

Eurooppalaisen rakenteiden mitoitusnormiston varmuusperusteet

Tor-Ulf Weck

Tiivistelmä. Artikkelissa esitetään eurooppalaisen rakenteiden mitoitusnormiston varmuusperusteiden taustatekijät ja tärkeimmät suositukset. Perusteellisemmin tarkastellaan jakauman vaikutusta rakenteiden luotettavuuteen ja käytettävään varmuuskertoimeen.

Avainsanat: Rakenteiden varmuus, Eurokoodit

Rakenteiden mitoituksen perusteiden normitus

Vielä puoli vuosisataa sitten rakennusnormistossa oli erilliset kuoritus- betoni-, teräs-, ja puunormit. Niitä yhdistävää perusfilosofiaa ei ollut esitetty missään. Useassa maassa todettiin kuitenkin, että kaikilla rakennusten mitoitusnormeilla tulee olla yhtenäiset perusteet, jotta rakenteiden luotettavuus voidaan määritellä samalla tavalla rakennusaineesta ja -tyypistä riippumatta. Normituksen parissa toimineet kansainväliset, usein käytännössä vain eurooppalaiset, järjestöt perustivat 1971 yhteisen, nimenomaan rakenteiden luotettavuuden perusteita käsittelevän yhdistyksen Joint Committee on Structural Safety (käytetään lyhennettä JCSS). Pohjoismaissa toimiva Nordiska kommittén för byggbestämmelser NKB perusti myös rakenteiden mitoituksen perusteita käsittelevän jaoston. Kansainvälinen standardointijärjestö ISO perusti 1975 teknisen komitean TC 98 standardoimaan rakentamisen mitoitusstandardien perusteita.

Pohjoismainen työ johti suositukseen [1] 1978, jota vielä päivitettiin [2] vuonna 1987. Kansainvälinen standardi IS 2394 [3] valmistui monien viivytysten jälkeen vasta 1998. Vähän myöhemmin ilmestyi JCSS:n luotettavuusanalyysiin perustuva normi [4].

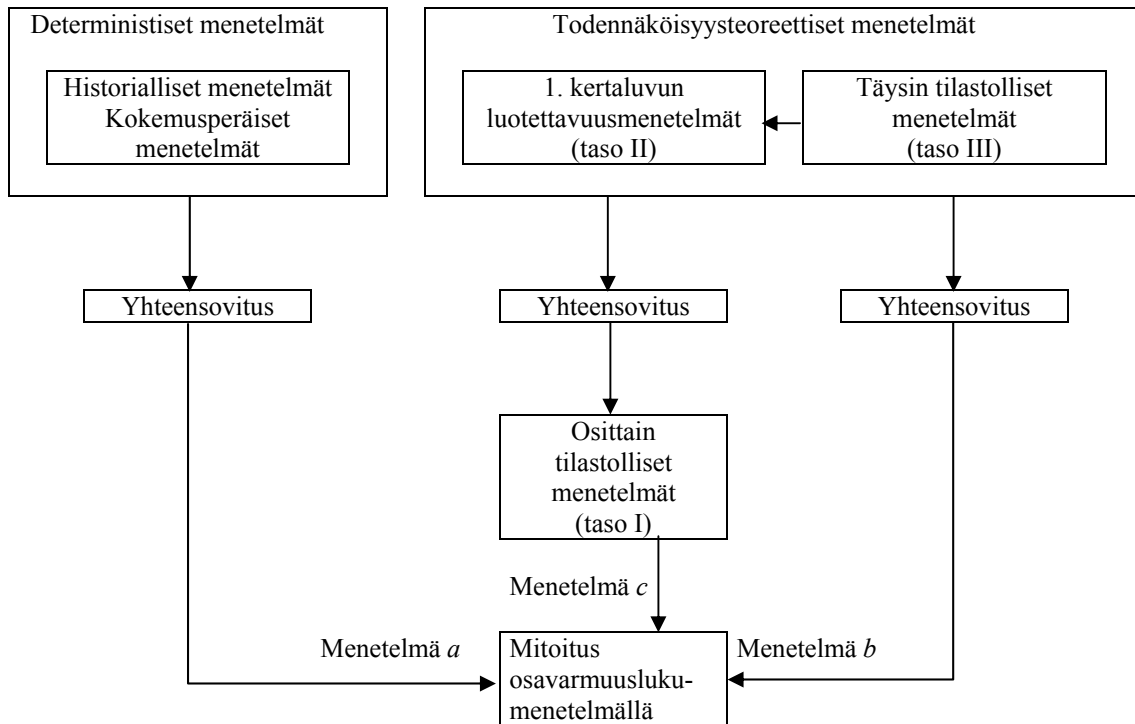
Eurokoodien kehittyminen

Rinnan kansainvälisen standardoinnin ja järjestöissä tapahtuvan normituksen kanssa myös valtiollisella taholla tunnistettiin yhtenäisten rakennusnormien tarve. EEC päätti normiston laatimisesta jo 1975. Monien vaiheiden jälkeen normituksen käytännön järjestelyt suoritti eurooppalainen standardointijärjestö CEN. Lopullinen rakenteiden mitoituksen perusteita käsittelevä standardi Basis of Design [5] valmistui 2002. Standardi pohjautuu paljolti edellä mainittuihin aikaisemmin julkaistuihin kansainvälisiin standardeihin ja normeihin.

Standardissa esitetään kaikkia eurokoodeja koskevat mitoituksen yleiset periaatteet. Lisäksi siinä annetaan suositus käytettävästä rajatilamenetelmästä ja siihen liittyvistä osavarmuusluvuista. Suosituksen taustaa ja perusteluja on esitetty julkaisussa Reliability Backgrounds [6], jossa myös annetaan muutamia esimerkkejä luotettavuusanalyysin tekemisestä.

Luotettavuusmenetelmät

Eurokoodeissa esitetty osavarmuuslukumenetelmä voidaan periaatteellisesti johtaa alla olevassa kaaviossa esitetyillä tavoilla. Vaikka eurokoodien perustaksi on annettu teoreettinen tilastomatemattinen menetelmä, on todettava, että pääosiltaan eurokoodit perustuvat kokemukseräiseen tietoon (menetelmä a). Vain eräiden kohtien tarkistamisessa sekä teoreettisissa tarkasteluissa on käytetty muita menetelmiä.



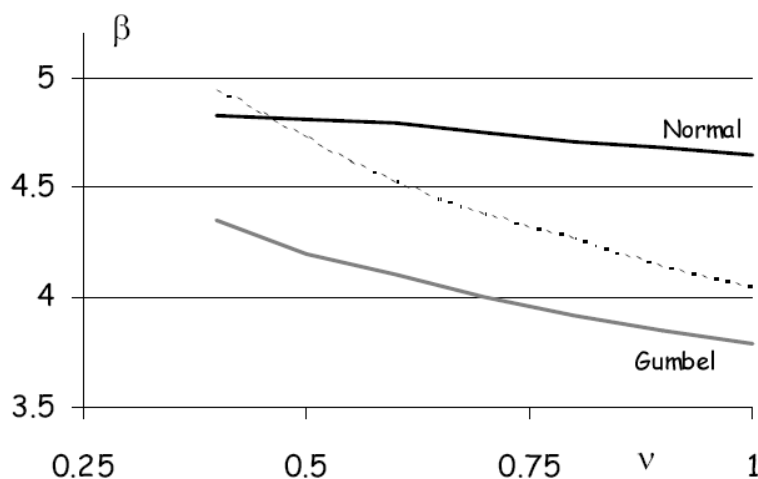
Kuva 1. Luotettavuusmenetelmien yleiskatsaus.

Sekä tason II että tason III menetelmissä luotettavuuden mittana käytetään kestämis-todennäköisyyttä $P_s = (1 - P_f)$, missä P_f on tarkasteltavan vaurioitumistavan vaurioitumistodennäköisyys tietyn tarkastelujakson aikana. Jos näin laskettu vaurion todennäköisyys on suurempi kuin asetettu tavoitearvo P_0 , niin rakenteen katsotaan vaurioituvan. Luotettavuuden mittana käytetään ns. luotettavuusindeksiä β . Menetelmää on tarkemmin selostettu toisaalla tässä lehdessä.

Suosittelut jakaumat

Laskelmia tehtäessä tulee valita käytettävät jakaumat. Eurokoodeissa todetaan, että omalle painolle on tavallisesti käytetty normaalijakautumaa, muille kuormille suositellaan jotain ääriarvojakaumaa, vaikkakin todetaan, että usein yksinkertaisuuden vuoksi on väsymistarkasteluja lukuun ottamatta käytetty normaalijakautumaa. Materiaalin ja rakenteen kestävyysparametreille ja mallin epävarmuuksille on tavallisesti käytetty lognormaalista tai Weibullin jakautumaa.

Koska ääriarvojakaumat ovat ns. vinoja jakaumia ja käytettävät todennäköisyydet pieniä, vaikuttaa jakauman valinta olennaisesti saatuun lopputulokseen. Tätä on käsitelty laajalti CIB:n raporteissa W18/33-1-1 [7] ja W18/33-1-2 [8]. Alla oleva kuva havainnollistaa riippuvuutta. Kuvassa ehjällä viivalla on merkitty puurakennetta, jossa ylemmässä tapauksessa muuttuva kuorma on normaalijakautunut ja alemmassa tapauksessa Gumbel-jakautunut. Katkoviiva esittää teräsrakennetta, jossa muuttuva kuorma on normaalijakautunut. Kaikissa tapauksissa pysyvä kuorma oletetaan normaalijakautuneeksi. Kuvasta huomataan paitsi kuorman jakauman vaikutus, myös materiaalikohtaisen ominaisuuden eli variaatiokertoimen vaikutus.



Kuva 2. Luotettavuusindeksin riippuvuus muuttuvan kuorman jakauman tyypistä. β on varmuusindeksi ja v on pysyvän kuorman suhde kokonaiskuormaan.

Murtorajatilan tavoitearvot

Kansainvälisen normituksen yhtenäistämisessä yksi tärkeimmistä, joskin kansallisella tasolla lopullisesti päätettävistä asioista on rakenteilta vaadittava luotettavuustaso. Tämä ”varmuustaso” on poliittisesti hyvin herkkä asia. Inhimillisen toiminnan eri aloilla kun käytännössä on totuttu edellyttämään hyvin erilaista ”varmuutta”. Eurokoodeissa on esitetty ns. tavoitetaso, joka muodostaa hyvän pohjan kansalliselle päätöksenteolle. Rakenteet on jaettu kolmeen luokkaan vaurion seuraamuksen perusteella. Näitä luokkia on havainnollistettu muutamalla esimerkkirakennuksella. Vähiten vaativaa luokkaa

merkitään riskiluokkana 1 (RC1) ja vaativinta luokkaa riskiluokkana 3 (RC3). Luotettavuus on esitetty luotettavuusindeksin avulla sekä yhden että 50 vuoden tarkastelujaksolle alla olevan taulukon mukaisesti.

Taulukko 1. Luotettavuusindeksille β murtorajatiloissa suositeltavat vähimmäisarvot

Luotettavuusluokka	Indeksin β vähimmäisarvot	
	1 vuoden tarkastelujakso	50 vuoden tarkastelujakso
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Jos vuosittaiset luotettavuudet ovat toisistaan riippumattomia, voidaan n vuoden luotettavuus laskea kaavalla

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n \quad (1)$$

Muille rajatiloille suositellaan seuraavia arvoja normaalissa riskiluokassa (RC2).

Taulukko 2. Luotettavuusindeksille β tavoitearvot luokassa RC2.

Rajatila	Luotettavuusindeksin tavoitearvo	
	1 vuosi	50 vuotta
Murtorajatila	4,7	3,8
Väsyminen		1,5 ... 3,8 ¹⁾
Käyttörajatila (palautumaton)	2,9	1,5

¹⁾ Riippuu tarkastus- ja korjausmahdollisuuksista ja vaurionsietokyvystä.

Osavarmuuslukumenetelmä

Eurokoodeissa käytetään osavarmuusmenetelmässä muuttujina oman painon ja muuttuvien kuormien lisäksi betonissa vaikuttavaa esijännitysvoimaa. Muuttujat esitetään ominaisarvolla, joita redusoidaan kuormitusyhdistelmästä riippuvalla yhdistelykertoimella ψ . Yhdistelykerroin on myös kansallisesti määritettävä parametri, joka riippuu paitsi kuormasta myös tarkasteltavasta rajatilasta. Yhdistelykertoimia on eurokoodissa kolme.

ψ_0 perusyhdistelmälle

ψ_1 tavalliselle yhdistelmälle

ψ_2 pitkäaikaisyhdistelmälle

Samoja kertoimia käytetään niin murtorajatilassa kuin onnettomuus- ja käyttörajatilassa. Kahden muuttuvan kuorman tapauksessa voidaan yhdistelykerroin laskea likimäärin seuraavasti:

Normaalijakauman tapauksessa kaavalla

$$\psi_0 = \frac{1 + (0,28\beta - 0,7 \ln N_1)V}{1 + 0,7\beta V} \quad (2)$$

Gumbelin jakauman tapauksessa kaavalla

$$\psi_0 = \frac{1 - 0,78V \left[0,58 + \ln(-\ln \Phi(0,28\beta)) + \ln N_1 \right]}{1 - 0,78V \left[0,58 + \ln(-\ln \Phi(0,7\beta)) \right]} \quad (3)$$

missä:

N_1 on suhde T/T_1 lähimpään kokonaislukuun pyöristettynä, missä

T on tarkastelujakso

T_1 on pitempi yhdistettävien kuormien perustarkastelujaksoista

β on luotettavuusindeksi

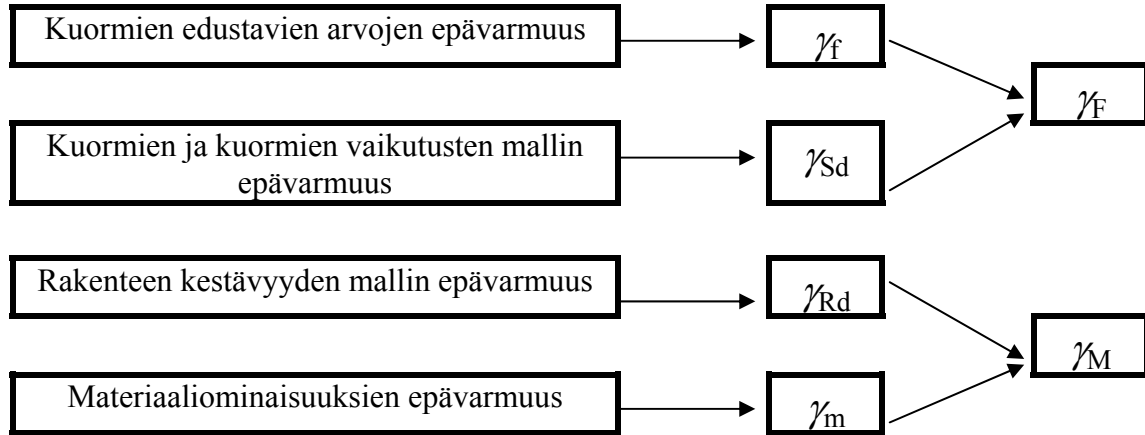
V on samanaikaisesti vaikuttavan kuorman variaatiokerroin tarkastelujakson aikana.

Suosittelut yhdistelykertoimien arvot esitetään alla olevassa taulukossa. Kertoimiin liittyvät tarkennukset ja selitykset on yksinkertaisuuden vuoksi jätetty taulukosta pois.

Taulukko 3. Yhdistelykertoimen suositusarvoja.

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
asuintilat	0,7	0,5	0,3
toimistotilat	0,7	0,5	0,3
kokoontumistilat	0,7	0,7	0,6
myymälätilat	0,7	0,7	0,6
varastotilat	1,0	0,9	0,8
liikennöitävät tilat, kun ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
liikennöitävät tilat, kun $30\text{kN} <$ ajoneuvon paino ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Rakennusten lumikuormat pohjoismaissa	0,7	0,5	0,2
Rakennusten tuulikuormat	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa)	0,6	0,5	0

Osavarmuusluvut esitetään erikseen kuormille ja materiaaliominaisuuksille. Näihin osavarmuuslukuihin on sisällytetty laskentamalleihin sisältyvä epävarmuus alla olevan kuvion tapaan.



Kuva 2. Laskentamallin epävarmuuden sijoittaminen osavarmuuslukuihin.

Murtorajatilan kuormayhdistelmänä eurokoodissa on mahdollista käyttää kahta erilaista yhdistelmää. Näistä ensimmäinen (kaava 4) esittää suoraviivaisesti kuormat osavarmuus- ja yhdistelykertoimien, jolloin laskennasta saadaan mahdollisimman yksinkertaista. Toisaalta tästä seuraa, että todellinen rakenteen luotettavuus ei ole vakio, vaan riippuu käytettävästä oman painon ja muun kuorman suhteesta sekä luonnollisesti kuormien variaatiokertoimen suuruudesta. Jälkimmäinen kuormayhdistelmä esitetään kahdella kaavalla (kaavapari 5), joista käytetään suuremman mitoituskuorman antavaa arvoa. Kuormayhdistelmään sisältyy lisäparametri ξ , jolla oman painon ominaisarvoa redusoidaan

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \\ \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \end{cases} \quad (5)$$

missä:

γ on varmuuskerroin

G on pysyvän kuorman ominaisarvo

P on esijännitysvoiman aiheuttama rasitus

Q on muuttuvan kuorman ominaisarvo

ξ on epäedullisten pysyvien kuormien G pienennyskerroin.

Kaavoissa ”+” merkki tarkoittaa ”yhdistämistä jonkin toisen kanssa” eli käytännössä yleensä yhteenlaskua.

Menetelmä mitoitusarvojen määrittämiseen

Eurokoodeissa määritellään kuormien vaikutusten ja kestävyyksien mitoitusarvot (E_d ja vastaavasti R_d) siten, että epädullisemman arvon esiintymisen todennäköisyys on seuraava:

$$P(E > E_d) = \Phi(-0,7\beta) \quad (6)$$

$$P(R \leq R_d) = \Phi(-0,8\beta) \quad (7)$$

missä β on luotettavuusindeksin tavoitearvo.

Tässä kuorman vaikutusten herkkyyškertoimelle on eurokoodeissa valittu arvo $-0,7$ ja kestävyyskerroin α_R arvo $0,8$. Tämä on voimassa, mikäli kuormien vaikutuksen ja kestävyyskeskihajontojen suhde on välillä

$$0,16 < \frac{\sigma_E}{\sigma_R} < 7,6 \quad (8)$$

Jos ehto (8) ei toteudu, käytetään muuttujalle, jonka keskihajonta on suurempi, arvoa $\alpha = \pm 1,0$, ja muuttujalle, jonka keskihajonta on pienempi, arvoa $\alpha = \pm 0,4$.

Kun kuormitusmalliin kuuluu useita perusmuuttujia, niin kaavaa (6) käytetään vain määräävälle muuttujalle. Muille kuormille mitoitusarvot voidaan määrittää seuraavan kaavan perusteella:

$$P(E > E_d) = \Phi(-0,4 \cdot 0,7\beta) = \Phi(-0,28\beta) \quad (9)$$

Tietyn todennäköisyysjakautuman mukaisten muuttujien mitoitusarvoja määritettäessä käytetään taulukon 4 mukaisia kaavoja.

Taulukko 4. Mitoitusarvot eri jakaumafunktioille. Taulukossa α on herkkyysskerroin, μ muuttujan keskiarvo, V variaatiokerroin, σ keskihajonta.

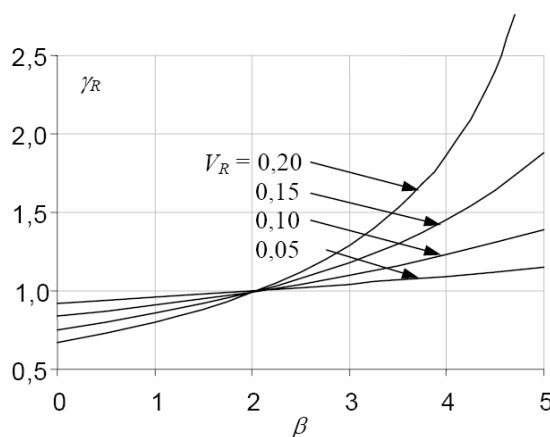
Jakauma	Mitoitusarvot
Normaalijakauma	$\mu - \alpha\beta\sigma$
Lognormaalinen	$\mu e^{(-\alpha\beta V)}$, kun $V = \frac{\sigma}{\mu} < 0,2$
Gumbelin jakauma	$u - \frac{1}{a} \ln\{-\ln \Phi(-\alpha\beta)\}$ missä $u = \mu - \frac{0,577}{a}$; $a = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}}$

Muuttuvilla kuormilla nämä parametrit valitaan siten, että ne perustuvat samaan tarkastelujaksoon kuin indeksi β . Jakauman vaikutusta voidaan havainnollista käyttämällä kestävyiden varmuuskerrointa laskettaessa normaalijakaumaa (10) ja lognormaalijakaumaa (11). Laskuissa on kestävyiden ominaisarvo oletettu määritetyn 5 % fraktiililla.

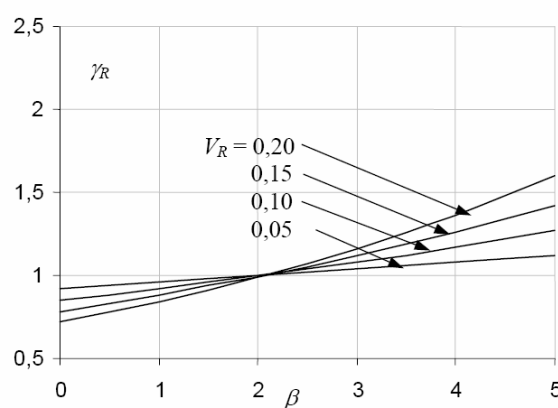
$$\gamma_R = \frac{1 - 1,645 V_R}{1 - 0,8 \beta V_R} \quad (10)$$

$$\gamma_R = \frac{e^{-1,645 V_R}}{e^{-0,8 \beta V_R}} \quad (11)$$

Näistä saadaan eri variaatiokertoimen arvoilla kuvien 3 ja 4 mukaiset käyräparvet.



Kuva 3. Normaalijakaumaa käytettäessä



Kuva 4. Lognormaalijakaumaa käytettäessä

Huomataan taas, että valittu jakauma vaikuttaa olennaisesti tarvittavaan varmuusker-toimeen varsinkin suurilla luotettavuusindeksin arvoilla. Yleisesti voidaankin todeta, että liikuttaessa luotettavuusindeksin suositusarvoissa 4,7...5,2 jakauma vaikuttaa hyvin paljon lopputuloksiin, jolloin rakenteen vaurioitumistodennäköisyyttä määritettäessä tulee aina ilmoittaa laskelmissa eri parametreille käytetty jakaumatyyppi.

Viitteet

- [1] NKB 35: *Retningslinier for Last- och sikkerhedsbestemmelser for Bærende konstruktioner*, NKB.skrift nr. 35. NKB, The Nordic Committee on Building Regulations, København 1978.
- [2] NKB 55 (1987): *Retningslinier for Last- och sikkerhedsbestemmelser for Bærende konstruktioner*, NKB.skrift nr. 55. NKB, The Nordic Committee on Building Regulations, København 1987
- [3] ISO 2394:1998, *General principles on reliability for structures*, Geneva 1998.
- [4] The JCSS probabilistic model code,
www.jcss.ethz.ch/publications/publications_pmc.html
- [5] EN 1990:2002 *Eurocode – Basis of structural design*, Brussels 2002.
- [6] *Implementation of Eurocodes*, Handbook 2, Reliability backgrounds, Leonardo da Vinci Pilot project, www.eurocodes.fi/1990/contents1990.htm.
- [7] *Aspects on reliability calibration of safety factors for timber structures*, CIB/W18 meeting 33, Delft 2000.
- [8] *Sensitivity studies on the reliability of timber structures*, CIB/W18 meeting 33, Delft 2000.

Tor-Ulf Weck
Teknillinen korkeakoulu
PL 1300
t.weck@tkk.fi