Rakenteiden Mekaniikka
Vol. 45, Nro 4, 2011, s. 201-212

Uusi rakenteiden mitoitusmenetelmä

Tuomo Poutanen

Tiivistelmä. Uusi mitoitusmenetelmä esitetään kolmena variaationa: sallittujen jännitysten muunnelma, eurokoodin muunnelma ja kokonaan uusi menetelmä. Näissä menetelmissä on neljä yhteistä piirrettä: Kuormavarmuusluvut asetetaan ykkösiksi eli $\gamma_{GQ} = \gamma_G = \gamma_Q = 1$. Muuttuvan kuorman vaihteleva variaatiokerroin V_Q otetaan huomioon. Kokonaisvarmuusluku γ_T asetetaan muuttuvaksi. Eksplisiittisiä varmuuslukuja ei ole, vaan ainoastaan fiktiivisiä kokonaisvarmuuslukuja γ_T, joilla materiaalilujuuksien nimellisarvot jaetaan, joista tällöin tulee sallittuja jännityksiä. Kaikki menetelmät ovat yksinkertaisia ja vaativat vähän laskentatyötä.

Ensimmäistä variaatiota, joka on sallittujen jännitysten mitoitusmenetelmän muunnelma, voidaan pitää vaihtoehdoista parhaimpana, sillä kuormataulukkomuutokset ovat nykyisiin mitoitusmenetelmiin verrattuna vähäisiä ja menetelmä on tarkin eli mitoitustuloksen poikkeama tavoiteluotettavuudesta on pienin. Uusi mitoitusmenetelmä on tarkempi, mutta samalla yksinkertaisempi ja vähemmän laskentatyötä vaativa, kuin nykyiset mitoitusmenetelmät.

Avainsanat: mitoitusmenetelmä, rakennemitoitus, kokonaisvarmuusluku

Johdanto

Merkinnät

Tässä kirjoituksessa käytetään pääosin samoja merkintöjä kuin eurokoodissa [1].

G	Pysyvä kuorma, $\mu_G = 1$, $\sigma_G = 0.0195$
Q	Muuttuva kuorma, $V_Q = 0.4$: $\mu_{Q,0.4} = 0.4909$, $\sigma_{Q,0.4} = 0.1964$; $V_Q = 0.2$: $\mu_{Q,0.2} = 0.6586$, $\sigma_{Q,0.2} = 0.1317$, nämä arvot vastaavat nykyistä varmuuslukujen laskentaa ja yhden vuoden kuormien jakaumien asemaa
M	Materiaalikestävyys, $V_M = 0.3$: $\mu_{M,0.3} = 1.6921$, $\sigma_{M,0.3} = 0.5076$; $V_M = 0.2$: $\mu_{M,0.2} = 1.4125$, $\sigma_{M,0.2} = 0.2825$; $V_M = 0.1$: $\mu_{M,0.1} = 1.1841$, $\sigma_{M,0.1} = 0.1184$
γ	Varmuusluku, $\gamma_G = 1.35$, $\gamma_Q = 1.5$ tai $\gamma_G = \gamma_Q = 1$, γ_M riippuu materiaalihajonnasta
κ	Kuormien G ja Q jakaumien hajontojen kerroin, jolla yhdistely sovitetaan riippuvaksi, jos kuormat yhdistetään riippumattomasti, $\kappa = 1$
μ	Keskiarvo
σ	Hajonta
P_f	Murtumistodennäköisyys, $P_f = 1/15400$
β	Luotettavuusindeksi, $P_f = \Phi(-\beta)$, Φ on 0,1-normaalijakauman kertymäfunktio
α	Kuormasuhde, muuttuvan kuorma suhde kokonaiskuormaan $\alpha = \mu_Q/(\mu_Q+\mu_G)$
V	Variaatiokerroin $V = \sigma / \mu$
dp	Mitoituspistearvo, jakauman kertymäfunktion arvo mitoituspisteessä
T_{QR}	Muuttuvan ominaiskuorman referenssiaika eli toistumisaika, $T_{QR} = 1/(1 - dp_Q)$

Tavoite

Tämän kirjoituksen tavoitteena on osoittaa, että suunnittelunormi, jossa materiaalivarmuusluku asetetaan kuormasuhteen α funktioksi, on tarkempi eli suunnittelutulos poikkeaa vähemmän tavoiteluotettavuudesta kuin nykyiset osavarmuuslukunormit, jossa kuormavarmuusluku on kuormasuhteen α funktio.

Oletukset

Tämän kirjoituksen perusoletukset ovat eurokoodin mukaisia.

Varmuuslukuja laskettaessa vain pysyvä ja muuttuva kuorma ja materiaali katsotaan satunnaismuuttujiksi. Muita mitoitukseen vaikuttavia satunnaistekijöitä, kuten rakenteen geometriaan, rakennemalliin, laskentaan, rakentamiseen ja käyttöön liittyviä vaihteluita ja virheitä ei huomioida. Näiden seikkojen merkitys on tärkeä, mutta on tavallista, että nämä seikat sivuutetaan [4].

Uuden mitoitusmenetelmän varmuusluvut perustuvat riippuvaan kuormien yhdistämiseen, [5, 6]. Eurokoodin [1] kuormien yhdistelysääntö 6.10 perustuu riippuvaan kuormien yhdistämiseen, mutta säännöt 6.10a,b ja 6.10a,mod sen sijaan riippumattomaan yhdistämiseen. Riippuva kuormien yhdistäminen johtaa suurempiin varmuuslukuihin ja tämä yhdistäminen on siten varmalla puolella. Kirjoituksissani [5, 6] selostan laajemmin, että kuormat tulee yhdistää riippuvasti.

Varmuusluvut valitaan niin, että tavoiteluotettavuuteen nähden alivarmuutta ei ole, kun kuormitusyhdistelyssä on enemmän kuin 20 % pysyvää tai muuttuvaa kuormaa. Tämä valinta johtaa likimäärin nykyisiin Suomen eurokoodin varmuuslukuihin.

Eurokoodi

Tekniikan nykytilan mitoitusnormi on eurokoodi, johon tätä uutta mitoitusmenetelmää verrataan. Eurokoodia sovelletaan hieman erilaisilla tavoilla eri maissa, mutta eurokoodi on pääosiltaan seuraava:

Pysyvä kuorma oletetaan normaali-jakautuneeksi; nimelliskuorma on keskiarvo, $dp_G = 0.5$; variaatiokerroin V_G on n. 0.1. Tässä on oletettu $V_G = 0.0915$, mikä vastaa tavoiteluotettavuutta $\beta = 3.826$, kun $\gamma_G = 1.35$ ja $V_M = 0$. Mitoituspisteeseen sovitettu jakauma jaetaan varmuusluvulla γ_G, jolloin saadaan murtotilan jakauma.

Muuttuva kuorma oletetaan Gumbel-jakautuneeksi, nimelliskuorma on 50 vuoden arvo eli $T_{QR} = 50$ a, $dp_Q = 0.98$, $\gamma_Q = 1.5$. Mitoituspisteeseen sovitettu jakauma jaetaan varmuusluvulla γ_Q, jolloin saadaan murtotilan jakauma. Muuttuvan kuorman vaihteleva variaatiokerroin voidaan huomioida mitoituksessa monella tavalla: Yksi vaihtoehto on, että varmuusluvut lasketaan suurimman vaihtelun tai lähes suurimman vaihtelun mukaan ja nimelliskuorma eli jakauman mitoituspistearvo optimoidaan niin, että materiaalivarmuusluku on vaihtuvissa muuttuvissa kuormissa mahdollisimman tarkkaan sama. Toinen vaihtoehto on, että varmuusluvut lasketaan muuttuvan kuorman todellisen vaihtelun ja mitoituspistearvon $dp_Q = 0.98$ mukaan ja optimointia varmuusluvun vakioimiseksi ei tehdä. Kolmas vaihtoehto on sama kuin edellinen, mutta mitoituspistearvo dp_Q optimoidaan varmuusluvun erojen minimoimiseksi. Tässä kirjoituksessa on sovellettu ensimmäisenä selostettua vaihtoehtoa ja muuttuvan kuorman variaatiokertoimeksi V_Q on valittu 0.4.

Materiaalilujuus oletetaan log-normaali jakautuneeksi; lujuuden nimellisarvo on 0.05 arvo, $dp_M = 0.05$. Murtotilan jakauma saadaan kertomalla nimellisjakauma varmuusluvulla γ_M.

Luotettavuustavoitteeksi asetetaan, että tavallisessa mitoituksessa murtumistodennäköisyyden P_f täytyy olla pienempi kuin 1/15400, eli luotettavuusindeksi β on 3.826. Tässä oletetaan yleisen käytännön mukaan, että tätä murtumistodennäköisyyttä sovelletaan sekä pysyvään, että muuttuvaan kuormaan.

Teräs, liimapuu ja sahatavara valitaan tässä vertailumateriaaleiksi. Näiden materiaalien kestävyyksien variaatiokertoimet V_M oletetaan olevan 0.1, 0.2 ja 0.3 sisältäen kuormavariaatiokertoimien kanssa kaiken vaihtelun eli mitoituksen epävarmuutta (mitoitusmalli, mitoitus, rakentaminen ja käyttö) ei huomioida erikseen.

Kuormitukset G ja Q, joiden kertymäfunktiot ovat $FG(x,\mu_G,\sigma_G)$, $FQ(x,\mu_Q,\sigma_Q)$ ja tiheysfunktiot $fG(x,\mu_G,\sigma_G)$, $fQ(x,\mu_Q,\sigma_Q)$ yhdistetään niin, että konvoluutiokaavalla laskettun yhdistelyjakauman $FGQ(x)$ hajonta muutetaan niin, että yhdistelyjakauma kulkee osajakaumien leikkauspisteen x_{GQ}, P_{GQ} kautta. Tämä sovitus tehdään kertomalla yhdistelyjakauman hajonta kertoimella κ. Materiaalikestävyyden jakaumat ovat $FM(x,\mu_M,\sigma_M)$ ja $fM(x,\mu_M,\sigma_M)$. Laskentakaavat voidaan kirjoittaa monella tavalla, esimerkiksi:

Jakaumien G ja Q leikkauspiste x_{GQ} ratkaistaan yhtälöstä

$$FG\left(x_{GQ},\frac{\mu_G}{\gamma_G},\frac{\sigma_G}{\gamma_G}\right)=FQ\left(x_{GQ},\frac{\mu_Q}{\gamma_Q},\frac{\sigma_Q}{\gamma_Q}\right) \tag{1}$$

Kerroin κ ratkaistaan yhtälöstä

$$\int_{-\infty}^{\infty} FG\left(x_{GQ}-r,\frac{\mu_G}{\gamma_G}\cdot\alpha,\frac{\sigma_G}{\gamma_G}\cdot\alpha\cdot\kappa\right)\cdot fQ\left[r,\frac{\mu_Q}{\gamma_Q}\cdot(1-\alpha),\frac{\sigma_Q}{\gamma_Q}\cdot(1-\alpha)\cdot\kappa\right]dr = FG\left(x_{GQ},\frac{\mu_G}{\gamma_G},\frac{\sigma_G}{\gamma_G}\right) \tag{2}$$

Kuormat G ja Q yhdistetään kuormaksi FGQ kaavalla

$$FGQ(x)=\int_{-\infty}^{\infty} FG\left(x-r,\frac{\mu_G}{\gamma_G}\cdot\alpha,\frac{\sigma_G}{\gamma_G}\cdot\alpha\cdot\kappa\right)\cdot fQ\left[r,\frac{\mu_Q}{\gamma_Q}\cdot(1-\alpha),\frac{\sigma_Q}{\gamma_Q}\cdot(1-\alpha)\cdot\kappa\right]dr \tag{3}$$

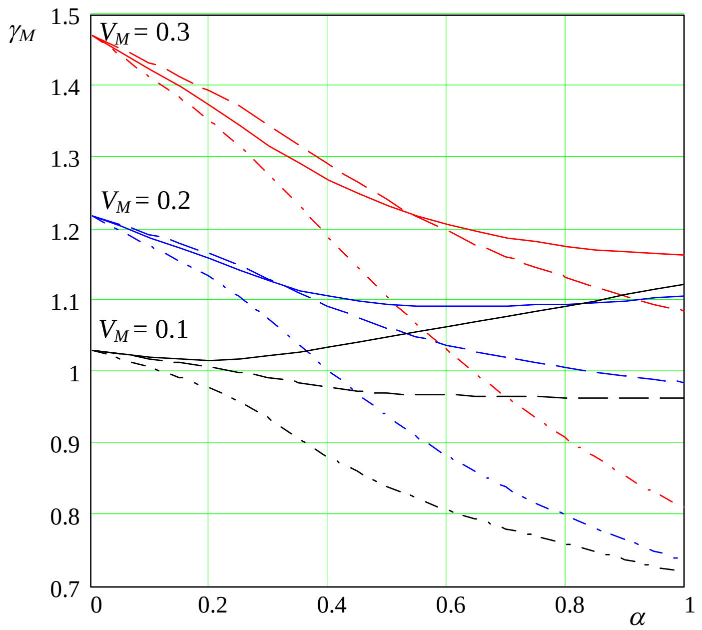
Materiaalivarmuusluku γ_M ratkaistaan yhtälöstä

$$1-\int_{0}^{\infty} FGQ(x)\cdot fM\left(x,\mu_M\cdot\gamma_M,\sigma_M\cdot\gamma_M\right)\mathrm{d}x = P_f \tag{4}$$

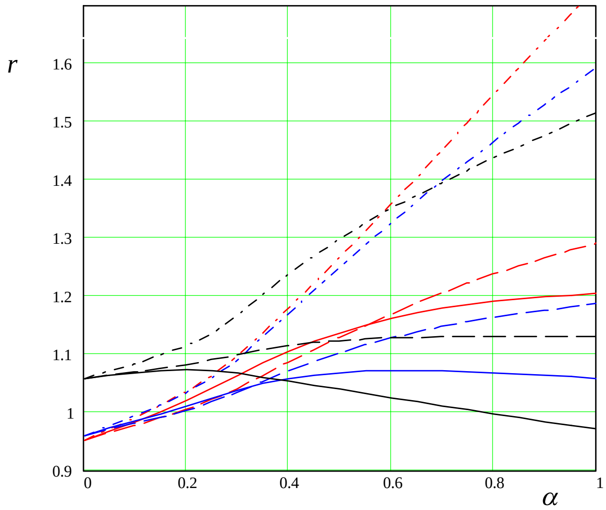
Näistä lähtökohdista voidaan laskea kuvassa 1 esitetyt tavoiteluotettavuutta vastaavat materiaalivarmuusluvut γ_M [5, 6].

Yhtenäiset viivat liittyvät $V_Q = 0.4$ arvoihin, kun $V_M = 0.3$, 0.2 ja 0.1 ja katkoviivat $V_Q = 0.2$ arvoihin, joissa nimellisarvo ja luotettavuus on laskettu $V_Q = 0.2$:sta. Pistekatkoviivat esittävät γ_M:n $V_Q = 0.2$ arvoja, joissa nimellisarvo on laskettu $V_Q = 0.4$:sta, mutta luotettavuus $V_Q = 0.2$:sta.

Pistekatkoviivat osoittavat, että on tärkeää määrittää nimelliskuorma todellisen variaatiokertoimen mukaan ja sääntöä $V_Q = 0.4$ ei tule soveltaa kaikkiin kuormiin ellei mitoituspistearvoa aseteta muuttuvaksi. Eurokoodissa oletetaan, että γ_M-arvot ovat riippumattomia kuormasuhteesta α. γ_M -arvot eivät ole vakioita, mistä aiheutuu virhettä. Tässä oletetaan, että, materiaalivarmuusluvut valitaan suunnittelunormiin niin, että tavoiteluotettavuus saavutetaan kuormitustapauksissa α = 0.2 - 0.8 eli kuormitustapaukset, joissa on vähemmän kuin 20 % pysyvää tai muuttuvaa kuormaa ovat harvinaisia ja ne jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Tästä oletuksesta seuraa, että varmuusluvut γ_M ovat 1.09, 1.17 ja 1.4, kun V_M = 0.1, 0.2 ja 0.3 eli teräs-, liimapuu- ja sahatavararakenteissa. Suomen eurokoodissa nämä luvut ovat 1.0, 1.2 ja 1.4. Suomen eurokoodissa sovelletaan kuormien yhdistelysääntöä 6.10a,mod, jossa on kaksi pysyvän kuorman varmuuslukua, γ_G = 1.15 ja 1.35, minkä johdosta varmuuslukujen γ_M tulee olla edellä esitettyjä suurempia. Alivarmuus on siten joissakin kuormitustapauksissa huomattava [5, 6]. Kuvassa 2 esitetään eurokoodin yhdistelysäännön 6.10, γ_G = 1.35, γ_Q = 1.5, virhesuhde, r, joka on edellä valitun varmuusluvun ja tavoiteluotettavuutta vastaavan varmuusluvun suhde. r < 1 merkitsee alivarmuutta eli murtumistodennäköisyys on tavoitetta suurempi. r > 1 merkitsee ylivarmuutta. Kuvasta 2 nähdään, että eurokoodin virhe on suuri, kun kuormituksessa on paljon muuttuvaa kuormaa ja ylimitoitus on n. 20 %. Jos eurokoodia sovelletaan niin, että muuttuvan kuorman variaatiokertoimeksi V_Q oletetaan kaikissa tapauksissa 0.4, em. ylimitoitusarvot ovat yli kaksinkertaiset.



Kuva 1. Materiaalivarmuusluvut γ_M, jotka vastaavat eurokoodin tavoiteluotettavuutta β = 3.826, V_M = 0.3, 0.2, 0.1, yhtenäiset viivat, V_Q = 0.4. Katkoviivat ovat γ_M arvoja, joissa V_Q = 0.2 (nimellisarvo ja luotettavuus on laskettu V_Q = 0.2:sta). Pistekatkoviivat kuvaavat V_Q = 0.2 arvoja, joissa ominaiskuorma on laskettu V_Q = 0.4:sta, mutta luotettavuus V_Q = 0.2:sta. α on muuttuvan kuorman suhde kokonaiskuormaan.



Kuva 2. Virhesuhde, r eli valittu γ_M-arvo jaettuna tavoiteluotettavuutta vastaavalla arvolla, viivojen merkintä on sama kuin kuvassa 1.

Sallitut jännitykset ja osavarmuusluvut

Euroopassa siirryttiin sallittujen jännitysten menetelmästä osavarmuuslukumenetelmään siksi, että varmuuslukujen laskentamenetelmä edellytti varmuusluvun asettamista jokaiseen satunnaismuuttujaan, pysyvään kuormaan, muuttuvaan kuormaan ja materiaaliominaisuuteen. Tämä varmuuslukujen määritystapa kuvataan edelleen voimassa olevassa eurokoodissa. Osasyynä luultavasti lisäksi oli luulo, että kuormien korottaminen murtotilassa johtaa tarkempaan mitoitukseen ja että rajatilasuunnittelu edellyttäisi kuormien korottamista murtotilassa.

Kuormien korottaminen on tarpeellista, jos mitoitus perustuu tarkkaan rakenteen simulointiin. Kuitenkin, tavallinen mitoitus on yksinkertaista ja kuormien korottaminen on tarpeellista käytännön mitoituksessa vain kahdessa erikoistapauksessa: toisen kertaluvun mitoituksessa ja kaatumismitoituksessa. Näitä kahta erikoistapausta varten normeissa on erikoisohjeet, joten tavallisessa mitoituksessa kuormien korottaminen ei ole tarpeellista. Esimerkiksi, eurokoodimitoituksessa murtotilakuormia ei tarvitse korottaa käyttötilakuormista. Eurokoodissa annetaan rakenteille ja niiden osille jäykkyydet käyttötilassa ja murtotilassa ja välitilaa ei tarvitse huomioida. Tästä periaatteesta seuraa, että kuorman ja jännityksen keskinäinen yhteys on molemmissa tiloissa lineaarinen riippumatta laskentamallista ja esimerkiksi siitä, oletetaanko rasitusten jakautuvan elastisesti, plastisesti, halkeamattomasti, halkeilleesti tai jotenkin näiden ääriarvojen väliltä. Eurokoodissa käyttötilan ja murtotilan jäykkyydet saattavat olla erilaiset, mutta kuormitustasot voivat olla tavallisessa mitoituksessa mitkä tahansa, mitoitustulos on kuormitustasosta riippumaton.

Kirjoituksissani [5, 6] selostetaan, että varmuusluvut eivät ole milloinkaan luotettavuuslaskennan vuoksi välttämättömiä. Varmuuslukujen avulla voidaan säätää kuormaan ja materiaalin liittyvä varmuus halutuksi. Aikaisemmin ei ole huomattu, että sama asia voidaan tehdä toisellakin tavalla eli muuttamalla muuttuvan kuorman nimelliskuormaa. Rakenteet mitoitetaan yleensä 50 vuodeksi ja muuttuvan kuorman nimelliskuorma on yleensä myös 50 vuoden toistumisvälin kuorma. Rakennuksen käyttöajalla ja nimelliskuorman referenssiajalla ei ole kuitenkaan mitään yhteyttä keskenään, joten nimelliskuorman aika voidaan valita vapaasti. Eurokoodissa muuttuva nimelliskuorma valitaan 50 vuoden mukaan ja varmuusluku γ_Q on 1.5. Jos nimelliskuorma valittaisiin 103 vuoden mukaan, nimelliskuormat kasvavat 11 % ja varmuusluku vastaavasti pienenee, jolloin siitä tulee 1.35 eli sama kuin pysyvän kuorman varmuusluku. Tämän mukaan eurokoodi voidaan muuttaa saman laskentatuloksen antavaksi kokonaisvarmuuslukunormiksi (ja myös sallittujen jännitysten menetelmän normiksi), kun muuttuvien kuormien ominaisarvoja kasvatetaan 11 % ja materiaalivarmuusluvut kerrotaan 1.35:llä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että lujuusmitoituksen kannalta kuormavarmuuslukujen γ_G ja γ_Q käyttäminen ei ole yleensä tarpeellista eivätkä kuormavarmuusluvut ole milloinkaan tarpeellisia luotettavuuslaskennan kannalta, kun muuttuvan kuorman nimelliskuorman aika säädetään sopivaksi. Varmuusluvut γ_G ja γ_Q voidaan siten asettaa suuruudeltaan ja keskinäiseltä suhteeltaan millaisiksi tahansa, esimerkiksi $\gamma_G = \gamma_Q = 1$.

Julkaisuissa [5, 6] selostetuilla menetelmillä rakenteen kokonaisvarmuusluku γ_T voidaan laskea suoraan kuormien ja materiaaliominaisuuksien jakautumista ilman varmuuslukuja γ_G, γ_Q ja γ_M. Menetelmällä voidaan myös laskea γ_M, jos on γ_G ja γ_Q ovat tunnettuja tai päinvastoin. Jos $\gamma_G = \gamma_Q = \gamma_{GQ}$ kokonaisvarmuus γ_T voidaan laskea $\gamma_T = \gamma_{GQ} \cdot \gamma_M$, jos $\gamma_G = \gamma_Q = 1$, $\gamma_T = \gamma_M$.

Tässä selostetuissa uusissa menetelmissä on vain yksi varmuusluku, kokonaisvarmuusluku γ_T, minkä johdosta menetelmää voidaan kutsua kokonaisvarmuuslukumenetelmäksi. Koska tämä varmuusluku on fiktiivinen eli sitä ei ole eksplisiittisenä normissa, sillä se on yhdistetty materiaalikestävyyden nimellisarvoon, josta tulee sallittu jännitys, tätä menetelmää voidaan pitää myös sallittujen jännitysten menetelmänä.

Kun asetetaan $\gamma_G = \gamma_Q = 1$, mitoitus helpottuu, sillä kaksinkertaista analyysia (käyttötila- ja murtotila-analyysia) ei yleensä tarvita, laskentatyö pienenee ja mitoitusnormi yksinkertaistuu. Laskentatyön vähennys liittyy staattisesti määrättyihin rakenteisiin ja likimäärin myös määräämättömiin, sillä käyttö- ja murtotilan jäykkyyserot vaikuttavat yleensä vain vähän rasitusjakaumaan.

Eurokoodin luotettavuusrakenne on epäkäytännöllinen, sillä $\gamma_G \neq \gamma_Q$ –valinta johtaa monimutkaiseen normiin ja suureen laskentatyöhön.

Uusi mitoitusmenetelmä

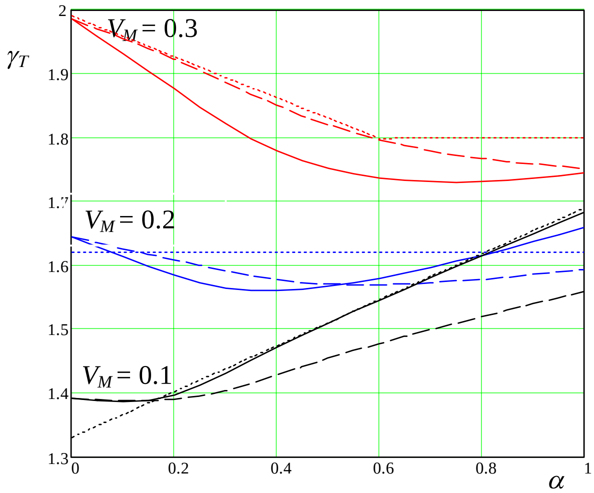
Uudessa mitoitusmenetelmässä ei ole kuormavarmuuslukuja. Tästä lähtökohdasta mitoitusmenetelmä voidaan laatia monenlaiseksi. Seuraavassa esitetään kolme tapaa.

Variaatio 1, sallittujen jännitysten muunnelma

Muuttuvan kuorman nimelliskuorma valitaan kuten sallittujen jännitysten menetelmässä ja eurokoodissa eli $T_{QR} = 50$ a, jos $V_Q = 0.4$. Tämä valinta tekee mahdolliseksi nykyisten kuormataulukoiden käyttämisen. Kuitenkin, jotta menetelmän kaikki mahdollisuudet voitaisiin hyödyntää, kuormataulukot tulee osittain uusia, sillä kuormia, joiden variaatiokerroin on pienempi kuin 0.4 ($V_Q < 0.4$), voidaan pienentää nykyisestä. Tässä asetetaan T_{QR} = 25, jos V_Q = 0.2, joten tämä ominaiskuorma on 7 % pienempi kuin T_{QR} = 50 mukainen kuorma ja 30 % pienempi kuin T_{QR} = 50 ja V_Q = 0.4 mukainen kuorma.

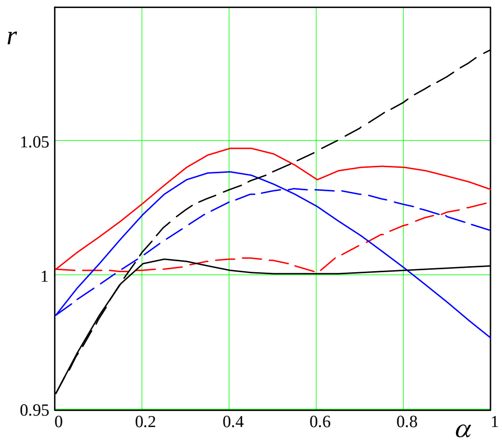
Kokonaisvarmuusluvut γ_T on esitetty kuvassa 3 [5, 6]. Teräksen ja sahatavaran varmuusluku on erilainen, kun kuormituksena on paljon pysyvää tai muuttuvaa kuormaa. Siksi näiden materiaalien varmuusluvun normiarvo γ_{TC} valitaan erilaiseksi pienillä ja suurilla α -arvoilla. Valitut γ_{TC} arvot ovat:

- teräs, V_M = 0.1: $\gamma_{TC.0.1} = 1.33 + \alpha 0.36$,
- liimapuu, V_M = 0.2: $\gamma_{TC.0.2} = 1.62$,
- sahatavara, V_M = 0.3: $\gamma_{TC.0.3} = 1.99 - \alpha 0.32$, $0 \le \alpha < 0.6$, 1.8, $0.6 \le \alpha \le 1$.



Kuva 3. Tavoiteluotettavuutta vastaavat kokonaisvarmuusluvut γ_T kun V_M = 0.1, 0.2, 0.3, yhtenäinen viiva, V_Q = 0.4. Katkoviivat liittyvät V_Q = 0.2 arvoihin. Pisteviivat kuvaavat valittuja normiarvoja γ_{TC}.

Valitut normiarvot γ_{TC} ovat suurempia kuin tavoiteluotettavuutta vastaavat arvot (kuormitustapauksissa α = 0.2 – 0.8). Virhesuhde eli normiarvo γ_{TC} jaettuna tavoiteluotettavuutta vastaavalla arvolla, on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Virhesuhde, r, normin γ_{TC} arvot jaettuna vastaavilla tavoiteluotettavuuden arvoilla. Käyrien merkinnät ovat samat kuin kuvassa 3.

Normiarvot γ_{TC} voidaan valita eksaktimmallakin tavalla, jolloin virhe olisi vielä pienempi. Tämäkin mitoitusmalli on tarkka eurokoodiin verrattuna, sillä sen vastaava virhe on ainakin n. 20.

Materiaalivariaatiokertoimen arvolla V_M = 0.3 eli käytännössä sahatavararakenteissa, materiaalivarmuusluku on vaihteleva, kun pysyvä kuorma on hallitseva, mutta vakio, kun muuttuva kuorma on hallitseva. Sahatavararakenteissa muuttuva kuorma on jotakuinkin aina hallitseva, joten materiaalivarmuusluku on vakio ja mitoitus on yksinkertaista. Materiaalivariaatiokertoimen arvolla V_M = 0.2, eli käytännössä betoni- ja liimapuurakenteissa, materiaalivarmuusluku on vakio kaikissa kuormitustapauksissa, joten mitoitus on yksinkertaista. Kun materiaalivariaatiokerroin on 0.1, eli käytännössä teräsrakenteissa, materiaalivarmuusluku on vaihteleva koko kuormitusalueella. Tässä suhteessa tämä uusi mitoitusmenetelmä on murtotilamitoituksessa yhtä monimutkaista kuin nykyisessä eurokoodissa. Jokaisessa teräsrakenteiden mitoitustapauksessa materiaalikestävyys joudutaan laskemaan kuormasuhteesta α. Teräsrakenteissa tosin muuttuva kuorma on hallitseva, α = 0.5 – 0.8, minkä mukaan γ_{TC} voidaan asettaa myös vakioksi.

Kokonaislaskentatyö on tässä uudessa menetelmässä yksinkertaisempaa ja helpompaa kaikilla materiaaleilla, sillä murtotilan ja käyttötilan laskenta voidaan jotakuinkin aina yhdistää.

Variaatio 2, eurokoodin muunnelma

Uusi havainto on, että kuormavarmuuslukujen sijasta pysyvän ja muuttuvan kuorman luotettavuutta voidaan säätää muuttuvan kuorman nimelliskuormalla. Esimerkiksi, eurokoodin muuttuvan kuorman varmuusluku γ_Q = 1.5 voidaan muuttaa 1.35:ksi eli samaksi kuin γ_G, kun nimelliskuorman referenssiaika muutetaan 50 vuodesta n. 103 vuoteen (102.77 vuoteen). Tällä muutoksella eurokoodi muuttuisi sallittujen jännitysten mitoitusmenetelmäksi (ja myös kokonaisvarmuuslukumenetelmäksi), sillä laskenta voidaan tehdä kuormavarmuusluvuilla $\gamma_G = \gamma_Q = 1$, kun mitoitusyhtälö jaetaan 1.35:lla.

Tässä variaatiossa nimelliskuorma asetetaan 100 vuodeksi, T_{QR} = 100 a, V_Q = 0.4. Tämä variaatio on siten melkein sama kuin eurokoodi, mutta kaksi eroa on. Muuttuville kuormille, joissa V_Q < 0.4 nimelliskuorman aika on pienempi kuin 100 vuotta, nimelliskuorma määrätään kuorman todellisen vaihtelun mukaan sekä kokonaisvarmuusluku γ_T vaihtelee kuormasuhteen α mukaan.

Kuvassa 5 on esitetty tavoiteluotettavuutta vastaavat kokonaisvarmuusluvut, jotka perustuvat seuraavaan: T_{QR} = 100 a kun V_Q = 0.4 ja T_{QR} = 75 a kun V_Q = 0.2 (3 % pienempi arvo kuin 100 vuoden arvo ja 30 % pienempi, jos nimellisarvo perustuu V_Q = 0.4 sääntöön). Yhtenäiset viivat liittyvät V_Q = 0.4 arvoihin, kun V_M = 0.1, 0.2 ja 0.3. Katkoviivat ovat vastaavia V_Q = 0.2 arvoja.

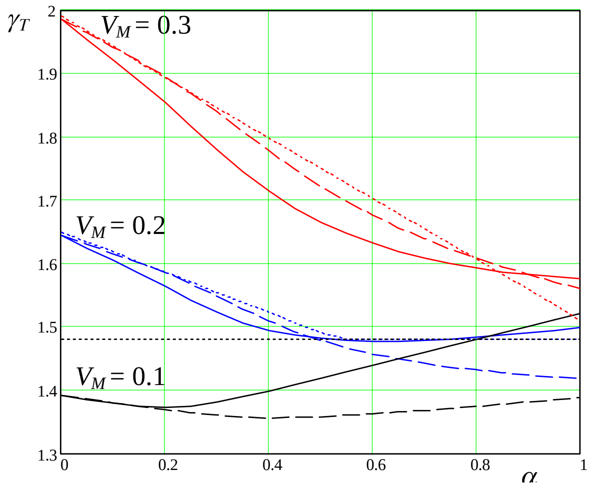
Samalla tavalla kuin edellä, normin kokonaisvarmuuslukujen arvot γ_{TC} valitaan niin, että tavoiteluotettavuus saavutetaan kuormitustapauksissa α = 0.2 - 0.8:

- teräs, V_M = 0.1, γ_{TC} = 1.48,
- liimapuu, V_M = 0.2, γ_{TC} = 1.48, $0.5 \le \alpha \le 1$ ja $1.65 - \alpha 0.32$, $0 \le \alpha < 0.5$,
- sahatavara, V_M = 0.3, $\gamma_{TC} = 1.99 - \alpha 0.48$.

Normiarvot γ_{TC} on esitetty kuvassa 5 pisteviivoilla. On syytä panna merkille, että sahatavan ja liimapuun normiarvon määrityksessä muuttuvan kuorman variaatiokerroin

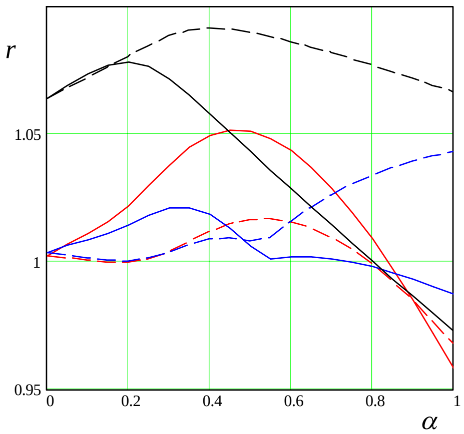
V_Q = 0.2 on määräävä. Koska tällainen kuormitus on harvinainen, edellä tehdyt valinnat eivät mahdollisesti ole optimaalisia eli sahatavaralle ja liimapuulle voidaan valita hieman pienemmätkin arvot.

Tämä variaatio edellyttää, että nykyiset 50 vuoden arvoihin perustuvat kuormataulukot on muutettava. Kuormia on korotettava jopa 11 % tai joskus vastaavasti pienennettävä. Kuormataulukoiden nimellisarvojen korottaminen ei merkitse mitoituksen kiristymistä, sillä varmuusluvut vastaavasti pienenevät. Uuden mitoitusmenetelmän kaikkien variaatioiden kokonaisvaikutus on, että mitoitus kevenee sellaiseen eurokoodiin nähden, jossa ei ole alivarmuutta.



Kuva 5. Tavoiteluotettavuutta vastaavat kokonaisvarmuusluvut γ_T kun V_M = 0.1, 0.2, 0.3, yhtenäinen viiva, V_Q = 0.4, vastaavat katkoviivat esittävät V_Q = 0.2 arvoja. Pisteviivat esittävät valittuja normiarvoja γ_{TC}.

Kuva 6 esittää variaation 2 virhettä eli normiarvon γ_{TC} suhdetta tavoitearvoon.



Kuva 6. Virhesuhde, r, normiarvon γ_{TC} suhde tavoiteluotettavuutta vastaavaan arvoon variaatiossa 2. Viivojen merkinnät ovat samat kuin kuvassa 5.

Kuvista 5 ja 6 nähdään, että variaation 2 virhe on pienempi kuin n. 9 %. Suuri tarkkuus johtuu pääasiassa muuttuvasta kokonaisvarmuusluvusta. Eurokoodin tarkkuutta voitaisiin parantaa vastaavalla tavalla, jos materiaalivarmuusluku asetettaisiin muuttuvaksi ja jos lisäksi muuttuvan kuorman nimelliskuorma määritettäisiin huomioimalla todellinen vaihtelu tapauksissa $V_Q < 0.4$ eikä noudatettaisi sääntöä $V_Q = 0.4$.

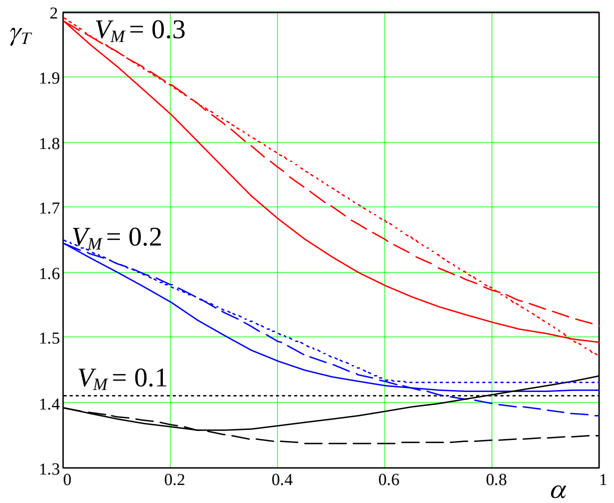
Variaatio 3, uusi menetelmä

Variaation 3 on kahta eroa lukuun ottamatta sama kuin variaatio 2: $T_{QR} = 150$ a, kun $V_Q = 0.4$ ja $T_{QR} = 100$ a, kun $V_Q = 0.2$ (4 % pienempi kuorma kuin 150 vuoden kuorma, 30 % pienempi, jos nimelliskuorma määritetään säännön $V_M = 0.4$ mukaan). Valitut γ_T –arvot ovat:

- teräs, $V_M = 0.1$, $\gamma_{TC,0.1} = 1.41$,
- liimapuu, $V_M = 0.2$, $\gamma_{TC,\,0.2} = 1.65 - \alpha 0.36$, $0 \leq \alpha \leq 0.6$ ja 1.43, $0.6 < \alpha \leq 1$,
- sahatavara, $V_M = 0.3$, $\gamma_{TC,\,0.3} = 1.99 - \alpha 0.52$.

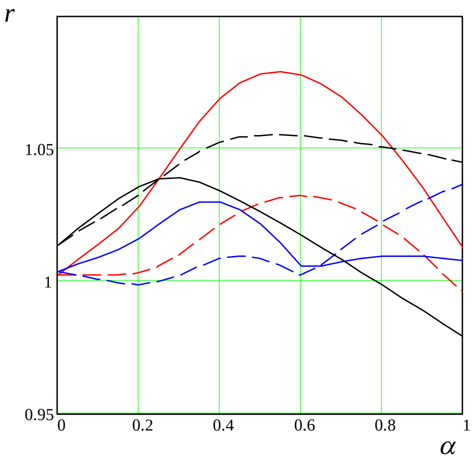
Kuvassa 7 on tavoiteluotettavuutta vastaavat kokonaisvarmuuslukuarvot γ_T ja pisteviivalla piirretyt normiarvot γ_{TC}.

Tässä variaatiossa nykyisiä muuttuvien kuormien kuormitusnormien arvoja on korotettava jopa 17 % ja joissakin tapauksissa näitä arvoja voidaan pienentää.



Kuva 7. Tavoiteluotettavuutta vastaavat kokonaisvarmuusluvut γ_T kun $V_M = 0.1, 0.2, 0.3$, yhtenäinen viiva $V_Q = 0.4$, vastaavat katkoviivat ovat $V_Q = 0.2$ arvoja. Pisteviivat kuvaavat normiarvoja γ_{TC}.

Kuva 8 esittää variaation 3 virhettä eli normiarvon γ_{TC} suhdetta tavoitearvoon. Kuvasta nähdään, että virhe on pienempi kuin n. 8 %.



Kuva 8. Virhesuhde, *r*, normiarvon γ_{TC} suhde tavoiteluotettavuutta vastaavaan arvoon variaatiossa 3. Viivojen merkitä on sama kuin kuvassa 7.

Arviointi

Tämä uusi mitoitusmenetelmä on kolmessa suhteessa parempi kuin nykyinen eurokoodi: Siinä on pienempi laskentatyö, suurempi tarkkuus ja edullisempi mitoitustulos.

Laskentatyö on pienempi, sillä käyttötila- ja murtotila-analyysi voidaan yleensä yhdistää. Toisaalta laskentatyö on nykyiseen eurokoodiin verrattuna joissakin tapauksissa, likimäärin yhtä suuri, sillä eräiden materiaalien (pääasiassa vain teräsrakenteiden) sallittujen jännitysten arvot riippuvat kuormasuhteesta α eli muuttuvan kuorman suhteesta kokonaiskuormaan. Näiden tapausten johdosta edellä selostettua menetelmää voidaan edelleen yksinkertaistaa asettamalla materiaalivarmuusluvut vakioiksi yleisimmissä kuormitustapauksissa.

Kaikissa variaatioissa käyttötilamitoitus voidaan tehdä nykyisellä tavalla.

Uusi menetelmä on tarkka. Kaikissa kolmessa variaatiossa virhe on tavoiteluotettavuuteen verrattuna pienempi kuin 6 - 9 %. Eurokoodin vastaava virhe on ainakin n. 20 %.

Variaatiossa 1 on mahdollista käyttää nykyisiä kuormitustaulukoita. Kuitenkin tämän menetelmän kaikki edut saadaan vasta kuormataulukoiden uusimisen jälkeen, sillä nykyisiä muuttuvan kuorman arvoja voidaan pienentää, kun $V_Q < 0.4$. Tämä variaatio on kahden muunkin syyn johdosta muita parempi: Se on tarkin ja materiaalivarmuusluku joudutaan määrittämään käytännön mitoituksessa kussakin kuormitustapauksessa erikseen vain teräsrakenteissa. Teräsrakenteisiin liittyvä lisätyö voidaan välttää, jos teräsrakenteidenkin materiaalivarmuusluku asetetaan vakioksi kevyillä ja raskailla rakenteilla erikseen. Jos vaaditaan, että alivarmuutta ei sallita lainkaan kuormitustapauksissa $\alpha = 0.2\ldots0.8$, ylivarmuus on enintään n. 7 %.

Tässä uudessa mitoitusmenetelmässä (kaikissa kolmessa variaatiossa) saavutetaan materiaalisäästöä eurokoodin mukaiseen mitoitukseen verrattuna niissä tapauksissa, joissa lujuus on kriittinen mitoitustekijä (edellyttäen, että kummassakaan mitoitusmenetelmissä ei sallita alivarmuutta tai sallitaan vain harvinaisissa tapauksissa samalla tavalla). Säästö on erityisen suuri materiaaleissa, joiden lujuusvaihtelu on suuri, kuten puurakenteissa. Säästön suuruus riippuu oleellisesti siitä, miten eurokoodissa on huomioitu muuttuvat kuormat, joissa $V_Q < 0.4$. Säästö lienee n. 5-10 %. Suurin säästö saadaan sahatavararakenteissa, joissa se on yli 10 %.

Päätelmät

Neljä johtopäätöstä voidaan tehdä.

Tässä mitoitusmenetelmässä asetetaan $\gamma_G = \gamma_Q = 1$, jolloin mitoitusmenetelmä on yksinkertainen ja laskentatyö vähäinen, sillä murtotilan ja käyttötilan analyysit ovat yleensä samoja.

Uusi mitoitusmenetelmä on tarkka. Tarkkuus johtuu pääasiassa siitä, että kokonaisvarmuusluku on asetettu muuttuvaksi, mutta myös siitä, että kaikkien muuttuvien kuormien todellinen hajonta on huomioitu. Menetelmän tuloksena saatava laskentatulos eroaa tavoiteluotettavuudesta vähemmän kuin 6 - 9 %. Vastaava ero eurokoodissa on ainakin n. 20 %.

Uuden mitoitusmenetelmän mukaisissa rakenteissa materiaalikustannus on pienempi verrattuna eurokoodimitoituksen rakenteisiin. Tämä säästö koskee kaikkia materiaaleja, mutta säästö on erityisen suuri materiaaleissa, joiden vaihtelu on suuri kuten puurakenteissa.

Variaatio 1 on perinteisen sallittujen jännitysten menetelmän kaltainen ja muutokset kuormitusnormeissa ovat vähäisiä. Se on muutoinkin vaihtoehdoista paras, sen virhe pienin ja laskentatyö vähäisin.

Viitteet

[1] *EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design*, European Committee for standardization, Bruxelles

[2] *Basis of structural design*, Handbook 1, Guide to interpretative documents for essential requirements to EN 1990 and to application and use of Eurocodes, Garston, 2004

[3] *Basis of structural design*, Handbook 2, Reliability backgrounds, Praha, 2005

[4] Ranta-Maunus A., Fonselius M., Kurkela J., Toratti T., *Reliability analysis of timber structures*, VTT research notes 2109, Espoo, 2001

[5] Poutanen T., *Safety factors and design codes*, Joint IABSE – fib Conference, Dubrovnik, May 3-5, 2010

[6] Poutanen T., *Calculation of partial safety factors*, Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering – Faber, Köhler & Nishijima (eds), Taylor & Francis Group, London, 2011

Tuomo Poutanen
Tampereen teknillinen yliopisto
Pl 600, 33101 Tampere
Tuomo.poutanen@tut.fi