

# RAJATILAMENETELMIEN KÄYTTÖ RAKENTEIDEN MITOITUKSESSA

PEKKA KANERVA

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 5  
No 3 1972 ss. 192-215; Rakenteiden Mekaniikan Seura, Helsinki

---

## YHTEENVETO

Artikkeli on katsaus rakenteiden kantavuuden ja varmuuden arvioinnissa käytettäviin menetelmiin. Kantavuusarvioinnin perustana ovat rajatilat, jotka määritellään ja esitetään rajatilojen saavuttamiskriteerit ilman lukuarvoja. Rajatilojen saavuttamistarkasteluissa käytettävien analyyttisten menetelmien valinnasta annetaan joitakin ohjeita käsittelemättä menetelmiä yksityiskohtaisemmin. Kokeellisista menetelmistä esitetään lyhyt kuvaus ja käyttöaluesuositus. Rakenteiden varmuuden arviointiin käytettävistä menetelmistä esitetään tilastomatemattinen menetelmä, osittaisvarmuuskerroinmenetelmä, kokonaisvarmuuskerroinmenetelmä ja sallittujen jännitysten menetelmä. Artikkelissa korostetaan rajatila- ja varmuustarkastelujen riippumattomuutta toisistaan. Vaadittavan varmuuden todetaan olevan riippumaton rakenteen käyttäytymistä tarkasteltaessa käytetystä menetelmästä ja todetaan sen olevan erillinen yhteiskunnallis-taloudellinen ongelma. Artikkelin lopussa esitetään luettelo tärkeimmistä rakenteiden mitoitukseen liittyvisät tutkimusaiheista.

## 1. JOHDANTO

Rakenteiden suunnittelun olennaisimpia vaiheita on rakenteen mittojen määrittäminen eli mitoitus. Mitoitusperusteina ovat rakenteen käyttötarkoitus, liittyminen muihin rakenteisiin, valmistusteknilliset seikat, normien määräykset, mitoitusjärjestelmät, kuten 10 cm:n moduliin perustuvat, ja rakenteiden kantavuuteen nähden asetetut vaatimukset. Mitat joudutaan yleensä aina tarkistamaan kantavuusvaatimuksiin nähden. Niiden avulla voidaan usein määrittää yksi rakenteen mitoista muiden ollessa etukäteen määrättyjä. Otsikossa mainituilla mitoitusmenetelmillä tarkoitetaan tätä kantavuusvaatimusten perusteella tapahtuvaa rakenteen mittojen tarkistusta tai mahdollista määrittämistä.

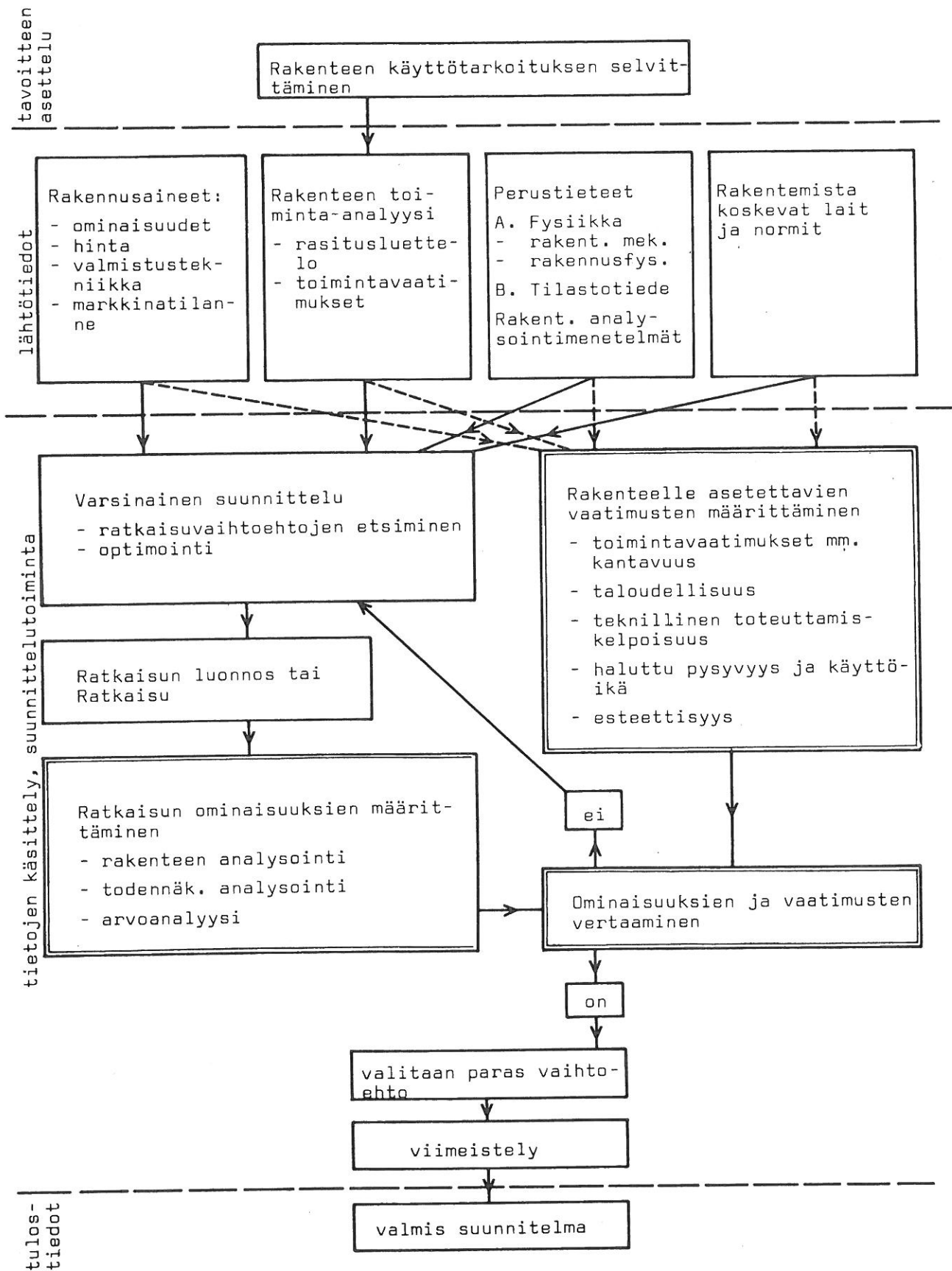
Rakenteiden suunnitteluprosessin havainnollistamiseksi on kuvassa 1 esitetty toimintakaavio. Artikkelissa lähemmin käsiteltävät toiminnot on kuviossa ympäröity kahdella viivalla.

Rakenteelle kantavuuteen nähden asetetulla toimintavaatimuksella tarkoitetaan tässä kirjoituksessa kaikkia rakenteen kantavuusfunktion liittyviä ominaisuuksia kuten vaadittua murtovarmuutta ja vakaavuutta, sallittuja siirtymiä ja värähtelyjä.

Rakenteen kelpoisuuden arvioinnilla tarkoitetaan rakenteen ominaisuuksien määrittämistä ja näiden vertaamista asetettuihin vaatimuksiin. Arvioinnin tavoitteena on kelpaamattomien ratkaisujen karsiminen pois ja hyväksyttävien asettaminen paremmuusjärjestykseen.

Tässä artikkelissa käsitellään kantavuusvaatimukseen perustuvia rakenteiden mittojen tarkistusmenetelmiä ja selvennetään rakenteiden suunnittelijoille käsitettä rajatilamenetelmät kajoamatta laskukaavoihin ja numeroarvoihin.

Tarkastelussa nojaudutaan etupäässä Yhteispohjoismaisen raken-



Kuva 1. Rakenteiden suunnittelun toimintakaavio.

nussäännöstekomitean (NKB) ehdotukseen kantavien rakenteiden varmuusmääräyksiksi [7] ja kuormitusmääräyksiksi [8]. Varsinkin käsitteet on usein valittu niiden mukaan. Sen sijaan määritelmät, kriteerit, kaaviokuvat ja esitettävät kantavuuden arviointitavat ovat yhteenve-toa lähdeluettelossa mainituista teoksista ja kirjoittajan lähinnä betoninormien uusimistyön ja rakenteiden suunnittelu -nimisen luento-kurssin yhteydessä kehrittelemistä toimintamalleista. Sen vuoksi lähdeviittauksia on voitu esittää vain silloin, kun käsitelty asia selvästi esiintyy lähdeteoksessa.

## 2. RAKENTEIDEN KELPOISUUDEN ARVIOINTI KANTAVUUDEN PERUSTEELLA

Rakenteen kantavuuteen nähden asetettu toimintavaatimus voidaan esittää seuraavasti [7]: Rakenteella tulee olla riittävä varmuus rajatilaan joutumiseen nähden. Rakenteen varmuudella tarkoitetaan sitä todennäköisyyttä, jolla rakenne vuoden aikana ei joudu rajatilaan. Rajatiloilla tarkoitetaan tiettyjä, jännitysten, muodonmuutosten tai niiden aikaderivaattojen avulla määriteltäviä rakenteen jännitys-, muodonmuutos- tai liiketiloja. Rakenteen joutuminen johonkin rajatilaan riippuu siihen vaikuttavista kuormista, rakenteen geometriasta ja rakennusaineiden ominaisuuksista, kuten lujuudesta, kimmokertoimesta, sitkeydestä, lämpötilan ja kosteuden muutosten aiheuttamista ominaisuuksien muutoksista. Kaikki nämä ovat satunnaisia eli stokastisia suureita, joille on ominaista niiden arvojen tietty hajonta vastakohtana kiinteäarvoisille, deterministisille suureille.

Rakenteiden arvioinnin yksinkertaistamiseksi joudutaan todellisia fysikaalisia olosuhteita aina idealisoimaan ja yksinkertaistamaan korvaamalla ne numeerisesti tai funktionaalisesti esitetyillä malleilla, joita muodostettaessa joudutaan aina suorittamaan kuvattavan il-

miön fysikaalinen tai tilastomatemattinen analysointi ja idealisointi. Rakenteen analysoinnissa käytettävä laskumalli sisältää rakenteen fysikaalisen käyttäytymisen kuvauksen ja lisäksi mahdollisesti tilastomatemattisen käsittelyn, jonka perusteella arvioidaan, millä todennäköisyydellä rakenne joutuu rajatilaan.

Rakenteilta vaadittavan varmuuden suuruuteen vaikuttavista tekijöistä ovat tärkeimmät mahdollisen vaurion aiheuttamat henkilövahingot ja taloudelliset vahingot. Henkilövahinkojen merkitystä tarkasteltaessa kiinnitetään huomiota vaurioituvassa rakenneosassa tai sen läheisyydessä oleskelevien henkilöiden lukumäärään, oleskeluaikaan ja mahdollisen kuormitushuipun ja henkilöiden yhtäaikaisen oleskelun todennäköisyyteen.

Taloudellisia vahinkoja tarkasteltaessa pyritään varmuus valitsemaan siten, että rakenteen rakennus-, käyttö-, huolto- ja korjauskustannusten summa saavuttaa minimin. Korjauskustannuksiin on tällöin laskettava mukaan myös ne kustannukset, jotka aiheutuvat mahdollisesta rakenteen käytön keskeytymisestä korjauksen aikana. Varmuuden suuruuteen vaikuttaa edelleen haluttu rakenteen käyttöikä, koska suurten kuormitushuippujen esiintymistodennäköisyys kasvaa rakenteen käyttöiän kasvaessa. Ympäristöolosuhteiden ja kuormitusten muuttumista on sitä vaikeampi arvioida, mitä pitempi on vaadittu käyttöikä.

Rakenteilta vaadittavan varmuuden suuruus on poliittis-taloudellinen kysymys: kuinka paljon yhteiskunta haluaa uhrata turvallisuuden ylläpitämiseen ja kuinka vastuu mahdollisten vaurioiden syntyessä jaetaan suunnittelijan, rakentajan, rakennuttajan ja yhteiskunnan kesken. Vaadittu varmuus ei riipu käytetystä varmuuden ja kantavuuden arviointimenetelmästä, mutta tietenkin on mahdollista sallia pienempi varmuus silloin, kun suoritettu rakenteen ja kuormien analysointi on erittäin tarkka, jolloin laskumallin epätarkkuudesta johtuvaa lisä-

varmuuden tarvetta ei ole.

Yhteispohjoismaisessa suosituksessa [9] ehdotetaan rakenteen varmuudeksi 0,999, joka merkitsee sitä, että todennäköisyys rakenteen joutumiselle rajatilaan vuoden aikana on 0,001. Verrattaessa kirjallisuudessa esiintyviä varmuusehdotuksia on kiinnitettävä huomiota sen ajan pituuteen, jonka kuluessa rakenne joutuu rajatilaan. Usein esiintyviä aikavälejä ovat 1 vuosi, 50 vuotta tai rakenteen käyttöikä [11] ja [2].

### 3. RAJATILAT

Kantaville rakenteille asetettavat toimintavaatimukset voidaan esittää kolmen rajatilan avulla, jotka ovat käyttö-, murto- ja katastrofirajatila. Niistä käytetään myöhempänä myös lyhennettyjä nimityksiä: käyttö-, murto- ja katastrofitila.

Käyttörajatila on se äärimmäinen jännitys-, muodonmuutos- tai liiketila, jossa rakenne vielä toteuttaa käyttötarkoituksensa tavanomaisessa käytössä. Määritelmän perusteella voidaan johtaa seuraavat kriteerit rakenteen joutumiselle käyttörajatilaan:

- taipuma tai muu siirtymä saavuttaa asetetun enimmäisarvon, jonka suuruus määräytyy siten, ettei rakenteen siirtymä aiheuta häiriöitä rakenteen, muiden liittyvien rakenteiden tai kannatettavien rakenteiden ja laitteiden käytölle. Esteettiset tai psykologiset seikat saattavat myös vaatia muodonmuutosten ja siirtymien rajoittamista
- värähtelyiden kiihtyvyys tai amplitudi saavuttaa tietyn, käyttömuukavuuden tai äänenmuodostuksen kannalta asetetun rajan
- paikallinen vaurio saavuttaa rakenteen korroosionkestävyyden, esteettisten näkökohtien tai toisinaan myös rakenteen muun kelpoisuu-

den, esim. vesitiiviyyden, kannalta asetetun rajan

- rakenteen suurin jännitys saavuttaa ennakolta asetetun ylärajan, jonka suuruus on voitu valita esimerkiksi siten, että jännitykset pysyvät rakennusaineen lineaarisesti kimmoisella alueella pysyvien muodonmuutosten välttämiseksi ja muodonmuutosten pitämiseksi pieninä.

Murtotila on saavutettu silloin, kun rakenne on tullut pysyvästi käyttökelvottomaksi siihen tarkoitukseen, johon se alunperin on suunniteltu. Murtotilaan joutuminen voidaan tarkistaa seuraavien kriteerien avulla.

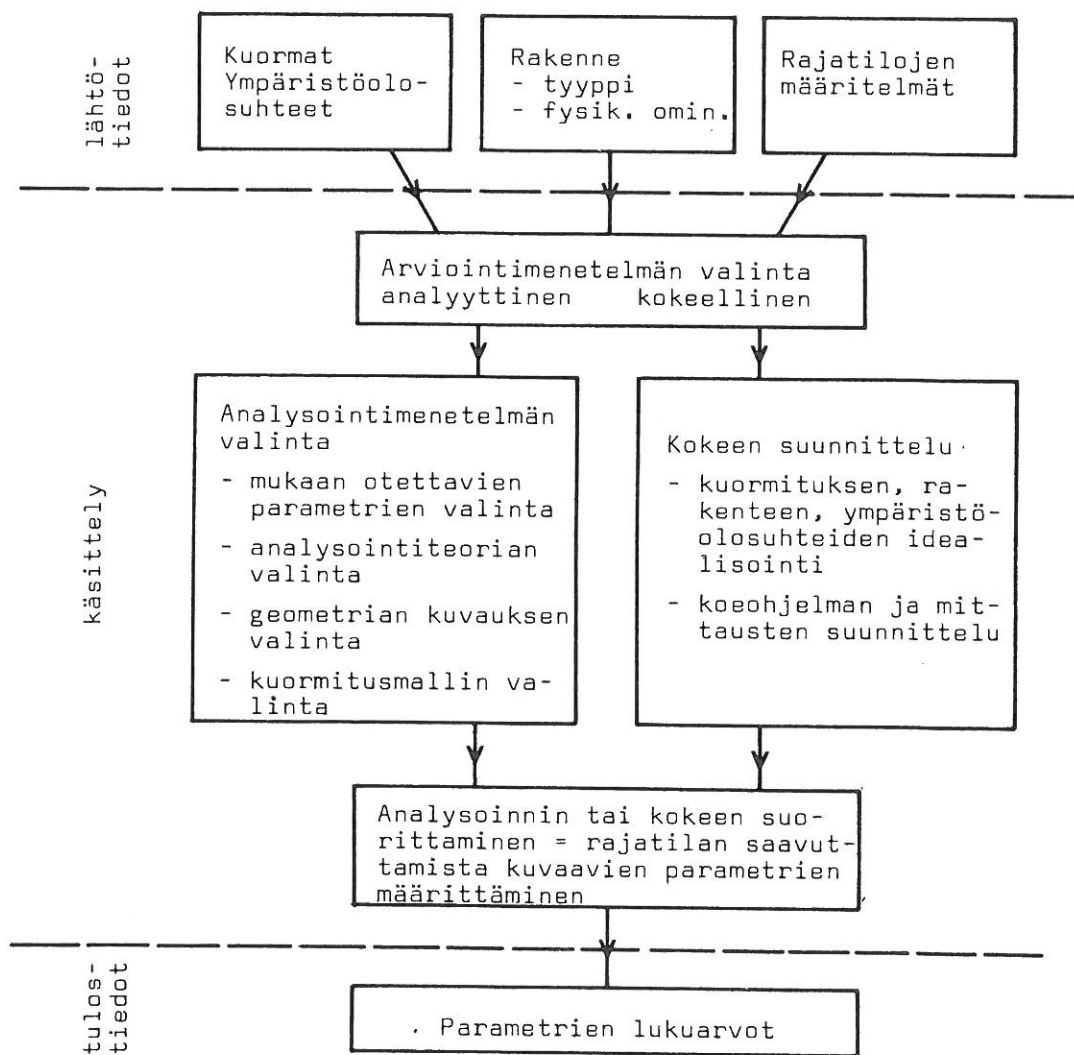
- rakenne menettää tasapainonsa jäykkänä kappaleena, esim. kaatuu
- rakenne siirtyy jäykkänä kappaleena, esim. liukumisen vuoksi niin paljon, että se tulee käyttökelvottomaksi
- rakenne tai sen jokin osa muuttuu myötääväksi mekanismiksi
- rakenteen jokin osa murtuu siihen kohdistuvien rasitusten ylittäessä sen lujuuden
- rakenteen jossain osassa tapahtuu väsymismurtuma toistuvan kuormituksen vaikutuksesta
- rakenne menettää vakavuutensa suurten muodonmuutosten takia kuten esim. nurjahduksessa, lommahduksessa tai kiepahduksessa
- toistuvasta, eri kuormitusten aiheuttamasta suuntaansa vaihtavasta myötämisestä johtuva aineen murtuminen.

Katastrofirajatila eli jatkuvan murtumisen rajatila on saavutettu silloin, kun rakenteen jokin osa on menettänyt kokonaan kantokykynsä erittäin harvinaisen kuormituksen, katastrofin tai erittäin harvinaisen kuormitusyhdistelmän tai odottamattoman lujuuden alituksen johdosta. Rakenteen muu osa ei saa kuitenkaan murtua siten, että koko rakenne sortuisi, vaikka se saakin vaurioitua korjauskelvottomaksi. Rajatilan saavuttamisen kriteeriksi voidaan asettaa vaatimus, et-

tä kuviteltaessa rakenteesta poistetuksi jokin osa jäljelle jäävän osan jännitykset eivät saa nousta rakennusaineen murtolujuuden yläpuolelle eikä koko rakenne saa muuttua mekanismiksi.

#### 4. RAKENTEIDEN KANTAVUUDEN ANALYYTTISET ARVIOINTIMENETELMÄT

Kantavuuden arvioinnilla tarkoitetaan tässä rakenteen käyttäytymistä kuvaavien rajatilojen saavuttamiskriteereissä esiintyvien parametrien määrittämistä (kuva 2). Lähtöarvojen hajontaa ei oteta hu-



Kuva 2. Rakenteen kantavuuden arvioinnin toimintakaavio.

mioon, vaan tarkastelu suoritetaan kiinteillä arvoilla. Käytettävät menetelmät voidaan jakaa kahteen pääryhmään seuraavasti:

- menetelmää nimitetään analyyttiseksi, jos koetuloksia on käytetty lähinnä vain rakennusaineiden ominaisuuksien määrittämiseen ja muu tarkastelu suoritetaan laskennollisesti käyttäen luotettaviksi todettuja, rakenteen käyttäytymistä, geometriaa ja ympäristöolosuhteita kuvaavia malleja
- menetelmää nimitetään kokeelliseksi, jos kuormien ja rajatilan saavuttamista kuvaavien parametrien välinen yhteys määritetään kuormittamalla valmista rakennetta tai sen pienoismalleja.

Analyyttiset menetelmät perustuvat jäykän kappaleen statiikkaan, kimmoteoriaan, plastisuusteoriaan, viskoelastisuusteoriaan tai näiden yhdistelmiin. Riippuen käytetystä numeerisesta ratkaisutavasta voidaan puhua ratkaisusta suljetussa muodossa, sarjakehitelmien avulla, differenssimenetelmällä tai elementtimenetelmällä. Käytettävän teorian valinta riippuu rakenteen kuormituksesta, rakennusaineesta ja tarkasteltavasta rajatilasta. Taulukossa 1 on esitetty joitakin esimerkkejä teorian valinnasta. Rakenteen geometria määrää käytettävän rakennetyypin geometriaa kuvaavan mallin valinnan. Tällaisia malleja on mm. sauvoja, levyjä, laattoja ja kuoria varten.

Taulukko 1. Esimerkkejä kantavuuden arvioinnissa käytettävän teorian valinnasta. Lyhennykset: k = kimmoteoria, p = plastisuusteoria, v = viskoelastisuusteoria, s = jäykän kappaleen statiikka, m = murtumismekaniikka. Pilkku lyhennysten välissä = tai + -merkki tarkoittaa teorioiden yhdistelmää.

Rak.aine	Käyttötila			Murtotila					Katas- trofi- tila
	taip.	väräht.	halk.	myötö	vakav. menetyks	väsy- minen	kaatu- minen	suuri rasitus	
teräs	k	k		p	k,k+p	k	s	k,p,m	k+p+m
puu	k+v	k			k,k+v	k	s	k+m	k+v+m
teräsbet.	k,k+v	k,k+p	k,k+v	p	k,k+v	k	s	k+p+m	k+p+v+m
muur.rak.	k	k	k+p		k	k	s	k+m	k+p+m
maaperä	k+v	k+p+v				k+v	s	k+p+m	p+m
kallio	k	k	k			k	s	k	k
muovi	k+v	k+v		p	k+v	k+p	s	k+m	k+v+m

## 5. RAKENTEIDEN KANTAVUUDEN KOKEELLISET ARVIOINTIMENETELMÄT

Kokeelliset menetelmät voidaan jaoitella seuraaviin ryhmiin:

- pienoismallikokeet
- täysikokoisten rakenteiden kuormitus laboratoriossa ja tulosten tilastomatemaattinen käsittely
- täysikokoisen rakenteen koekuormitus analyttisen arviointimenetelmän tarkistamiseksi
- valmiin rakenteen koekuormitus rakennuspaikalla rakenteen kantavuuden tarkistamiseksi arveluttavissa tapauksissa.

Seuraavaksi käsitellään kutakin menetelmää erikseen esitetyn jaoittelun selventämiseksi. Samalla on tarkoitus korostaa kokeellisten menetelmien käyttökelpoisuutta analyttisten rinnalla.

Pienoismallikokeissa määritetään kuormitusten ja rakenteen jän-

nitysten ja muodonmuutosten välinen yhteys kuormittamalla ja mittamalla rakenteen pienoismalleja. Mallikokeessa rakenteen muodon ja rakennusaineen, ympäristöolosuhteiden ja kuormituksen tulee olla mahdollisimman samanlaiset kuin varsinaisen oikean rakenteen. Koetta suunniteltaessa on kuitenkin sekä rakennetta, kuormitusta ja ympäristöolosuhteita idealisoitava kuten analyttisissä menetelmissäkin. Mahdollisimman vähän virheitä aiheuttava idealisointi sekä mallikokeen ja luonnollisen kokoisen rakenteen välisten yhteyksien, ns. mallilakien johtaminen edellyttävät kuitenkin rakenteen likimääräistä analysointia ja rakennusaineen tuntemusta. Pienomallikokeita tehdään tavallisesti silloin, kun kysymyksessä on uudentyyppinen tai harvinaisen rakenne, jota varten ei ole kehitetty analyttisiä ratkaisumalleja tai silloin, kun analyttisen menetelmän tarkkuus ei ole riittävä.

Täysikokoisten rakenteiden koekuormitukseen perustuvassa tilastollisessa kantavuuden arviointimenetelmässä koekappaleiden lukumäärän on oltava niin suuri, että kokeiden aikana mitattuja, rajatilan saavuttamista kuvaavia parametreja voidaan käsitellä tilastomatematisesti. Kuormituksen ja ympäristöolosuhteiden tulee vastata mahdollisimman tarkoin rakenteen käyttöolosuhteita, joita joudutaan jossain määrin idealisoimaan usein kuitenkin vähemmän kuin analyttisiä menetelmiä käytettäessä. Kuormituksen ja rajatilojen saavuttamista kuvaavien parametrien välinen yhteys voidaan ilmoittaa esimerkiksi muodossa: 75 % koekappaleista saavuttaa suuremman arvon kuin koetulosten keskiarvo - 10 %. Tarvittavien koekappaleiden lukumäärä riippuu halutusta luotettavuusasteesta. Jos rakenteisiin käytettävän rakennusaineen valmistuksessa käytetään tilastollisia laadunvalvontamenetelmiä ja jos tunnetaan rakennusaineen ominaisuuksien muutosten vaikutus rakenteen kantavuuteen, tarvittavien koekappaleiden lukumäärää voidaan vähentää. Tätä menetelmää voidaan soveltaa edullisimmin teollisesti

Taulukko 1. Esimerkkejä kantavuuden arvioinnissa käytettävän teorian valinnasta. Lyhennykset: k = kimmoteoria, p = plastisuusteoria, v = viskoelastisuusteoria, s = jäykän kappaleen statiikka, m = murtumismekaniikka. Pilkku lyhennysten välissä = tai + -merkki tarkoittaa teorioiden yhdistelmää.

Rak.aine	Käyttötila			Murtotila					Katas- trofi- tila
	taip.	väräht.	halk.	myötö	vakav. menetyks	väsy- minen	kaatu- minen	suuri- rasitus	
teräs	k	k		p	k,k+p	k	s	k,p,m	k+p+m
puu	k+v	k			k,k+v	k	s	k+m	k+v+m
teräsbet.	k,k+v	k,k+p	k,k+v	p	k,k+v	k	s	k+p+m	k+p+v+m
muur.rak.	k	k	k+p		k	k	s	k+m	k+p+m
maaperä	k+v	k+p+v				k+v	s	k+p+m	p+m
kallio	k	k	k			k	s	k	k
muovi	k+v	k+v		p	k+v	k+p	s	k+m	k+v+m

## 5. RAKENTEIDEN KANTAVUUDEN KOKEELLISET ARVIINTIMENETELMÄT

Kokeelliset menetelmät voidaan jaotella seuraaviin ryhmiin:

- pienoismallikokeet
- täysikokoisten rakenteiden kuormitus laboratoriossa ja tulosten tilastomatemattinen käsittely
- täysikokoisen rakenteen koekuormitus analyttisen arviointimenetelmän tarkistamiseksi
- valmiin rakenteen koekuormitus rakennuspaikalla rakenteen kantavuuden tarkistamiseksi arveluttavissa tapauksissa.

Seuraavaksi käsitellään kutakin menetelmää erikseen esitetyn jaotellun selventämiseksi. Samalla on tarkoitus korostaa kokeellisten menetelmien käyttökelpoisuutta analyttisten rinnalla.

Pienoismallikokeissa määritetään kuormitusten ja rakenteen jän-

nitysten ja muodonmuutosten välinen yhteys kuormittamalla ja mittamalla rakenteen pienoismalleja. Mallikokeessa rakenteen muodon ja rakennusaineen, ympäristöolosuhteiden ja kuormituksen tulee olla mahdollisimman samanlaiset kuin varsinaisen oikean rakenteen. Koetta suunniteltaessa on kuitenkin sekä rakennetta, kuormitusta ja ympäristöolosuhteita idealisoitava kuten analyttisissä menetelmissäkin. Mahdollisimman vähän virheitä aiheuttava idealisointi sekä mallikokeen ja luonnollisen kokoisen rakenteen välisten yhteyksien, ns. mallilakien johtaminen edellyttävät kuitenkin rakenteen likimääräistä analysointia ja rakennusaineen tuntemusta. Pienomallikokeita tehdään tavallisesti silloin, kun kysymyksessä on uudentyyppinen tai harvinaisen rakenne, jota varten ei ole kehitetty analyttisiä ratkaisumalleja tai silloin, kun analyttisen menetelmän tarkkuus ei ole riittävä.

Täysikokoisten rakenteiden koekuormitukseen perustuvassa tilastollisessa kantavuuden arviointimenetelmässä koekappaleiden lukumäärän on oltava niin suuri, että kokeiden aikana mitattuja, rajatilan saavuttamista kuvaavia parametreja voidaan käsitellä tilastomatematisesti. Kuormituksen ja ympäristöolosuhteiden tulee vastata mahdollisimman tarkoin rakenteen käyttöolosuhteita, joita joudutaan jossain määrin idealisoimaan usein kuitenkin vähemmän kuin analyttisiä menetelmiä käytettäessä. Kuormituksen ja rajatilojen saavuttamista kuvaavien parametrien välinen yhteys voidaan ilmoittaa esimerkiksi muodossa: 75 % koekappaleista saavuttaa suuremman arvon kuin koetulosten keskiarvo - 10 %. Tarvittavien koekappaleiden lukumäärä riippuu halutusta luotettavuusasteesta. Jos rakenteisiin käytettävän rakennusaineen valmistuksessa käytetään tilastollisia laadunvalvontamenetelmiä ja jos tunnetaan rakennusaineen ominaisuuksien muutosten vaikutus rakenteen kantavuuteen, tarvittavien koekappaleiden lukumäärää voidaan vähentää. Tätä menetelmää voidaan soveltaa edullisimmin teollisesti

## 6. RAKENTEIDEN VARMUUDEN ARVIOINTI

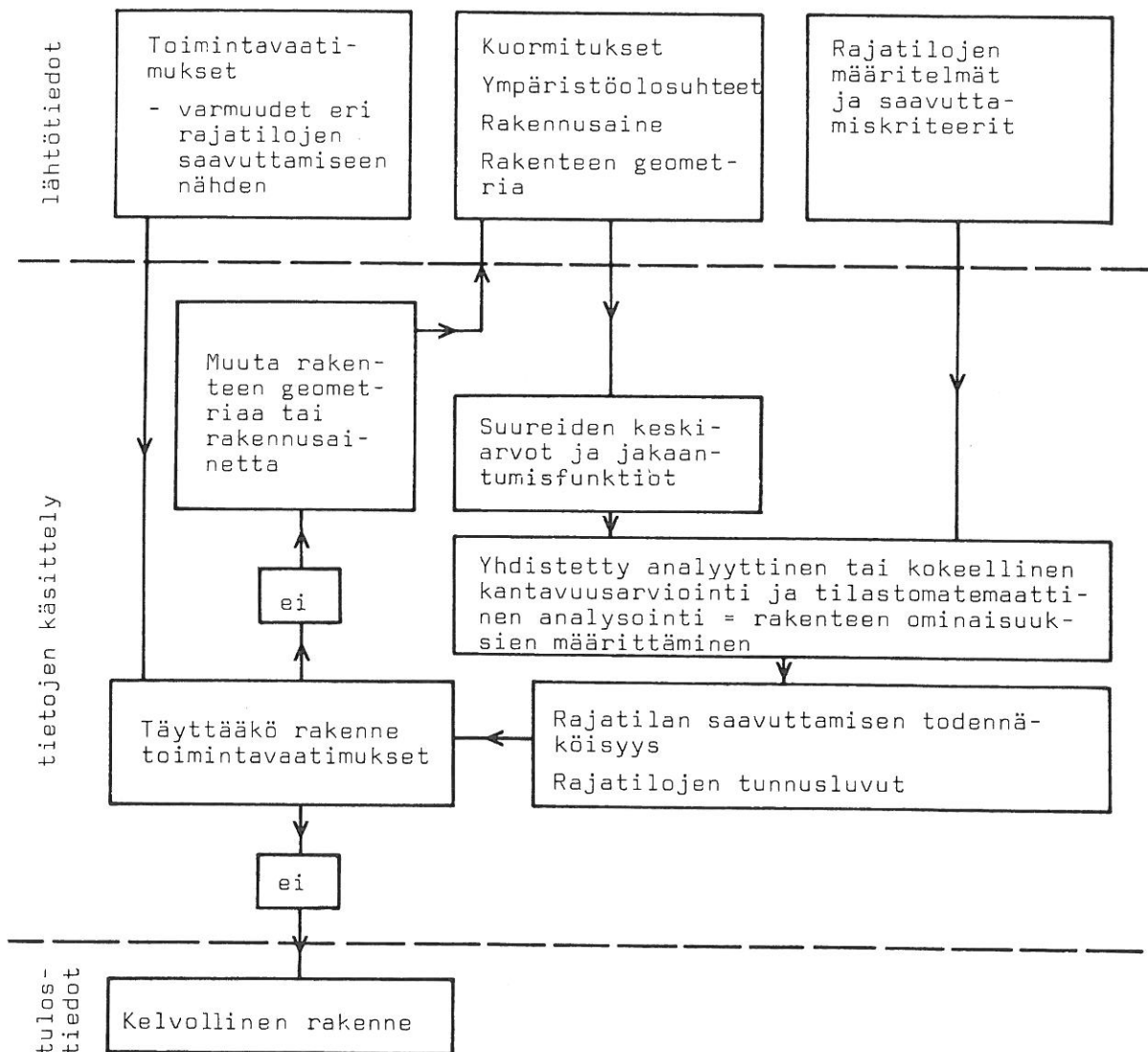
Rakenteiden varmuuden määrittämisellä tarkoitetaan sen todennäköisyyden määrittämistä, jolla rakenne joutuu rajatilaan (kuva 3). Kun vielä verrataan, täyttääkö rakenne varmuuteen nähden asetetun toimintavaatimuksen, rakenteen kelpoisuus tulee tarkistetuksi. Riippuen varmuustarkastelun tarkkuudesta ja täydellisyydestä käytettävät menetelmät voidaan jakaa seuraavasti:

- täydellienn tilastomatemaaattinen varmuustarkastelu
- osittaisvarmuuskertoimien käyttäminen varmuustarkastelussa
- kokonaisvarmuuskertoimen käyttäminen varmuustarkastelussa
- sallittujen jännitysten ja taipumien perusteella tapahtuva varmuustarkastelu.

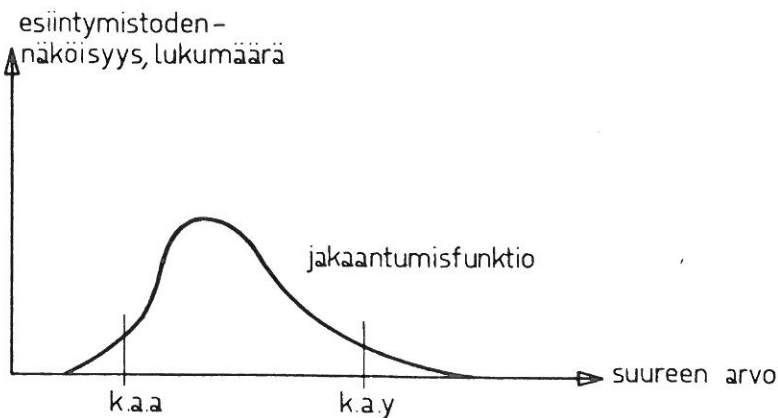
Tilastomatemaaattisessa varmuustarkastelussa käsitellään lähtöarvoja satunnaissuureina, joiden keskiarvot ja esiintymistodennäköisyyttä kuvaavat jakaantumisfunktiot (kuva 4) määritetään ensin. Sen jälkeen suoritetaan analyyttinen käsittely yhdistetyn kantavuuden arviointi- ja tilastomatemaaattisen menetelmän avulla rajatilaan joutumisen todennäköisyyden määrittämiseksi. Jos määritetty todennäköisyys on pienempi kuin rakenteelle asetettu toimintavaatimus, rakenne on kelvollinen (kuva 3). Menetelmä johtaa varsin pitkiin laskelmiin ja sitä kannattaa käyttää vain erikoistapauksissa. Käyttöä haittaa myös lähtötietojen, kuten kuormitusten, materiaalin ominaisuuksien ja rakenteen mittojen jakaantumisfunktioiden tuntemuksen puute.

## 7. OSITTAISVARMUUSKERTOIMIEN KÄYTTÖ VARMUUDEN MÄÄRITTÄMISESSÄ

Osittaisvarmuuskertoimia käyttävässä menetelmässä korvataan tilastollisesti jakaantuneet suureet kiinteillä arvoilla ns. karakteris-



Kuva 3. Rakenteen kelpoisuustarkastelun toimintakaavio.



Kuva 4. Suureen jakautumisfunktio ja karakteriset arvot.  
 $k.a.a$  = karakteristisen arvon alaraja  
 $k.a.y$  = karakteristisen arvon yläraja

tisilla arvoilla. Hajonta otetaan huomioon kertomalla nämä karakteristiset arvot hajonnan arvioidusta suuruudesta riippuvilla kertoimilla. Näin saatuja ns. laskennollisia arvoja käytetään kiinteinä lähtöarvoina ja suoritetaan rakenteen kantavuuden arviointi analyttisin menetelmin.

Suureen karakteristista arvoa nimitetään myös nimellisarvoksi, suunnitteluarvoksi tai mitoitusarvoksi. Kun karakteristinen arvo määritetään tilastollisen käsittelyn perusteella, sen alaraja määritellään arvona, jonka tarkasteltava suure ylittää tietyllä todennäköisyydellä ja sen yläraja vastaavasti arvona, jonka suureen arvo alittaa samalla todennäköisyydellä (kuva 4). Niitä rakennesuunnittelun lähtöarvoja, joiden suuruus määritellään normeissa tai perustuu muutoin sopimukseen, kuten rakenteiden hyötykuormat, voidaan pitää ko. suureen karakteristisina arvoina.

Osittaisvarmuuskertoimien suuruus pyritään valitsemaan siten, että rakenteelle saadaan sama varmuus kuin tilastomatemattista menetelmää käytettäessä. Sen vuoksi osittaisvarmuuskertoimen suuruus riippuu paitsi tarkasteltavasta suureesta myös tarkasteltavasta rajatilasta. Lisäksi tulee kiinnittää huomiota mahdollisten epäedullisten vaikutusten yhtäaikaisen esiintymisen todennäköisyyteen ja sovittaa samanaikaisesti käytettävien osittaisvarmuuskertoimien suuruus sen mukaisesti. Yleisenä sääntönä on kuitenkin, että tarkasteluissa on laskennollisten arvojen ylä- ja alarajoista valittava ne, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen.

Tarkasteltavien tapausten lukumäärä muodostuu helposti suureksi, koska osittaisvarmuuskerroinmenetelmässä kaikilla kantavuustarkastelun lähtöarvoilla kuten lujuudella, kimmokertoimella, murtovenymällä, mitoilla ja kuormituksilla on vähintään kaksi arvoa, yläraja ja alaraja, ja periaatteessa kaikki yhdistelmät olisi tutkittava epä-

edullisimpien löytämiseksi. Tämän vuoksi menetelmää olisi yksinkertaistettava laatimalla ohjeet siitä, mitä suureita voidaan tarkastelussa käyttää kiinteinä ottamalla tarkasteluun joko laskennollisen arvon ylä- tai alaraja ja edelleen siitä, mitkä kuormitusten ja ympäristöolosuhteiden yhdistelmät tulee käsitellä.

Osittaisvarmuuskerroinmenetelmään sisältyvän käsitteistön havainnollistamiseksi esitetään seuraavassa joitakin esimerkkejä:

A. Mitat

Rakenteen piirustukseen merkitty mitta  $n_s$ . nimellismitta on mitan karakteristinen arvo. Laskennollisen arvon alaraja saadaan määrittämällä se mitan arvo, jota suuremman mitan saavuttaa haluttu osa valmistettavista rakenteista. Mitan laskennollisen arvon yläraja on se arvo, jonka alapuolelle jää yhtä suuri osa valmistettavista rakenteista. Mitan laskennollisen arvon absoluuttisena ylä- ja alarajana on tietenkin nimellismitta lisättynä piirustukseen merkityllä ylitystoleranssilla ja alarajana nimellismitta vähennettynä alitustoleranssilla.

B. Betonin lujuus

Betonin lujuuden karakteristinen arvo saadaan määritetyksi koekappaleiden perusteella esim. siksi arvoksi, joka on yhtä suuri kuin koekappaleiden lujuuksien keskiarvo - 10 % ja jonka vähintään 90 % koekappaleista ylittää. Betonin lujuuden laskennollinen arvo saadaan kertomalla karakteristinen lujuus kertoimilla, joiden suuruus riippuu valutyön huolellisuudesta ja suoritustavasta, työskentelyolosuhteista, kuormituksen laadusta, rakennetyypistä jne.

C. Ympäristöolosuhteet

Ympäristöolosuhteita kuvaavien suureiden, kuten korkeimman ulkoilman lämpötilan tai veden korkeuden karakteristinen arvo määritetään esiintymistodennäköisyyden perusteella. Esimerkiksi ulkoilman korkeimman lämpötilan karakteristinen arvo on korkein paikkakunnalla tietyn ajan kuluessa mitattu lämpötila. Laskennollisen arvon suuruutta määritettäessä otetaan huomioon rakenteen sijainti, mikroilmasto, pinnan väri, alttius auringon säteilylle ja muut paikalliset tekijät, jotka aiheuttavat poikkeamista seudun keskimääräisistä lämpötiloista.

8. VARMUUDEN MÄÄRITTÄMINEN KOKONAISVARMUUSKERTOIMIA TAI SALLITTUJA JÄNNITYKSIÄ JA TAIPUMIA KÄYTETTÄESSÄ

Kokonaisvarmuuskertoimia käytettäessä kuormitukset kerrotaan varmuuskertoimilla ja tarkastellaan sen jälkeen rakenteen joutumista rajatilaan näiden kuormien alaisena käyttäen laskelmissa rakenteen ominaisuuksien karakteristisia arvoja. Tarkasteltavia tapauksia on vähemmän kuin osittaisvarmuuskerroinmenetelmässä, koska kuormituksilla on yleensä vain ylä- ja alaraja-arvo ja muut laskelmiin sisältyvät ovat vakioita. Varmuustarkastelusta tulee vastaavasti karkeampi ja likimääräisempi, vaikka eri rajatiloja tarkasteltaessa käytetään eri varmuuskertoimia. Murtorajatilatarkasteluissa käytettävä varmuuskerroin on nykyään noin 1,5...1,8. Kertoimen suuruus on määritetty kokeuksen perusteella, sillä rakenteen liian pienen murtovarmuuden aiheuttamia vaurioita ei ole esiintynyt näitä varmuuskertoimen arvoja käytettäessä. Kokonaisvarmuuskertoimen suuruutta tarkasteltaessa on huomattava, että kuormitusotaksumiin ja laskumenetelmiin sisältyy usein varmuutta lisääviä tekijöitä.

Käytettäessä sallittuja jännityksiä ja taipumia varmuuden arvioinnin perustana lasketaan eri rajatiloja vastaavilla kuormituksilla rakenteen taipuma ja suurin jännitys ja verrataan näitä rajatilakriteereissä määriteltuihin sallittuihin enimmäisarvoihin. Laskelmassa käytetään sekä kuormitusten että rakenteen ominaisuuksien karakteristisia arvoja. Menetelmää voidaan pitää kokonaisvarmuuskerroinmenetelmän muunnoksena, jossa kaikille kuormille on annettu sama varmuuskerroin ja jaettu sillä rajatilan kriteerissä esiintyvät jännitykset ja siirtymät. Menetelmä soveltuu ainoastaan fysikaalisesti ja geometrisesti lineaarisiin rakenteisiin. Hoikkien pilareiden epälineaarisuus on menetelmässä otettu huomioon lisäämällä sallittujen jännitysten taulukkoon pilarin hoikkuudesta riippuva kerroin.

Sallittujen jännitysten menetelmä on yksinkertainen, mutta se antaa luotettavan arvion rakenteen varmuudesta vain lineaarisesti kimoisten rakenteiden joidenkin rajatilojen kohdalla (vrt. taulukko 1). Menetelmän suositeltava käyttöalue on yksinkertaiset usein esiintyvät rakenteet, joiden ominaisuuksista on runsaasti kokemuksia ja joita ei tarvitse suunnitella optimaalisesti kantavuuteen nähden.

## 9. KUORMITUKSET

Kuormituksilla tarkoitetaan tässä kaikkia rakenteeseen vaikuttavia, rakenteen jännitys- tai muodonmuutostilaa muuttavia fysikaalisia tekijöitä, kuten varsinaiset kuormittavat voimat, lämpötila ja sen muutokset, kosteus ja sen muutokset, tukien ja perusmaan siirtymät, rakenteen mittavirheistä asennuksen yhteydessä syntynyt pakkomuodonmuutos jne.

Eri rajatiloja tarkasteltaessa valitaan käytettävä kuormitus esiintymistodennäköisyyden perusteella. Vakiintuneen käytännön puut-

tuessa voidaan apuna käyttää seuraavaa taulukkoa:

rajatila	kuormitus
käyttötila	pysyvä + tavallinen
murtotila	harvinainen
katastrofitila	äärimmäisen harvinainen

Taulukko 2. Rajatiloja tarkasteltaessa käytettävät kuormitusyhdistelmät

Lähdeteoksen [8] mukaan pysyvillä kuormilla tarkoitetaan kuormia, jotka vaikuttavat rakenteeseen aina suuruudeltaan, suunnaltaan ja vaikutuspisteeltään muuttumattomina kuten oma paino. Esiintymistodennäköisyys on siis 1,0.

Tavallisen kuorman ylittymistodennäköisyys yhden vuoden aikana on 0,2. Kuormitusyhdistelmien esiintymisen todennäköisyyttä tarkasteltaessa määritellään tavallisiksi lyhytaikaisiksi kuormiksi ne, joiden yhteenlaskettu vaikutusaika vuoden aikana on enintään 0,01 rakenteen käyttöajasta. Muut ovat pitkäaikaisia.

Harvinaisten kuormien ylittymistodennäköisyys yhden vuoden aikana on 0,01 ja äärimmäisten harvinaisten, katastrofi- eli ekstreemi-kuormitusten  $5 \times 10^{-5}$ .

Esimerkkeinä tavallisista kuormista voidaan mainita ajoneuvo-kuorma, harvinaisista kuormista tavallisten kuormitusten harvinainen yhdistelmä, rakenteen ylikuormitus ja äärimmäisen harvinaisista ajoneuvojen törmäykset rakenteisiin, poikkeuksellinen tulva, tulipalo, tapaturmaisesti putoavien tai kaatuvien esineiden aiheuttamat kuormitukset sekä tavallisten ja harvinaisten kuormitusten äärimmäisen harvinaiset yhdistelmät.

Käytettäessä osittaisvarmuuskerroinmenetelmää kuormien karakterisina arvoina voidaan pitää tavallisia kuormituksia. Harvinaiset ja erittäin harvinaiset kuormat saadaan kertomalla tavalliset kuormat osittaisvarmuuskertoimilla.

Valittaessa rakenteen analysointiteoriaa tai suunniteltaessa koekuormitusta kuormat joudutaan lisäksi jaottelemaan vaikutustavan perusteella esimerkiksi seuraavalla [8]:ssa esitetyllä tavalla:

A. Vaikutusajan perusteella

- lyhytaikaiset, jolloin kuorman vaikutusaikaa ei tarvitse ottaa huomioon rakenteen kantavuuden arvioinnissa
- pitkäaikaiset, jolloin kuormitusajan pituus tulee ottaa huomioon rakenteen kantavuuden arvioinnissa. Kuormituksen pitkäaikaisuus tässä mielessä on riippuvainen rakennusaineesta, joten sitä koskevat ohjeet tulee antaa ko. rakennusainetta käsittelevissä erikoisnormeissa.

B. Toistuvuuden perusteella

- kertakuormitukset ovat joko hitaita staattisia kuormituksia tai äkillisiä sysäyskuormituksia
- toistuvat kuormitukset ovat joko hitaita, harvoin toistuvia kuormituksia, joita voidaan käsitellä staattisina kuormina tai nopeita, usein toistuvia kuormituksia, joiden vaikutusta tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon aineen väsyminen tai rakenteen mahdollinen joutuminen resonoivaan värähtelyyn.

C. Vaikutuspisteen perusteella

- sidotut kuormat, jotka esiintyessään vaikuttavat aina samassa pisteessä
- vapaat kuormat, joiden vaikutuspiste voi vaihdella joko satunnaisesti tai jonkin fysikaalisen suureen, kuten ajan tai vedenkorkeuden, funktiona.

Kirjallisuudessa usein esiintyvä kuormitusten jaoittelu niiden fysikaalisen alkuperän perusteella, kuten oma paino, hyötykuorma, luonnonkuormat ja muodonmuutoskuormat, on merkityksetön rakenteiden kantavuuden arvioinnin kannalta, koska kuormien vaikutusta tarkastellaan esiintymistodennäköisyyden ja vaikutustavan mukaan.

#### 10. LOPPUPÄÄTELMÄT

Rakenteiden kantavuuden arviointi eri rajatilatarkastelujen perusteella antaa rakenteen varmuudesta ja käyttökelpoisuudesta yksityiskohtaisemman ja luotettavamman käsityksen kuin aikaisempi sallittuihin jännityksiin ja taipumiin perustuva, lähinnä käyttötilan tarkasteluun nojautuva menetelmä. Tarkastelu on samalla tullut huomattavasti suuritöisemmäksi tarkasteltavien tilojen ja kuormitusyhdistelmien määrän kasvaessa varsinkin silloin, kun pyritään järjestelmällisesti tutki-  
maan kaikki olosuhteiden, kuormitusten ja rakenteiden ominaisuuksien yhdistelmät. Osittaisvarmuuskertoimia käytettäessä tulisi ilmeisesti normeissa määrätä ne yhdistelmät, joihin nähden kantavuuden tarkistus on suoritettava.

Tilastomatemattinen käsittely ei ilmeisesti tule koskaan kuulumaan tavanomaiseen rakenteen kantavuuden arviointiin, vaan sitä käytetään etupäässä sopivien osittais- ja kokonaisvarmuuskertoimien suuruuden tarkistamiseen. Nykyään käytettävät varmuuskertoimet on valittu kokemusperäisesti siten, että niitä käytettäessä vaurioita tavallisesti ei esiinny.

Rakenteiden kantavuuden arvioinnin analyttiset menetelmät on kehitetty varsin pitkälle. Puutteellisimmat alueet ovat fysikaalisesti epälineaaristen rakenteiden käsittely ja viskoelastisuusteorian soveltaminen rakenteiden analysointiin. Katastrofitilan tarkasteluun

soveltuvista menetelmistä ei ole olemassa yhtenäistä esitystä. Kokeelliset menetelmät ovat teknillisesti pitkälle kehitetyt, mutta sen sijaan ei ole olemassa vakiintunutta käytäntöä vaadittavasta koekappalemäärästä, koetustavasta ja olosuhteista, koetulosten käsittelystä ja niiden perusteella suoritettavasta rakenteen kantavuuden arvioinnista.

Rakenteiden varmuuden arvioinnissa käytettävien menetelmien soveltamista vaikeuttaa huomattavasti lähtötietojen epäluotettavuus tai lähes täydellinen puuttuminen. Sen vuoksi olisi tutkittava seuraavat asiat:

- rakenteiden kuormitukset ja niiden hajonta
- rakenteiden lujuuden ja muiden ominaisuuksien hajonta
- rakenteiden mittahajonta ja rakenteiden mahdollinen luokittelu mita- ja materiaalihajontojen ts. valmistustoleranssien perusteella
- ympäristöolosuhteiden hajonta
- olisi selvitettävä, mikä on tarkoituksenmukainen rakenteelta vaadittava varmuus ja sen mukaisesti jaoiteltava rakenteet tärkeyden perusteella varmuusluokkiin ja määritettävä kussakin varmuusluokassa sovellettavat kokonais- tai osittaisvarmuuskertoimet sekä sallitut jännitykset
- rajatilojen määritelmät tulisi täsmentää ja tutkia, mitkä ovat sopivat rajatilan saavuttamisen kriteerit ja kriteereihin kuuluvat lukuarvot
- olisi laadittava koekuormitusten suoritusohjeet, jotka varsinkin dynaamisten ja pitkäaikaiskokeiden osalta tulisi sisällyttää kutakin rakennusainetta käsittelevään erikoisnormiin
- kunkin rakennusaineen kohdalla tulisi määritellä erikseen, milloin kuormitus on pitkäaikainen ja milloin kuormitus on dynaaminen (väsyttävä, sysäys tai toistuva)

- olisi laadittava yleiset rakenteiden kantavuuslaskelmien suoritusohjeet, joissa määriteltäisiin eri rajatilojen tarkastelussa käytettävät teoriat ja rakenteen varmuusluokasta riippuva laskelmien numeerinen suoritustarkkuus.

Rajatilamenetelmät voidaan ottaa nykyistä laajempaa käyttöön ilman edellä esitettyssä luettelossa mainittuja toimenpiteitä, mutta ilman niiden suorittamista rakenteiden varmuutta ei voida määrittää nykyistä tarkemmin, vaikka rajatilamenetelmät tekisivät sen mahdolliseksi ja täten olisi saavutettavissa taloudellisesti edullisempi lopputulos.

Esitettyä rakenteiden kantavuuden perusteella tapahtuvaa kelpoisuuden arviointimenetelmää voidaan soveltaa sellaisenaan myös muihin rakenteen fysikaalisiin ominaisuuksiin perustuvaan kelpoisuuden arviointiin, jos lähtöarvojen hajonnat tunnetaan.

#### Kirjallisuutta

- [1] Allen, D.E., Limit state design - A unified procedure for design of structures. National Research Council of Canada Division of Building Research. Technical Paper no. 315. Ottawa 1970.
- [2] Benjamin, J.R. and Lind, N.C., A probabilistic basis for a deterministic code. Journal of the American Concrete Institute. November 1969 ss. 857...865.
- [3] Commitee Europeen du Beton, International recommendations for the design and construction of concrete structures. English edition, London 1970.
- [4] Cornell, C.A., A probability-based structural code. Journal of the American Concrete Institute. December 1969 ss. 974...984.
- [5] Dansk Ingeniørforenings normstyrelse, Forslag til dansk ingeniørforenings norm for betonkonstruktioner. Kritik-udgave August 1971.

- [6] Lind, N.C., Turstra, C.J. and Wright, D.T., Safety, economy and rationality in structural design. International Association for Bridge and Structural Engineering. 7th Kongress. Rio de Janeiro 1964. Preliminary Publication, ss. 185...192.
- [7] Nordiska Kommitteen för Byggningsbestämmelser, Utvalget vedrørende sikkerhedsbestemmelser for bærende konstruktioner: Retningslinier for sikkerhedsmetoder. September 1971.
- [8] Nordiska Kommitteen för Byggningsbestämmelser, Belastningsutskottet: Principförslag till lastbestämmelser. September 1971.
- [9] Recharadt, T., Betonirakenteet. Luennot. Helsingin teknillisessä korkeakoulussa 1971-72.
- [10] Rowe, R.E., Current European views on structural safety. Journal of the Structural Division. Proc. of ASCE. March 1970 ss. 461...467.
- [11] Shah, H.C., The rational probabilistic code format. Journal of the American Concrete Institute, September 1969 ss. 690...697.
- [12] Struck, W., Zur Frage der Sicherheit bei Beurteilung von Bauteilen nach Versuchsergebnissen. Die Bautechnik 6/1971 ss. 188...195.
- [13] Varmuustoimikunta, Rakenteiden luotettavuustutkimuksen ohjelma. Helsinki 1971. (Ei julkaistu).

Pekka Kanerva, dipl.ins., VTT:n tutkimusassistentti.