ensimmäisessä kerroksessa seinän ulkopinnasta sisäpintaan. Pystyhalkeamat ovat sängen tasaisesti jakautuneet pitkin seinän ulkokehää kolmannen kerroksen ikkunoihin saakka. Tällä korkeudella esiintyy myös hienoja vaakahalkeamia muurin sisäpinnassa. Tornin juuren halkeamien leveys ylitti paikoitellen 20 mm (kuva 14). Samalla todettiin muurin ulkokehän siirtyvän radiaalisesti ulospäin yli 2 mm vuodessa.



Kuva 13. Tornin levitetyn vaippapinnan halkeamapiirros ja tornin poikkileikkaukset [10].



Kuva 14. Tornin halkeamat syksyllä 1991.

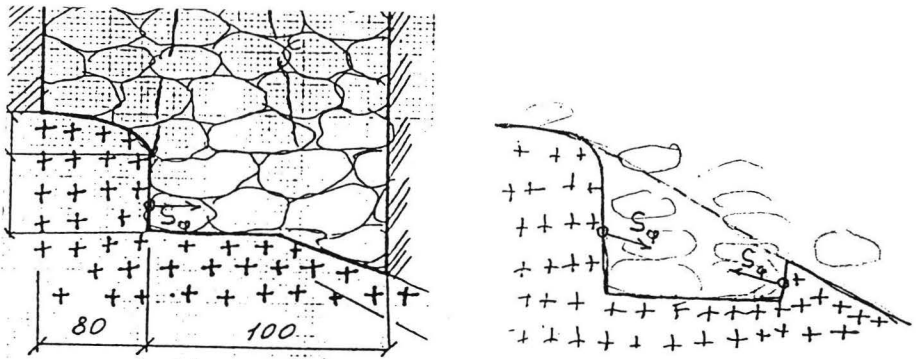


Kuva 15. Keskiaikaisen puusiteen jättämä ontelo kerroksessa I.

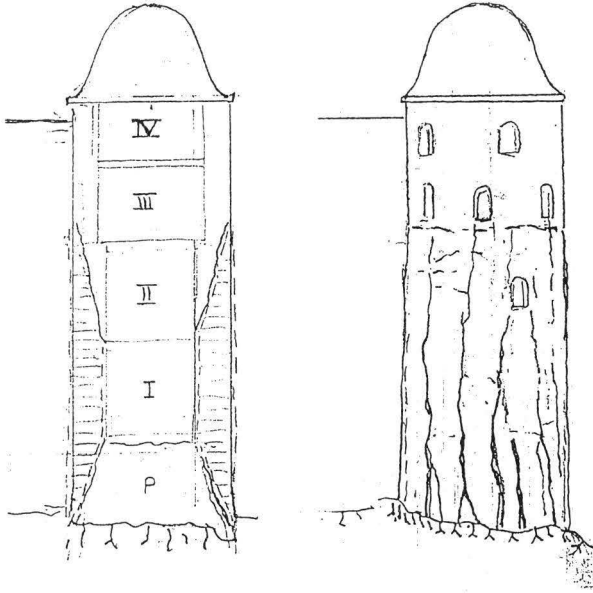
Tärkeä tekijä on ollut linnaa sivuavan uuden betonisen Turun-sillan rakentaminen entisen puisen tilalle. Uuden sillan paalut perustettiin graniittiseen peruskallioon, minkä johdosta liikenteen dynaaminen vaikutus entistä voimakkaammin säteili linnan perustuksiin. Paratiisitornin halkeamat kasvoivat uhkaaviksi keväällä 1990. Onnellisen yhteensattuman kautta myös betonisillan halkeilu kehittyi niin vaaralliseksi, että silta piti sulkea liikenteeltä. Tämä on melkoisesti pysäyttänyt tornin liikkumista vuoden 1990 jälkeen. Muurauksen rapautuminen sadeveden ja pakkasen vaikutuksesta jatkui kuitenkin edelleen, ja laastin sitova vaikutus oli muurin paksuuden kolmanneksen syvyydellä ulkopinnasta lukien käytännöllisesti katsoen hävinnyt [10].

Kevättalvella 1992 poistettiin, sen jälkeen kun torni oli tuettu jännitettyillä vaijerisiteillä, loput I kerroksen täytemaasta. Tällöin paljastui seinän sisäpinnassa useampia toista senttimetriä leveitä pystyhalkeamia. Pohjassa oli sisäpuolella näkyvissä linnan vanhan lounaismuurin n. 1/2 m pohjasta nouseva osa. Ensimmäisen kerroksen oviaukon jälkiä näkyi tornin sisä(pohjois)seinän epämääräisenä kivi- ja tiilimuurauksena. Muualla seinä oli murattu suurista työstämättömistä kivistä. Pohjassa oli kahden keskiaikaisen vaakasiteen puiset jäännökset muurin läpileikkaukseltaan neliömäisissä 20 x 20 cm onteloissa, jotka sijaitsivat ulkopuolella näkyvien rauta-ankkuripäiden määräämällä linjalla. Tämäntapaisia puusiteitä oli myös samaan aikaan rakennetussa Olavinlinnassa. Puuparrujen päihin oli siellä kiinnitetty lyhyet muurin ulkopintaan ankkuroidut rautasiteet (kuva 15). Kellarikerroksen täytti yhtenäinen kovettunut rakennusjätekerros. Kellarikerroksen katon korkeudella havaittiin tornin ulkomuurin kehäsuuntainen leveä vinohalkeama.

Vaurioiden syinä korjauksesta vastaavat elimet pitävät vuonna 1991 loppuunsaate-
 tun tutkimuksen perusteella seuraavia seikkoja: Seinä on perustettu osittain graniittikumpareen kalteville pinnoille. Kalliota ei ole riittävästi hammastettu muurin alla. Muuraus on tehty työstämättömillä kivilohkareilla. Ympäröivä heikko tiivistämätön täytemaakerros ei ole kyennyt kestämaan muurin painetta. Ympäröivä raskas liikenne (mukaanluettuna rautatieliikenne), kaupungin rakennustyömaiden räjähdystyöt sekä äänirajaa ylittävän lentoliikenteen seisminen tärinä on aiheuttanut muurialustan liukumisen ja heikentänyt laastisaumojen lujuutta. Lopuksi todettiin, että tornin tila ennako-
 i sortumista [10].



Kuva 16. Kallioon hakattuja askelmia, a) yksipuolinen (tornin muurin ulkopinnassa [10]), b) kaksipuolinen.



Kuva 17. Paratiisitornin mahdollinen halkeamamekanismi.

Ylläolevat sängen perusteelliset tutkimukset luovat valoa moneen suuntaan. Rakennushistoriallisesti tärkeä on keskiaikaisten ankkurisiteiden osa. Siteinä toimivat jykvät puuparrut oli upotettu ainakin seinän paksuuden puolikkaan verran tornin muureihin. Niiden jatkona olivat lyhyet, niihin kiinnitetyt rautaiset ankkurikappaleet. Muurauksesta päätellen parruja ei ole voitu vaihtaa, joten niiden jättämissä onteloissa olevat puun jäännökset ovat todennäköisesti keskiaikaisia (kuva 15). Nämä siteet, joiden tehtävänä oli tasapainottaa tornin holvien vaakavoimat, lahosivat vesivaurioiden takia viimeistään linnan palon jälkeisenä aikana. Vuoden 1890 tienoilla tämä johti tornin ylimmän holvin sortumiseen, koska tässä muurin painon stabiloiva vaikutus oli pienin. Sotainsinöörihallinnon suorittama raju saneeraus, jossa kaikki holvit purettiin ja korvattiin palkistoilla, johtui ilmeisesti pelosta, että ylimmässä kerroksessa tapahtunut sortuma voisi toistua alempana ja johtaa koko tornin sortumiseen.

Tutkimustulokset luovat toisaalta valoa tornin vakavuutta uhkaavaan halkeilumekanismiin. Koska torni on lähes 500 vuotta pysynyt pystyssä, ovat vauriot ilmeisesti syntyneet viime vuosikymmenien aikana dynaamisten voimien sekä veden ja jään laastia rapauttavasta vaikutuksesta. Koska torniosien pystysuoraa liikettä ei ole todettu ja tornin muuri on lieriömäinen, ei halkeilumekanismi voi vastata diskreettiä klasista statiikkaa, mutta kyllä (kuva 17) jatkumoteoriaan perustuvaa mekanismia. Jos sovellamme tätä teoriaa Paratiisitorniin, on kuvan 10 mekanismi *a*, mikä mahdollistaa tornin yläosan ehjänä liukumisen alaspäin, eräs sortumisen muoto, mutta myös suurempien seinän ulkopinnan kerrosten epäsäännöllinen lohkeaminen seismisten voimien vaikutuksesta on varteenotettava seikka. Mekanismi *b* sen sijaan saattaa toteutua tornin pohjakerroksessa, jossa kovettunut täyte ja siihen liittyvä seinämänosa työntävät irtilohjenneen muurin ulospäin.

Torni on pääosiltaan perustettu suoraan kalliopinnalle, jonka kalteville osille on louhittu askelmia. Askelman pystypinta toimii tärinän vaikutuksesta vaakasuoran impulssin ja halkeaman alkulähteenä (kuva 16a), joka työntää muurausta pitkin louhitua vaakapintaa kalliopinnan kaltevuuden suuntaan alaspäin. Tämä ilmenee vasemmanpuoleisen torninpuoliskon juuressa radiaalisten halkeamien kaltevuudesta (kuva 13), mikä osoittaa, että kallion reaktio on suunnattu ylöspäin vasemmalle johtuen muurin liukumisesta oikealle. Vaikka tällainen askelma staattisissa oloissa estää liukumisen, se dynaamisissa oloissa päinvastoin voi edistää sitä. Liukumisen estämiseksi on muuri vaarnana upotettava kahden vastakkaisen askelman väliin, jolloin näiden pystypinnoista lähtevät iskuimpulssit kumoavat toisiaan (kuva 16b). Luetellut havainnot eivät missään ole ristiriidassa jatkumoteorian kanssa. Kuvassa 17 esitettyyn mekanismiin viittaavat ennen kaikkea ulkopuoliset radiaaliset pystyhalkeamat, jotka vain ensimmäisessä kerroksessa ulottuvat seinän läpi. Kehän suuntaisiin vinohalkeamiin viittaa tämän kerroksen lattian kohdalla sisäpuolella ilmenevä kehän suuntainen halkeama, samaten kuin toisen kerroksen melkein halkeamaton sisäpinnan rappaus. Vaikka kuvan 17 yhdistelmämekanismi kuvaa suppean materiaalin takia vain erästä tulkintaa, se kuitenkin antaa osviittoja mahdollisista sortumamuodoista.

7. Muurattujen rakenteiden sortumavaara ja sen ennaltaehkäiseminen

Staattisten vaaratekijöiden, kuten perustuksen peräänantamisen, roudan aiheuttamien siirtymien ja ajan hampaan, saumojen laastia rapauttava vaikutus ilmenee joko kallistumisena tai halkeiluna tai näiden yhdistelmänä. Lisäksi ovat nousemassa etualalle dynaamiset vaikutukset, ennen kaikkea liikenteen aiheuttama tärinä. Tämä muuttaa muuratun rakenteen luonteen aivan toisenlaiseksi, puolikiinteästä tilasta korostetusti puolinestemäiseen tilaan. Staattisessa tapauksessa rakenne sortuu diskreettien rakenteosien yhden vapausasteen sortumamekanismin synnyttyä, jolloin holvit ja kaaret sortuvat muurien jäädessä useimmiten pystyyn. Tärinän vaikutus kohdistuu nyt ennen kaikkea pystyvuureihin hajoittamalla nämä vaikeasti ennakoitavalla tavalla, mikä lopulta kehittyy monen vapausasteen liki kaoottiseen sortumamekanismiin. Tällöin on huomattava, että radiaalisten sysäysresultanttien takia kaarevat muurit altistuvat helpommin tärinän aiheuttamille vaurioille kuin suorat muurit. Siten Viipurin linnan Paraatiisitornin kaltaisia pystyhalkeamia oli huomattavasti vähemmän siihen liittyvissä suorissa vuureissa. Kuitenkin saattavat muurin nurkkauksessa seinien poikittaisten pystyhalkeamien iskuimpulssit irrottaa pilarimaisen nurkkaosan (kuva 4). Tämän arvellaan olleen San Marcon tornin sortumisen eräs alkusyy [5]. Dynaamiset vaikutukset näkyvät selvästi siellä missä päälliikenneväylät sivuavat arvokkaita historiallisia muistomerkkejä. Vaaravyöhykkeessä on nyt Rooman Colosseum. Viipurin linnan Paraatiisitornin muurien hajoamisilmiöt johtuvat viereisen Turun uuden sillan raskaasta liikenteestä, koska tornin radiaalinen liukuminen miltei pysähtyi, kun sillan liikenne katkaistiin. Vaaravyöhykkeessä meillä on ennen kaikkea keskellä satamavyöhykettä sijaitseva raskaan liikenteen ympäröimä Turun linna.

Vanhan rakennuksen säilyvyyden ylläpitäminen vaatii jatkuvaa tarkkailua ja seuranta. Muuratussa rakenteessa halkeamat ja siirtymät ovat tärkeimmät staattisen toiminnan ulkoiset ilmiöt. Halkeamaleveyden kasvun ja rakenteosien kallistuman avulla voidaan päätellä, mikä mekanismi kätkeytyy niiden taakse. Useinkin katsotaan halkeamat ulkonäköä häiritseviksi pintavaurioiksi, jotka peitetään laastilla. Tällaisten

liian usein tapahtuvien kosmeettisten ratkaisujen sijasta on tarkkojen mittauksen perusteella analysoitava, mikä rakennuksen liiketila on muutoksen aikaansaanut. Vasta kun tämä on selvitetty, voidaan ryhtyä suunnittelemaan mahdollisen etenevän vaurion ehkäisemistä. Tärkeä on tässä myös kohteen rakennushistorian riittävä tuntemus. Puolikiinteissä, siis työstetyistä kivistä muuratuissa taitorakenteissa, kuten holvistoissa pilareineen, jotka noudattavat diskreettistatiikan sääntöjä, voidaan rakennus vakauttaa mieluummin lisäpainoilla tai ankkuroiduilla vetotangoilla. Puolinestemäisissä, siis epäsäännöllisistä kivistä muuratuissa rakenteissa, jotka lähinnä noudattavat vetoaksetämättömän jatkumon statiikkaa, eivät jännittämättömät terästangot yleensä toimi taroituksenmukaisesti. Varsinaisesti seismisen vaikutuksen alaisissa rakenteissa on tärkeintä eliminoida sisäisiä halkeamia. Tämä tapahtuu riittävällä injektoinnilla ja esijännityksellä, sillä vain nämä keinot muuttavat rakenteen kiinteäksi, niin ettei siinä esiinny halkeamia eikä kivien välisten saumojen synnyttämiä luotaantuontöivoimia. Esijännityksen sovittaminen rakenteeseen on kuitenkin yleensä hankalaa. Vain suoraa muuria on menestyksekkäästi voitu esijännittää, poraamalla jopa 30 metriä pitkiä kaapelikanavia, joihin on sijoitettu muhveilla jatkettavia teräksiä [11]. Jos uusia teräksiä tai betonisia rakenneosia sovitetään vahvistusmielessä vanhaan muurukseen, tämän ei tarvitse lisätä rakenteen kestävyyttä. Muuruksesta poikkeavan jäykkyyden ja lämpölaajenemisen kautta nämä lisät voivat aiheuttaa uusia vaurioita sisäisen jännitystilän muuttumisen takia. Restaurointityössä on pyrittävä mahdollisimman vähäisiin rakenteellisiin lisäyksiin. Tärkeä on myös kohteen rakennushistorian riittävä tuntemus, koska aikojen kuluessa tehdyt muutokset voivat oleellisesti muuttaa rakennuksen sisäisten voimien kulun. On tehtävä vain mahdollisimman lieviä korjauksia, sillä monet rakennusmuistomerkit ovat menettäneet monumentaalista arvoaan liioiteltujen teknisten keinojen takia.

Tässä yhteydessä ei voi olla puuttumatta siihen tapaan, jolla vanhoja kivi- ja tiilirakennuksiamme on entisöimällä vandalisoitu. Räikein esimerkki on Turun linna, jonka kauniita tiiliholveja on monin paikoin korvattu teräsbetonisilla laatta- ja palkkirakenteilla.

Staattisen toiminnan oikea oivaltaminen on aivan välttämätön edellytys vanhan rakennuksen korjaus- ja entisöimishankkeen onnistumiselle. Entisöimisellä tarkoitetaan tällöin rakennuksen saattamista alkuperäiseen kuntoon ei vain ulkonäköön nähden, vaan myöskin toiminnallisessa mielessä. Puurakenne entisöidään puurakenteena, teräsrakenne teräsrakenteena. Muurattu rakenne on entisöitävä muurattuna rakenteena. Toisin sanoen entisöidyn rakenteen statiikan on vastattava alkuperäisen rakenteen statiikkaa.

Esitän lopuksi prof. F. Wenzelin lopullisen entisöimisratkaisun tavoittelemista koskevan varoituksen: »Usein kuulee ajattelemattoman väitteen, että seuraava sukupolvi on vapautettava historiallisen aineksen taakasta kerta kaikkiaan ja lopullisesti. Tähän päämäärään ei päästä teknillisillä korjausmenetelmillä. Onneksi tekniikka ja tiede eivät voi saavuttaa sitä alituisesti muuttuvien olosuhteiden takia. Sanon onneksi, koska jokaisen sukupolven huolenpito historiallisesta perimästään on tärkeä side sen historiaan ja perusvirike muistomerkkien vaalimiseen sanan laajimmassa merkityksessä» [11].

Tämä selvitys liittyy Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusstatiikan laitoksen 1970-luvulla käynnistämään kivistä rakennusten tutkimusprojektiin. Tekijä haluaa kiittää Viipurin museon johtoa, restaurointivirasto »Spetsprojektrestavratsijan» haaraosaston johtajaa I. Katšerinia ja rakennusyritys »Startin» johtajaa I. Sinjakinia avusta ja tärkeistä tiedoista. Niinkään tekijä haluaa kiittää arkeologi V. Tjulenevia ja prof. R. Rusoa arvokkaista neuvoista ja antoisista keskusteluista.

Lähteet

- [1] Heyman, J. The stone skeleton. *Internat. Journal of Solids and Structures* 1966.
- [2] Parland, H. Kivirakenteiden vakavuus. *Rak.mekaniikka* 2. 1972.
- [3] Del Piero, G. Constitutive equation and compatibility of the external loads for linear elastic masonry-like structures. *Meccanica* 24. 1989.
- [4] Di Pasquale, S. New trends in the analysis of masonry structures. *Meccanica* 27. 1992.
- [5] Heyman, J., Leaning towers. *Meccanica* 27. 1992.
- [6] Jean, M. & Moreau, J.-J. Unilaterality and dry friction in the dynamics of rigid body collections. *Proc. Contact Mechanics Symposium* 7.–9. 10. 1992 Lausanne. Authorization by Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [7] Tjulenev, V. A. Viipurin arkeologisen tutkimuksen tuloksia. Viipurin suomalaisen kirjallisuusseuran toimitteita 8. Lappeenranta 1987.
- [8] Parland, H. Graphical documentation of the castle of Viborg and its surroundings. *Nordenskiöld Seminar* 1979. Espoo.
- [9] Hackman, A. Bidrag till Viborgs slotts byggnadshistoria. *Analecta Archeologica* 1944. Helsingfors.
- [10] A. Wiedin alkuperäiskartta. Herzog August Bibliothek, Wolfenbüttel.
- [11] »Start»-yrityksen ja »Spetsprojektrestavratsijan» Paratiisitornin vaurioita koskevat tutkimuslausekkeet.
- [12] Wenzel, F. & Maus, H. Repair of masonry structures. *Meccanica* 27. 1992.

Summary

The Danger of Collapse, Repair and Restoration of Stone Structures

The article discusses the mechanisms of cracking in stone structures, their interpretation in assessing the danger of collapse, the prevention of damages and the restoration work. Masonry structures differ completely from monolithic or solid structures such as those of steel, which conform to the rules of elastostatics. Masonry structures can be regarded as semi-solid or even semi-fluid structures that do not transmit tensile stress. The classical theory of stone structures concerns arches, vaults and colonnades of worked ashlar stones. This is a highly simple theory of stability, in which the limit state corresponding to collapse can be reliably defined. The classical theory, however, cannot be applied to medieval mixed masonry techniques, in which the cracking is not restricted to the joints of the ashlars. The statics of the non-tension supporting continuum provide a more adequate description of the behaviour of this kind of masonry. One of its special features is the separation of the masonry construction into a load-carrying part, dependent on the direction of the load and consisting of compression fields, and into a stress-free non-load-carrying part.

The collapse mechanisms of masonry walls, the critical inclination of stone walls, and dynamic effects on walls are discussed from the perspective of the continuum theory. Owing to increasing traffic, dynamic effects on walls have become a significant source of risk. The article presents and analyses as an interesting example the mechanisms of damage caused by seismic vibration in the so-called Paradise Tower of Viborg Castle.

The article concludes with a discussion of means to prevent collapse and their influence on the restoration of historical buildings and the preservation of their monumental value.