

VAAKAVOIMIEN KUORMITTAMAN MUURATUN SEINÄELEMENTIN LUJUUDEN JA KANTOKYVYN ARVIOIMISPERUSTEET

Pentti Mäkeläinen

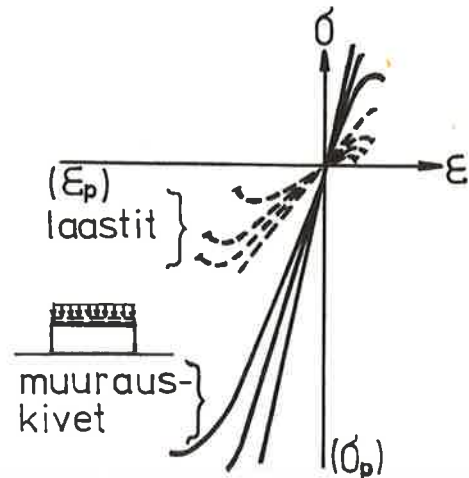
Rakenteiden Mekaniikka Vol. 9
No. 1 1976 s. 1-11

YHTEENVETO: Tässä yleispiirteisessä esityksessä pyritään tuomaan esiin tärkeimpiä niistä lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista, joiden selvittäminen on tarpeellista pyrittäessä arvioimaan vaakavoimien kuormittaman muuratun seinäelementin kantokykyä. Aluksi on käsitelty muuratun seinäelementin perusosien, muurauskiven ja laastin jännitys-muodonmuutoskäyttäytymistä sekä tähän mekaaniseen käyttäytymiseen liittyviä parametreja, ainevakioita ja niiden kokeellista määrittämistä. Tämän jälkeen on tarkasteltu vaakakuormituksen alaisen muuratun seinäelementin taivutuskestävyyttä ja sille on johdettu arvioita sekä vaaka- että pystysuuntaisessa taivutuksessa. Niitä seikkoja, jotka tekevät nk. murtoviivateorian soveltumattomaksi ainakin raudoittamattoman seinäelementin laskentaperusteeksi, on pyritty selvittämään artikkelin loppuosassa.

1. MUURAUSSKIVEN JA -LAASTIN LUJUUSOMINAISUUKSIEN TARKASTELU

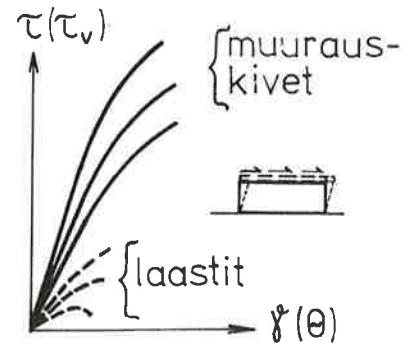
Aluksi voidaan todeta kaikista muurattujen rakenteiden lujuusominaisuuksista se yleispiirre, että laastisaumassa tai sen ja muurauskiven rajapinnassa syntyvä jännitys-muodonmuutostila ratkaisee aina ensisijaisesti muuratun rakenteen kantokyvyn erilaisten rasitusten alaisena.

Tarkastelemalla muurauskiville ja laasteille erikseen saatuja jännitys-venymäkäyriä, joita on hahmoteltu kuvassa 1, edellä esitetty tosiseikka käy jo näiden perusteella ilmi varsin selvästi. Siis laastin lujuusominaisuudet aksiaalissa puristuksessa ja varsinkin vedossa ovat niin huomattavasti heikommät kuin muurauskiven, että muurattujen rakenteiden veto- ja/ tai puristusrasitusten alaisiksi joutuvat osat menettävät kantokykynsä ensin laastisaumojen koh-



Kuva 1. Muurauskivien ja -laastien tyypillisiä jännitys-venymäkäyriä.

dilta. Tilanne on samantapainen myös muunlaisten rasitusten osalta. Puh-
taassa leikkauksessa syntyvien leik-
kausjännitysten τ ja liukumien γ
tai väännössä syntyvien leikkaus- eli
vääntöjännitysten τ_v ja vääntymien
 θ väliset riippuvuudet tulevat sum-
mittaisesti kuvan 2 mukaisiksi muu-
rauskiville ja laasteille erikseen
määritettyinä. Laastin lujuusominais-
suudet ovat siten määräävinä tekijöi-
nä myös leikkaurasitusten alaisiksi
joutuvien rakenteen osien kantokyvylle.



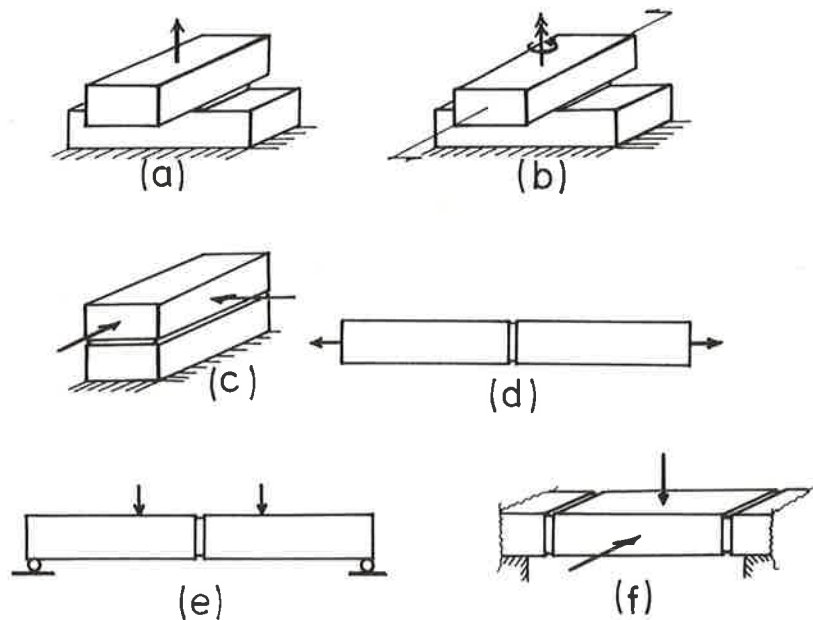
Edellä esitetty tarkastelu laastin ja
muurauskiven lujuusominaisuuksiin eril-
lisinä materiaaleina antaa vasta suun-
taviivoja niistä todellisista jännitys-
muodonmuutostiloista, jotka syntyvät
näistä kahdesta materiaalista yhdeksi kokonaisuudeksi muodostetussa raken-
teessa, muuratussa rakenteessa. Alussa esitetty maininta laastisauman ja
muurauskiven rajapinnasta ja siinä syntyvästä jännitys-muodonmuutostilasta
antaa parhaan lähtökohdan muuratun rakenteen ja sen osien jännitys-muodon-
muutoskäyttäytymisen tarkastelulle.

Kuva 2. Muurauskivien ja -laas-
tien tyypillisiä liuku-
mapiirroksia.

Muurauskiven ja -laastin kiinnittyminen toisiinsa ja liitoksen pitävyys eli
tartunta on useimmiten se heikko rengas, joka määrää koko rakenteen kestä-
vyyden. Laastisaumojen kohdilta murtuneessa rakenteessa murtumispinta on
muodostunut lähes aina muurauskivi- ja laastipintojen erkanemisesta toisis-
taan eli pintojen välinen tartuntalujuus on ylittynyt.

Kuvassa 3 on hahmoteltu muuratun rakenteen laastisauman erilaiset rasitus-
tyypit näihin liittyvien rasituskokeiden avulla. Kuvassa esitettyjen kuu-
den laastisauman rasituskokeen yhteydessä on syytä korostaa sitä seikkaa,
että niihin sisältyy sekä muurauskiven pään että sen lapepinnan ja laastin
välisten tartuntalujuuksien selvittäminen. Tämä on tärkeää tehdä molemmil-
le muurauskiven pinnoille erikseen, koska valmistusteknisistä syistä kiven
pään ja lapepinnan tartuntaominaisuudet laastiin ovat hyvin erilaiset.

Puhtaasti mekaaniselta kannalta katsoen syy siihen, että laastisauman ja
muurauskiven pinnan välinen kohta on heikompi kuin sauman sisäosat, voidaan
ehkä löytää kyseisissä kohdissa vallitsevien jännitystilojen erilaisuudesta.
Kuvan 3 mukaisissa rasitustilanteissa se jännitystila, mikä välittyy muu-
rauskivestä laastisaumaan, on vielä sauman pintaosissa aksiaalista tai



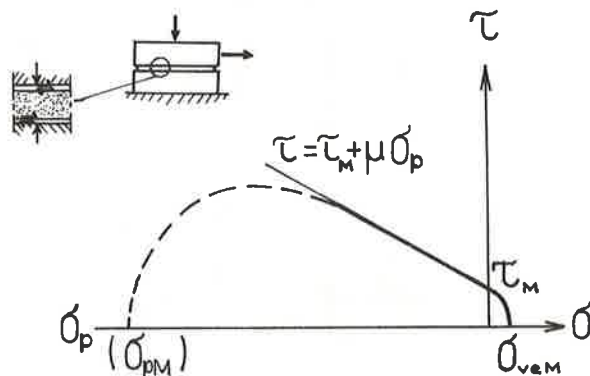
Kuva 3. Laastisauman rasitukset: a) vaakasauman veto b) vaakasauman vääntö c) vaakasauman leikkaus d) pystysauman veto e) pystysauman taivutus f) pystysauman leikkaus.

puhdasta leikkausta, mutta se muuttuu sauman sisäosissa kaksi- tai kolmi- akseliseksi jännitystilaksi. Tällöin esimerkiksi laastin pinnan aksiaalinen jännitys vaihtuu sisäosissa usean komponentin muodostamaksi jännitystilaksi. Ulkoisen rasituksen suuntaa vastaava komponentti säilyy tosin sauman sisäosissakin merkittävimpana, mutta sen itseisarvo pienenee rasituksen jakautuessa myös muille jännityskomponenteille. Siten muurauskiven ja -laastin tartuntakohdassa on odotettavissa murtumisen alkaminen ensimmäisenä, koska laastin kriittillinen lujuusominaisuuden raja ylittyy siinä ensimmäiseksi.

Todellisuudessa kuvan 3 mukaiset rasitustilanteet esiintyvät muurattujen rakenteiden eri osissa siten, että puristusta, vetoa, leikkausta, vääntöä ja taivutusta on samanaikaisesti niiden erilaisina kombinaatioina. Laastisaumojen sisällä syntyy tällöin erilaisia avaruusjännitystiloja ja laastin murtumistapahtuman selvittäminen vaatii monimutkaisten murtumishypoteesien ottamista mukaan tarkasteluun. Laastisauman sisällä esiintyvistä jännitystiloi- sta ei kuitenkaan mikään ratkaise yleensä muuratun rakenteen murtumista. Muurauskiven ja -laastin välinen tartunta on aiemman mukaisesti määrää-

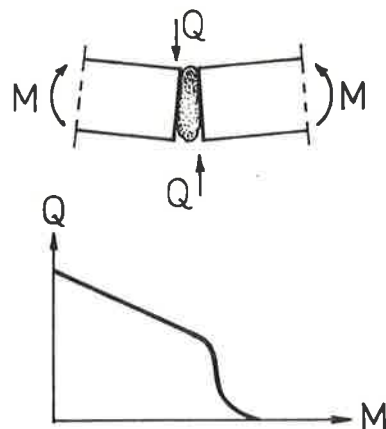
vä tekijä myös yhdistetyissä rasituksissa.

Laastisauman murtumistapahtumaa voidaan selvittää tarkastelemalla kuvan 4 mukaisesti muurauskiven ja laastisauman tartuntapintojen jännityskomponenttien välistä riippuvuutta yhdistetyssä veto-puristus- ja leikkaurasituksessa. Kuvan 3 a)- ja c)-kohdan kokeista saadaan σ - τ -diagrammiin arvot σ_{veM} ja τ_M . Kun muurauskiveen pannaan vaikuttamaan leikkauksen lisäksi pystysuora puristusvoima, vaakavoimaa ja samalla leikkaurasitusta voidaan lisätä τ_M -arvon yli. Osoittautuu jopa sellainen seikka, että puristusvoimaa lisättäessä tartunnan pettämiseen tarvittava vaakavoima riippuu likimain suoraviivaisesti puristavasta voimasta. Tätä suoraviivaisesta riippuvuudesta voidaan pitää muurauskivi- ja laastipinnan välisestä kitkasta johtuvana. Suoran kulmakerroin määrää tällöin pintojen välisen kitkakerroimen arvon. Kun puristava voima kasvaa kyllin suureksi, sauman sisäosat alkavat deformatua huomattavasti ja lisättäessä samanaikaisesti vaakavoimaa laastin murtumisen määräävät sauman sisäosien leikkautumisominaisuudet. Puristus- ja leikkaurajännityksen välinen riippuvuus tulee silloin likimain kuvassa katkoviivalla esitetyn käyrän mukaiseksi.



Kuva 4. Laastisauman ja muurauskiven tartuntapintojen jännityskomponenttien välinen riippuvuus.

Samantapainen riippuvuus kuin edellä saadaan myös puristus- ja vääntöjännityksen välille tarkasteltaessa tapusta, missä kuvan 3 b)-tapaukseen lisätään vaikuttamaan samanaikainen puristus väännön kanssa. Pystysaumoilte tehdyissä yhdistetyissä rasituskokeissa mainitut riippuvuudet muuttuvat siinä mielessä, että laastin ja muurauskiven pään välisen kitkan ollessa pienempi kuin laastin ja kiven lapepinnan arvot σ_{veM} ja τ_M jäävät vaakasaumojen vastaavien arvojen alapuolelle.



Kuva 5. Laastisauman samanaikaisen taivutuksen ja leikkauksen keskinäinen riippuvuus.

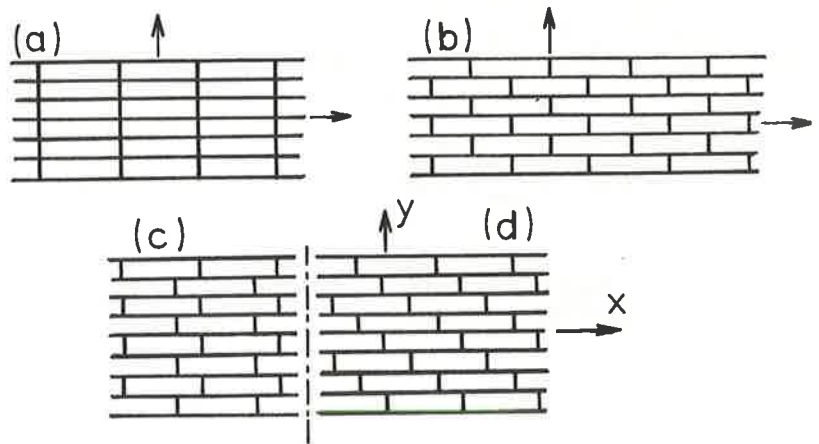
Yhdistetyn taivutuksen ja leikkauksen (tai taivutuksen ja väännön) tapauksessa tilannetta voidaan tarkastella kuvan 5 avulla. Suhteellisen pienillä taivutusmomentin (M) arvoilla tartunnan ylittymisen aikaansaava leikkausvoima riippuu aluksi kitkavaikutuksen vuoksi likimain suoraviivaisesti momentista M , mutta M :n kasvaessa edelleen laastisauman reunaosat alkavat irrota muurauskiven pinnasta vetopuolella ja taivutuskestävyys putoaa jyrkästi.

Edellä esitetty yleisluonteinen katsaus muutamiin muuratun rakenteen detaljioinaisuuksiin on vasta lähtökohtana rakenteen kantokyvyn selvittämisessä. Muuratun rakenteen kantokyvyn selvittäminen esimerkiksi taivutuskestävyyden osalta vaatii koko rakenteen toimintatavan tuntemista sitä vaakavoimin kuormitettaessa.

2. VAAKAVOIMIN KUORMITETUN SEINÄELEMENTIN TAIVUTUSKESTÄVYYS

Tarkasteltaessa vaakakuormituksen alaista muurattua seinää ja pyrittäessä kuvaamaan sen staattista toimintatapaa laattarakenteena ensimmäinen vaikeus ilmenee siinä, että laatan eli seinän kimmoiset tai yleensä jännitys-muodonmuutosominaisuudet poikkeavat huomattavasti toisistaan laatan eri suunnissa. Tämä on tietysti odotettavissakin muurauskivi- ja laastimateriaalin epähomogeenisesta jakautumisesta seinään sekä kiven ja laastin aineominaisuuksien erilaisuudesta.

Laattaa sanotaan ortotrooppiseksi (ortogonaalisesti isotrooppiseksi), jos sillä on kaksi toisiaan vastaan kohtisuoraa suuntaa, joiden suhteen laatan kimmoiset ominaisuudet ovat symmetriset. Kuvasta 6 havaitaan, että tarkka ottaen muurattua seinäelementtiä voidaan pitää ortotrooppisena laattana vain tapauksissa a) ja b). Sen sijaan 1/4- ja 1/3-kiven juoksulimityksellä (d)-tapaus) tehdyissä seinis-



Kuva 6. Muuratun seinän limitystyyppit.

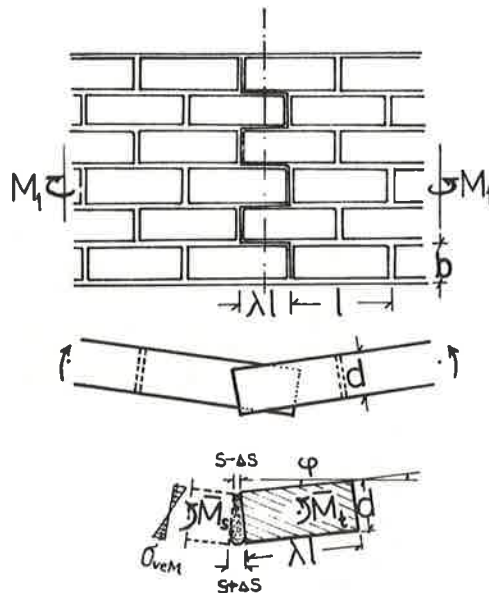
sä ei ole kuin vinosymmetrisyyttä kuvaan piirrettyjen x- ja y-akseleiden suhteen. Kimmoteorian mukaisten kimmovakioiden, kimmokertoimen, liukukertoimen sekä suppeumakertoimen merkitysten ja niiden määrittämisperusteiden selvittäminen kuvan 6 mukaisille muuratuille seinille on edellä mainituista seikoista johtuen varsin vaikea tehtävä.

Muuratun seinän taivutuskestävyydelle M_1 seinän korkeussuunnan pituusyksikköä kohti on johdettu lähteessä [1] kaava

$$M_1 = \frac{\tau_M d^2}{2b} (\lambda \ell - \frac{1}{3} d) \quad (1)$$

missä τ_M on laastisauman leikkauslujuus ja muut merkinnät liittyvät kuvaan 7. Kaavaa johdettaessa seinään on otaksuttu syntyvän taivutuksesta kuvan 7 mukainen "pystysarana". Saranakohdan vaakasaumoissa syntyvän väännön on otaksuttu yksinään ottavan vastaan ulkoisen taivutusmomentin vaikutuksen. Soveltamalla vaakasaumojen vääntöön ns. hiekkakasa-analogiaa kaavan (1) oikealle puolelle on saatu reunakaltevuudeltaan τ_M sekä pohjami-toilta $d \times \lambda \ell$ olevan hiekkakasan kaksinkertainen tilavuus.

Kaavan (1) johtaminen pitämällä laastisauman ainetta plastisena ja varsinkin ideaaliplastisena tuntuu arveluttavalta, kun kysymyksessä on varsinai-



$$M_1 = M_s + M_t; \quad M_s = \bar{M}_s / b = \frac{1}{6} \sigma_{veM} d^2$$

$$M_t = \bar{M}_t / b = G I_t \theta / b$$

$$I_t = k(\lambda) d^3 \lambda \ell$$

$$G = E / 2(1 + \nu); \quad \theta = \varphi / s$$

$$\varphi = 2 s / d = 2 \frac{s}{d} \cdot \frac{\Delta s}{s} = 2 \frac{s}{d} \epsilon_M$$

$$\epsilon_M = \sigma_{veM} / E = \sigma_{veM} / 2G(1 + \nu)$$

$$M_t = \frac{k(\lambda)}{1 + \nu} \sigma_{veM} d^2 \lambda \frac{\ell}{b}$$

$$M_1 = M_s + M_t =$$

$$\frac{1}{6} \sigma_{veM} d^2 \left[1 + 6 \frac{k(\lambda)}{1 + \nu} \lambda \frac{\ell}{b} \right]$$

Kuva 7. Muuratun seinän taivutuskestävyyden arvioiminen vaakasaumojen kimmoisen väännön ja pystysaumojen samanaikaisen puristuksen avulla.

nen hauras aine. Lisäksi kaavassa jää huomioonottamatta pystysaumojen merkittävä osuus taivutuskestävyydessä: sehän on ainakin teoriassa sama kuin koko taivutuskestävyys pystysuunnassa. Kaavan (1) sijaan artikkelin kirjoittaja on kehittänyt [3] kuvan 7 mukaisesti muuratun seinän kestäväälle taivutusmomentille M_1 seinän korkeussuunnan pituusyksikköä kohti kaavan

$$M_1 = \frac{1}{6} \sigma_{veM} d^2 \left[1 + 6 \frac{k(\lambda)}{1+\nu} \lambda \frac{\ell}{d} \right] \quad (2)$$

soveltamalla vaakasaumojen vääntöön kalvoanalogiaa ja ottamalla myös pystysaumojen toiminta taivutuksessa huomioon kuvan mukaisesti. Kaavassa (2) käytetyillä symboleilla on seuraavat merkitykset:

- σ_{veM} = seinän pystysauman taivutusvetolujuus
- d = seinän nimellispaksuus
- ℓ = pystysaumojen väli
- b = vaakasaumojen väli
- ν = laastin suppeuskerroin eli Poisson'in vakio
- λ = limityssuhde
- $k(\lambda)$ = limityspituuden $\lambda \ell$ ja seinän nimellispaksuuden d suhteesta riippuva vakio, jonka arvot saadaan seuraavasta taulukosta 1 (väliarvot saadaan esimerkiksi interpoloimalla suoraviivaisesti).

Taulukko 1. Kaavan (2) vakion $k(\lambda)$ arvot.

Limityspituus/seinän paksuus $\lambda \ell / d$	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0
$k(\lambda)$	0,141	0,166	0,196	0,229	0,263

Muuratun seinän ylä- ja alareunan ollessa vapaasti tuetut sen kestävä taivutusmomentti M_2 vaakasuuntaista pituusyksikköä kohti saadaan kaavasta

$$M_2 = \frac{1}{6} \sigma_{veM} d^2 \quad (3)$$

Kaavassa (3) σ_{veM} on nyt vaakasauman taivutusvetolujuus. Sen arvo ei ole ilmeisesti tarkalleen sama kuin pystysauman vastaava arvo kaavassa (2), mutta muuratun seinän vaaka- ja pystysuuntaisten taivutuskestävyyksien vertailua varten niitä voitaneen pitää samansuuruisina ilman että tarkkuus tästä vähenee huomattavasti. Tällöin mainittujen taivutuskestävyyksien suhteen ilmaisee suoraan kaavan (2) sulkulausekkeen arvo.

Edellä esitetyistä kaavoista ja niillä saaduista taivutuskestävyyksien arvioista ei saada vielä täysin absoluuttista tietoa rakenteen loppuun asti

käytetystä taivutuskapasiteetista, vaan niiden avulla voidaan löytää arvio rakenteen taivutuskestävyyden ensimmäiselle ja mitoituksen kannalta määrävimmälle huonontumiskohdalle. Pystysauman vetopuolen halkeama ei vielä riiko koko rakennetta, vaan taivutusrasitusta voidaan vielä lisätä vaakasauman vääntökestävyyden ja pystysauman puristuskestävyyden varassa. Vasta siinä vaiheessa, kun vaakasaumojen tartuntalujuus on ylittynyt ja sauma on irronnut muurauskiven pinnasta, rakenteen taivutuskapasiteetti voidaan katsoa loppuunkäytetyksi.

3. MURTOVIIVA- ELI MYÖTÖVIIVATEORIA

Heti aluksi on syytä kiinnittää huomiota sanaan murtoviivateoria ja sen käytöstä aiheutuvaan harhakuvaan teorian sisällöstä. Koko teorian pohjana on nimittäin aineen myötäämisominaisuus, mikä edellyttää puolestaan aineelta riittävää sitkeyttä myötäämisen tapahtumiseksi. Mistään murtumiseen liittyvistä seikoista ei teorian perusteissa eikä alkuotaksumissa ole lainkaan kyse. Murtoviiva-sanalla on vain näennäinen yhteys teoriaan siinä, että laattaa murtoon asti kuormitettaessa laatan murtumiskohtiin tulevat murtoviivat sattuvat luonnollisesti osumaan samoille kohdille kuin myötäävässä laatussa syntyvät myötöviivat.

Kaikkien nk. plastisten menetelmien soveltamisessa rakenteiden kantokyvyn tarkasteluun perusedellytyksenä on se, että rakenteen aineominaisuudet ovat riittävän lähellä idealisoinnilla saadun malliaineen eli ideaaliplastisen aineen ominaisuuksia. Esimerkiksi teräksen jännityksen ja muodonmuutoksen välinen riippuvuus on tunnetusti idealisoitavissa kahden suoran avulla, joista edellinen kuvaa lineaarista kimmoista ja jälkimmäinen ideaaliplastista tilaa. Rajakohdan näiden tilojen välillä eli sen jännitystilan, jolla myötääminen alkaa, määrää myötöehto, ja plastisten muodonmuutosten riippuvuuden jännitystilasta myötäämisen jälkeen ilmaisee myötösääntö. Ideaaliplastiselle aineelle myötöehto ja myötösääntö saadaan arvattavasti mahdollisimman yksinkertaisiksi, mikä säästää monilta vaikeuksilta sovellettaessa mallia erilaisiin rakenteisiin.

Plastisen nivelen eli myötönivelen käsite tulee esiin ensimmäiseksi sovellettaessa plastisia menetelmiä sauvarakenteisiin. Tähän päästään idealisoidulla jännitys-muodonmuutosyhteyden lisäksi myös taivutusmomentin ja käyritymän välinen yhteys rakenteessa kuvan 8 mukaiseksi. Kuvassa esitetylle palkille tämä tarkoittaa vastaavanlaista riippuvuutta kuorman ja taipuman välillä. Kuorman kasvaessa tietyn arvon (F_p) suuruiseksi palkkiin syntyy plastinen nivel eli myötönivel ja muodonmuutokset palkissa tapahtuvat tämän jälkeen nivelen kiertymisinä. Palkista on tullut mekanismi.

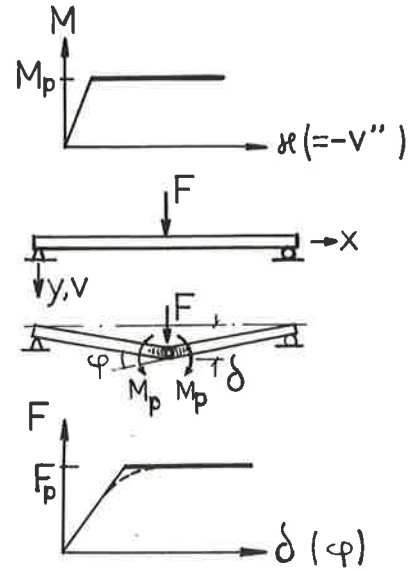
Laattoihin sovellettu myötöviivateoria on tavallaan edellä esitetyn tarkastelun yleistys. Myötöniveliä vastaavat myötöviivat, jotka jakavat laatan osiin niin, että siitä syntyy mekanismi.

Syntynyt mekanismi toimii siis siten, että myötöviivojen rajoittamat laatan osat kiertyvät jäykkinä kappaleina kiertoakseleidensa ympäri ja näinä kiertoakseleina toimivat suorat myötöviivaosat laattassa. Laatan kantokyvyn arvioimiseen tästä päästään tarkastelemalla laattamekanismin liittyviä töitä tai energioita.

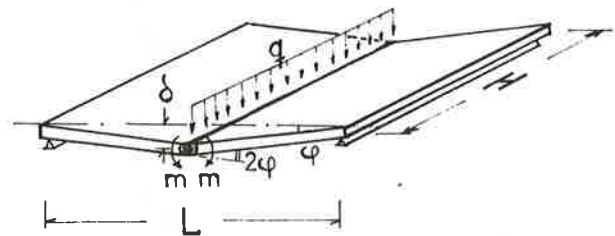
Tavallisin ja ehkä havainnollisin tapa nk. rajakuorman määrittämisessä on virtuaalisten siirtymien periaatteeseen pohjautuva menetelytapa: mekanismin saadessa pienen

liikkeen virtuaalisten (ulkoisten ja sisäisten) töiden summa on nolla. Kuvas-
 vassa 9 on pyrietty selvittämään yksinkertaisen esimerkin avulla esitetyn periaatteen sisältöä. Toinen saman lopputuloksen antava tapa työyhtälön muodostamisessa tuo mukanaan termin dissipatiivinen energia. Sillä tarkoitetaan sitä energiaa, mikä kuluu myötöviivojen sisällä niiden plastisissa muodonmuutoksissa. Kun tämä

rakenteen sisällä kuluva energia (tai teho) pannaan yhtäsuureksi kuin ulkoisten kuormien energia (tai teho), yhtälöstä saadaan rajakuorma määrittetyksi. Yhtälön muoto poikkeaa virtuaalisten siirtymien avulla saadusta muodosta sikäli, että tehoja tarkasteltaessa laatan osien painumat ja kiertymät muuttuvat laattamekanismin osien rotaatioita ilmaiseviksi kulmanopeuksiksi. Myötöviivojen sijoittuminen laatalle eli myötöviivaku-
 vio on valittava intuitiivisesti monen mahdollisen



Kuva 8. Palkin myötömekanismi.



$$W_{ulk.} = qH\delta$$

$$W_{ulk.} = W_{sis.} :$$

$$W_{sis.} = mH \cdot 2\phi = mH \cdot 2 \cdot 2\delta/L$$

$$q_p = 4m/L$$

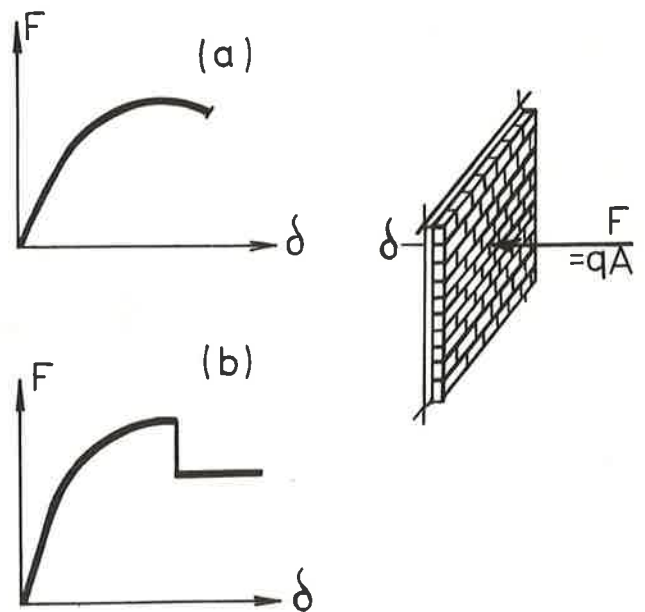
Kuva 9. Esimerkki laattamekanismin työyhtälön muodostamisesta.

vaihtoehdon joukosta. Sen jälkeen on vielä määritettävä myötöviivojen rajoittamien laatanosien keskinäisten dimensioiden suhteet. Tämä määräytyy plastisuusteorian ns. kinemaattisen lauseen perusteella eli se laattamekanismi, joka antaa työyhtälöstä pienimmän rajakuorman, on määräävä.

Myötöehto, jota tarvitaan työyhtälön sisältämien myötömomenttien määrittämiseen, on otaksuttu alunperin Johansenin teräsbetonilaatoille esittämässä myötöviivateoriassa yksinkertaiseksi ns. neliömyötöehdoksi. Sen mukaan laatan jonkin kohdan myötääminen riippuu vain siinä kohdassa olevien sisäisten päämomenttien suuruudesta. Toisin sanoen, kun kyseisessä kohdassa määrätään se suunta, missä vääntömomentti häviää, tämän suunnan taivutusmomentista suuremman saavuttaessa myötörajan syntyy myötääminen tässä kyseisessä kohdassa. Isotrooppisille laatoille tämä neliömyötöehto on todettu varsin sopivaksi. Ortotrooppisille laatoille on kehitelty myös oma myötöehtonsa edellä esitettyä tarkastelua laajentamalla.

Menemättä enää pitemmälle myötöviivateorian yksityiskohtiin esitetyn katsoituksen perusteella voitaneen jo löytää useita seikkoja, jotka arveluttavat teorian soveltamista oitis muurattuun rakenteeseen ja varsinkin raudoittamattomaan muurattuun seinäelementtiin. Tätä vielä selventäneen eräs seinä-

elementeille tehdyn koesarjan antama tulos, mikä on esitetty summittaisesti kuvassa 10. Koesarjalla pyrittiin selvittämään raudoituksen vaikutusta muuratun seinäelementin käyttäytymisessä tasaisen vaakakuormituksen (esim. tuulenpaine) alaisena. Raudoittamattomalla seinäelementillä saatiin kuorman ja seinän taipuman välinen riippuvuus kuvan ylemmän käyrän mukaiseksi. Lisätessä seinäelementtiin pysty- ja vaakaraudoitusta kuorman ja taipuman välinen riippuvuus muuttui kuvan alemman käyrän muotoiseksi. Käyrään syntyi äkillinen



Kuva 10. Vaakapaineen kuormittaman muuratun seinäelementin summittaiset kuormasiirtymäkäyrät: a) raudoittamaton b) raudoitettu seinäelementti.

"hyppäys", kun muurauskiven ja -laastin yhteistoiminta lakkasi ja seinäelementti jäi yksinomaan terästen varaan. Siis kyseinen hyppäys oli rakenteen kahden täysin erilaisen toimintatavan välinen muutoskohta.

4. LOPPUPÄÄTELMÄT

Edellä esitetyn katsauksen jälkeen voidaan todeta, että murto- eli myötöviivateorian käytölle vaakakuormien alaisen muuratun seinäelementin kantokyvyn arvioimiseen ei ole realistista perustetta. Muuratun seinäelementin jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen ei sisällä mitään plastiseen myötöön rinnastettavaa ilmiötä. Muuratun seinän kuormankantokyvyn rajatila määräytyy laastisaumojen toiminnasta. Tämä puolestaan perustuu saumoissa vaikuttavaan kitkaan sekä muurauskiven ja -laastin väliseen tartuntaan. Se, että Ruotsissa ja Norjassa tehdyistä laajoista tiiliseiniä kuormituskokeista saadut murtokuormat ovat lähellä teoreettisia myötöviivateorian avulla laskettuja arvoja, on pelkästään sattuma. Tätä sattumaa on lisäksi pyritty tukemaan valitsemalla useimmissa laskelmissa seinän myötömomentit myötöviivamenetelmän työyhtälöön sopivan suuruisiksi.

Realistisin laskentaperuste vaakavoimien alaisen muuratun seinäelementin toiminnan ja kantokyvyn arvioimisessa on yhä edelleen kimmoteoria ja siitä sovellettu ortotrooppisten laattojen teoria. Ortotrooppisten laattojen laskennallinen käsittely sinänsä ei tuota enää nykyään mitään erityisiä vaikeuksia. Vaikeudet luotettavien kimmovakioiden saamisessa muuratulle seinäelementille ovat sen sijaan pullonkaulana tämän ortotrooppisten laattojen teoriaan perustuvan laskentatavan yleistymiselle.

KIRJALLISUUTTA

- [1] Sahlin, S., Structural masonry. Prentice-Hall Inc., New Jersey 1971.
- [2] Mondorf, P.E., Murværkskonstruktioner. Polyteknisk Forlag, Kööpenhamina 1972.
- [3] Mäkeläinen, P., Kirjoitus lukuun 4. Rakennesuunnittelu (4.1 Perusteet) käsikirjassa Muuratut rakenteet RIL 99, Helsinki 1975.
- [4] Johansson, S., Sidobelastade halvstens tegelväggar. Esitelmä Toisessa pohjoismaisessa muurattujen rakenteiden symposiumissa, Kööpenhamina 1975.
- [5] Cajdert, A. ja Losberg, A., Armerade tegelväggars hållfasthet mot sidolast. Dimensionering för vindtryck. Esitelmä Toisessa pohjoismaisessa muurattujen rakenteiden symposiumissa, Kööpenhamina 1975.

Pentti Mäkeläinen, dipl.ins. Helsingin teknillinen korkeakoulu, Otaniemi.