

ERI MATERIAALEISTA VALMISTETTUJEN RAKENTEIDEN LUOTETTAVUUDEN VERTAILUA

Asko Sarja

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 10
No. 3 1977 s. 23...31.

YHTEENVETO: Artikkelissa määritellään ensin rakenteen varmuusindeksi ja vaurioitumistodennäköisyys. Sen jälkeen on määritetty suunnittelunormeissa annettuja lujuusarvoja käyttäen eri materiaalien varmuusindeksit ja vaurioitumistodennäköisyydet murtorajatilaan joutumiseen nähden. Lopuksi on tarkasteltu rakenteen oman painon vaikutusta rakenteen varmuuteen ja todettu suuren oman painon lisäävän rakenteen varmuutta nykyisiä suunnitteluperiaatteita käytettäessä.

YLEISTÄ

Rakentamisen lopputuloksena on hyvin pitkällä aikavälillä käyttöön vakiintuneita, eri tyyppisistä materiaaleista erilaisilla valmistustavoilla tehtyjä rakenteita. Kun perinteellä on huomattava vaikutus rakenteiden mitoituskäytäntöön ja kun eri materiaaleista valmistettujen rakenteiden normit ja standardit on tehty paljolti toisistaan riippumattomina, voidaan ajatella rakenteiden luotettavuustasoon syntyneen eroja.

Tässä artikkelissa tarkastellaan lähinnä eri materiaaleista valmistettujen rakenteiden staattista lujuutta normien mukaisten suomalaisten mitoitusmenetelmien perusteella. Staattisesti kuormitettujen rakenteiden mitoituksen lisäksi tarkastellaan lyhyesti eräiden muiden tekijöiden vaikutusta rakenteiden luotettavuuteen.

TILASTOLLINEN LUOTETTAVUUSTARKASTELU

Rakenteen tilastollisella luotettavuudella tarkoitetaan todennäköisyyttä sille, että rakenne ei käyttöikänään joudu rajatilaan. Vaurioitumistodennäköisyydellä tarkoitetaan todennäköisyyttä, että rakenne käyttöikänään joutuu rajatilaan. Tässä tarkastellaan vain staattisen kuormituksen murtorajatilaa.

Eri materiaaleista valmistetuilla rakenteilla on suuri määrä materiaali-, valmistus- ja rakenneyksityiskohtia, jotka vaikuttavat rakenteen mitoituspaan ja luotettavuuteen. Siksi rakenteiden yleisessä vertailussa täytyy eri tekijöiden vaikutuksia yhdistää ja pyrkiä käyttämään kuormien sekä mittatoleranssien ja materiaalilujuuksien yhdistettyjä tilastollisia tunnuslukuja.

Tällaisia ovat:

- kuorman keskiarvo
- " keskihajonta
- " ominaisarvo (ominaiskuorma)
- " keskeisvarmuuskerroin
- " osavarmuuskerroin
- materiaalilujuuden keskiarvo
- " keskihajonta
- " ominaisarvo (ominaislujuus)
- " osavarmuuskerroin
- rakenteen varmuusindeksi
- rakenteen vaurioitumistodennäköisyys.

Tässä vertailussa otaksutaan kuormat ja materiaalilujuudet normaalijakautuneiksi. Lisäksi käytetään suomalaisten normien mukaisia ominaiskuormien ja materiaalien ominaislujuuksien määrittelyjä tai määrittelyn puuttuessa normeista otaksutaan ominaiskuormat ja ominaislujuudet määrittelyiksi käyttämällä 5 %:n fraktiilia. Kapasiteetti ja kuormat, myös rakenteen oma paino, otaksutaan toisistaan riippumattomiksi muuttujiksi. Eri materiaalien tyypilliset variaatiokerroimet on valittu kirjallisuuden ja VTT:n koetulosaineiston perusteella.

Todennäköisyyslaskennan perusteella voidaan määritellä varmuusindeksi

$$\beta = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{\theta - 1}{\sqrt{\theta^2 V_R^2 + V_S^2}},$$

missä

- m_R = rakenteen kapasiteetin keskiarvo,
- m_S = kuorman vaikutuksen keskiarvo,
- σ_R = rakenteen kapasiteetin keskihajonta,
- σ_S = kuorman vaikutuksen keskihajonta,
- V_R = rakenteen kapasiteetin variaatiokerroin,
- V_S = kuorman vaikutuksen variaatiokerroin ja
- $\theta = \text{keskeisvarmuuskerroin} = \frac{m_R}{m_S}$

Keskeisvarmuuskerroin lasketaan yhtälöstä

$$\theta = \frac{\gamma(1+k_S V_S)}{1-k_R V_R}$$

missä

- γ = nimellisvarmuuskerroin sallittujen jännitysten menetelmässä tai $\gamma = \gamma_R \cdot \gamma_S$ murtorajatilamitoituksessa,
- γ_R = materiaalin osavarmuuskerroin,
- γ_S = kuorman osavarmuuskerroin,
- k_R = materiaalin ominaislujuuden alitustodennäköisyyttä vastaava kerroin (=1,65, kun alitustodennäköisyys on 5 %) ja

k_S = kuorman nimellisarvon eli ominaiskuorman ylitystodennäköisyyttä vastaava kerroin (=1,65, kun ylitystodennäköisyys on 5 %).

Varmuusindeksin merkitys käy selväksi, kun todetaan, että normaalijakautumiin perustuvassa tarkastelussa vaurioitumistodennäköisyys on

$$p_f(\beta) = \phi(-\beta) = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz.$$

Esitetyillä periaatteilla lasketut eri materiaaleista valmistettuja rakenteita kuvaavat tilastolliset arvot on esitetty taulukossa 1. Taulukkoon 1 on merkitty myös murtumistyyppin arviointi, koska sitkeydellä on merkitystä tarvittavan luotettavuustason kannalta.

Taulukko 1. Eräistä materiaaleista valmistettuja rakenteita kuvaavia tilastollisia luotettavuussuureita.

Table 1. Some statistical reliability factors for structures of some common materials.

materiaali material	materiaalin lujuuden vari- aatiokerroin V_R	rakenteen varmuus- indeksi β	vaurioitumis- todennä- köisyys p_f	murtumis- tyyppi
1. sahatavara sawn timber goods				
-LT 40	0,17	4,80	$8 \cdot 10^{-7}$	sitkeä I
-LT 30	0,19	4,35	$7 \cdot 10^{-6}$	"
-LT 20	0,23	3,70	$1 \cdot 10^{-4}$	"
-T 40	0,15	5,60	$1 \cdot 10^{-8}$	"
-T 30	0,18	4,76	$1 \cdot 10^{-6}$	"
-T 20	0,24	3,68	$1 \cdot 10^{-4}$	"
2. tiili brickwork	0,15	4,96	$3 \cdot 10^{-7}$	hauras II-III
3. teräs steel	0,10	4,88	$4 \cdot 10^{-7}$	sitkeä I
4. betoni concrete				
-teräsbetoni	0,15	4,67	$1 \cdot 10^{-6}$	sitkeä I-II
-raudoitta- maton betoni	0,15	5,07	$2 \cdot 10^{-7}$	hauras II-III
5. kaasubetoni gas concrete (Siporex)				
-laatta	0,15	4,42	$5 \cdot 10^{-6}$	sitkeä I-II
-muurattu	0,20	4,60	$2 \cdot 10^{-6}$	hauras II-III

Vertailutaulukko on tehty pelkästään materiaalien veto- ja puristuslujuuden perusteella, joten se ei kata kaikkia rakenteiden murtumistapoja. Tällaisia taulukon tarkasteluun sisällytettömiä murtumistapoja ovat esimerkiksi leikkautuminen ja yhdistettyjen rakenteiden eri osien yhtenäisyyden loppuminen, kuten betonin ja terästen välisen tartunnan pettäminen tai liimatun puupalkin liima-
sauman murtuminen.

Kansainvälisissä suosituksissa /4/ ja /5/ on esitetty taulukon 2 mukaiset varmuusindeksin minimiarvot.

Taulukko 2. Varmuusindeksin minimiarvot.

Table 2. Recommended levels of the safety index β and probability of failure p_f /4/, /5/.

sortuman seuraus failure conse- quences	varmuusindeksi β ja vastaava vaurioitumistodennäköi- syys (p_f), kun murtumistyyppi on		
	I sitkeä ductile	II	III hauras brittle
lievä (not serious)	3,09 (10^{-3})	3,71 (10^{-4})	4,26 (10^{-5})
vakava (serious)	3,71 (10^{-4})	4,26 (10^{-5})	4,75 (10^{-6})
hyvin vakava (very serious)	4,26 (10^{-5})	4,75 (10^{-6})	5,20 (10^{-7})

Kun verrataan taulukossa 1 esitettyjä tilastollisia suuria kansainvälisen ohje-ehdotusten vaatimuksiin, voidaan todeta varmuusindeksin yleensä täytävän vaativimmankin rakenneluokan vaatimukset. Poikkeuksena ovat selvästi vain sahatavarat LT 20 ja T 20 ja ehkä joissakin tapauksissa muurattu kaasubetoni, jotka eivät täytä vaativimman luokan luotettavuusvaatimuksia. Kovin tarkkaa rajaa ei tällaisen ylimalkaisen tarkastelun perusteella voida vetää. Vertailussa riittänee vaurioitumistodennäköisyyden kertaluvun vertailu.

Tämän varmuustarkastelun tekijöiden lisäksi vaikuttavat rakenteiden luotettavuuteen ainakin seuraavat tekijät:

- ajan mukana tapahtuvat ilmiöt, kuten materiaalien lujittuminen tai heikkeneminen ja korroosio
- rakennesysteemi
- rakenteelliset määräykset, jotka mitoituslaskelmien ohella vaikuttavat rakenteen konstruktion
- rakenteen valmistuksen laadunvalvonta, jolla pyritään havaitsemaan etenkin vaaralliset viat ja eliminoidaan niiden vaikutus
- rakenteen massiivisuuden vaikutus rakenteen oman painon ja kapasiteetin välisen korrelaation kautta ja
- myötäämisen jälkeinen lujuus myötölujuunevilla aineilla

Esimerkkinä iän mukana lujittuvasta aineesta on normaalista portlandsementistä valmistettu betoni, jonka lujuuden on eräiden saksalaisten ja amerikkalaisten koetulosten perusteella todettu olevan 2,5 vuoden iässä noin 0...30 % ja 25...50 vuoden iässä noin 60...280 % suuremman kuin 28 vuorokauden iässä. Suhteellinen lisäys oli sitä suurempi mitä pienempi oli alkulujuus /10/, /11/. Korroosio taas vaikuttaa selvästi puurakenteiden lahoamisessa ja teräsrakenteiden ruostumisessa.

Rakennesysteemillä on huomattava vaikutus luotettavuuteen, koska paikallisten vikojen vaikutus rakenteen kapasiteettiin on vähäinen sitkeästä aineesta tehdyissä "rinnan kytketyissä" rakennesysteemeissä. Hauraasta aineesta tehdyissä tai "sarjaan kytketyissä" rakenteissa paikallinen vika voi määrätä koko

rakenteen kapasiteetin.

Rakenteelliset määräykset vaikuttavat usein rakenteen kapasiteettiin siten, että rakenne joudutaan konstruoimaan kapasiteetiltaan mitoituksen mukaista minimikapasiteettia suuremmaksi. Samalla rakenteelle taataan riittävä sitkeys. Tällaisia vaikutuksia on esimerkiksi minimimitoilla ja minimiteräsalloilla. Myös niissä tapauksissa, joissa jokin käyttörajatila, kuten taipuma, tulee määrääväksi, kasvaa rakenteen luotettavuus murtorajatilan suhteen. Esimerkkinä rakenteellisten määräysten erilaisuudesta voidaan esittää kantavan seinärakenteen minimimitat, jotka ovat normien mukaan eri materiaaleille seuraavat:

- tiili: 130 mm, kun korkeus 10 m ja
85 mm, kun korkeus 10 m
- kaasubetoni (Siporex): 150 mm yleisesti ja 125 mm yksikerroksisissa rakennuksissa
- betoni:
 - teräsbetoni: 150 mm
 - betoni: 150 mm yleinen, 120 yksikerroksisissa taloissa ja 100 mm sisäseinissä.

Muuratuille rakenteille sallitaan siis yleensä pienemmät seinäpaksuudet kuin betonirakenteille, vaikka mitoituslaskelmien mukaan, ottamalla tarvittavat vaaka- ja tuulivoimat huomioon betoniseinän kapasiteetti on suurempi kuin muuratun tai kaasubetoniseinän kapasiteetti. Ero korostuu vielä siinä, että kyseisiä minimimittoja sovelletaan yleisesti myös betonisiin sandwich-elementteihin, joiden kapasiteetti on selvästi suurempi kuin yksinkertaisen levyn kapasiteetti.

Rakenteen laadunvalvontaan on viime aikoina alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota ja eri materiaalien erot ovat ilmeisesti entisestään pienentyneet. Rakennuspaikalla valmistettavien rakenteiden laadunvalvonnan yleistaso lienee huonompi kuin teollisessa valmistuksessa, mutta sitä korvaa osittain rakennekohtaisen yksilöllisen valvonnan mahdollisuus.

Rakenteen massiivisuudella on tavallisia mitoitusmenetelmiä käytettäessä huomattava piilevä vaikutus rakenteen luotettavuustasoon silloin, kun mitoitettavan rakenteen oman painon vaikutus rasitukseen on suuri. Useimmiten rakenteen oma paino ja kapasiteetti korreloivat siten, että oman painon kasvaminen suurentaa myös kapasiteettia. Rakenteen kapasiteetin lisääntyminen on yleensä ainakin lähes yhtä suuri kuin oman painon lisäyksestä syntyvä rasituksen lisäys, joten näissä tapauksissa olisi paikallaan käyttää mitoitettavan rakenteen omalle painolle lähellä ykköstä olevaa osavarmuuserrointa. Sensijaan muulle pysyvälle kuormalle, kuten esimerkiksi pystyrakenteiden mitoituksessa niihin tukeutuvien vaakarakenteiden painolle, on syytä olla selvästi ykköstä suurempi osavarmuuserroin. Kun mitoitettavan rakenteen omalle painolle käytetään samaa osavarmuuserrointa kuin muillekin pysyville kuormille, saadaan esimerkiksi taivutusrasitetuille vaakarakenteille, joiden rasituksesta huomattava osa syntyy omasta painosta, selvää ylikapasiteettia, jota voidaan

kutsua reservikapasiteetiksi /1/. Rakenteilla, joissa oman painon vaikutus rasitukseen on pieni, on myös syntyvä ylikapasiteetti pieni. Reservikapasiteetti on massiivisilla rakenteilla huomattava piilevä luotettavuustason muuttaja, joka asettaa eri tyyppiset rakenteet erilaiseen asemaan mitoituksessa. Ilmiön vaikutukset on havaittu myös käytännössä. Esimerkiksi Norjassa tapahtui talvella 1977 useita kattorakenteiden sortumisia lumimäärän ollessa poikkeuksellisen suuri. Sortuneet rakenteet olivat kevytrakenteita, joiden oma paino oli pieni. Esimerkiksi Tromsössä betonipalkeista ja TT-laatoista valmistettu ja lumikuormalle 150 kp/m^2 suunniteltu tehdashallin kattorakenne kesti reservikapasiteetin turvin lumikuorman, kun taas lähellä sijainneen teollisuushallin teräsrakenteinen profiloitu levykatto murtui, vaikka katto oli suunniteltu lumikuormalle 250 kp/m^2 /1/. Reservikapasiteettia tarkastellaan vielä deterministisen mallin yhteydessä.

Myötäämisen jälkeinen lujittuminen ennen materiaalin murtumista synnyttää myös reservikapasiteettia. Lujittuminen on huomattavaa kuumavalssatuilla teräksillä ja se esiintyy siten lähinnä teräs- ja teräsbetonirakenteissa. Lujittuminen onkin otettu huomioon ohjeiden /4/ ja /5/ vaatimuksissa siten, että tyyppi sitkeä I tarkoittaa myöden jälkeen lujittuvaa rakennetta ja II rakennetta, jolla ei ole lujittumisominaisuuksia.

LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI DETERMINISTISTEN MITOITUSMALLIEN AVULLA

Deterministisinä mitoitusmenetelminä käytetään sallittuihin jännityksiin perustuvaa menetelmää ja rajatilamitoitusmenetelmää.

Näillä eri materiaaleista valmistetuille rakenteille saatavia varmuustasoja on verrattu toisiinsa edellä esitetyssä taulukossa 1. Lisähuomiota ansaitsee tässä edellä esitetyn reservikapasiteetin tarkastelu. Esimerkiksi tasaisella kuormalla kuormitetun yksinkertaisen palkin taivutusvarmuuskerroin voidaan esittää muodossa

$$n = \frac{[g + (t+1)q] \cdot \frac{L^2}{8}}{(g+q) \cdot \frac{L^2}{8}}$$

missä

g = omapaino

q = muu kuorma

t = r/q suhteellinen reservikapasiteetti

r = $t \cdot q$ reservikapasiteetti

L = jännemitta

Reservikapasiteetti on siten

$$t \cdot q = (n-1)(g+q)$$

Kun reservikapasiteetista poistetaan hyötykuormalle käytetty varmuus, jää jäljelle oman painon varmuuskertoimista syntyvä reservikapasiteetin osuus

$$r_g = tq - (n-1)q = (n-1)g.$$

Tämän suhteellinen suuruus verrattuna hyötykuormaan on

$$\frac{r_g}{q} = (n-1) \frac{g}{q}$$

Laskelmissa huomiotta jäävä suhteellinen reservikapasiteetti on siten erilaisille suhteille g/q ja varmuuskertoimille n laskettuna taulukon 3 mukainen.

Taulukko 3. Suhteellinen reservikapasiteetti eri arvoille g/q ja n .

Table 3. Relative extra carrying capacity for some values of g/q and safety margin n , where g is the weight of the structure to be designed and q the other part of the load.

$\frac{g}{q}$	$\frac{r_g}{q} \%$	
	$n=1,8$	$n=1,7$
0,1	8	7
0,3	24	21
0,5	40	35
0,75	60	52,5
1,0	80	70
1,5	120	105
2,0	160	140

Esimerkiksi edellä esitettyssä Tromsön tehdashallien tapauksessa voidaan oman painon varmuudesta tuleva reservikapasiteetti laskea seuraavasti:

rakenne	omapaino	hyötykuorma	varmuuskerroin n	suhteellinen reservikapasiteetti $\frac{r_g}{q} \quad \text{kp/m}^2$	
betonirakenne	200 kp/m^2	150 kp/m^2	1,75	1,0	150
teräsrakenne	30 kp/m^2	250 kp/m^2	1,6	0,072	18

Kun käytetään rajatilamitoituksessa usein sovellettua kuormien osavarmuuskerroinjärjestelmää, jossa oman painon osavarmuuskerroin on pienempi kuin hyötykuormien osavarmuuskertoimet, pienenee ylimääräinen reservikapasiteetti. Ilmeisesti normitustyössä olisikin massiivisuudeltaan eri tyyppisten rakenteiden luotettavuustasoa pyrittävä vakioimaan asettamalla rakenteen oman painon osavarmuuskerroin selvästi pienemmäksi kuin hyötykuormien osavarmuuskertoimet. Kuormien osavarmuuskertoimissa olisi siten kolme ryhmää:

- mitoitettavan rakenteen oma paino
- mitoitettavaa rakennetta kuormittavien rakenteiden paino ja muut pysyvät kuormat ja
- muuttuvat kuormat.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Eri materiaaleista valmistettujen rakenteiden luotettavuuden tilastollisen tarkastelun perusteella vaikuttavat mitoituksessa saatavat luotettavuustasot rakenteiden yleisiä käyttökohteita ajatellen likimäärin sopivilta. Kun muutkin rakenteiden luotettavuuteen vaikuttavat tekijät otetaan huomioon, voidaan eri materiaaleista valmistetuilla tai muutoin eri tyyppisillä rakenteilla havaita olevan merkittäviäkin luotettavuustason eroja verrattuna mitoituksessa pyrkimyksenä olevaan luotettavuuteen. Tämän epätarkkuuden pienentämisellä voitaisiin ilmeisesti saada aikaan huomionarvoista taloudellista hyötyä ja eräissä tapauksissa myös turvallisuuden paranemista. Luotettavuuden tarkentamisessa lähinnä normitustyön yhteydessä tehtäviksi sopivia uudistuksia ovat esimerkiksi seuraavat:

1. Rakenteiden pitkäaikaisen kestävyysluokittelu ja rakenteiden suunnitteluvaiheen huomioonottaminen materiaaalipohjaisissa normeissa.
2. Rakenteellisten määräysten kehittäminen rakenteiden toiminnallisiin vaatimuksiin perustuvien periaatteiden mukaisiksi.
3. Kuormitusten käsittelyn yhtenäistäminen materiaaleista riippumattomaksi ja rakenteen oman painon erottaminen muista kuormista näitä pienempää osavarmuuseroita käyttämällä.
4. Laskentamallien kehittäminen eri materiaalien ja rakennesysteemien todellista käyttäytymistä vastaavaan suuntaan. Staattisen epämääräisyysasteen vaikutuksen huomioonottaminen varmuustarkastelussa.
5. Käyttörajoitusten vaatimusten perusteiden yhtenäistäminen rakenteiden käytön mukaisten toimintavaatimusten mukaisiksi. Tähän kuuluu mm. taipuma- ja värähtelyrajojen vaatimusten yhtenäistäminen.
6. Laadunvalvonnan sopeuttaminen kunkin materiaalin käytön vaatimustasoa ja mitoituksen varmuustarkastelun lähtöotaksumia vastaavaksi.

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Bernander, K.G., Kvalitetsegenskaper hos betongelementkonstruktioner. Byggmästaren 1976:10, s. 44...50.
- [2] Betoninormit (1967, 1970, 1971) 1975, Betonielementtinormit (1967) 1975, Rajatilamitoitusohjeet 1975. Helsinki 1975. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, RIL 53 d.
- [3] Hannus, M., Rakenteiden luotettavuus. Helsinki 1973. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Julkaisu 8.
- [4] Harmonization of the technical content of building regulations, project 4.2: Uniform principles for requirements on load-bearing structures including design loads. United Nations Economic and Social Council. 1976
- [5] Last- och säkerhetsbestämmelser för bärande konstruktioner. Nordiska kommittén för byggbestämmelser. Förslag 1976.
- [6] Muuratut rakenteet. Standardi SFS 2803. Helsinki 1972. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 1972. RIL 85.

- [7] Puurakenteiden normit. Helsinki 1969. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. RIL 63. Karkaistun kevytbetonin normit. Helsinki 1969. Suomen rakennusinsinöörien liitto. RIL 69.
- [8] Rakenteiden kuormitusnormit (1969) 1970. Helsinki 1970. Suomen Rakennusinsinöörien liitto. RIL 59 b.
- [9] Teräsrakenteiden suunnitteluhjeet. Standardi SFS 3200. Helsinki 1974. Suomen rakennusinsinöörien Liitto. RIL 90.
- [10] Walz, K., Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 30 und 50 Jahren. Betontechnische Berichte 1977. Düsseldorf, Beton-Verlag GmbH, 1977, s. 57...78.
- [11] Walz, K & Hartmann, E., Witterungsbeständigkeit von Beton. 2. Bericht. Berlin 1977. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 274.

Asko Sarja, tekn.lis., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Otaniemi