



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

RFEM LASKENTA- JA MITOITUSOHJE TERÄSBETONILAATOILLE

Juho Ikävalko

Opinnäytetyö
Toukokuu 2017
Rakennustekniikka
Talonrakennustekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka
Talonrakennustekniikka

IKÄVALKO, JUHO:

RFEM laskenta- ja mitoitusohje teräsbetonilaatoille

Opinnäytetyö 51 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Toukokuu 2017

Opinnäytetyö tehtiin A-Insinöörit Oy:n toimeksiannosta. Tavoitteena oli laatia mitoitusohje teräsbetonilaatalle RFEM -ohjelmalla ja RFEM:in lisämoduulille RF-CONCRETE Surface. A-Insinööreillä oli tarve painottaa RFEM:in käyttöä rakennesuunnittelussa ja siten yhtenäistää teräsbetonilaatan suunnittelutapoja yhtiön sisällä.

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin teräsbetonilaatan mitoitukseen vaikuttavia tekijöitä ja verrattiin RFEM -ohjelmaa muihin mitoitusohjelmiin, kuten FEM-design:iin ja JPBox:iin. Työssä tarkasteltiin RFEM -ohjelmalla laattojen taipumaa epälineaarilla materiaalmallilla sekä tukiehtojen vaikutusta laatan rasituksiin. Lisäksi työssä selvitettiin laskennassa tapahtuvien singulariteettiongelmien ratkaisuja RFEM:ssä.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsitellään RFEM:n mitoitukseen käyttämiä eurokoodeja ja niiden osuutta teräsbetonilaatan laskentaan sekä asioita, joita ohjelma jättää huomioimatta mitoituksessa. Lisäksi teoriaosuudessa käsitellään elementtimenetelmiä pintapuolisesti, jotta ohjelman toimintatavoista tulisi lukijalle jonkinlainen käsitys.

Työn tuloksena saatiin selville, että laatan sisäisiin voimiin ja taipumaan vaikuttavat tukiehdot ja rakenteen epälineaarinen materiaalmalli. Esimerkiksi vaadittujen raudoitusten tuloksissa voi ilmetä virheitä, mikäli tukiehdot ovat väärin tai niiden liukuminen ja kiertyminen on estetty. Singulariteettiongelmaa ohjelmassa on helpointa ehkäistä voimia taasaavalla keskiarvoalueella.

Opinnäytetyöhön sisältyy salassa pidettävänä liitteenä RFEM laskenta- ja mitoitusohje A-Insinöörit Oy:lle.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Construction Engineering

IKÄVALKO, JUHO:

RFEM design and analysis guidelines for reinforced concrete slab

Bachelor's thesis 51 pages, appendices 1 pages

May 2017

The thesis work has been commissioned by A-Insinööri Oy. The objective was to design a manual for design calculations of reinforced concrete slab with RFEM-program and RF-Concrete Surface add-on module. The company wanted to simplify the use of RFEM in structural design and standardize the design practices of reinforced concrete slab within the company.

This thesis conducted a research to analyze what kind of aspect affected the design of reinforced concrete slab. The work observes an effect of nonlinear material model and supporting conditions in concrete slab stresses. RFEM-program was compared also to other measurement programs such as FEM-design and JPBox. Additionally, discussing how to handle singularity problems with RFEM.

In the theory part of this thesis, the use of Eurocodes and their effect to the computation was estimated in the design of reinforced concrete slab. Within the theory section, a small part is dedicated to finite element methods, to provide view to the reader a view to how the program functions.

As a result of this thesis was that the stress and the deflection of the concrete slab is affected by the supporting variables and the non-linear structure material model. In the reinforcement of the slab, peculiar problems can appear if the support conditions are wrong or their sliding and twisting is constrained. Singularity problems in the program are easiest to prevent with force equating average area.

The thesis contains a confidential document of RFEM design and guidelines analysis for A-Insinööri Oy as an attachment.

Key words: rfem, finite-element method, reinforced concrete slab

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	ELEMENTTIMENETELMÄ.....	8
2.1	Yleistä.....	8
2.2	Elementtiverkko.....	9
2.3	Kalvovoimat ja raudoitus	10
3	EUROKOODIEN MITOITUSPERIAATTEET PAIKALLAVALULAATOILLE	12
3.1	Mitoituksen kulku	12
3.2	Materiaaliominaisuudet.....	13
3.2.1	Betoni.....	13
3.2.2	Teräs.....	15
3.3	Minimiraudoitus.....	17
3.4	Raudoituksen ankkurointi.....	18
3.5	Taipuma.....	20
4	RFEM -OHJELMA	21
4.1	RFEM, laskenta ja moduulit.....	21
4.2	Käyttöliittymä	22
4.3	Mallintaminen.....	24
4.4	Kuormat ja kuormitusyhdistelmät.....	25
4.5	Tulosten käsittely	26
5	MURTORAJATILATARKASTELU	27
5.1	Tulosten tulkinta ja käsittely.....	27
5.1.1	Vertailu normien ja kirjallisuuden välillä	27
5.1.2	Singulariteettiongelma	28
5.2	Tukiehtojen vaikutus FEM-laskennassa.....	29
5.2.1	Tukiehtojen määrittäminen	29
5.2.2	Pilarin yläpään vaikutus laattaan	32
5.3	Suppeusluku	34
6	KÄYTTÖRAJATILATARKASTELU	36
6.1	Laattojen taipuma epälineaarisella menetelmällä	36
6.1.1	Teoria	36
6.1.2	Betonin vetolujuus ja vetojäykistyminen.....	38
6.1.3	Kutistuma ja viruma	40
6.1.4	Halkeilu.....	42
6.2	Betonilaatu ja suhteellinen kosteus	45
6.3	Vertailu ohjelmien välillä.....	46

7 POHDINTA	47
LÄHTEET	49
LIITTEET.....	51
Liite 1. Teräsbetoni-laattojen mitoitus- ja laskentaohje RFEM-ohjelmaan, ei julkaista	51

LYHENTEET JA TERMIT

Leaflet	Betoniteollisuuden betonirakenteiden ohjeistus
RFEM	Laskentaohjelma
Add-on modules	Laskentaohjelman lisämoduulit
Malli	Kolmiulotteinen jäljitelmä rakenteesta
RakMK	Rakennusmääräyskokoelma
2D	Kaksiulotteinen
JPBox	DOS pohjainen rakenteidenmitoitushjelma

1 JOHDANTO

Muutaman viime vuoden aikana tiedon sähköinen prosessointi on muuttanut insinöörin työmenetelmiä kaikilla rakentamisen aloilla. Varsinkin rakennesuunnittelussa, jossa nykyään on vaikea ajatella rakenteiden mitoittamista ilman tietokoneohjelmien avustusta. Vaikka laskentaohjelmat antavat paljon erilaista tietoa nopeasti, on insinöörien silti ymmärrettävä rakenteen toimintaperiaatteet.

Työn taustalla on A-Insinöörit Oy:n tarve saada yhtenäistettyä teräsbetonilaattojen mitoittamisessa käytettyjä ohjelmia ja tapoja. Nykyään A-Insinööreillä käytetään montaa eri tapaa ja ohjelmaa laattojen mitoitukseen. Työn tavoitteena on luoda yhtenäiset ja luotettavat mitoituskäytännöt sekä suunnittelukriteerit laattojen mitoitukselle. Ohjeella saadaan nopeutettua ja helpotettua suunnittelijoiden tekemää työtä. Erilaiset laattojen mitoitustavat tuovat epävarmuutta lopputulokseen, josta suurimmat epävarmuudet liittyvät tällä hetkellä käyttörajatilamitoitukseen.

Suunnittelija joutuu käyttörajatilamitoituksessa määrittämään useita laskennassa käytettäviä parametreja, joista osa vaikuttaa merkittävästi lopputulokseen. Käytännön projekteissa suunnittelijalla on harvemmin aikaa selvittää tarvittavia parametreja kirjallisuudesta tai muista lähteistä ja ne joudutaan arvaamaan perustuen aikaisempaan kokemukseen. Laskentaan liittyy myös joukko muita oletuksia, jotka suunnittelija joutuu tekemään ja joiden merkitys lopputulokseen saattaa olla merkittävä. Tämän työn tavoitteena on selvittää käytettävät parametrit ja suunnitteluoletukset, jotka johtavat hyvään ja luotettavaan lopputulokseen.

Tämän työn tarkoituksena on luoda A-Insinöörien käyttöön teräsbetonilaattojen laskenta- ja mitoitusohje Dlubalin RFEM -ohjelmaan. Ohjeessa käsitellään tukiehtojen vaikutusta, taipuman laskemista epälineaarilla menetelmällä ja momenttihuippujen tasaustapoja.

2 ELEMENTTIMENETELMÄ

2.1 Yleistä

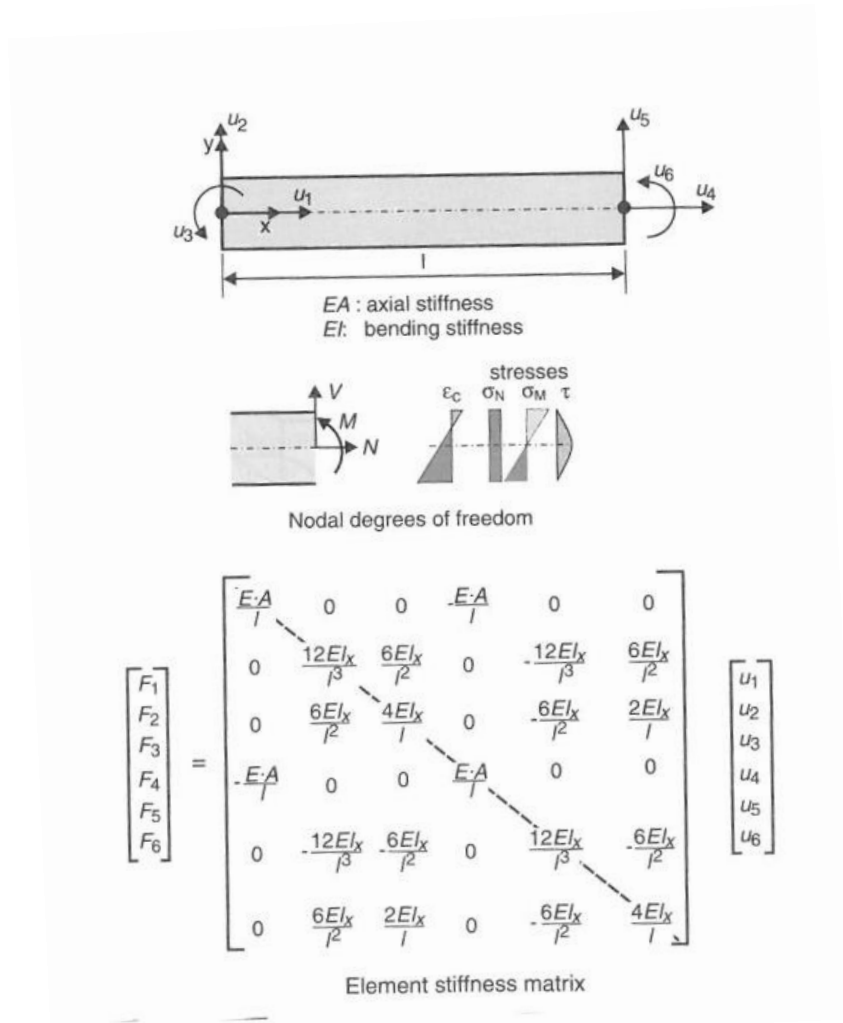
Elementtimenetelmän englanninkielinen nimi on Finite Element Method, josta tulevaa lyhennettä FEM käytetään myös Suomessa yleisesti. Usein saatetaan myös käyttää lyhennettä FEA, joka tulee sanoista Finite Element Analysis, ja tarkoittaa elementtimenetelmällä suoritettavaa laskentaa. (Lähteenmäki, n.d.)

FEM laskennassa monimutkaiset rakenteet jaetaan useaan pieneen komponenttiin, mutta kuitenkin rajalliseen määrään yksittäisiä komponentteja, joita kutsutaan elementeiksi. Yksittäiset elementit ovat yhteydessä muihin elementteihin solmupisteistään. Elementtien solmupisteiden siirtymää ja reaktiota voidaan tarkentaa rajallisilla parametreilla ja analyttisillä funktioilla. Kaikki siirtymät, kuormitukset ja rasitukset elementissä sekä pistevoimat solmuissa voidaan laskea muotofunktioilla ja niiden derivaatoilla. Koko monimutkaisen rakenteen ratkaisu saadaan näiden kaikkien elementtien koonnista. Kaikkien elementtien jäykkyyismatriisit $[K]^e$ lisätään globaaliin jäykkyyismatriisiin $[K]$, mistä tuntemattomat pisteiden siirtymät $\{u\}$ voidaan laskea kaavasta 7.

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (7)$$

Kaavassa $[K]$ on globaali jäykkyyismatriisiin $[K] = \Sigma[K]^e$, $\{u\}$ on pisteen siirtymävektori ja $\{F\}$ on kuormitusvektori.

Päättehtävä on löytää muotofunktio, joka voi arvioida tietyn rakenne-elementin käyttäytymisen. Esimerkiksi kuvassa 1 oleva yksinkertainen kaksisolmuinen elementti. Tässä tapauksessa tasapainoehdosta voidaan selvittää solmuvoiman ja solmusiirtymän suhde jokaisessa elementissä. (Rombach, 2011, 5–6)



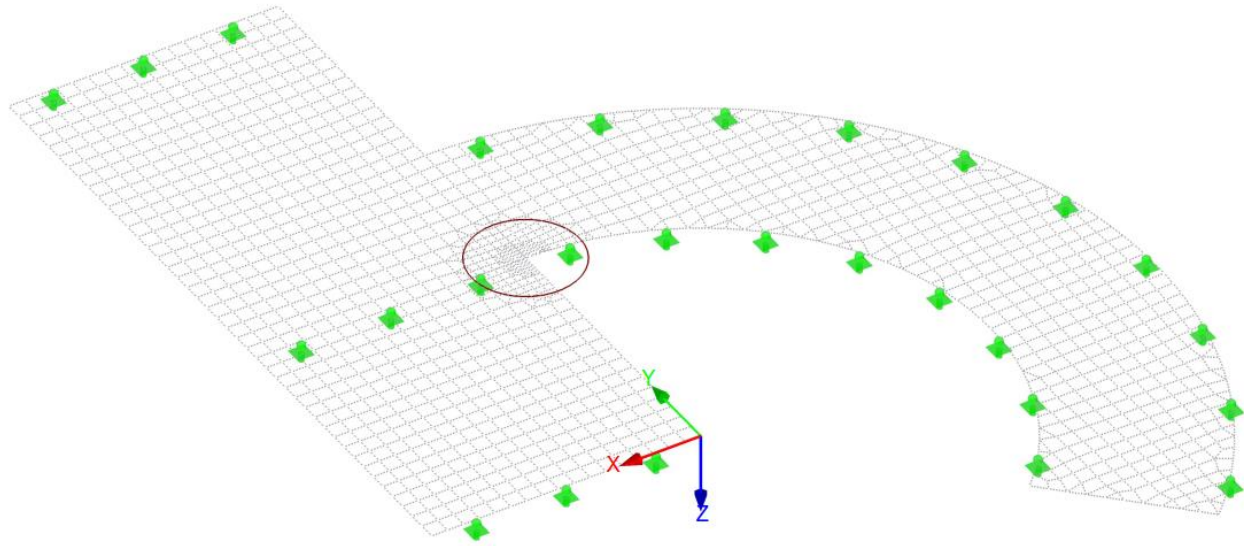
KUVA 1. Kaksisolmuinen elementti ja jäykkyydsmatriisi. (Rombach G.A. 2011, 6)

2.2 Elementtiverkko

Rakenteen elementtijaossa voidaan käyttää samanaikaisesti erityyppisiä ja -muotoisia sekä erilaisia geometrisia- ja materiaaliominaisuuksia sisältäviä elementtejä. Pintarakenteiden yhteydessä elementtiverkkoina voidaan käyttää erimuotoisia nelikulmioita tai kolmioita. Kolmiulotteisissa kappaleissa voidaan käyttää neli-, viisi- ja kuusitahokkaita, joiden rajapinnat voivat olla tasoja tai yksinkertaisia kaarevia viivoja (Lähteenmäki, n.d.). Sauva- ja palkkielementissä käytetään janaelementtiä.

Kaikista tarkimman tuloksen saa, kun laatassa määritellyt elementit ovat mahdollisimman lähellä neliötä. Mitä tiheämpi elementtiverkko on, sitä tarkempi tulos laskennasta saavutetaan. Kuitenkin on huomioitava, ettei elementtiverkko ole myöskään liian pieni, sillä

liian pieni verkko voi aiheuttaa vääristymää laskennassa. Elementtiverkon yhden elementin leveyden alarajana on hyvä pitää mitoitettavan laatan paksuutta. Kuvassa 2 on esitetty teräsbetoni-laatan elementtiverkko, jossa yhteen nurkkaan on lisätty tarkentava elementtiverkko.

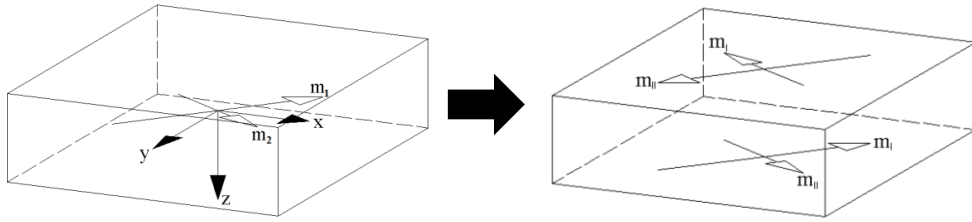


KUVA 2. Betonilaatan elementtiverkko.

2.3 Kalvovoimat ja raudoitus

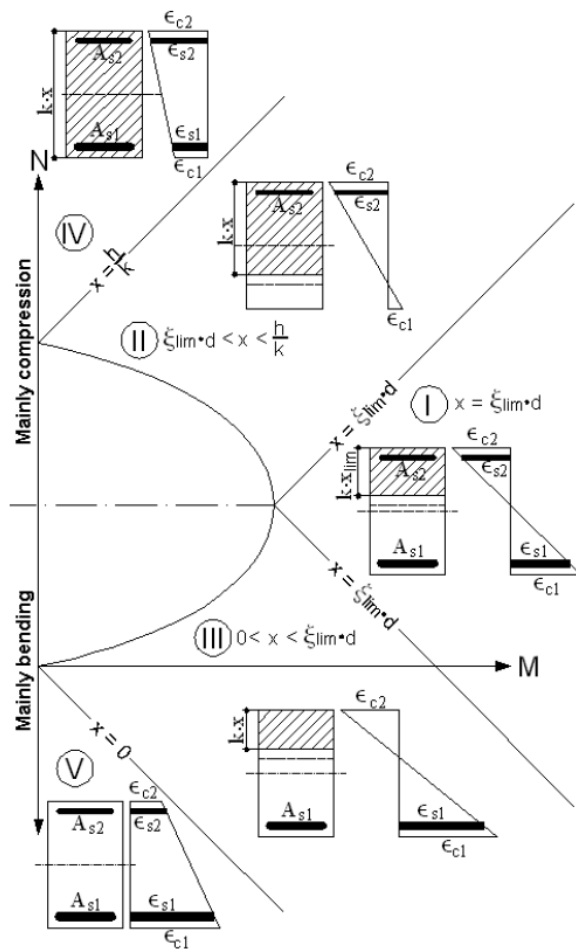
Suunnittelussa käytettävien voimien ratkaisemiseksi RFEM:ssä käytetään voimien muunnosta, jossa tasapaino ratkaistaan kolmella mielivaltaisella raudoitussuunnalla. Käytännössä raudoitus toteutetaan kahdella kohtisuoralla raudoitussuunnalla, jolloin kolmas voimakomponentti on betonin puristus. (A-Insinöörit. 2017)

Kuoressa vaikuttavat sisäiset momentit muunnetaan kuoren tason sisäisestä momentista kummankin pinnan kalvovoimiksi. Nämä voimat ovat toistensa vastakohtia ja kuvassa 3 on esitetty kyseessä olevan muunnoksen periaate. Näin yhdistetyt normaali- ja taivutusvoimat muunnetaan kummankin pinnan mitoitusvoimiksi.



KUVA 3. Sisäisten voimien muuntaminen kalvovoimiksi. (Dlubal 2013. b, 30)

Jokaista kuormitustilannetta vastaavat poikkileikkauksen momenttivarret ja venymät määritellään viiteen eri luokkaan. Näiden luokkien luokittelualgoritmit ovat esitetty kuvassa 4. Samalla tarkistetaan puristuspuolen kestävyys, mahdollinen vaadittu puristusräsmäärä ja sallitut muodonmuutokset. (A-Insinöörit. 2017)



KUVA 4. Kuormitustilanteen luokittelualgoritmit. (Dlubal 2013. b, 50)

3 EUROKOODIEN MITOITUSPERIAATTEET PAIKALLAVALULAA-TOILLE

3.1 Mitoituksen kulku

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, jotka edustavat viimeisintä teknistä kehitystä rakennesuunnittelua koskevissa ohjeissa. Eurokoodit korvaavat nykyiset kansalliset standardit ja suunnitteluohjeet 28 Euroopan maassa. Eurokoodien pääasia on kymmenen, ja niiden soveltamisalaan kuuluvat kaikki tärkeimmät rakennemateriaalit. Kuvassa 5 on esitetty Eurokoodien mukainen rakenteiden mitoituksen kulku. (Betoni. n.d. a)



KUVA 5. Eurokoodien mukainen mitoituksen kulkukaavio. (Betoniteollisuus n.d. a)

Kaikessa suunnittelussa on noudatettava voimassa olevia normeja ja ohjeita. Eurokoodit astuivat voimaan vuonna 2010, jonka jälkeen on hiljalleen luovuttu lähes kaikista kansallisista suunnitteluohjeista ja standardeista. Betoniteollisuus on tehnyt eurokoodien mukaisia lyhyitä ohjeita mitoituksen kulkuun, jotka tunnetaan leafleteinä. Laatan yksityiskohtainen mitoituksen kulku kuvataan taulukossa 1. (Betoniteollisuus. n.d a)

TAULUKKO 1. Laatan mitoitusmenettely. (Betoniteollisuus n.d. a)

Vaihe	Tehtävä	Lisäohjeita	
		Opasaria	Standardi
1	Määritetään suunniteltu käyttöikä	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1990 taulukko 2.1
2	Määritetään laattaan kohdistuvat kuormat	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1991 (10 osaa) ja kansalliset liitteet
3	Määritetään kuormayhdistelmät	Eurokoodimitoituksen perusteet	SFS-EN 1990 ja kansallinen liite
4	Määritetään kuormituskaaviot	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1992–1–1 ja kansallinen liite
5	Arvioidaan säilyvyysvaatimukset ja määritetään betonin lujuusluokka	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 206-1 ja kansallinen liite
6	Tarkistetaan betonipeitevaatimukset palonkestoaajan perusteella	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet ja tämän oppaan taulukko 2	SFS-EN 1992–1–2: kohta 5
7	Lasketaan vähimmäisbetonipeite säilyvyys-, tartunta- ja palonkestovaatimusten kannalta	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1992–1–1 kohta 4.4.1
8	Tarkastellaan rakenne kriittisten momenttien ja leikkauvoimien löytämiseksi	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1992–1–1 kohta 5
9	Mitoitetaan taivutusraudoitus	Ks. kuva 1	SFS-EN 1992–1–1 kohta 6.1
10	Tarkistetaan taipuma	Ks. kuva 3	SFS-EN 1992–1–1 kohta 7.4
11	Tarkistetaan leikkaukestävyys	Ks. taulukko 7	SFS-EN 1992–1–1 kohta 6.2
12	Tarkistetaan tankojako tai halkeamaleveys	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1992–1–1 kohta 7.3

Eurokoodien mukaan laataksi nimitetään rakenneosaa, jonka sivumitat ovat vähintään viisi kertaa laatan kokonaispaksuus (RTEK-3210, 2013, 97). Laatan poikkileikkausmitoitus voidaan tehdä samalla tavalla kuin suorakaidepalkin, mutta laatasta tarkasteluleveys on metrin ja korkeus on laatan paksuus.

3.2 Materiaaliominaisuudet

3.2.1 Betoni

Betonin tärkein ominaisuus on sen puristuslujuus. Eurokoodeissa betoni luokitellaan sen puristuslujuuden mukaan ja lujuusluokan perusteella määritellään käytettävät mekaaniset ominaisuudet. Betonin lujuusluokka saadaan standardin EN 206-1 mukaisesta lieriölujuudesta f_{ck} tai kuutiolujuudesta $f_{ck,cube}$. Taulukossa 2 on esitetty betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2007)

TAULUKKO 2. Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. (Betoniteollisuus n.d.

a)

Betonin lujuusluokka	Analyttinen yhteys/viittaus														
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk, 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk, 0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5 % fraktiili
$f_{ctk, 0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk, 0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95 % fraktiili
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm}/10)^{0,3}]$ (f_{cm} MPa)
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	ks. kuvaa 3.2 $\epsilon_{c1} (\text{‰}) = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	ks. kuvaa 3.2 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu1} (\text{‰}) = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	ks. kuvaa 3.3 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c2} (\text{‰}) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ks. kuvaa 3.3 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu2} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c3} (\text{‰}) = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40]$
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu3} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$

Puristuslujuuden mitoitusarvo määritellään kaavalla 1.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C \quad (1)$$

Kaavassa γ_C on betonin osavarmuusluku, joka saadaan taulukosta 3. α_{cc} on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät. Arvo valitaan väliltä 0,8 ja 1, mutta suositusarvo on 1.

Vetolujuuden mitoitusarvo määritellään kaavalla 2.

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} f_{ctk, 0,05} / \gamma_C \quad (2)$$

Kaavassa γ_C on betonin osavarmuusluku, joka saadaan taulukosta 3. α_{ct} on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon vetolujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta riippuvat epäedulliset tekijät. α_{ct} :n suositusarvo on 1.

TAULUKKO 3. Murtorajatiilojen materiaaliolosuhteet. (SFS 1992-1-1. 2007, 28)

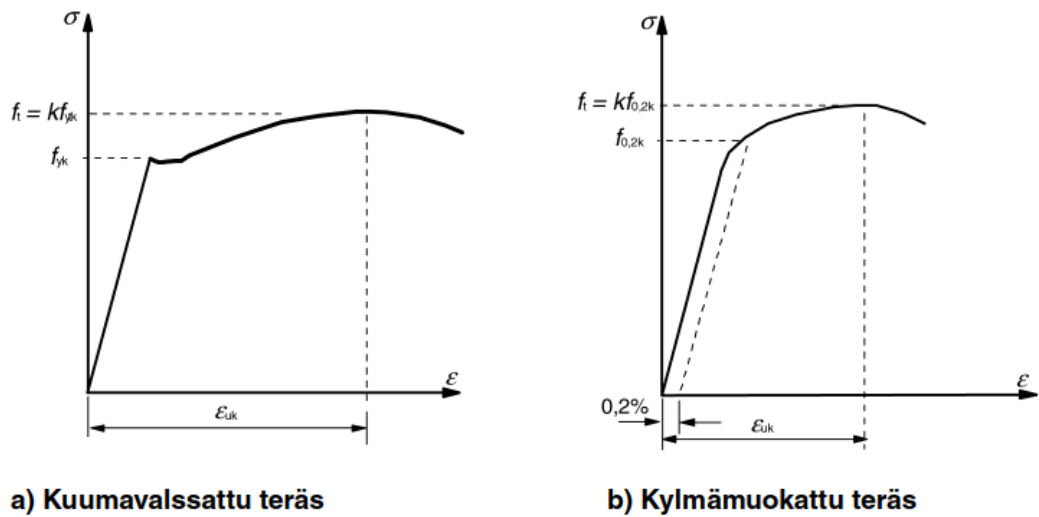
Mitoitustilanteet	betonin γ_c	betoniteräksen γ_s	jänneteräksen γ_s
Normaalisti vallitseva ja tilapäinen	1,5	1,15	1,15
Onnettomuus	1,2	1,0	1,0

Kutistuma ja viruma ovat betonin ajasta riippuvia muodonmuutoksia. Kutistuma riippuu vesi-sementtisuhteesta, suhteellisesta kosteudesta sekä rakenneosan mitoista ja muodosta. Epäsymmetrisesti raudoitettussa poikkileikkauksessa kutistuma aiheuttaa kaarevuutta, josta johtuva taipuma saattaa olla merkittävä matalissa rakenteissa. Kutistuman aiheuttama taipuma tulee ottaa huomioon taipumatarkasteluissa. (Betoniteollisuus n.d. c).

Pienen vetolujuuden vuoksi betonin halkeilua ei voida välttää, mutta kaikki halkeilu ei ole haitallista. Halkeamia syntyy aina kun kuormien tai pakkovoimien aiheuttama vetävä päämuodonmuutos ylittää betonin murtovenymän. Suunnittelussa on otettava huomioon lämpötilasta, virumasta ja kutistumisesta aiheutuvan muodonmuutoksen vaikutus. (By 210, 2008, 350-351)

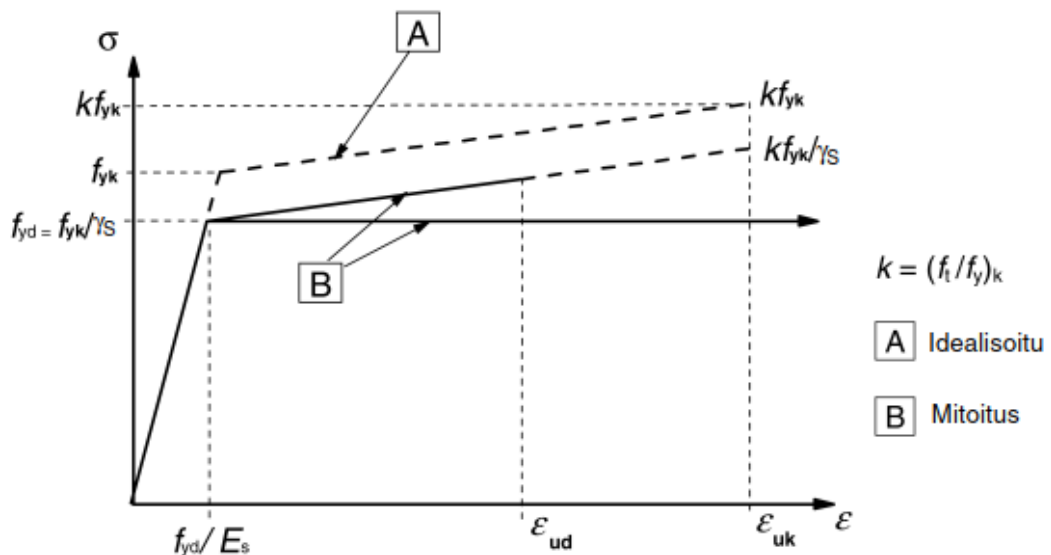
3.2.2 Teräs

Teräksen tärkeimmät ominaisuudet teräsbetonirakenteissa ovat sen vetolujuus ja murtovenymä. Teräkset luokitellaan niiden vetolujuuden perusteella ja vetolujuus (myötölujuus) f_y saadaan vetokokeesta. Kuvassa X on esitetty jännitys-venymäkuvaaja kuuma- ja kylmämuokatulle teräkselle, sekä niiden myötölujuudet f_y ja murtovenymät ϵ_{uk} .



KUVA 6. Jännitys-venymäkuvaaja kuumavalssatulle ja kylmämuokatulle teräkselle. (SFS 1992-1-1 2007, 39)

Teräsbetonissa yleisin käytetty teräslaji on B500B, mikä vastaa vanhan RakMK B4:n teräsluokkaa A500HW. Teräs on hitsattava kuumavalssattu harjatanko ja sen myötölujuuden ominaisarvo f_{yk} on 500 N/mm^2 . Kimmokertoimen E_s mitoitusarvoksi oletetaan betoniteräksellä $200\,000 \text{ N/mm}^2$. Kuvassa 7 on esitetty terästen idealisoitu jännitys-venymäkuvaaja ja mitoituskuvaajat f_{yd} ja $k f_{yk}$. Varmuuskerroin γ_s saadaan taulukosta 3.



KUVA 7. Betoniteräksen idealisoitu jännitys-venymäkuvaaja ja mitoituskuvaajat. (SFS 1992-1-1 2007, 41)

3.3 Minimiraudoitus

Minimiraudoitus laatoille lasketaan samalla tavalla kuin palkeille. Laatan pääraudoituksen pitää olla vähintään minimiraudoituksen $A_{s,min}$ suuruinen. Minimiraudoitus lasketaan kaavalla 3. (SFS 1992-1-1. 2007, 150)

$$A_{s,min} = \max \begin{cases} 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \\ 0,0013 b_t d \end{cases} \quad (3)$$

Kaavassa b_t on palkin vedetyn osan keskimääräinen leveys, eli laattoja laskiessa yksi metri ja d on laatan tehollinen korkeus. (SFS-EN 1992-1-1, 150)

Kun halkeilun rajoittaminen on mitoittava vaatimus, halkeilua esiintyvissä rakenteen osissa tulee olla minimiraudoitus. Minimiraudoituksen määrä perustuu siihen, että ennen halkeilun alkamista kehittynyt vetovoima vedetyssä betonissa ei aiheuta raudoitukseen jännityksen nousemista myötörajalle halkeaman avauduttua. Minimiraudoitus $A_{s,min}$ joka täyttää tämän ehdon voidaan laskea kaavalla 4. (By 210, 2008, 366)

$$A_{s,min} = \frac{k_c k f_{ct,eff} A_{ct}}{\sigma_s} \quad (4)$$

missä k_c on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon jännitysten jakauma poikkileikkauksessa välittömästi ennen halkeilua ja sisäisen momenttivarren muutos. k kertoimen avulla otetaan huomioon eri suuruisten toisensa tasapainossa pitävien jännitysten vaikutus, minkä johdosta pakkovoimat pienenevät. $f_{ct,eff}$ on f_{ctm} tai sitä pienempi $f_{ctm}(t)$, jos halkeilun syntyminen on odotettavissa ennen 28 vuorokauden ikää. A_{ct} on betonin vedetyn poikkileikkauksen ala. Tällä tarkoitetaan korkeutta, joka on vedettynä juuri ennen ensimmäisen halkeaman muodostumista. σ_s on raudoituksen sallitun suurimman jännityksen itseisarvo välittömästi halkeaman muodostumisen jälkeen. Tälle voidaan käyttää raudoituksen myötölujuuden arvoa f_{yk} . (SFS 1992-1-1. 2007, 119)

Yhteen suuntaan kantavissa laatoissa tulee olla poikittainen jakoraudoitus, joka on vähintään 20 % pääraudoituksesta (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, 2011).

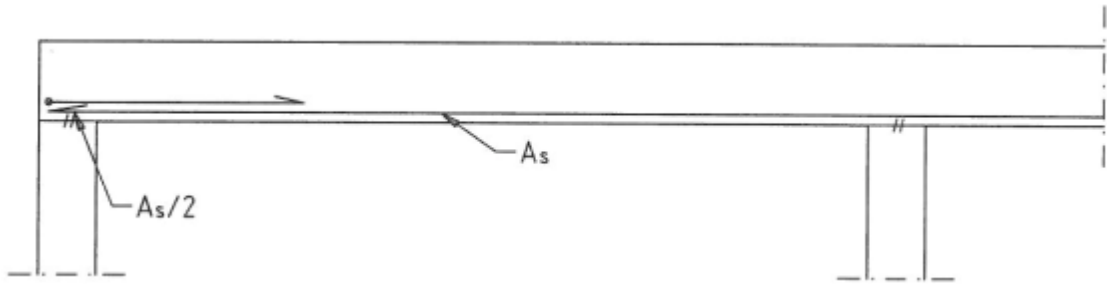
Eurokoodeissa esitetty tankoväli laatoille saa olla enintään $s_{max,slabs}$, jonka suositusarvo on: (SFS 1992-1-1. 2007, 156)

- pääraudoituksessa $3h \leq 400$ mm, missä h on laatan kokonaispaksuus
- jakoraudoituksessa $3,5h \leq 450$ mm tai $4h \leq 600$ mm (Suomen kansalliset liitteet 1, 2007, 12)

Pistekuormien tai maksimimomenttien alueilla säännöt ovat vastaavasti:

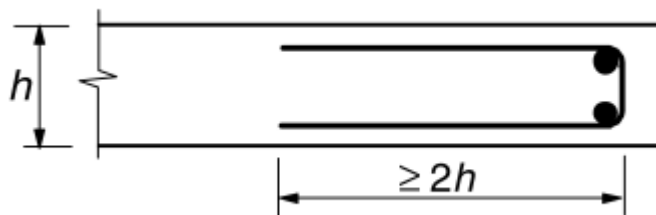
- pääraudoituksessa $2h \leq 250$ mm
- jakoraudoituksessa $3h \leq 400$ mm.

Vapaasti tuetussa laatasta puolet laskennallisesta kenttäraudoituksesta tuodaan tuelle ja ankkuroidaan sinne. Kuvassa 8 on esitetty raudoituksen periaatteellinen kuva tuesta ja ankkuroinnista. (SFS 1992-1-1. 2007, 156)



KUVA 8. Raudoituksen ankkurointi tuella.

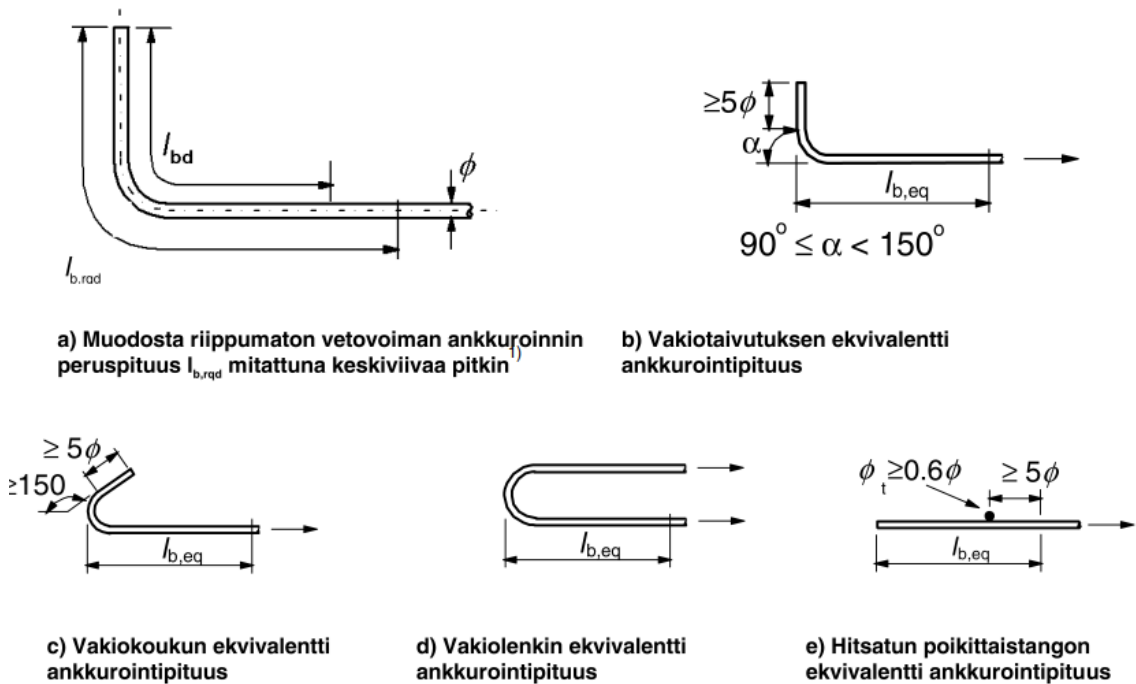
Laattojen vapaalla reunalla raudoitus järjestetään kuvan 9 mukaisesti tai vaihtoehtoisesti laatan reunalla oleva raudoitus voi toimia reunaraudoituksena.



KUVA 9. Laatan reunaraudoitus. (SFS 1992-1-1. 2007, 157)

3.4 Raudoituksen ankkurointi

RFEM ei laske vaadittavaa ankkurointipituutta, joten suunnittelijan on määriteltävä se itse. Raudoitustangot ja -verkot tulee ankkuroida siten, että tartuntavoimat siirtyvät luotettavasti betonille tangon suuntaista halkeilua tai lohkeilua aiheuttamatta. Tarvittaessa tulee käyttää poikittaisraudoitusta, jolla varmistetaan raudoituksen ankkuroituminen. Kuvassa 10 esitetään erilaisia ankkurointimenetelmiä.



KUVA 10. Suorana tankona ankkuroinnista poikkeavia ankkurointimenetelmiä.

Tartuntajännitys murtorajatilassa tulee olla riittävä estämään tartunnan pettämisestä aiheutuva murtuminen. Harjatankojen tartuntalujuuden mitoitusarvona murtorajatilassa voidaan käyttää arvoa f_{bd} , joka lasketaan kaavalla 5.

$$f_{bd} = 2,25\eta_1\eta_2f_{ctd} \quad (5)$$

Kaavassa f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo. η_1 on kerroin, joka liittyy tartuntaolosuhteiden laatuun ja tangon sijaintiin betonoinnin aikana. Olosuhteiden ollessa hyvät voidaan käyttää arvoa 1,0 ja muissa tapauksissa 0,7. Kerroin η_2 riippuu tangon halkaisijasta, jonka arvona käytetään 1,0 kun tangon halkaisija on alle 32 mm ja $\frac{132-\phi}{100}$ kun tangon halkaisija on yli 32 mm. (SFS 1992-1-1. 2007, 131-132)

Vaadittavaa ankkurointipituutta laskiessa on otettava huomioon teräksen tyyppi ja tankojen tartuntaominaisuudet. Taivutettujen tankojen vaadittava ankkurointipituus mitataan tangon keskiviivaa pitkin. Vaadittava ankkurointipituus $l_{b,rqd}$ saadaan kaavasta 6, kun ankkuroidaan tangossa vallitsevaa voimaa $A_s \cdot \sigma_{sd}$ ja kun tartuntalujuus f_{bd} oletetaan vaikioksi.

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \quad (6)$$

Kaavassa σ_{sd} on tangon mitoitusjännitys kohdassa, josta ankkurointipituus mitataan ja \emptyset on ankkuroitavan tangon halkaisija

3.5 Taipuma

Laatan paksuus määräytyy yleensä käyttörajatilassa taipuman perusteella. Taipumaan vaikuttavia tekijöitä on paljon ja usein ne ovat ajasta ja toisistaan riippuvaisia, mikä vaikeuttaa taipuman arviointia. Taipumaan vaikuttavia tekijöitä on muun muassa betonin vetolujuus, viruma, kimmokerroin, kuormituksen suuruus, tukien kiinnitysaste ja kutistuma. Taipuman laskenta on aina vain arvio, joten tuloksissa voi olla -30%...+15% virhe. Taipuman arviointiin on suositeltavaa liittää epätarkkuuteen liittyvä varoitus. (Betoniteollisuus n.d. c)

4 RFEM -OHJELMA

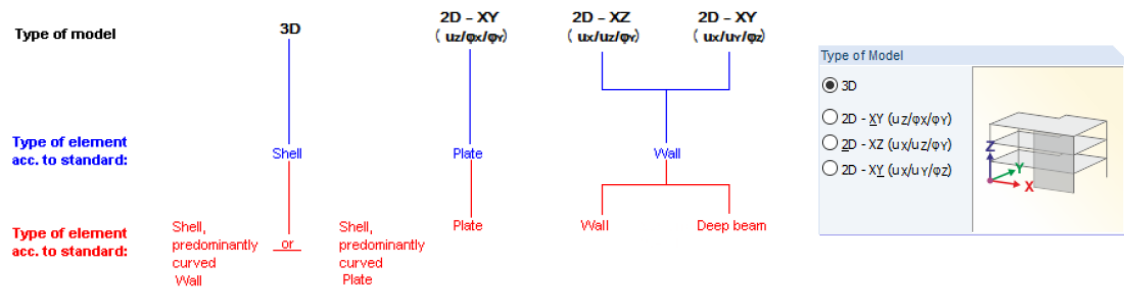
4.1 RFEM, laskenta ja moduulit

RFEM on Saksalais-Tsekkiläisen ohjelmistotoimittajan Dlubal Softwares GmbH:n päätuote ja sitä käytetään rakenteiden laskentaan ja mitoitukseen. Ohjelma perustuu modulaariseen ohjelmistoympäristöön, missä perusohjelmaan voidaan liittää Add-on Modules -lisämoduuleita. Modulaarisen rakenteen ansiosta ohjelmaa voidaan muokata helposti käyttäjien tarpeisiin sopivaksi.

RFEMin pääohjelman perusnäkyvässä rakenteelle annetaan mitat, kuormitus ja materiaali. Pääohjelmalla voidaan laskea muun muassa kuormitusyhdistelmät, taipumat (pois lukien betonirakenteiden taipuma) ja rakenteen rasitukset. Kun perusohjelmaan on määritetty tarvittavat tiedot, valitaan mitoitusta varten lisämoduuli materiaalin mukaan. Näitä materiaaleja on muun muassa puu, teräs ja teräsbetoni. Materiaalin mukaisissa lisämoduuleissa on käytössä kansainväliset standardit. Muilla ohjelmaan liitettävillä lisämoduuleilla voidaan laskea esimerkiksi stabiiliutta ja tehdä dynaamisia analyyseja. (A-Insinöörit. 2016. Luento 0)

Laskenta RFEM:ssä tapahtuu kolmella eri tavalla, joka riippuu rakenteen muodosta. Palkit ja pilarit lasketaan yleensä viivamaisena rakenteena eli sauvaelementtinä. Laattamaisissa rakenteissa laskennassa käytetään erilaisia neliö- ja kolmioelementtejä ja kolmiulotteisissa rakenteissa eri tahokkaita.

Vapausasteet kuvastavat elementin nurkkapisteen siirtymää ja rotaatiota. Sauvaelementeissä rakenteelle annetaan 12 eri vapausastetta, kuusi alkuun ja kuusi loppuun. Kaksiulotteisissa elementeissä solmupisteiden vapausasteet ovat samat kuin sauvaelementeissä. Vapausasteet takaavat sen, että sauva- ja laattaelementit ovat yhteensopivia solmupisteissä. (Dlubal a, 2013, 256–257) RFEM:ssä teräsbetonikuori voidaan käsitellä kolmella eri tavalla: shell, plate ja wall. Mallin asetuksia määriteltäessä tulee valita joko 3D tai 2D -malli. Kuvassa 11 on esitetty vaihtoehdot ja miten se vaikuttaa malliin. On myös suositeltavaa käyttää 3D mallia, koska siinä käsitellään kaikki vapausasteet.

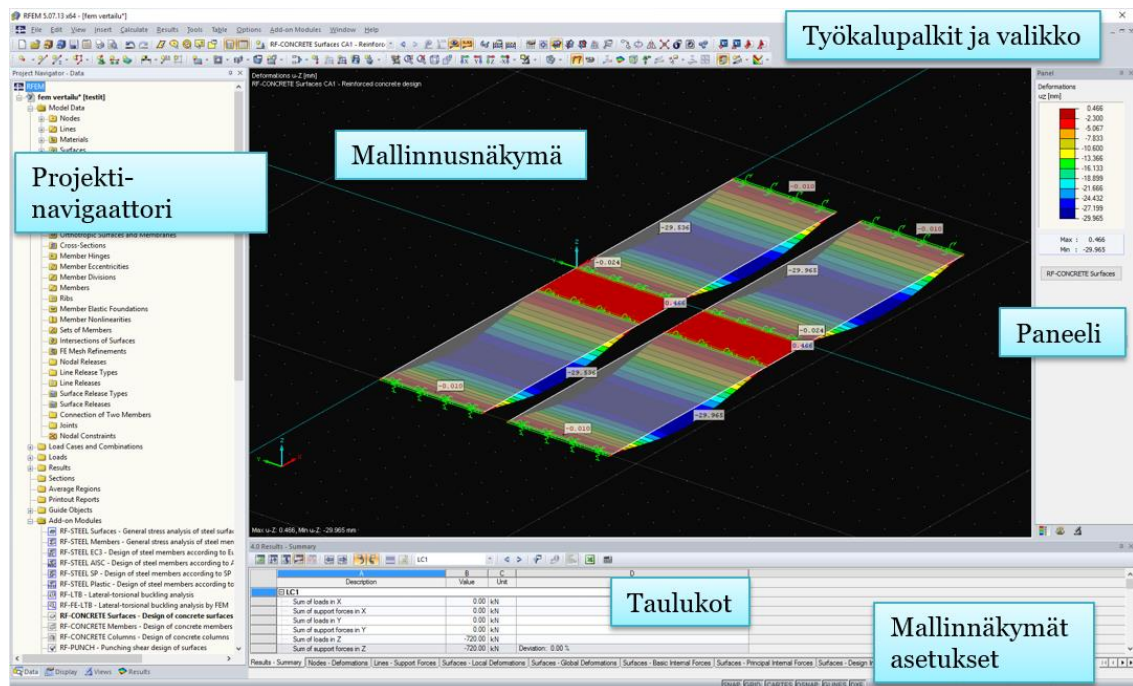


KUVA 11. Mallityypin valinta ja sen vaikutus kuoren tyyppiin.

4.2 Käyttöliittymä

Ohjelman päänäkymä on esitetty kuvassa 12 ja se muodostuu seuraavista viidestä pääkohdasta:

- PROJEKTINAVIGAATTORI
- MALLINNUSNÄKYMÄ
- TAULUKOT
- PANEELI
- TYÖKALUPALKIT JA VALIKKO
- STATUS PALKKI.



KUVA 12. RFEM -ohjelman päänäkymä.

Kuvassa 12 on esitetty projektinavigaattori, mistä voidaan valita mitä mallinnusnäky-
mässä esitetään. Valittavissa on neljä eri välilehtiä: Data, Display, View ja Result -nä-
kymä.

Data -välilehdellä on rakenteisiin ja niiden mallinnukseen liittyvä asiat, kuten linjat, ma-
teriaalit, tasot ja muut vastaavat. Nämä asiat ovat helposti muokattavissa ja helpottavat
mallintamista. Data -välilehti on ohjelman päävalikko, mistä löytyy kaikki avoimena olevat
projektit ja se sisältää myös ohjelman lisämoduulit sekä kokeiluversioita lisämoduuleista,
mitä ei ole hankittu.

Display -välilehdellä muokataan mallinnustilan näkymäasetuksia kuten mallin, kuormien
tai tulosten näkyvyyttä.

View -välilehdellä voidaan tallentaa ja hallita mallinnustilan näkymäasetuksia. Välileh-
deltä löytyy esimerkiksi aikaisemmin tallennetut näkymäasetukset.

Result -välilehdellä on laskennasta saatujen tulosten suodattimet. Suodattimia voidaan
valita esimerkiksi muodonmuutosten, kuormien ja tukivoimien välillä.

Mallinnusnäkyvässä on mallinnettava rakenne ja siihen valitut näkymät projektinavi-
gaattorista. Näkyvässä tehdään kaikki rakenteisiin liittyvä geometrinen muokkaus.

Taulukko ikkunassa voidaan tarkastella ja muuttaa kaikkea rakenteeseen kuuluvaa dataa.
Taulukossa on neljä pääkohtaa jotka ovat mallin data, kuormitustapaukset ja -yhdistelmät,
kuormat ja tulokset. Mallin data -taulukosta voidaan muuttaa kaikkea malliin liittyvää,
esimerkiksi mallin geometriaa, materiaaleja, tukien paikkoja ja jäykkyyksiä sekä raken-
teen poikkileikkausta. Kuormitustapaukset ja yhdistelmät -taulukossa määritetään ni-
mensä mukaisesti mallin kuormitukset ja niiden yhdistelmät. Kuormitus -taulukossa voi-
daan määrittää rakenteille kuormia, jotka voidaan kohdistaa pisteeseen, rakenneosaan,
linjalle, pinnalle tai kappaleelle. Kuormitus -taulukossa voidaan myös antaa rakenteille
epäkeskisyyttä tai epätäydellisyyttä. Tulokset -taulukossa näkyy muun muassa lasken-
nassa saadut rakenteen kuormat, muodonmuutokset ja sisäiset voimat. Taulukoita voi-
daan myös tuoda tai viedä esimerkiksi Exceliin.

Paneeli -ikkuna tulee näkyviin päänäkymän oikeaan laitaan, kun tarkastellaan tuloksia tai
kuormia. Paneelissa on valitun kuormituksen tiedot sekä tulosten skaalaus.

Työkalupalkissa on RFEM -ohjelman käytön kannalta tärkeimmät pikapainikkeet tarvittaviksi. Työkalupalkkia on mahdollista muokata käyttäjäkohtaisesti. Valikkorivillä on kaikki valittavissa olevat työkalut, näkymät ja asetukset.

Statuspalkki koostuu kolmesta eri osasta. Vasemmalla näkyvässä osassa ohjelma ilmoittaa, mikä työkalu on valittuna ja mitä seuraavaksi on tehtävissä. Keskellä on mallinnusnäkökulman verkkoasetukset, jossa voi säätää mallin ruudun päälle, hiiren osuvuus ruudun reunoihin tai mallissa oleviin objekteihin. Oikeassa laidassa näkyy osoittimen sijainti koordinaatistossa ja koordinaatiston suunta.

4.3 Mallintaminen

RFEM:ssä laskentamalli tehdään ohjelmassa joko itse tai tuodaan ohjelmaan mallinnusohjelmasta, kuten Tekla Structuresista. Mallintaminen tapahtuu ohjelmassa viivoja, pisteitä, pintoja tai kolmiulotteisia rakenteita piirtämällä. RFEM:ssä on myös mahdollisuus luoda valmiita rakenteita ja rakennuksia, kuten halleja, jatkuvia palkkeja tai kattoja, suoraan ohjelman omalla rakenteiden luontiohjelmalla.

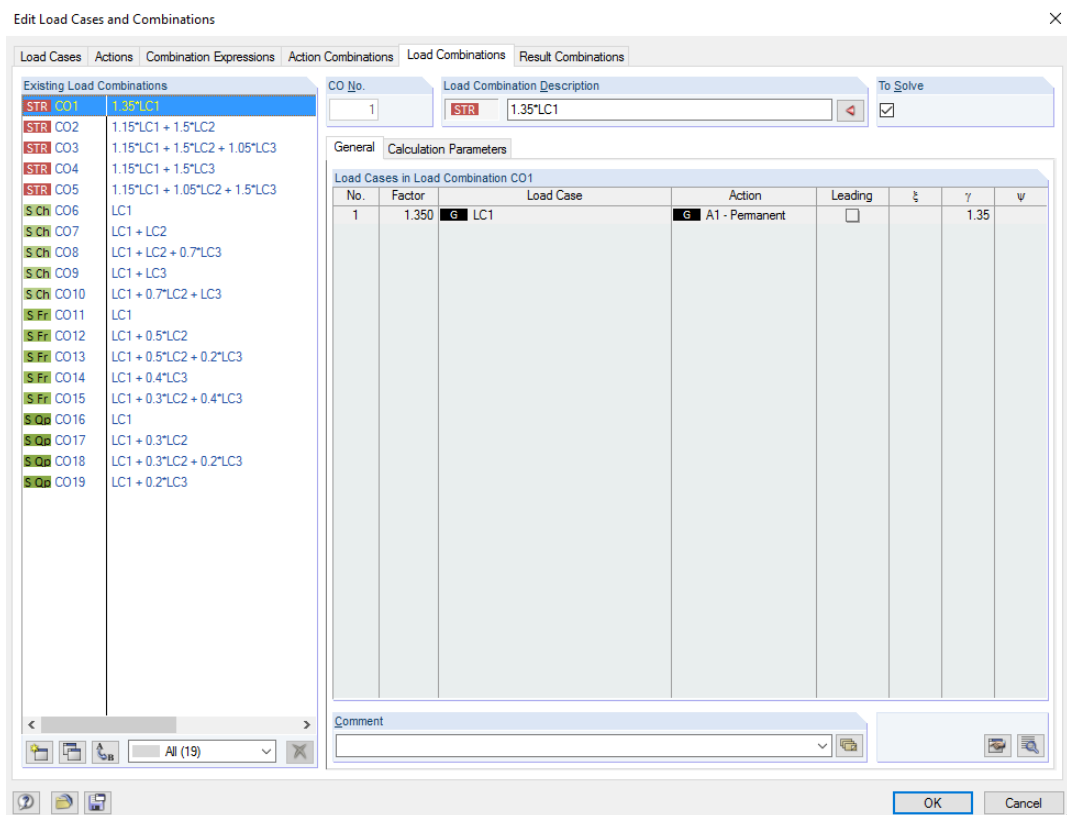
Laskentamalli on aina yksinkertaistus rakenteiden todellisesta toiminnasta. Rakenteissa on oltava tarkkana varsinkin liitoksissa, sillä ei vain riitä, että rakenne on oikean kokoinen ja muotoinen. Jokaisessa liitoksessa on myös mietittävä onko liitos nivelinen, jäykkä tai siltä väliltä.

Mallissa on myös määritettävä tukien sijainti, sillä ilman niitä rakenne pyörisi vapaasti ja rakennetta ei voitaisi laskea. RFEM:ssä on kolme erilaista tukityyppiä: piste, viiva ja alue-tuki. Tuille voidaan määrittää erilaisia vapausasteita tai ne voidaan vaihtaa jousiksi, joille annetaan omat jousivakiot. Tukia voidaan vaihtaa myös esimerkiksi vastaamaan alapuolella olevaa seinää tai pilaria.

4.4 Kuormat ja kuormitusyhdistelmät

Rakenteelle määriteltävät kuormat voidaan asettaa joko mallinnusnäkyssä tai luoda automaattisesti RFEM:in valmiilla kuormien luonti työkalulla. Ennen kuormien syöttämistä on tehtävä kuormitus tapaukset, joihin kuormat määritellään. Kuormitustapaus voi pitää sisällään useamman kuorman. Kuormat voidaan antaa isoina kokonaisuuksina ja ohjelma jakaa ne laskentasolmuille ja elementeille sekä kokoaa kuormavektorin.

Kuormitusyhdistelmät voidaan RFEM:ssä määrittää joko itse tai antaa ohjelman tehdä ne kansallisten liitteiden mukaan. RFEM:ssä on kaksi eri vaihtoehtoa kuormitusyhdistelmien luomiseen: kuormitus- ja tulosityhdistelmät. Kuormitusyhdistelmä sopii epälineaariseen laskemiseen ja on tarkempi laskentatapa, mutta on myös ohjelmallisesti raskaampi. Tulosityhdistelmä sopii ainoastaan lineaariseen laskentaan, jossa voimasuureet yhdistetään superpositioperiaatteella annettujen yhdistelysääntöjen mukaan. Kuvassa 13 on esitetty RFEM:in kuormitusyhdistelmä -ikkuna, jossa ohjelma on automaattisesti laskenut kaikki kuormitusyhdistelmät.



KUVA 13. RFEM:in kuormitusyhdistelmä välilehti.

4.5 Tulosten käsittely

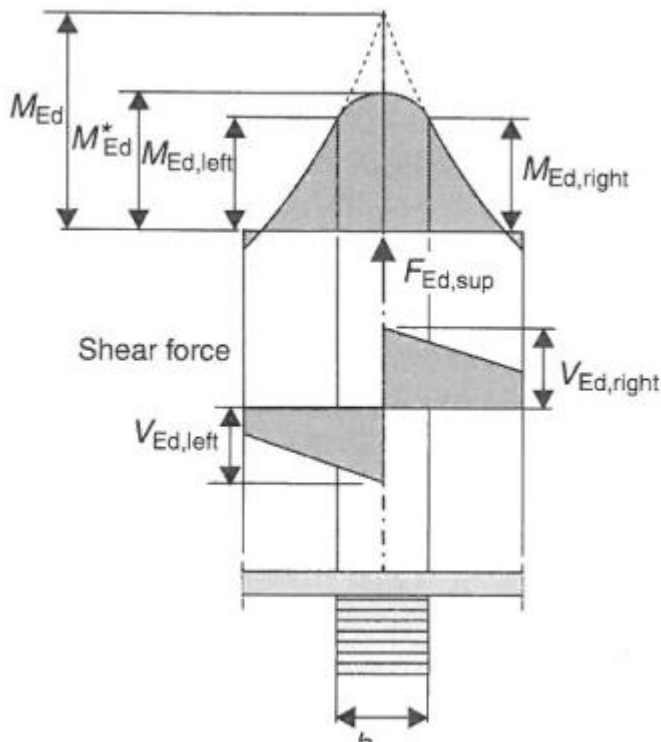
Kun kaikki tuet on määritetty paikoilleen ja malli tarkistettua siten, että se on mahdollista laskea, voidaan laskenta aloittaa. Tuloksia voidaan tarkastella joko mallinnusnäkyvässä, taulukko -ikkunassa tai tulosdiagrammeista. Mallissa näkyviä kuormia ja muodonmuutoksia voidaan vaihtaa projektinavigointivälilehdeltä. Kuormia voidaan selata myös taulukkoikkunassa, josta ne voidaan viedä taulukkolaskentaohjelmaan.

5 MURTORAJATILATARKASTELU

5.1 Tulosten tulkinta ja käsittely

5.1.1 Vertailu normien ja kirjallisuuden välillä

Kun laatta on jatkuva tuella, joka toimii nivelenä, voidaan tuen keskilinjän kohdalla saattaa momenttia pienentää määrällä elementtirakenteissa $F_{Ed,sup}t/8$, jossa $F_{Ed,sup}$ on seinän kohdalla olevan tukireaktion mitoitusarvo ja t on tuen leveys. Paikallavaletuissa laatoissa voidaan pienentää tuen kohdalla vaikuttavaa momenttia arvolla $F_{Ed,sup}t/4$. Kuvassa 14 on esitetty momenttihuipun tasauksen periaate. (Rombach G.A. 2011, 185)



KUVA 14. Momenttihuipun tasaus. (Rombach G.A. 2011, 185)

Rakentajain kalenterissa lasketaan momentti M_d tuen kohdalla kaavalla 7.

$$M_d = M_{max} - V_{min} \frac{b_s}{2} \quad (7)$$

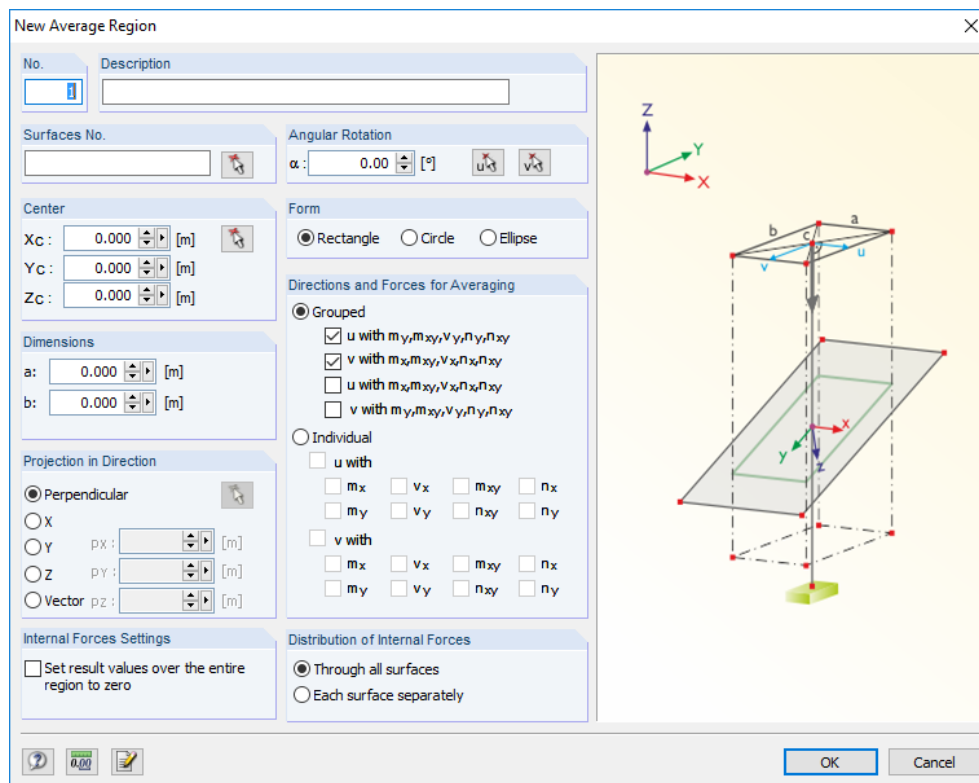
missä M_{max} on taivutusmomentin itseisarvo tuen keskellä. V_{min} on itseisarvoltaan pienempi leikkausvoimista ja b_s on tuen leveys. (Rakentajain kalenteri. 1991, 444-446)

5.1.2 Singulariteettiongelma

Singulariteettiongelma kuvastaa tietyn pisteen merkittävästi suurempi jännitystila, joka ei vastaa todellisuutta vaan kasvaa rajatta elementtiverkon tihentyessä. Singulariteetti on yleinen ongelma ja sitä esiintyy hyvin usein seuraavissa paikoissa:

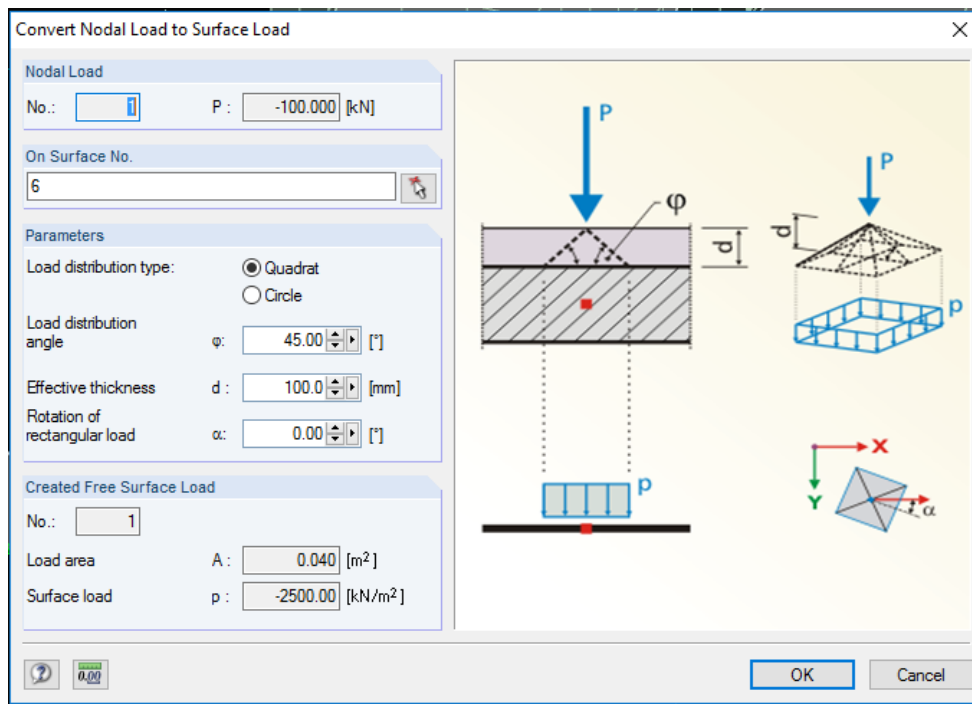
- seinät, jotka loppuvat laatan sisällä
- epäjatkuvissa viivatuissa
- pistetuissa
- aukoissa
- sisänurkissa
- pistemäisissä kuormissa.

Yleisin ratkaisu näihin ongelmiin on asettaa singulariteettiongelman alueelle voimia ta-
saava keskiarvoalue. Alueelle annetaan keskipiste, geometria ja mihin tasoihin ja kuor-
miin se vaikuttaa. Kuvassa 15 on esitetty kyseinen RFEM:in kuormien tasaus -ikkuna.
RF-Concrete Surface lisäosan käytössä on asetettava erikseen kyseessä olevan kuormien
tasauksen erikseen päälle.



KUVA 15. RFEM:in singulariteetti ongelman tasaus.

Pistekuormasta johtuvaa singulariteettiiongelmaa voidaan vähentää RFEM:ssä vaihtamalla kuorma pintakuormaksi. Kuormaa muutettaessa ohjelmalle annetaan tulevan alueen geometria ominaisuudet. Kuvassa 16 on esitetty pistekuorman muuntaminen pintakuormaksi.



KUVA 16. Pistekuorman muuntaminen pintakuormaksi.

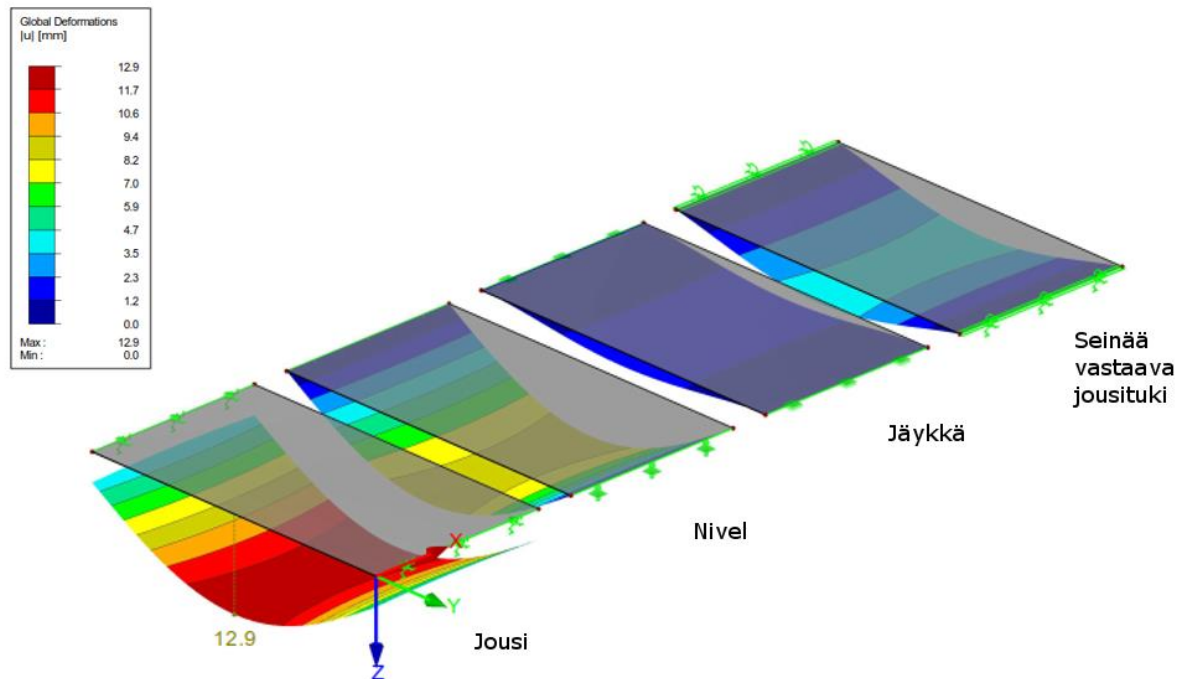
5.2 Tukiehtojen vaikutus FEM-laskennassa

5.2.1 Tukiehtojen määrittäminen

Paikallavalurakenteissa laatat liittyvät saumattomasti seiniin ja palkkeihin, mutta laattojen voimasuureiden kannalta tukia voidaan käsitellä nivellisinä tai jatkuvina ilman, että seinien kiertymisjäykkyyttä otetaan huomioon. Sen sijaan kiinnityksien vaikutukset kannattaa ottaa huomioon seiniä ja palkkeja mitoittaessa. (Suomen Betoniyhdistys ry. 2008, 397)

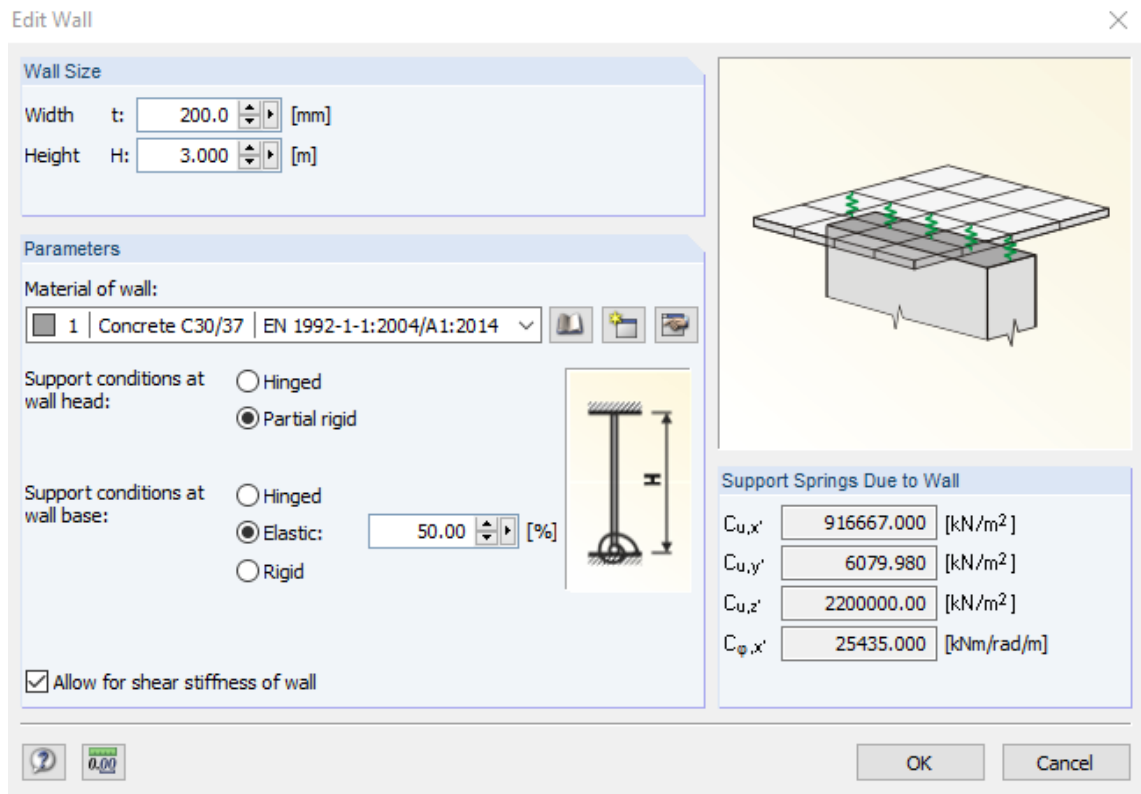
RFEM -ohjelmassa on useita eri tapoja määrittellä rakenteen tuenta. Laattojen tuenta vaikuttaa laskennan lopputulokseen huomattavasti, sillä esimerkiksi viivatuki, jossa kiertyminen on vapautettu, antaa laatan uloimman reunan pyöriä vapaasti verrattuna täysin jäyk-

kään tukeen. Todellisuudessa tuki on jäykän ja nivelisen tuen väliltä. Kuvassa 17 on esitetty neljän laatan taipuma eri tukiehdoilla. Laatat ovat samankokoisia ja niiden kuormitukset ovat identtisiä.



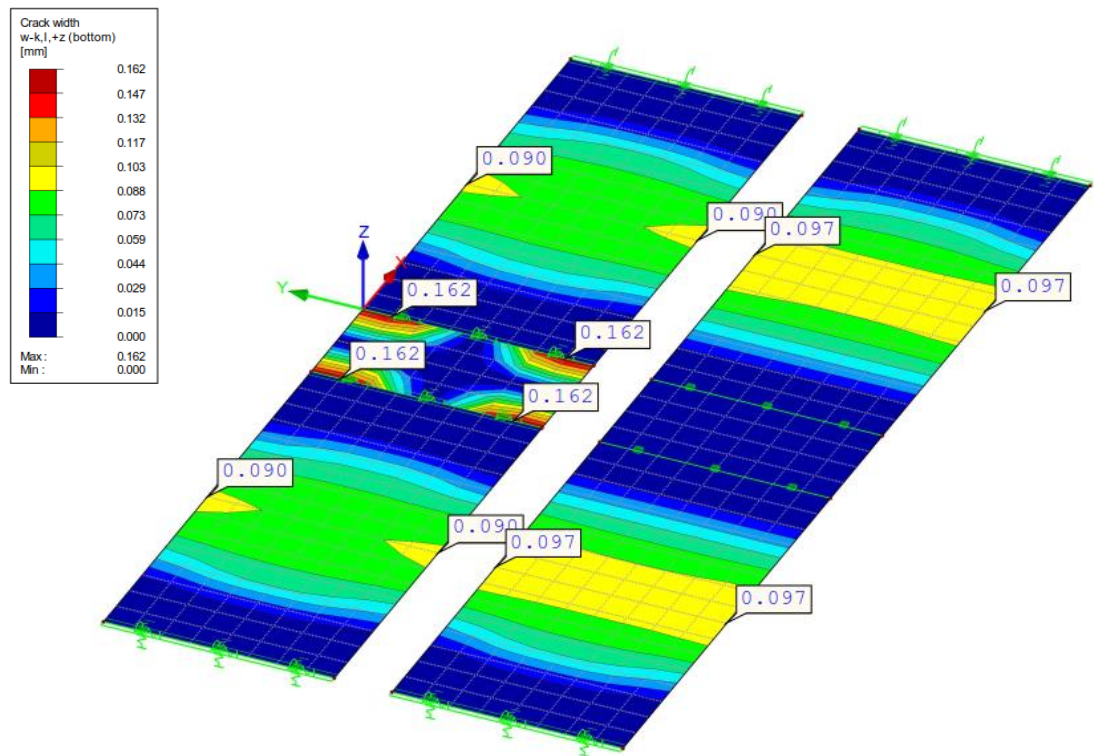
KUVA 17. Tukien vaikutus laatan taipumaan.

RFEM:ssä on mahdollista käyttää alapuolista seinää vastaavaa jousitukea, jolle ohjelma määrittää jousivakiot tueksi riippuen seinän geometriasta, materiaalista ja tuennasta. Kuvassa 17 on neljä laattaa, joista oikeanpuoleinen on tuettu käyttäen RFEM:ssä olevaa työkalua, jolla voidaan määrittää tuelle tietyt jäykkyyssasteet. Kuvasta 17 selviää, että laatan taipuma asettuu nivelisen ja jäykän laatan välimaastoon, kun käytetään kyseessä olevaa työkalua. Kuvassa 18 on esitetty RFEM:in ikkuna seinätuesta.



KUVA 18. Laatan tuenta seinää vastaavalla jousituella.

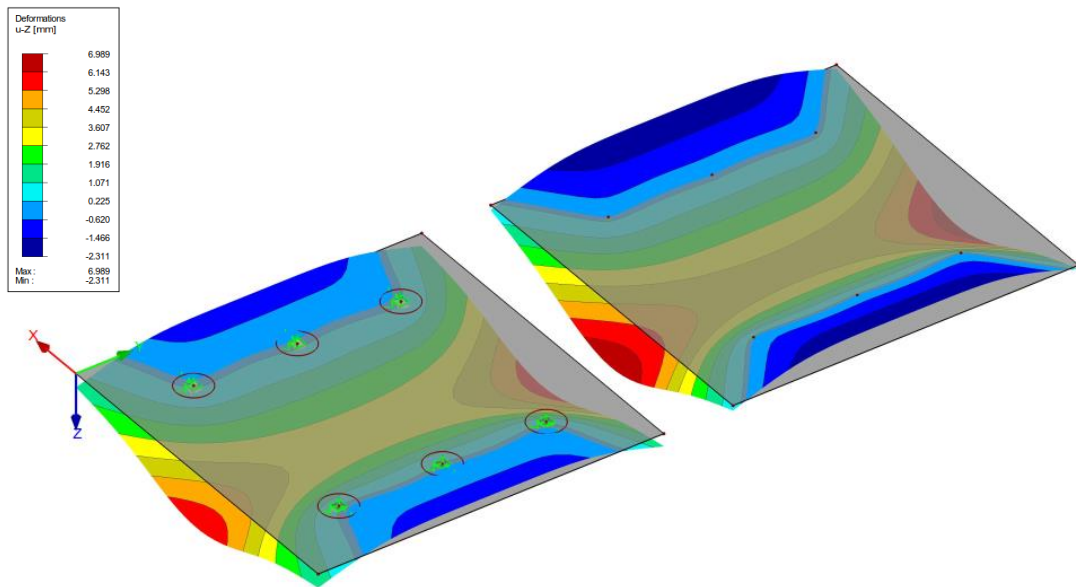
Tukien määrittämisessä on myös mietittävä, voiko laatta liukua tuen suunnassa. Mikäli tuen liukuminen on estetty laattaan suunnassa, voi tuen lähelle syntyä tarkoituksenmukaisettomia halkeamia ja voimia. Kuvassa 19 on havainnollistettu kyseessä olevaa vaikutusta laatan halkeamaleveyksiin. Kuvassa oikeainpuoleisen laatan keskituille on sallittu liukuminen x ja y suunnassa ja vasemmanpuoleisen laatan tuentaan on käytetty RFEM:in laskemaa seinän jousivakiota.



KUVA 19. Pitkittäinen halkeiluleveys laatan alapinnassa.

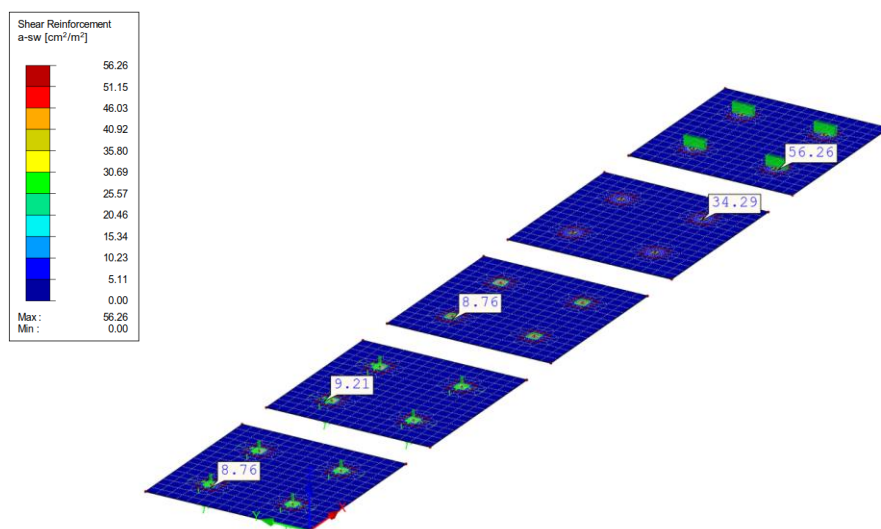
5.2.2 Pilarin yläpään vaikutus laattaan

RFEM:ssä pilareiden yläpää asettuu yleensä yhteen solmupisteeseen. Ohjelmassa on kuitenkin mahdollista vaihtaa pilarin yläpään levy, joka esittää pilarin yläpään kimmoisen tuennan pintaa laatan sisällä. Toinen mahdollisuus on asettaa piste, jossa on muunneltu elementtiverkko ympärillä. Nämä asetukset ehkäisevät singulariteettiongelman syntymistä laskennassa. Kuvassa 20 on esitetty kaksi laattaa, joista toinen on tuettu levyllä ja toinen on kiinni yhdessä elementin solmupisteessä. Solmukohtaan voidaan asettaa myös samanlaiset jouset kuin seinän yhteydessä. Pilarissalaatoissa esiintyy yleisesti singulariteettiongelmaa, joten pilarissa muunnellun tuennan käyttö on suositeltavaa.



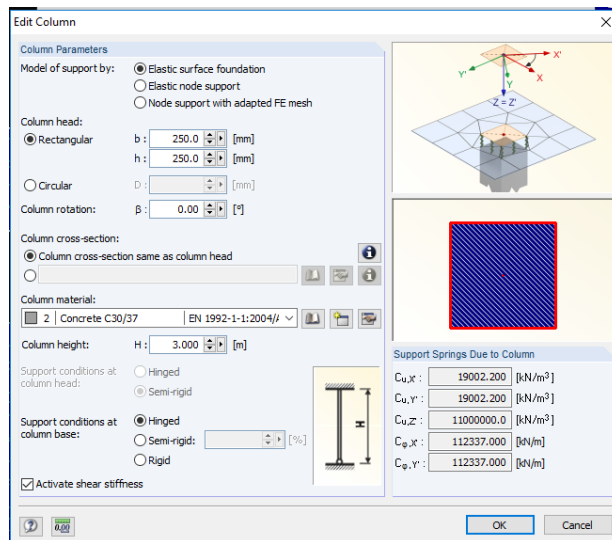
KUVA 20. Pilarin tukipisteen vaikutus laatan taipumaan.

Pilareiden tukemassa laatasta voidaan käyttää erilaisia tukiehtoja, jotka ovat esitetty kuvassa 21. Kuvassa on esitetty viisi eri tapausta sekä niiden vaatimat leikkausraudoitukset. Kuvassa kaikissa laatoissa on identtinen geometria ja kuormitus. Kahdessa taaimmaisessa laatasta on selvästi suuremmat vaatimukset raudoitukselle, mikä todennäköisesti johtuu singulariteettiongelmasta. Näissä kahdessa viimeisessä laatasta on käytetty piste ja jäykkää tukea



KUVA 21. Pilarin yläpään vaikutus leikkausraudoitukseen.

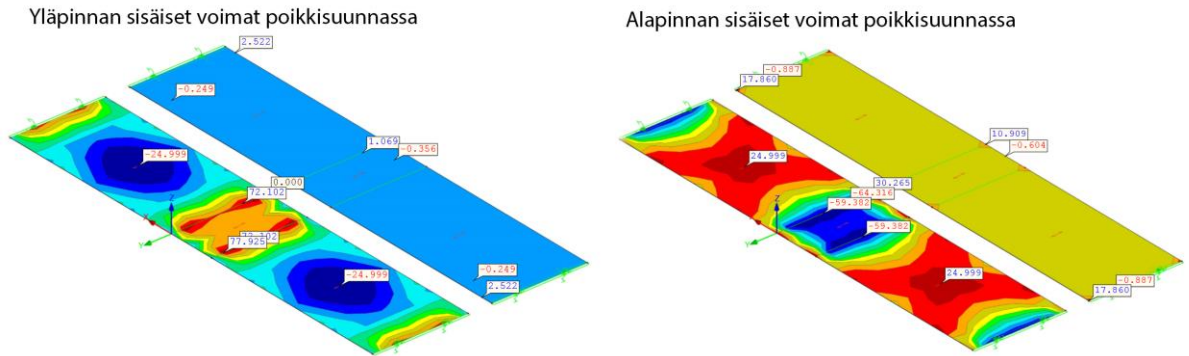
Kuvassa 21 kolme ensimmäistä laattaa on tehty käyttäen RFEM:in omaa joustavaa pila-ritukea, jolle ohjelma laskee jäykkyyden, kuten viivatuessa seinälle. Ohjelmassa on mahdollisuus valita tuki kolmesta eri vaihtoehdosta: elastinen pintatuki, elastinen pistetuki ja piste, jolle ohjelma lisää muunnellun elementtiverkon. Kuvassa 22 on esitetty kyseessä olevat tukivaihtoehdot ja valittavat parametrit.



KUVA 22. Tukivaihtoehdot ja niiden parametrit.

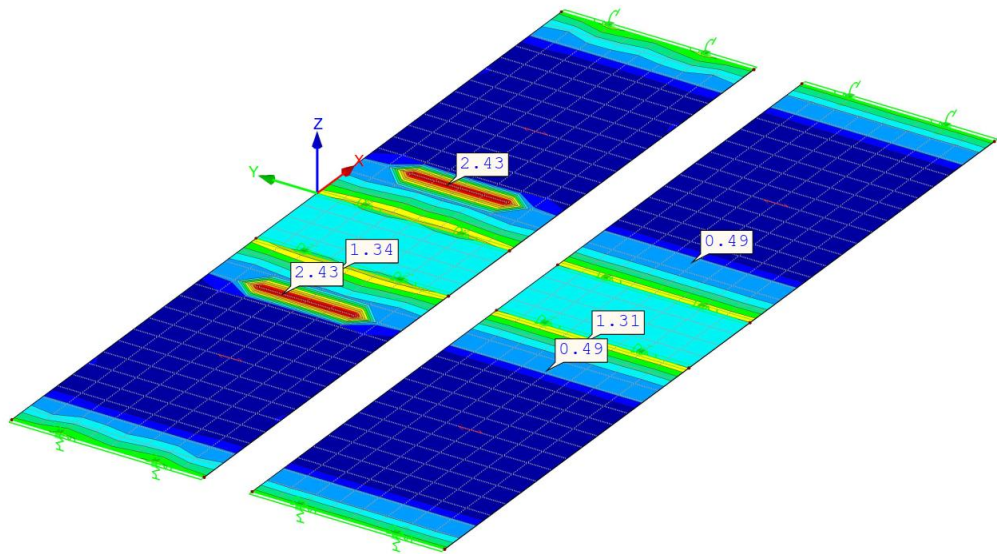
5.3 Suppeumaluku

Suunnittelija joutuu määrittämään monia eri parametrejä mitoittaessaan rakenteita. Yksi mitoituksessa pääteltävä parametri on suppeumakerroin, johon eurokoodit antavat raja-arvot nolasta 0,2:een. RFEM:ssä on betonille annettu valmiiksi arvo 0,2 mutta tätä lukua vaihdettaessa laatan taipuma muuttuu noin 1%. Eurokoodeissa 0,2 suppeumakerroin tarkoittaa halkeamatonta betonia ja 0 halkeillutta betonia. RFEM:ssä on suositeltavaa pitää tämä arvo 0,2:ssa, paitsi joissain tapauksissa vakio saattaa tuottaa yksinkertaisesta statiikkasta poikkeavia jännityksiä. Kuvassa 23 on esitetty suppeumakerroimen vaikutus laatan sisäisiin voimiin sen poikkisuunnassa ala- ja yläpinnassa.



KUVA 23. Suppeumaluvun vaikutus laatan sisäisiin voimiin.

Suppeumakertoimen vaikutus poikittaiseen raudoitukseen laatan yläpinnassa on esitetty kuvassa 24. Laatoissa on käytetty suppeumakerrointa nolla ja 0,2. Vasemman puoleisessa laatasta ohjelma asettaa momentin nollakohtaan minimiraudoituksen kun suppeumakerroin on 0,2. Mitoituksessa on tulkittu pääjännityssuunta ja sen myötä minimiraudoitus on ohjelman algoritmin perusteella paikallisesti väärin.



KUVA 24. Suppeumaluvun ja minimiraudoituksen vaikutus laatasta.

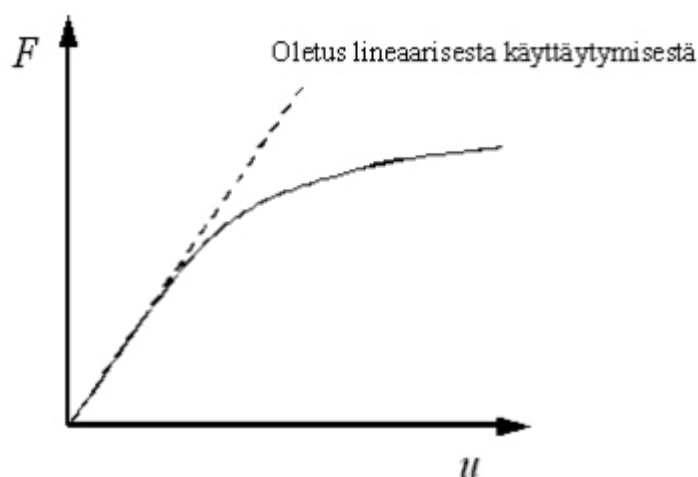
6 KÄYTTÖRAJATILATARKASTELU

6.1 Laattojen taipuma epälineaarilla menetelmällä

6.1.1 Teoria

Siirtymätilalla tarkoitetaan rakenteen siirtymän määrää suhteessa suunniteltuun linjaan. Rakenneosan tai rakenteen siirtymätila ei saa olla sellainen, että se haittaa rakenneosan tai rakenteen tarkoituksenmukaista toimintaa tai ulkonäköä. Rakenteen ulkonäköä ja yleistä käyttökelpoisuutta voi heikentää, kun laskettu taipuma pitkäaikaiskuormien vallitessa ylittää arvon $L/250$, jossa L on rakenteen jännemitta. (SFS 1992-1-1. 2007, 126) Rakentamisen jälkeiselle pitkäaikaiselle taipumalle käytetään rajaa $l/500$, jos siihen liittyy taipumille herkkiä osia.

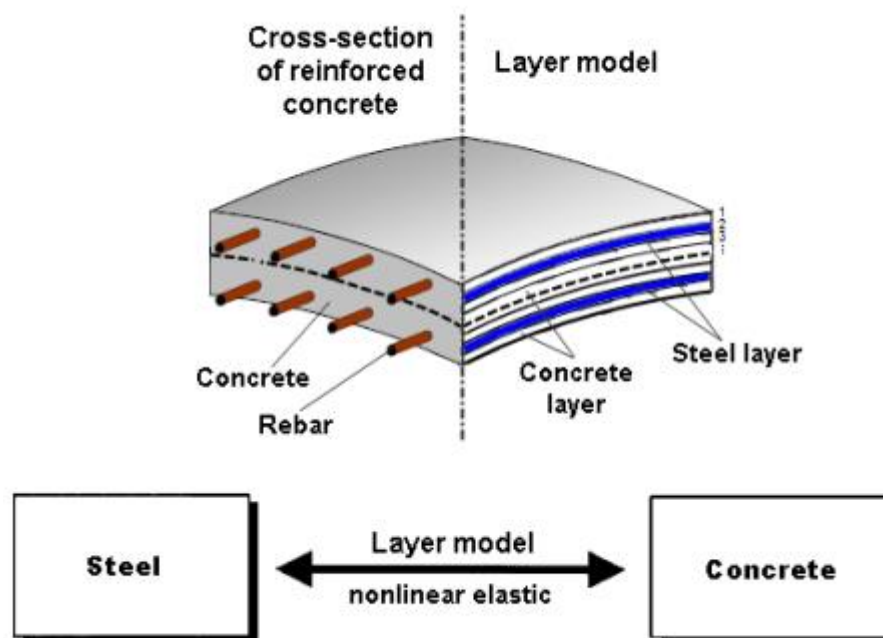
Yleensä rakenteiden oletetaan käyttäytyvän lineaarisesti, eli ulkoisen kuormituksen muuttaminen muuttaa myös rakenteen siirtymiä ja jännityksiä samassa suhteessa. Kun teräsbetonirakennetta kuormitetaan, rakenteen siirtymä kasvaa kuitenkin epälineaarisesti. Epälineaarissa laskennassa menetelmä ottaa huomioon sisäisten voimien määrittämisen ja muodonmuutoksen. Kuvassa 26 on esitetty epälineaarinen voima-siirtymä käyrä, joka edustaa eri voimatasapainotiloja sekä tasapainotilassa olevan rakenteen voiman ja siirtymän välistä riippuvuutta.



KUVA 25. Epälineaarinen voima-siirtymä käyrä.

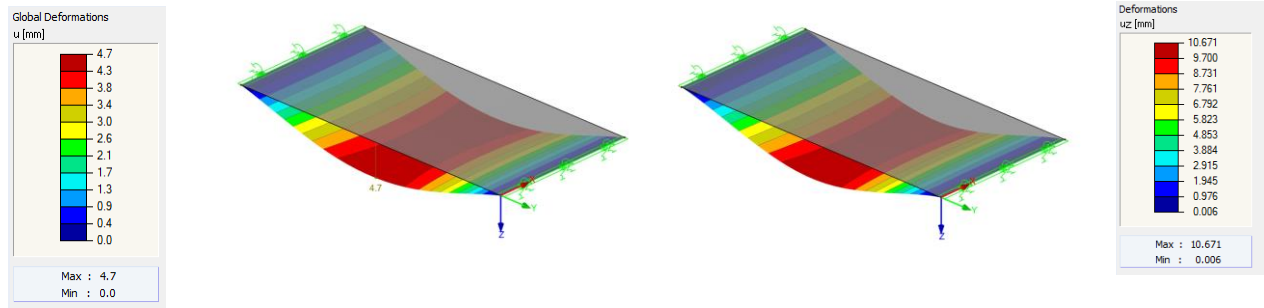
Jotta saataisiin selville kuormitusten lopullisia arvoja vastaavat siirtymät ja jännitykset, epälinearisessa laskennassa on käytettävä niin sanottua kuormituksen askellusta. Tällöin kuormitus lisätään riittävän pieninä askeleina ja jokaisella kuormitusaskeleella etsitään rakenteen tasapainotila iteroimalla (Elementtimenetelmän perusteet n.d.).

Laattarakenteissa malli voidaan kuvata kaksiulotteisena rakenteena seuraavien muuttujien tilafunktiona: pintakuorma, muodonmuutokset, sisäiset voimat ja venymä pinnan keskialueella. Epälinearisessa teräsbetoni mallissa täytyy ottaa huomioon materiaaliominaisuudet jotka vaihtelevat pinnan syvyys suunnassa. Tästä syystä 2D-mallissa on otettava huomioon rakenteen syvyys poikkileikkauksessa. Teräsbetonin poikkileikkaus jaetaan laskennassa suunnittelijan määrittelemään betoni- ja terästasoja. Kuvassa 27 on esitetty epälineaarisen laskentamallin tasot. (Dlubal b. 2013, 107–108.)



KUVA 26. Teräsbetonirakenteen tasojen jakaantuminen. (Dlubal 2013. b, 108)

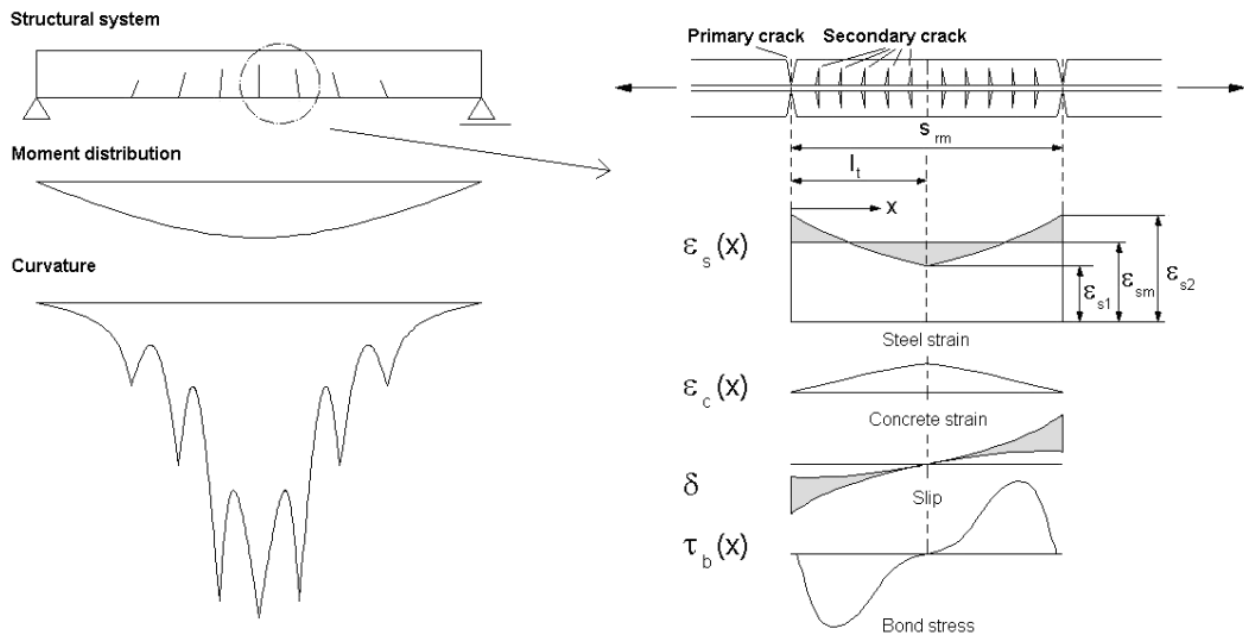
RFEM:ssä ohjelma laskee laatan sisäiset voimat, jonka jälkeen vasta RF-CONCRETE Surface lisäosassa lasketaan laatan taipuma epälinearisesti. Kuvassa 28 on esitetty kaksi tapausta, jossa oikea kuva esittää epälinearisella materiaalimallilla laskettu ja vasen lineaarisella. Esimerkissä laatan taipuma on kaksi kertaa isompi epälinearisella menetelmällä laskettuna verrattuna lineaariseen laskentaan



KUVA 27. Laatan taipuma epälineaarilla laskentamallilla ja ilman.

6.1.2 Betonin vetolujuus ja vetojäykistyminen

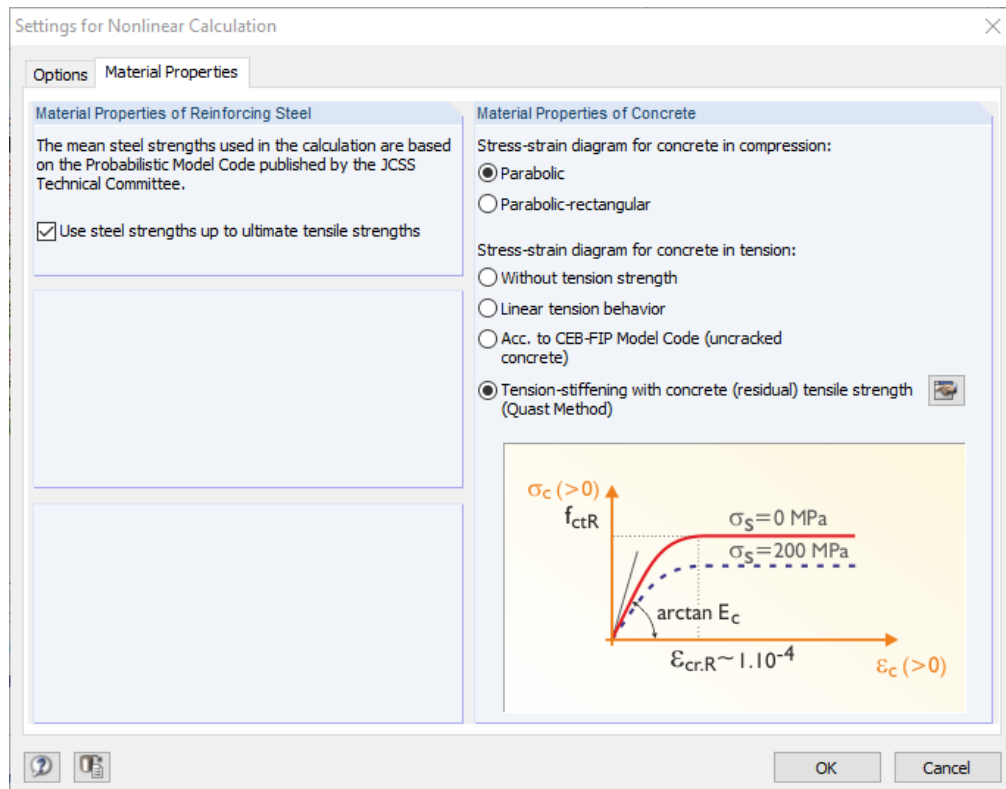
Teräsbetonirakenteen halkeavilla osilla vetoa vastustaa ainoastaan betonissa oleva teräs. Kahden halkeaman välillä vetovoima kuitenkin siirtyy betoniin. Tästä johtuen betoni on osallisena sisäisten voimien vastustamisessa, joka johtaa korotettuun jäykkyyteen rakenteessa verrattuna täysin halkeilleeseen poikkileikkaukseen. Kuvassa 29 esitetään periaatekyseisestä jäykkyyden lisäyksestä halkeamien välillä. (Dlubal. 2013. b, 115)



KUVA 28. Betonin halkeilu rakenteessa. (Dlubal 2013. b, 115)

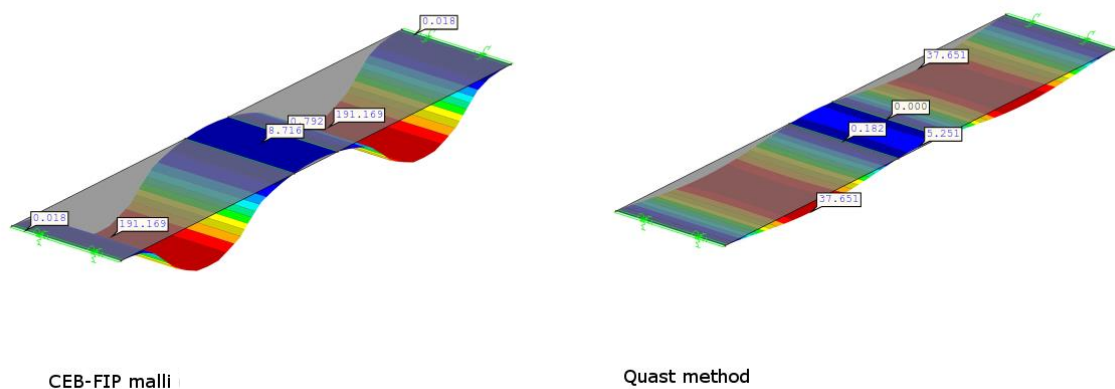
Epälineaarissa menetelmässä käytetään betonin puristuksen laskennassa joko parabolista tai parabolinen-neliö jännitys-venymäkuvaaja. Betonin ollessa vetorasituksen alaisena, voidaan sille määrittellä neljästä eri jännitys-venymäkuvaajasta sen vetojäykistys tai

vetolujuus. Kuvassa 30 on esitetty jännitys-venymä käyrät betonin puristukselle ja vedolle.



KUVA 29. RFEM:in jännitys-venymä käyrä betonille.

Epälineaarisisessa laskennassa on suositeltavaa käyttää viimeistä kohtaa betonin vetojäykistyksessä kuvan 30 ikkunasta. Kuvassa 31 on esitetty kahden viimeisen vaihtoehdon vaikutus laatan taipumaan. Kuvassa vasemmalla on CEB-FIP malli, jossa ei ole huomioitu vetojäykistystä, sekä vetojäykistykseen huomioiva Quast method. Laskennassa suositellaan käyttämään vetojäykistykseen huomioivaa Quast methodia.



KUVA 30. Vetojäykistykseen huomioiminen laatan taipumassa.

6.1.3 Kutistuma ja viruma

Viruma voidaan määrittellä virumaluvun avulla, johon eurokoodeissa annetaan kaksi eri vaihtoehtoa. Virumaluku voidaan määrittää joko laskemalla tai kuvaajasta määrittämällä. RFEM:ssä viruma saadaan laskettua RF-CONCRETE Surface lisäosalla. Ohjelma ottaa viruman huomioon käyttäen virumalukua $\varphi(t, t_0)$ ajanhetkellä t . Virumaluvun voi määrittää myös käsin. Ohjelmaan voi lisätä myös ilman suhteellisen kosteuden sekä sementtityypin. Kuvassa 32 on esitetty RF-CONCRETE:n virumataulukko ja kuvassa 33 on esitetty viruman vaikutus muodonmuutoksiin.

Settings for the check of serviceability limit state - Surface No. 6-9

Creeping Parameters

Calculation time:

Infinite

t : 25500 [Days]

Concrete age at beginning of loading

t₀ : 28 [Days]

Relative air humidity

RH : 50 [%]

Type of cement:

Slow-hardening cement (S) : CEM 32,5 N

Normal-hardening cement (N) : CEM 32,5 R, CEM 42,5 N

Rapid-hardening cement (R) : CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R

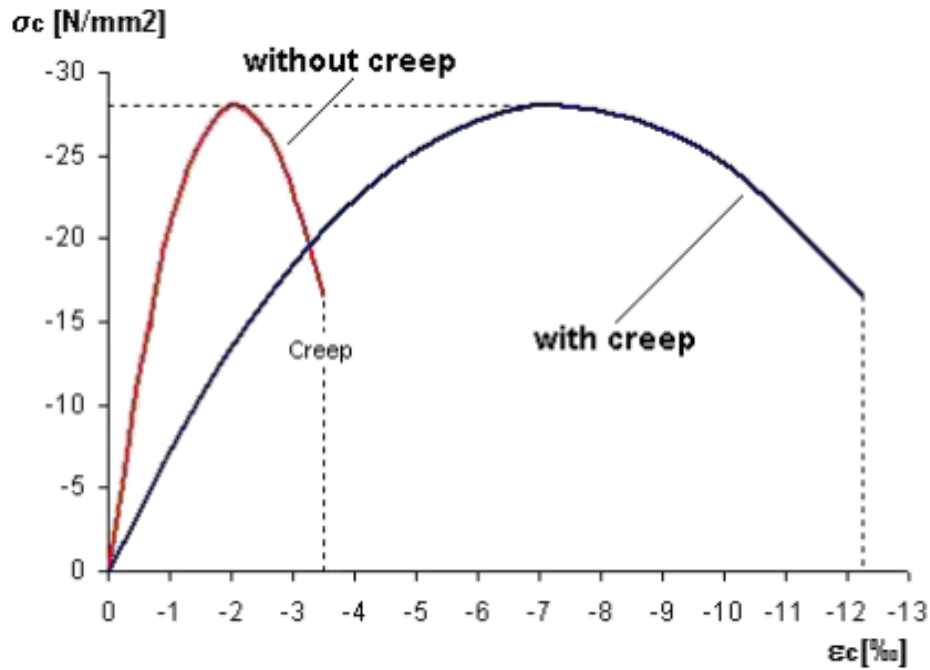
User-defined creep coefficient

φ : 2.24886 [-]

Set input for surface No.:

6-9 All

KUVA 31. RFEM:in RF-Concrete lisäosan virumataulukko.



KUVA 32. Viruman vaikutus rakenteen muodonmuutokseen. (Dlubal 2013. b, 122)

Kutistuma kuvaa ajasta riippuvaa muutosta rakenteen massassa ilman ulkoisen voiman tai lämpötilan vaikutusta. Kutistumaan vaikuttaa muun muassa rakenteen ulkopuolinen suhteellinen kosteus, rakenteen tehokas paksuus, runkoaine, betonin lujuus, vesi-sementti suhde ja kuivumisen aika. Kutistuman arvo esitetään kutistumana $\varepsilon_{c,s}(t, t_s)$ ajanhetkellä t .

RFEM:ssä on myös mahdollista lisätä kutistumasta aiheutuva kuormitus rakenteelle ilman RF-Concrete Surface lisämoduulia. Kuormitus lisätään kutistumarasitus -ikkunassa, jonne rakenteelle määritetään samat asiat kun lisämoduulissa. Tätä kuormitusta ei tarvitse määrittää, mikäli on käyttämässä RF-Concrete Surface lisämoduulia, sillä lisämoduuli laskee itse kutistumasta aiheutuvan kuorman. Määrittämiseen tarvittavat tiedot ovat esitetty kuvassa 34.

Generate Surface Load Due to Shrinkage

According to Standard
 DIN 1045-1
 EN 1992-1-1:2004-12 (Eurocode 2)

Consider
 Drying shrinkage
 Autogenous shrinkage

Shrinkage Parameters
 Considered age of concrete t : 5000 [Days]
 Notional size of surface h : 0.250 [m]
 Mean compressive strength f_{cm} : 3.80 [kN/cm²]
 Type of cement C.Type: N
 Relative humidity RH: 50.00 [%]
 Age of concrete at beginning of shrinkage t_s : 28 [Days]
 Calculated shrinkage $\epsilon_{cs}(t, t_s)$: -0.00042 []

Schematic Drawing of Time Depending Autogenous and Drying Shrinkage

OK Cancel

KUVA 33. RFEM:in kutistumarasitus -ikkuna.

6.1.4 Halkeilu

Halkeilulla on suuri merkitys raudoituksen määrittämisessä, sillä se yleensä määrittää rakenteeseen tulevan teräksen määrän. Halkeilua tapahtuu betonissa koko sen käyttöiän aikana, joten se on otettava huomioon myös laskennassa. RFEM:ssä voidaan määrittellä halkeaman maksimi leveys joko itse tai eurokoodien mukaisesti. Taulukossa 4 on esitetty eurokoodien w_{max} suositusarvot millimetreissä ja taulukossa 5 on Suomen rakennusmääräyksen mukaiset suositusarvot. Kuvassa 35 on esitetty RFEM:in halkeamaleveyden maksimiarvo -ikkuna.

TAULUKKO 4. Halkeamaleveyden w_{max} suositusarvot eurokoodien mukaan. (SFS 1992-1-1. 2007, 118)

Rasitusluokka	Teräsbetonirakenteet ja tartunnattomat ankkurijännerakenteet	Tartuntajännerakenteet ja injektoidut ankkurijännerakenteet
	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä	Tavallinen kuormayhdistelmä
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Vetojännityksetön tila
HUOM. 1 Rasitusluokkien X0 ja XC1 yhteydessä halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen, ja tämä raja on asetettu, jotta tavallisesti saavutetaan kelvollinen ulkonäkö. Jos ulkonäköehtoja ei aseteta, tätä rajaa voidaan väljentää.		
HUOM. 2 Näiden rasitusluokkien yhteydessä tarkistetaan myös, ettei vetojännitystä esiinny kuormien pitkäaikaisen yhdistelmän vallitessa.		

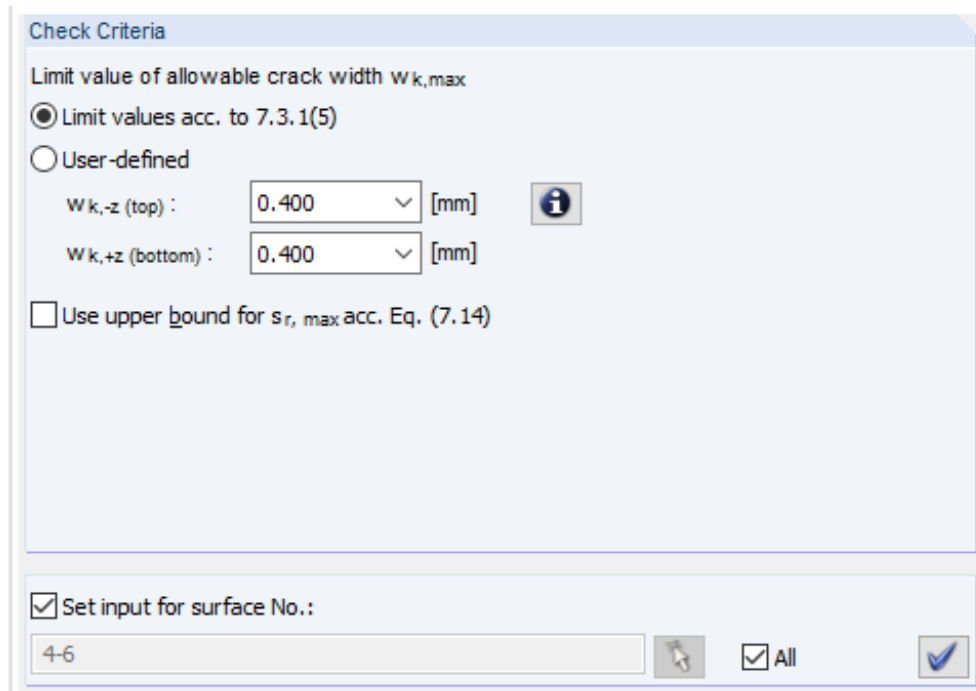
TAULUKKO 5. Halkeamaleveyden w_{\max} suositusarvot Suomen rakennusmääräyskoelman mukaan. (Suomen rakennusmääräyskokoelma. 2016, 21)

Rasitusluokka	Teräsbetonirakenteet ja tartunnattomat ankkurijännerakenteet	Tartuntajännerakenteet ja injektoidut ankkurijännerakenteet	
	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä	Tavallinen kuormayhdistelmä	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä
X0, XC1	0,40	0,20	ei vaatimuksia
XC2, XC3, XC4, XD1, XS1	0,30	0,20	Vetojännityksetön tila
XD2, XD3, XS2, XS3	0,20	Vetojännityksetön tila	ei vaatimuksia

Huomautus 1. Rasitusluokkien X0 ja XC1 yhteydessä teräsbetonirakenteissa tai käytettäessä tartunnattomia jänteitä halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen, ja esitetty raja on asetettu kelvollisen ulkonäön takaamiseksi. Jos ulkonäköehtoja ei aseteta, tätä rajaa voidaan väljentää.

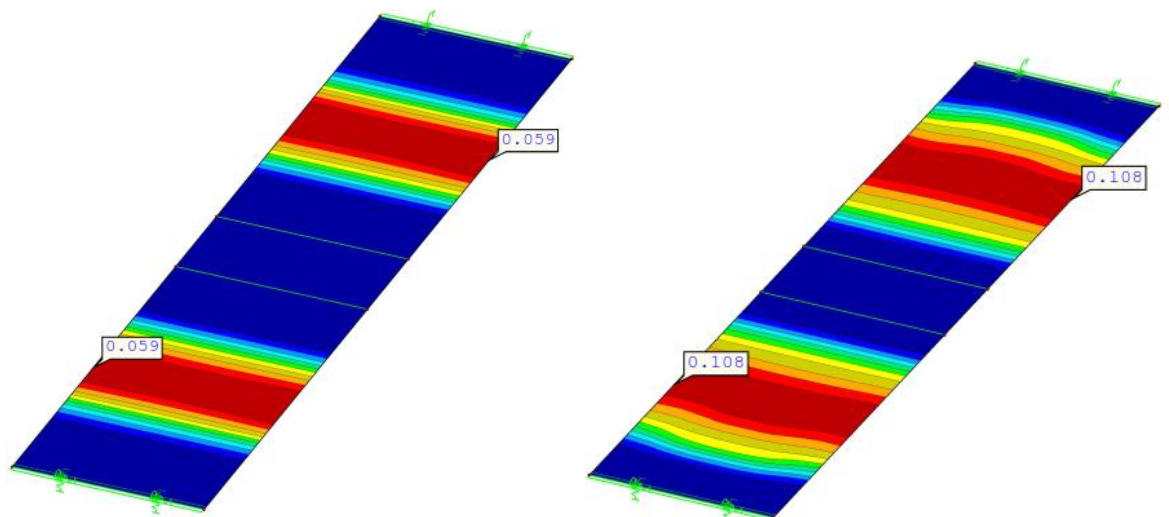
Huomautus 2. Tartuntajännerakenteilla ja injektoiduilla ankkurijännerakenteilla sallitaan pitkäaikaisella kuormayhdistelmällä korkeintaan vetolujuuden ominaisarvon $f_{ctk,0,05}$ suurinen vetojännitys, mikäli rakennetta kuormittaa standardin SFS-EN 1991-1-1 mukainen hyötykuorma, jonka pitkäaikaisosuuden yhdistelykerroin on suurempi kuin 0,5.

Huomautus 3. Betonipeitteen ollessa suurempi kuin säilyvyyden kannalta vaadittu minimipeite $c_{\min,dur}$, taulukon halkeamaleveyden raja-arvoja saa korottaa kertoimella $(c_{true} - c_{dev})/c_{\min,dur} \leq 1,4$, jossa c_{true} on suunnitelmien mukainen betonipeite. Mikäli betonipeitteen paksuus on suurempi kuin 50 mm, betonipeitteelle c voidaan käyttää halkeamaleveyden laskennassa arvoa 50 mm.



KUVA 34. RFEM:in halkeamaleveyden maksimiarvo -ikkuna.

Kutistuma ja viruma aiheuttaa vähitellen betonissa halkeilua mikä on myös huomioitava laskennassa. Kuvassa 36 on esitetty vertailu, missä vasemmanpuolisesta laatasta on jätetty kutistuma ja viruma huomioimatta ja oikean puoleisessa laatasta on otettu huomioon kutistuma ja viruma betonin lopullisessa iässä. Esimerkkitapauksessa halkeamaleveys on kaksinkertainen kun kutistuma ja viruma otetaan huomioon. Halkeamaleveydet voivat vaihdella tapauskohtaisesti.

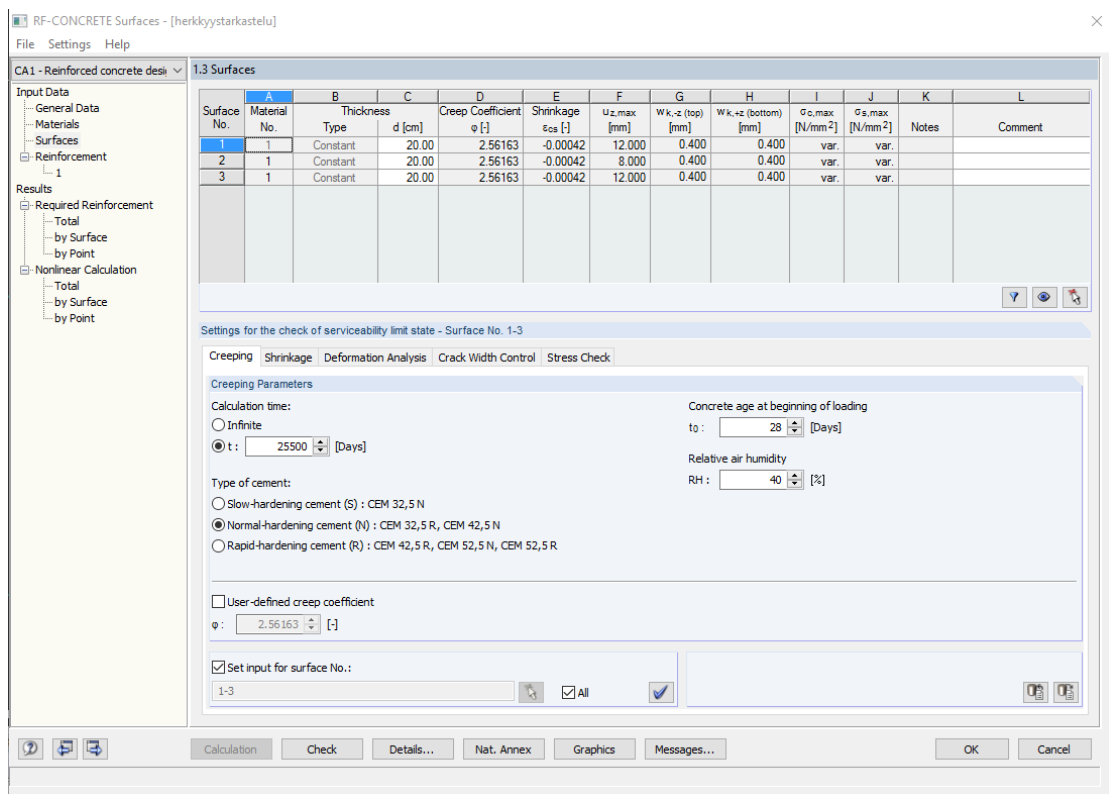


Kuva 35. Kutistuman ja viruman vaikutus halkeamaleveyteen.

6.2 Betonilaatu ja suhteellinen kosteus

RFEM:ssä on mahdollista vaihtaa betonilaatu sekä muita betonin halkeiluun ja taipumaan vaikuttavia tekijöitä. Betonilaatua voi vaihdella RF-Concrete Surface lisämoduulissa hitaasti, normaalisti ja nopeasti kovettuvan betonin välillä. Näiden betonilaatujen vaihtelu vaikuttaa laatan taipumiin ja halkeamiin. Halkeamat ja taipumat kasvavat, kun valitaan nopeasti kovettuva betoni verrattuna hitaasti kovettuvaan.

Ilman suhteellinen kosteus on myös yksi asia, mitä suunnittelija joutuu valitsemaan mittaessaan laattaa. Esimerkiksi optimaalinen kosteusprosentti sisätiloissa on noin 45 prosenttia ja hyväksyttävä vaihteluväli on noin 35-60 prosenttia. RFEM:ssä on mahdollista määrittää nämä arvot laatan kutistuman ja viruman yhteydessä. Näiden arvojen perusteella RFEM laskee virumaluvun ja kutistuman. Kuvassa 25 on esitetty laatan viruma-ikkuna. Esimerkkitapauksessa laatan taipuma kasvoi 15 prosenttia kun suhteellinen kosteus nostettiin 40:stä 60:en prosenttiin.

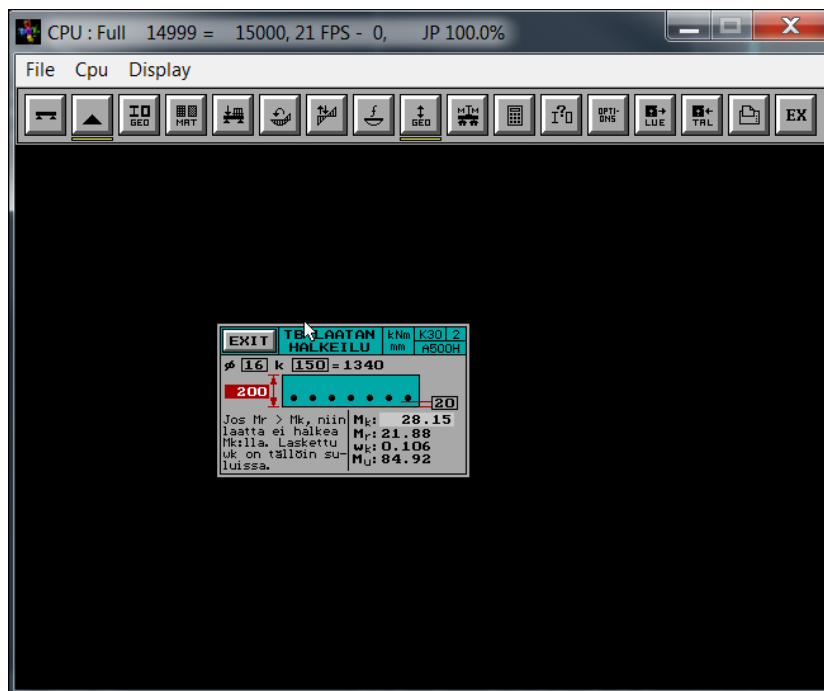


Kuva 36. RF-Concrete Surfaces viruma -ikkuna

6.3 Vertailu ohjelmien välillä

Eri ohjelmilla laskettaessa voidaan saada eroja rakenteen voimien, taipumien ja raudoituksen välillä. FEM-design:lla laskettuna saatiin raudoitusmäärässä 3% erotus RFEM:iin verrattuna. RFEM:llä laskenta oli varmemmalla puolella. Laattojen halkeilun vertailussa on käytettävä analyttistä tarkistus mallia RFEM:ssä, sillä FEM-design:sta ei löydy epälineaarista laskentaa. Halkeamat RFEM:ssä on isommat FEM-design:iin verrattuna ja kun otetaan epälineaarinen materiaalmalli huomioon, on halkeamat kaksinkertaiset esimerkiksi kitapauksessa.

Halkeamia tarkisteltuna JPBox:lla, on halkeamat laatoissa FEM-design:in ja RFEM:in välissä. Voimasuureet poimittiin RFEM:stä JPBox:iin. Kuvassa 37 on esitetty JPBox:in mitoitus halkeamaleveydelle. JPBox on RakMK:n mukainen ohjelma.



KUVA 37. Laatan halkeamaleveyden mitoitus JPBox:lla.

7 POHDINTA

RFEM:in käyttö teräsbetoni-laatan suunnittelussa vaatii huomattavaa perehtymistä ohjelmaan, sillä suunnittelussa laatan rasitukset voivat vaihdella käyttäjästä riippuen. Suunnittelijan on myös ymmärrettävä ohjelman toimintatavat sekä osattava tulkitä tuloksia. RFEM:ssä on mahdollista saada tuhansia kuormitusyhdistelmiä, jolloin laskennasta tulee hyvin pitkäkestoinen ja raskas. Tämä asia on myös huomioitava ennen laskennan aloittamista. Ohjelman käyttäjän on myös tärkeää tietää elementtimenetelmien perusteet, sillä yksi tärkeä osa laskennassa on rakenteen elementtiverkotus.

Tukiehtojen määrittäminen on yksi tärkeimmistä asioista, mitä suunnittelija joutuu määrittämään teräsbetoni-laatan mitoituksessa. Tukiehdot vaikuttavat huomattavasti laatan oleviin rasituksiin ja on tärkeää, että suunnittelija ymmärtää näiden ehtojen vaikutuksen rasituksiin. On mahdotonta mallintaa täydellisesti rakenteiden käyttäytymistä, joten tuloksiin on suhtauduttava kriittisesti.

Singulariteettiongelma on hyvin yleinen laatan mitoituksessa, sillä se esiintyy monessa paikassa. Ongelman korjaaminen helpoiten onnistuu voimia tasaavalla keskiarvoalueella. Toinen vaihtoehto singulariteettiongelmien välttämiseksi on välttää kokonaan pistevoiman ja yhteen pisteeseen määritetyn tuen käyttöä.

Ilman suhteellinen kosteus ja betoni-laatu ovat kertoimia, jotka määrittävät epälineaarisessa laskennassa. Näillä kertoimilla voidaan määrittää betonin virumaa ja kutistumaa, jotka vaikuttavat laatan taipumaan. Näitä kertoimia suunnittelija joutuu hyvin usein arvaamaan, sillä esimerkiksi ilman suhteellista kosteutta on vaikea määrittää 50 vuoden ajalle. Kertoimien vaikutus laatan rasituksiin ovat hyvin pienet verrattuna tukiehtojen vaikutukseen.

Teräsbetoni-laatan laskennassa on tärkeää ottaa huomioon rakenteen epälineaarinen käyttäytyminen. Epälineaarinen laskenta pidentää laskenta-aikaa huomattavasti mutta on myös tarkempi tapa tarkastella rakenteen toimintaa. Suositeltavaa on myös käyttää epälineaarisessa laskennassa vetojäykistystä huomioivaa jännitys-venymäkuvaajaa. Vetojäykistykseen laskenta tuo tarkkuutta laskentaan, sillä se huomioi betonin todellisen käyttäytymisen rakenteessa.

Vertailulaskelmissa erot muihin ohjelmiin olivat hyvin pienet, kun verrattiin ohjelmien laskemaa rauditusmäärää tai halkeamaleveyksiä. Muiden ohjelmien vertailussa sai hyvän kuvan myös muiden ohjelmien toimintatavoista sekä miten niitä käytetään. Muihin ohjelmiin verrattuna RFEM on huomattavasti laajempi, sillä ohjelma sisältää erilaisia lisämoduuleita tiettyjen rakenteiden laskentaan ja mitoittamiseen. Ohjelmaan on myös sisällytetty eurokoodit sekä sen kansalliset liitteet.

Opinnäytetyöstä tehtävä ohje ei ole valmis pohja tietynlaiselle laatanmitoitukselle, vaan sen tarkoituksena on ohjeistaa miten laattoja pitäisi mitoittaa RFEM:llä. Ohjeesta tehdään mahdollisimman helppokäyttöinen, sillä liian vaikeakäyttöinen ohje jää todennäköisesti käyttämättä. Opinnäytetyössä jäi muutama kohta tutkimatta teräsbetonilaatoista mutta nämä kohdat lisätään ohjeeseen. Ohjetta päivitetään jatkossa tarpeiden mukaan. Ohjeen jatkojalostusta voisi jatkaa muihin betonirakenteisiin, kuten palkkeihin tai pilareihin.

LÄHTEET

A-Insinöörit. 2016. R-FEM koulutusaineisto luento 0. Luettu 24.3.2017 A-Insinöörien sisäinen verkko.

A-Insinöörit. 2016. R-FEM koulutusaineisto luento 1. Luettu 24.3.2017 A-Insinöörien sisäinen verkko.

A-Insinöörit. 2017. R-FEM koulutusaineisto 05 RF-Concrete – 2. laatan mitoitus. Luettu 26.4.2017 A-Insinöörien sisäinen verkko.

Betoniteollisuus. n.d. a Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Osa 1: Eurokoodimitoituksen perusteet. Luettu 27.3.2017 http://www.eurocodes.fi/1992/paasivu1992/sahkoinen1992/Leaflet_1_Eurokoodimitoituksen_perusteet.pdf

Betoniteollisuus. n.d. b Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Osa 3: laatat. Luettu 27.3.2017 http://www.eurocodes.fi/1992/paasivu1992/sahkoinen1992/Leaflet_3_Laatat.pdf

Betoniteollisuus. n.d. c Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Osa 8: Taipuma. Luettu 3.4.2017 http://www.eurocodes.fi/1992/paasivu1992/sahkoinen1992/Leaflet_8_Taipuma.pdf

Betoniteollisuus n.d. d Rakenne- ja elementtisuunnittelu. Luettu 27.3.2017. <http://betoni.com/arkkitehtisuunnittelu/rakenne-ja-elementtisuunnittelu>

Dlubal 2013. a RFEM 5 Program description. Luettu 30.3.2017 <https://www.dlubal.com/en/downloads-and-information/documents/manuals>

Dlubal 2013. b RFEM Add-on Module RF-Concrete Surfaces. Program description. Luettu 2.4.2017 <https://www.dlubal.com/-/media/7B0CD5E4446B4DA19A0A96DA0812744A.ashx>

Elementtimenetelmän perusteet N.d. Sessio 03: FEM-ohjelman analyysityypit. Luettu 31.3.2017 <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5GiAj/FES03.pdf>

Lindberg, R. & Kerokoski, O. 2012. Teräsbetonirakenteet RTEK-3210. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Matti Lähteenmäki, Elementtimenetelmän perusteet. Johdanto. n.d. Luettu 24.3.2017 http://personal.inet.fi/koti/mlahteen/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf

Rakentajain kustannus Oy. 1991. Rakentajain kalenteri. Osa 1 rakennusalan käsikirja. Helsinki: Rakentajain kustannus Oy.

Rombach G.A. 2011. Finite-element Desing of Concrete Structures. Practical problems and their solutions. 2. painos. Lontoo: ICE Publishing.

SFS 1992-1-1. 2007. Eurokoodi 2: betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1 yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. Luettu 3.4.2017. Vaatii käyttöoikeudet. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Suomen Betoniyhdistys ry. 2008. By 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Jyväskylä: Suomen Betoniyhdistys ry

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2011. RIL 202-2011 Betonirakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Suomen rakennusmääräyskokoelma. 2016. Ympäristöministeriö. Suomen ympäristöministeriön verkkosivut. Luettu 3.4.2017. <http://www.ym.fi/download/no-name/%7B3F5DE241-F74B-4EA0-9F0E-18B81A7C0EC3%7D/125119>

LIITTEET

Liite 1. Teräsbetoni-laattojen mitoitus- ja laskentaohje RFEM-ohjelmaan, ei julkaista