

RFEM käyttöohje ja teräsbetonipalkin vertailulaskelma

Veli-Matti Heikonen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Heikkonen, Veli-Matti	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2016
	Sivumäärä 31	Julkaisun kieli Suomi
	Osittain salainen	Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi RFEM käyttöohje ja teräsbetonipalkin vertailulaskelma		
Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Pekka Lähdesmäki		
Toimeksiantaja(t) Sweco Rakennetekniikka Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja toimi Sweco Rakennetekniikka Oy. Tavoitteena oli laatia käyttöohje RFEM-ohjelmasta ja samalla tarkastella ohjelman lisämoduulin luotettavuutta verrattuna käsinlaskentaan.</p> <p>FEM-laskentaa käytetään rakennesuunnittelussa entistä enemmän. On tärkeää että laskentaohjelmien opetteluun ja kehitykseen käytetään resursseja, jotta tulokset olisivat luotettavia ja yhä useampi pystyisi tarkastelemaan laskentaohjelmien antamia voimasuureita.</p> <p>Työn teoriaosuudessa paneudutaan elementtiteoriaan, ohjelman käyttöön sekä teräsbetonipalkin mitoitusperiaatteeseen. Vertailulaskelmassa vertaillaan käsinlaskennan rasiituksia RFEM-ohjelmalla saatuihin rasiituksiin. Lisäksi vertaillaan ohjelman lisämoduulin laskemia raudoituksia käsinlaskennassa saatuihin raudoituksiin.</p> <p>Tuloksena saatiin selville, että käsinlaskennan ja RFEM-ohjelman välillä ei synny eroja rasiitusten suhteen, kun kyseessä oli yksinkertainen rakenne. Käsinlaskennan ja ohjelman lisämoduulin raudoitusten ero syntyi vain muutama prosentti. Tämä ei ole kuitenkaan kovin luotettava tulos, sillä laskenta samoilla lähtöarvoilla ja oletuksilla johti laskelmia samaan suuntaan. Näin tulokset tulivat samansuuruisiksi. Mikäli eri henkilöt tekisivät laskelmat toisistaan välittämättä, saatettaisiin saada suurempia eroja tulosten välillä.</p> <p>Johtopäätöksenä oli, että RFEM sopii hyvin sekä monimutkaisten että yksinkertaisten rakenteiden rasiitusten laskemiseen. Ohjelman käyttö vaatii kuitenkin käyttäjältä osaamista ja kokemusta. Työn lopputuloksena syntynyt ohje auttaa uusia ohjelman käyttäjiä pääsemään alkuun. Se on saatavilla konsernin intranetissä.</p>		
Avainsanat (asiasanat) RFEM, käyttöohje, FEM, teräsbetonipalkki, raudoituksen mitoitus		
Muut tiedot Liite 1: RFEM käyttöohje, 28 sivua (salainen)		

Author(s) Heikkonen, Veli-Matti	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2016 Language of publication: Finnish
	Number of pages 31	Permission for web publication: x
	Title of publication Instruction manual for RFEM and comparison calculation for reinforced concrete beam	
Degree programme Civil Engineering		
Supervisor(s) Pekka Lähdesmäki		
Assigned by Sweco Rakennetekniikka Oy		
Abstract <p>This thesis was assigned by Sweco Rakennetekniikka Oy. The goal was to make an instruction manual for RFEM program and also examine the reliability of the programs add-on modules compared to handmade calculations.</p> <p>FEM calculation is used more and more in civil engineering. It is crucial that the resources on calculation are used in software learning and development to, ensure that the results are reliable and even more users could view the forces that calculation programs give.</p> <p>The theory part delves into the finite element theory, using the program and calculation theory of reinforced concrete beam. In comparison calculation the forces are calculated by hand and compared to the forces given by RFEM. The reinforcements calculated by hand are also compared to the reinforcements given by RFEM add-on module.</p> <p>The result of the thesis shows that there are no differences between the forces of RFEM and hand calculation when dealing with simple structures. There is only a few percent difference between the reinforcements calculated by hand and given by add-on module. This is not, however, a very reliable result since the calculation made using the same starting values and the hypothesis directs the calculation to the same direction.</p> <p>The final conclusion is that RFEM suits calculating complex structures as well as simple structures. The program use requires knowledge and know-how from the user. The outcome of this thesis helps the new users of the program to get started. The manual is now available on the corporation's intranet.</p>		
Keywords/tags (subjects) RFEM, instruction manual, FEM, reinforced concrete beam, reinforcement design		
Miscellaneous Appendix 1: Instruction manual for RFEM, 28 pages (confidential)		

Sisältö

Käsitteet.....	4
1 Johdanto	5
1.1 Tausta.....	5
1.2 Toimeksiantaja.....	5
1.3 Tavoitteet	6
1.4 Tutkimusmenetelmä ja tietopohja	7
2 Elementtimenetelmä.....	7
3 RFEM.....	8
3.1 Käyttöliittymä	8
3.1.1 Työkalurivi.....	9
3.1.2 Navigointipalkki.....	9
3.1.3 Mallinnustila ja hallintapaneeli	10
3.1.4 Taulukot	10
3.2 Mallintaminen	11
3.2.1 Rakenneosat.....	11
3.2.2 Tuet.....	11
3.2.3 Kuormat	12
3.3 Laskenta.....	12
4 Eurokoodin mukainen mitoitus teoria palkille	13
4.1 Mitoitus	13
5 Vertailulaskelmat	15
5.1 Lähtötiedot	15
5.1.1 Palkki.....	15
5.1.2 Kuormat	16
5.1.3 Kuormitusyhdistelmä	16
5.2 Palkin rasitukset	17
5.2.1 Käsin laskenta.....	17

	2
5.2.2 RFEM laskenta.....	18
5.3 Palkin raudoitus	19
5.3.1 Raudoituksen käsinlaskenta	19
5.3.2 Raudoituksen laskenta RFEM lisämoduulilla	22
6 Tulokset.....	24
6.1 Rasitukset	24
6.2 Palkin raudoitus	25
7 Pohdinta.....	25
7.1 Ohjelman käyttö	25
7.2 Hyödyt.....	26
7.3 Ongelmat.....	26
7.4 Mahdollisuudet.....	27
7.5 Johtopäätökset	28
7.6 Tavoitteiden saavuttaminen	29
Lähteet.....	30
Liitteet	31
Liite 1. RFEM käyttöohje 2016	31

Kuviot

Kuvio 1. Sweco organisaatio tammikuu 2015 (Sweco intranet).....	6
Kuvio 2. RFEM käyttöliittymä (Heikkonen 2016)	8
Kuvio 3. Palkin poikkileikkaus. (Heikkonen 2016).....	15
Kuvio 4. Palkin kuormituskaavio. (Heikkonen 2016)	16
Kuvio 5. Palkki mallissa. (Heikkonen 2016)	18
Kuvio 6. Palkin momenttikuvaaja RFEM. (Heikkonen 2016)	19
Kuvio 7. Palkin leikkauskuvaaja RFEM. (Heikkonen 2016)	19
Kuvio 8. Lisämoduuli RF-CONCRETE Members. (Heikkonen 2016)	23

Taulukot

Taulukko 1. Palkin mitoitusmenettely (leaflet 4)	13
Taulukko 2. Viitteellinen suunniteltu käyttöikä. (RIL 201-1-2011)	14
Taulukko 3. Palkin rasitusten vertailu	24
Taulukko 4. Palkin raudoituksen vertailu	25

Käsitteet

RFEM

Dlubalin kehittämä elementtimenetelmään perustuva laskentaohjelma.

EUROKOODI

Kantavien Rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja.

FEM

Finite element method. Numeerinen ratkaisumenetelmä lujuuslaskentaan.

LISÄMODUULI

RFEM -ohjelman laskentamoduuli, jolla voi laskea teräsbetonirakenteiden raudoituk-
sia.

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä perehdytään ensin hieman Finite Element Method, (FEM) elementtimenetelmän yleiseen teoriaan. Tämän jälkeen käydään läpi ohjelman käyttöä, josta siirrytään esimerkkilaskelmiin teräsbetonipalkista.

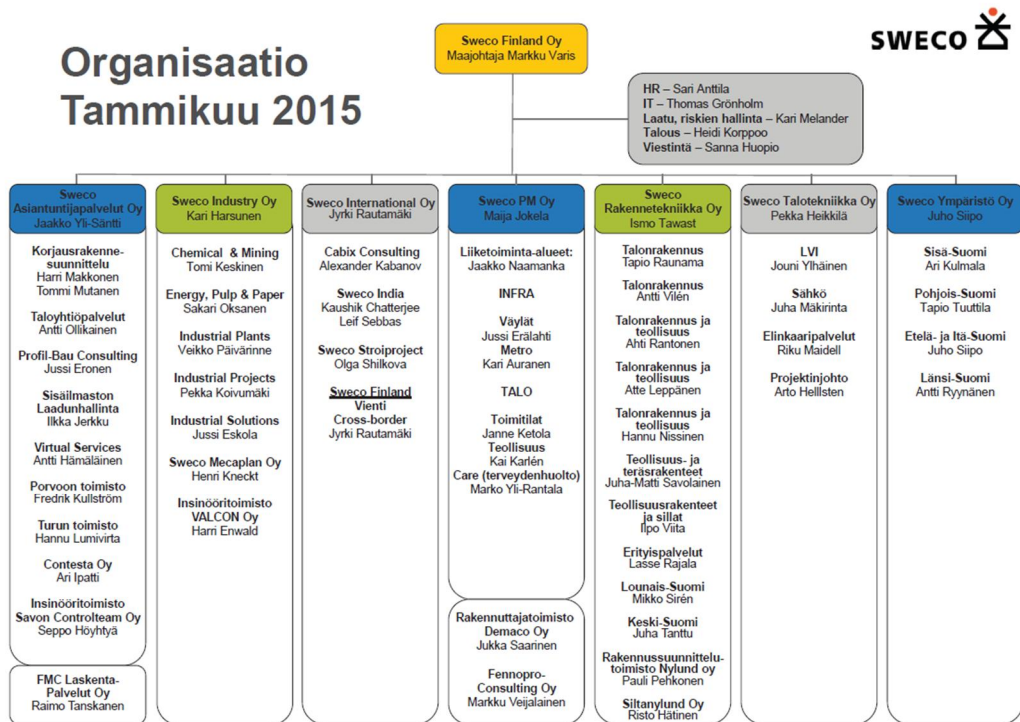
1.1 Tausta

Rakennesuunnittelussa yksi tärkeimmistä ja samalla vaikeimmista asioista on rakennuksen kokonaisstabiliteetin tarkastelu. Monimutkaisten rakennusten stabiliteetin tarkastus käsin on vaativaa, joten suunnittelijoiden avuksi on kehitetty FEM-laskentaan pohjautuvia ohjelmia. Näiden avulla voidaan tarkastella kokonaisstabiliteettia sekä yksittäisille rakennusosille tulevaa rasitusta. Tässä opinnäytetyössä paneudutaan tarkemmin vain yksittäisiin rakenneosiin.

Toimistopalaverissa tuli esille, että olisi tarve käyttöohjeelle *RFEM*iä varten koko konsernin tasolla. Näin syntyi idea ohjeen tekemiselle. Ohjeesta haluttiin tiivis, jotta se palvelisi käyttäjiä mahdollisimman tehokkaasti.

1.2 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Sweco Rakennetekniikka Oy:n Jyväskylän toimipiste. Olin siellä toisessa harjoittelussa keväällä 2014 ja jatkoin kesätöissä aina koulun alkuun asti. Sweco Rakennetekniikka Oy on Sweco Finlandin yksi liiketoimintaharoista. Sweco Finland on osa Sweco Groupia. Sweco Oy on ruotsalainen kansainvälisesti toimiva rakennus-, energia- ja ympäristöalan asiantuntijayritys. Yhtiöllä on noin 14 500 työntekijää 14 maassa. Suomessa työskentelee noin 2000 henkilöä 25 paikkakunnalla. Yhtiön liikevaihto oli vuonna 2015 noin 1,7 miljardia euroa. Sweco Finlandin liikevaihto oli samana vuonna 178 miljoonaa euroa. (Sweco Suomessa n.d.)



Kuvio 1. Sweco organisaatio tammikuu 2015 (Sweco intranet n.d)

1.3 Tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda käyttöohje Dlubalin *RFEM*-ohjelman käyttämiseksi. Tämä käyttöohje rajataan tavanomaisiin teräsbetonirakenteisiin. Toimeksiantajan pyynnöstä käsittelen ohjeessa pilaria, palkkia, laattaa ja seinää. Käyttöohje tulee toimeksiantajan työntekijöiden käyttöön, jotka eivät ole vielä käyttäneet ohjelmaa. Käyttöohje toimii myös apuna ohjelmaan jo tutustuneille. Tarkoituksena on tehdä ohjeesta mahdollisimman yksinkertainen, jotta sen luettavuus olisi helppoa ja näin ollen avuksi päivittäisessä suunnittelutyössä. Ohjetta on mahdollisuus päivittää, mikäli ohjelmaan tulee hyödyllisiä päivityksiä. Tämän lisäksi vertailen palkin laskentaa *RFEM:llä* käsinlaskentaan, käyttäen apuna ohjelman lisämoduleita. Näiden tavoitteiden summana on opetella ohjelman käyttöä ja syventää ammatillista osaamista teräsbetonirakenteisiin.

1.4 Tutkimusmenetelmä ja tietopohja

Tutkimusmenetelmäksi muodostui kvalitatiivinen menetelmä. Kvalitatiivisessa menetelmässä aineistonhankintamenetelmä on haastattelu ja havainnointi. (Kvalitatiivinen tutkimus luo aina uutta n.d.)

Tietopohjana opinnäytetyössä on käytetty alan kirjallisuutta, alan sähköisiä julkaisuja, tekijän omaa työkokemusta sekä Sweco Rakennetekniikka Oy:n asiantuntijoita. Erityisesti elementtiteoriasta on saatavilla vähän julkista helposti saatavilla olevaa tietoa. Tästä syystä joudun nojaamaan vain kahteen lähteeseen aiheesta.

2 Elementtimenetelmä

Finite Element Methodin suomennos on elementtimenetelmä. Yleensä puhutaan kuitenkin lyhenteestä FEM. Joskus käytetään myös lyhennettä FEA, joka viittaa englannin kieliseen termiin Finite Element Analysis. Tämän menetelmän avulla voidaan numeerisesti ratkaista ns. kenttäongelmia. Kenttäongelmia joita ratkotaan elementtianalyysillä, ovat esimerkiksi magneettikenttä, lämpötila ja rasitukset. Kenttäongelmia kuvataan yleensä matemaattisesti differentiaali- tai integraaliyhtälöillä. Nämä yhtälöt ovat syötetty valmiiksi FEM-ohjelmiin.

Elementtimenetelmällä voidaan helposti analysoida geometrialtaan monimutkaisia rakenteita. Geometrialtaan monimutkaisen, materiaaliominaisuuksiltaan tai muulla tavoin epälineaarisen rakenteen tapauksessa tarkan ratkaisun löytäminen on usein mahdotonta, ja likiratkaisun löytäminen muilla menetelmillä hankalaa. (Cook, Malkus, Plesha & Witt 2001)

Elementtimenetelmän perusideana on jakaa rakenteen geometria useisiin elementteihin. Nämä elementit liittyvät toisiinsa pisteiden eli solmujen avulla. Näin muodostuu elementtiverkko. Tasoelementeissä käytetään kolmi- tai nelisivuisia elementtejä. Elementtien koko on avainasemassa virheiden välttämiseksi. Liian suuret elementit kuvaavat laskettavaa kappaletta huonosti. (Lähteenmäki M.) Toisaalta äärettömän

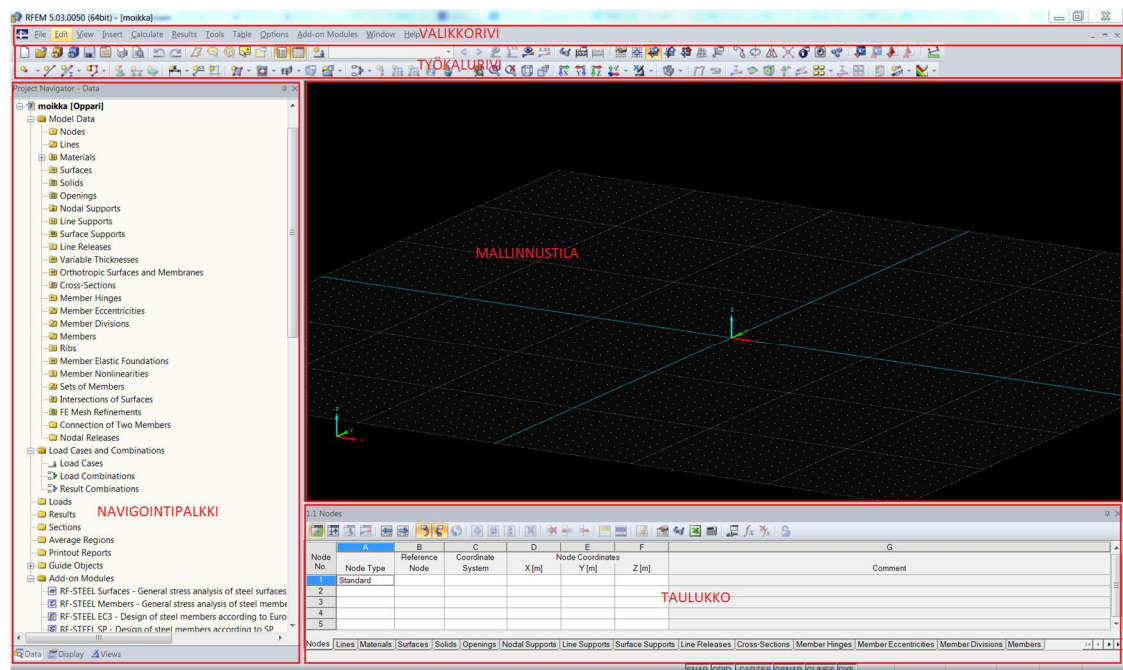
pienet elementit eivät anna enää lisää tarkkuutta suhteessa laskenta-ajan pitenemiseen.

3 RFEM

Rakenteiden analyysiin käytettävä RFEM muodostuu monesta osasta. Pääohjelmalla määritellään rakenteita, materiaaleja ja kuormia. Ohjelma antaa tuloksena muodonmuutokset, sisäiset voimat, rasitukset ja tukivoimat. (Dlubal a n.d.)

3.1 Käyttöliittymä

RFEMin käyttöliittymä muodostuu pääsääntöisesti neljästä osasta: työkalurivistä, navigointipalkista, mallinnustilasta ja taulukosta. Näiden lisäksi ohjelma sisältää valikkorivin, josta pääsee kaikkiin ohjelman toimintoihin.



Kuvio 2. RFEM käyttöliittymä (Heikkonen 2016)

3.1.1 Työkalurivi

Työkaluriviltä löytyvät pikapainikkeet ohjelman tärkeimmistä työkaluista ja komennoista. Kaikki työkalurivillä olevat toiminnot löytyvät valikkorivistön alta. Periaatteessa työkaluriviltä löytyvät kaikki mallintamiseen tarvittavat toiminnot. Valikkoriviltä löytyvät tarkemmat säädöt ja asetukset.

3.1.2 Navigointipalkki

Navigointipalkissa on neljä päänäkymää: Data, Display, Views ja Results.

Data-valikko näyttää avoinna olevien mallien tiedot ja avatut tiedostot hakemistopuussa. Täältä löytyvät mallin kaikki osat lajiteltuna ja numeroituna. Osia ovat mm. solmut, viivat, materiaalit ja tuet. Lisäksi hakemistossa näkyvät kuormitukset, tulokset, tulosteet ja lisä-moduulit.

Display-valikossa ohjataan mallin näkyvyyttä. Valikosta voidaan kytkeä pois näkyvistä mikä tahansa mallinnettu asia. Tämän lisäksi mallin läpinäkyvyyttä ja värejä ohjallaan halutulla tavalla. Näkyvyyttä voi ohjalla yksittäisestä rakennusosasta lähtien. Näkyvyyttä ohjallaan mallin selkeyttämiseksi ja mallinuksen helpottamiseksi.

Views-valikon tarkoitus on tehdä malliin valmiita näkyvyyksiä. Tämä tulee tärkeämmäksi mitä suurempi malli on kyseessä. Jako tehdään joko projektissa määrättyllä tavalla tai oman mieltymyksen mukaan. Jaottelu voidaan tehdä esimerkiksi kerroksittain tai lohkoittain. Tämä selkeyttää mallin käyttöä mallintajalle ja mahdolliselle tarkistajalle.

Results-valikon alta löytyy laskelman antamat tulokset rakenneosittain. Ohjelmasta saadaan erilaisia tuloksia mm. muodonmuutokset, siirtymät, leikkaus- ja normaalivoimat, momentit, sisäiset jännitykset ja tukireaktiot. (Dlubal b n.d.)

3.1.3 Mallinnustila ja hallintapaneeli

Mallinnustilaan mallinnetaan kaikki kantavat rakenneosat ja kuormitukset. Hallintapaneeli tulee näkyviin mallinnustilaan, kun malli on laskettu. Hallintapaneelissa voidaan säätää tuloksien näkyvyyttä mallinnustilassa. Tämä auttaa hahmottamaan tuloksia paremmin. Hallintapaneelissa on kolme välilehteä: *Color scale*, *Factors* ja *Filter*. *Color scale* -välilehdellä säädetään rasitusten värejä. Näin saadaan halutut värit tietyn suuruksille rasituksille. *Factors* -lehdellä säädetään rasitusten näkyvyyden kerrointa. Esimerkiksi taipumat ovat yleensä niin pieniä, että selkeyden vuoksi näiden kerrointa on syytä nostaa. Näin nähdään paremmin mihin suuntaan rakenne taipuu. Jos halutaan tutkia joidenkin tiettyjen osien rasituksia, käytetään *Filter* -lehteä. Täältä voi sammuttaa haluamansa rakenneosien rasitukset näkyvistä. (Dlubal b n.d.)

3.1.4 Taulukot

Taulukossa näkyy kaikki tiedot numeerisessa muodossa. Taulukoissa on neljä päänäkymää: Mallin tiedot, kuormitusyhdistelmät, kuormat ja tulokset. Taulukosta voidaan valita tietty osa, jolloin se korostuu mallinnustilassa. Taulukkoon voidaan myös syöttää suoraan tietoja, jotka sitten muuttuvat malliin. Esimerkiksi kuormitusyhdistelmät kannattaa tuoda toisesta projektista jos sellainen on valmiina. (Tikkanen E. 2016)

Mallin tiedoista löytyy kaikki rakenneosat, kuten solmut, viivat, aukot, tuet ja materiaalit. Esimerkiksi viivan tiedoista näkyy mihin solmuihin viiva on liittynyt ja kuinka pitkä viiva on. Solmun tiedoissa näkyy sen koordinaatit ja solmun tyyppi.

Kuormitusyhdistelmät näkyvät taulukosta suoraan ja ne voidaan ladata ja tallentaa xls-muodossa. (Tikkanen E. 2016)

Erilaiset kuormat on lajiteltu ja näiden tiedot näytetään seuraavassa välilehdessä.

Tulokset osiossa kaikki tulokset näkyvät numeroina, kuten tukireaktiot ja siirtymät.

3.2 Mallintaminen

Mallintaminen tulee tehdä sillä ajatuksella, että mallin tulee vastata valmiin rakennuksen toimintatapaa; ei siis riitä että rakenneosat ovat oikean muotoisia ja oikeaa materiaalia. Osien liitokset tulee miettiä tarkkaan, jotta rakenne toimii oikein. Lisäksi on huolehdittava materiaalien jäykkyyksien oikeellisuudesta.

3.2.1 Rakenneosat

Rakenneosia mallinnetaan solmujen, viivojen ja tasojen avulla. Kullekin viivalle ja tasolle annetaan dimensiot ja materiaalitiedot. Pilarit ja palkit mallinnetaan viivoina. Näille annetaan halutut vapausasteet kumpaankin päähän. Lisäksi valitaan materiaali. Ohjelmassa on kattava materiaalikirjasto valmiina. Teräsosat ovat lajiteltu jopa valmistajan mukaan.

Mikäli haluttua materiaalia tai dimensiota ei löydy sen voi luoda itse. Materiaalien luomisessa itse on oltava tarkkana, sillä materiaalit käyttäytyvät ohjelmassa sen mukaan mitä ominaisuuksia niille antaa. Betonille ja teräkselle voi mm. antaa kimmomoduulin, painon, tiheyden ja leikkauslujuuden.

3.2.2 Tuet

Ilman tukia mallia ei pysty laskemaan. Käytännössä siirtymät ovat äärettömät ja solmut pyörisivät vapaasti tuettomassa mallissa. Tuet laitetaan malliin yleensä kuvaamaan anturoita tai maanpintaa. Mikäli mallinnetaan yksittäisiä rakenneosia, tuet voivat kuvata liitoksia tai muita rakenneosia.

Ohjelmassa on kolmenlaisia tukia. Pistetuki voidaan asettaa vain pisteeseen. Viivatuki asetetaan viivalle. Nämä kaksi kuvaavat usein anturoita. Kolmas tuki on pintatuki, joka voidaan asettaa mm. laatalle. Näin se kuvaa maanpintaa.

Tuet ovat usein käytännössä jäykkiä tai nivelellisiä. Tämä tarkoittaa tukien vapausasteiden säätämistä vastaamaan todellista tilannetta. Tukiin voidaan lisäksi asettaa jousivakio, jolloin tuki toimii jousena.

3.2.3 Kuormat

Malliin luodaan ensin kuormitustapaukset. Nämä luodaan standardien EN 1991-1-1, EN 1991-1-2, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4, EN 1991-1-5, EN 1991-1-6, EN 1991-1-7 ja niiden kansallisten liitteiden mukaan. Yleisimmät kuormitustapaukset ovat oma paino, hyötykuormat, lumikuormat ja tuulikuormat. Näiden lisäksi ohjelmasta löytyy lämpötila, onnettomuuskuormat, alkuapäätarkkuus, seismiset kuormat ja esijännitys. Kuormitustapauksia luodaan vaadittu määrä.

Kuormat mallinnetaan kohteeseen piste-, viiva- tai tasokuormina. Jokaiselle kuormitustapaukselle mallinnetaan omat kuormat. Kuormat tulee mallintaa niin, että saadaan oikeanlaiset kuormitusyhdistelmät tehtyä.

Ohjelma osaa tehdä asetetuista kuormista itse kuormitusyhdistelmät. Tämä ei ole yleensä kannattavaa sillä yhdistelmiä voi tulla satoja. Kuormitusyhdistelmät luodaan standardin EN 1990 mukaan. Tällöin asetetaan kuormien varmuuskertoimet ja niiden yhdistelyt.

3.3 Laskenta

Kun malli on luotu, kuormat asetettu ja kuormitusyhdistelmät luotu, malli voidaan laskea. Ensin malli tarkistetaan mahdollisten virheiden takia. Ohjelma luo tässä vaiheessa elementtiverkon ja tarkistaa mallin tiedot. Elementtiverkon asetukset ovat säädettävissä. Elementeistä tehdään halutun kokoisia ja muotoisia, jotta tulokset olisivat mahdollisimman lähellä oikeaa. Ohjelma tutkii solmujen, viivojen ja tasojen liitoksia ja törmäyksiä. Tämän jälkeen ylimääräiset asiat voidaan poistaa mallista.

Ohjelmassa on useita eri laskentaparametreja. Ennen laskentaa tulee tiedostaa, millä tapaa ohjelma laskee rasiuksia. Oletusasetuksena ohjelma laskee staattisella ja lineaarisella analyysillä. Toisen kertaluvun vaikutukset huomioon ottava laskenta vaatii asetusten muuttamista. Jos asetuksia alkaa vaihtamaan, on oltava tietoinen, mitä mikäkin muutos tekee.

Ohjelma voi laskea kerralla kaikki kuormitusyhdistelmät. Myös yksittäisten yhdistelmien laskenta on mahdollista. Mallin suuruudesta, käytettävän tietokoneen tehosta

ja laskenta-asetuksista riippuen laskenta kestää muutamasta minuutista muutamaan tuntiin. Vääränlaisilla asetuksilla laskeminen voi kestää pahimmillaan jopa päiviä. (Dlubal b n.d.)

4 Eurokoodin mukainen mitoitusteoria palkille

Palkit ovat sauvamaisia rakenteita, joissa kuormitus vaikuttaa pääasiallisesti palkin pituusakselia vastaan kohtisuoraan suuntaan. Tämä aiheuttaa palkkiin ensisijaisesti taivutus- ja leikkausrasituksia. Myös vääntörasitus ja akselin suuntainen normaali-voima ovat mahdollisia. (BY211 2013)

4.1 Mitoitus

Teräsbetonirakenteiden mitoituksen selkeyttämiseksi Betoniteollisuus on julkaissut Eurocodes.fi-sivustolla oppaita. Eri rakenneosille on tehty oma opas ja palkkeja käsittelee *Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan: Palkit*. Tätä julkaisua kutsutaan myös nimellä *Leaflet 4*. Tämä mitoitusteoria perustuu Leaflet 4 –oppaaseen.

Taulukko 1. Palkin mitoitusmenettely (Betoniteollisuus.)

Vaihe	Tehtävä	Lisäohjeita	
		Opasrja "Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan"	Standardi
1	Määritetään suunniteltu käyttöikä	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1990 taulukko 2.1
2	Määritetään palkkiin 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 palonkesto- ajan perusteella	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet ja tämän oppaan taulukko 2	SFS-EN 1992–1–2: kohta 5
7	Lasketaan vähimmäisbetonipeite säilyvyys-, tar- tunta- ja palonkestovaatimusten kannalta	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1992–1–1 kohta 4.4.1
8	Tarkastellaan rakenne kriittisten momenttien ja leikkausvoimien löytämiseksi	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1992–1–1 kohta 5
9	Mitoitetaan taivutusraudoitus	Ks. tämän oppaan kuva 2	SFS-EN 1992–1–1 kohta 6.1
10	Tarkistetaan leikkauskestävyys	Ks. tämän oppaan kuva 5	SFS-EN 1992–1–1 kohta 6.2
11	Tarkistetaan taipuma	Ks. tämän oppaan kuva 6	SFS-EN 1992–1–1 kohta 7.4
12	Tarkistetaan tankojako tai halkeamaleveys	Betonirakenteiden suunnitteluperusteet	SFS-EN 1992–1–1 kohta 7.3

Suunniteltu käyttöikä määräytyy standardista EN 1990. Tavallisesti palkin käyttöikä on 50 vuotta.

Taulukko 2. Viitteellinen suunniteltu käyttöikä. (RIL 201-1-2011)

Suunnitellun käyttöiän luokka	Viitteellinen suunniteltu käyttöikä (vuosia)	Esimerkkejä
1	10	Tilapäisrakenteet ⁽¹⁾
2	10...25	Vaihdettavissa olevat rakenteen osat, esim. nosturiratapalkit, laakerit
3	15...30	Maatalous- ja vastaavat rakennukset
4	50	Talonrakennukset ja muut tavanomaiset rakenteet
5	100	Monumentaaliset rakennukset, sillat ja muut maa- ja vesirakennuskohteet

⁽¹⁾ Sellaisia rakenteita tai niiden osia, jotka voidaan purkaa uudelleen käytettäväksi, ei pidetä tilapäisinä.

Palkkiin kohdistuvat kuormat määritellään aina rakennekohtaisesti. Tavanomaisesti palkkiin kohdistuu oman painon lisäksi liittyvien rakenteiden oma paino ja hyötykuorma.

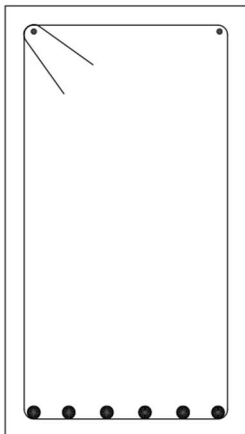
5 Vertailulaskelmat

Vertailulaskelma tehdään *RFEM*-ohjelman ja käsinlaskennan välillä. Rasiusten lisäksi vertaillaan ohjelman lisämoduulin laskemaa murtorajatilan raudoitusta käsin laskennasta saatuun raudoitukseen. Ohjelman rajoitusten takia raudoitusten vertailu tehdään vain pääraudoituksesta ja leikkausraudoituksesta.

5.1 Lähtötiedot

5.1.1 Palkki

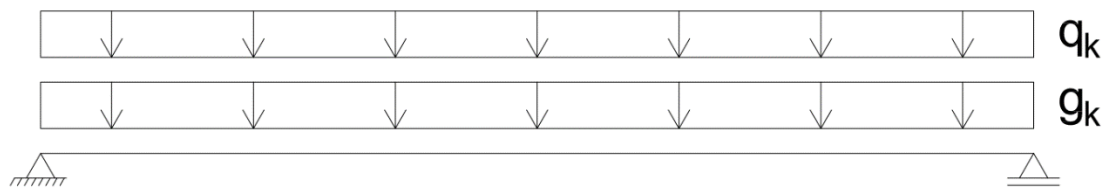
Tässä työssä käytetään elementtirakenteista palkkia, jonka oletetaan lepävään teräs-betonipilareiden varassa. Palkki on sisätilassa, jossa ilman kosteus on alhainen. Palkin jännemitta on 7,0 metriä ja poikkileikkaus 680x380 mm. Suunniteltu käyttöikä on 50 vuotta. Paloluokka R60. Rasitusluokaksi tulee XC1, betonipeitteen nimellisarvoksi 30 mm ja betonin lujuusluokaksi C30/37-2. (BY 51. 2007). Betoniteräksen luokka on B500B. Pääteräksiksi on valittu $\varnothing 20$ mm ja leikkaushaioiksi $\varnothing 8$ mm umpihaat. Palkin yläreunassa on $\varnothing 10$ työteräkset. Raudoitus ja poikkileikkaus on valittu etukäteen niin, että sitä ei tarvitse enää muuttaa.



Kuvio 3. Palkin poikkileikkaus. (Heikkonen 2016)

5.1.2 Kuormat

Kuormat syntyvät palkin omasta painosta, palkin päälle tulevasta laatasta ja hyötykuormasta. Laatan kuormitusväli on kuusi metriä. Laattana toimii massiivibetonilaatta, jonka paksuus on 200 mm. Ripustuskuorma on $0,6 \text{ kN/m}^2$ ja laatan pintarakenteet $0,4 \text{ kN/m}^2$. Hyötykuorma on tavaratalon välipohjan mukainen 5 kN/m^2 . (RIL 201-1-2011)



Kuvio 4. Palkin kuormituskaavio. (Heikkonen 2016)

Palkin omapaino

$$g_k = 0,38\text{m} * 0,68\text{m} * 25 \text{ kN/m}^3 = 6,46 \text{ kN/m}$$

Laatan omapaino + ripustus + pintarakenteet

$$g_k = ((0,2\text{m} * 25 \text{ kN/m}^3) + 0,6\text{kN/m}^2 + 0,4 \text{ kN/m}^2) * 6\text{m} = 36 \text{ kN/m}$$

Omapaino yhteensä $42,46 \text{ kN/m}$

Hyötykuorma

$$q_k = 6\text{m} * 5 \text{ kN/m}^2 = 30 \text{ kN/m}$$

5.1.3 Kuormitusyhdistelmä

Murtorajatilän määräävässä kuormitustapauksessa yhdistetään sellaisten kuormien arvot, joiden voidaan katsoa esiintyvän samanaikaisesti. Tässä laskennassa kuormat esiintyvät samanaikaisesti ja seuraamusluokka on CC2. Kuormakerroin K_{FI} on tällöin 1,0. (RIL 201-1-2011)

Kuormitusyhdistelmän kaava (RIL 201-1-2011)

$$\left. \begin{matrix} 1,15K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_P P + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (1)$$

kuitenkin vähintään

$$\left. \begin{matrix} 1,35K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \quad (2)$$

Kuormitusyhdistelyt

$$1,15 * 42,46 \text{ kN/m} + 1,5 * 30 \text{ kN/m} = 93,83 \text{ kN/m}$$

tai

$$1,35 * 42,46 \text{ kN/m} = 57,32 \text{ kN/m}$$

Määrääväksi kuormitukseksi tulee 93,83 kN/m.

5.2 Palkin rasitukset

5.2.1 Käsien laskenta

Rasitukset lasketaan statiikan kaavoista. Momentin kaava yksiaukkoiselle tasaisesti kuormitetulle palkille on (Rakentajainkalenteri 2014)

$$M_d = \frac{qL^2}{8} \quad (3)$$

Leikkausvoima saadaan palkin tukireaktion kaavalla

$$T_d = V_d = \frac{qL}{2} \quad (4)$$

Leikkausvoimaa tuella voidaan vähentää holvivaikutuksen ansiosta. Leikkausvoiman mitoitusarvo saadaan etäisyydellä d tuen reunasta. Tässä laskelmassa tuota leikkausvoiman pienennystä ei oteta huomioon, vaikkakin myös RFEM osaa sen ottaa huomioon. Laskenta on kuitenkin rakenteellisesti varmallalla puolella. Näin palkki kestää sille tulevat rasitukset. (BY 210. 2008)

Momentiksi saadaan

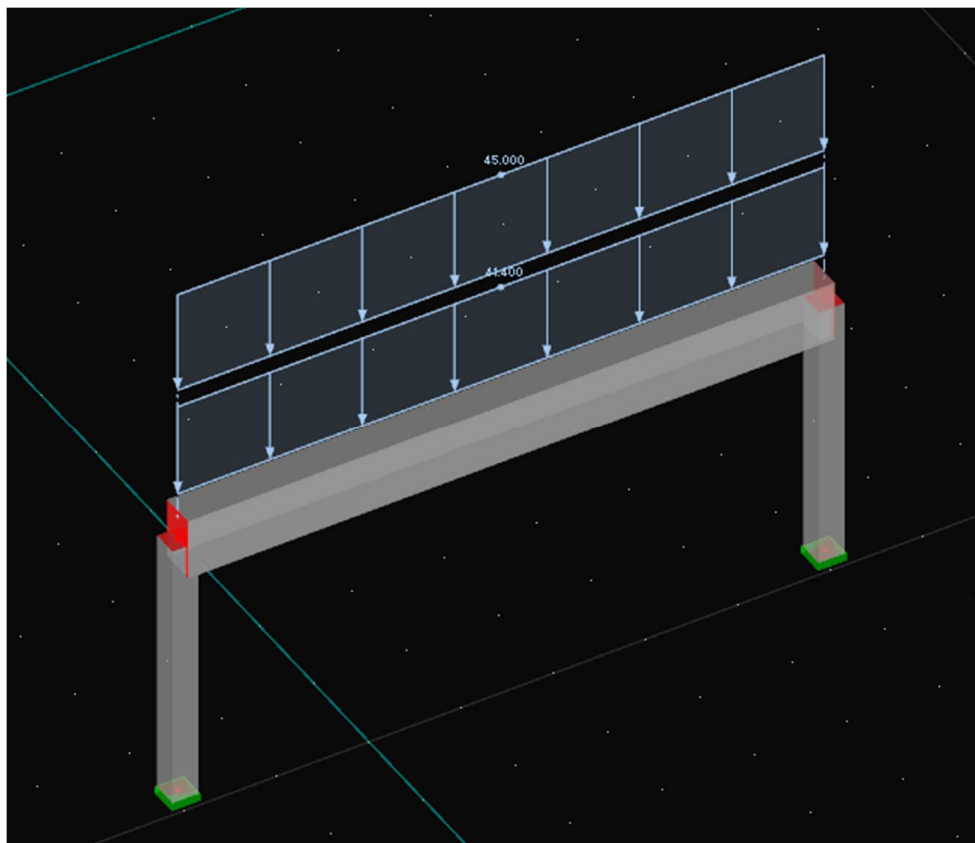
$$Md = (93,83 \text{ kN/m} * (7,0 \text{ m})^2) / 8 = 574,7 \text{ kNm}$$

Leikkausvoimaksi saadaan

$$Vd = (93,83 \text{ kN/m} * 7,0 \text{ m}) / 2 = 328,4 \text{ kN}$$

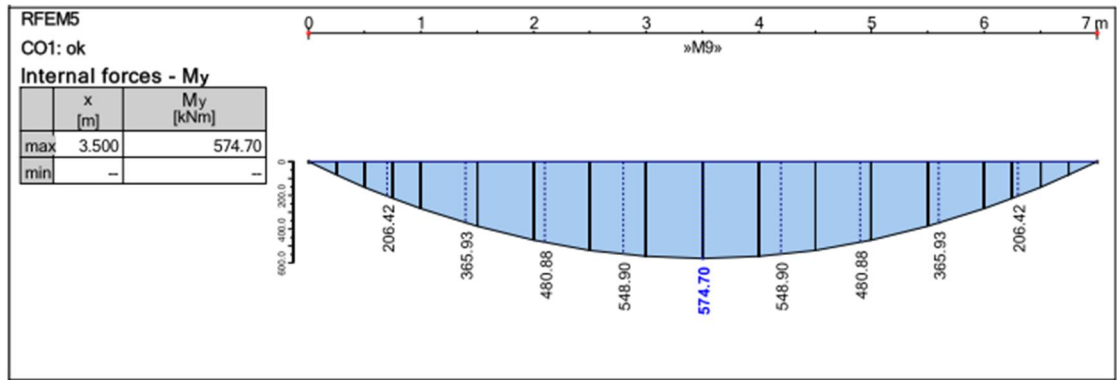
5.2.2 RFEM-laskenta

Laskentaa varten luotiin malli, johon syötettiin rakenne ja kuormat. Palkin päihin laitettiin pilarit kuvaamaan tukea. Palkin päihin luotiin vapausasteet vastaamaan käsin laskennan kuormituskaaviota. Kuormat syötettiin ominaiskuormina, jonka jälkeen luotiin kuormitusyhdistelmä kaavan 1 mukaisesti.



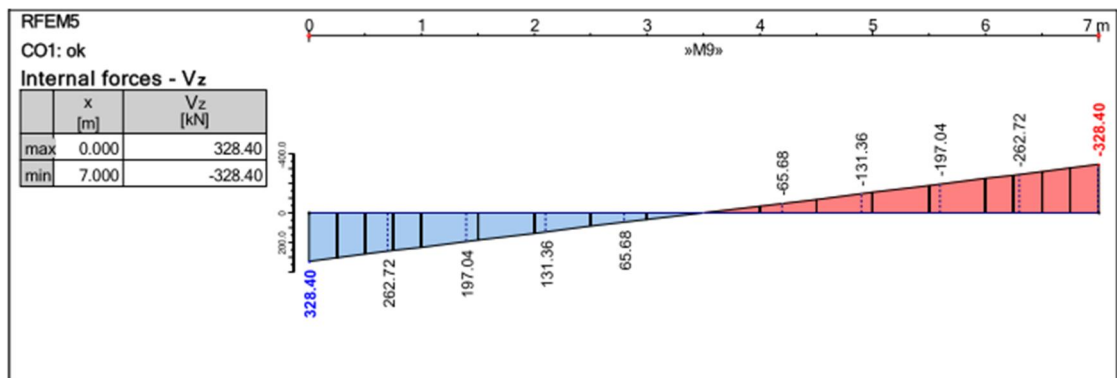
Kuvio 5. Palkki mallissa. (Heikkonen 2016)

Murtorajatilamomentiksi saadaan 574,70 kNm



Kuvio 6. Palkin momenttikuvaaja RFEM. (Heikkonen 2016)

Leikkausvoimaksi saadaan 328,40 kN.



Kuvio 7. Palkin leikkauskuvaaja RFEM. (Heikkonen 2016)

5.3 Palkin raudoitus

5.3.1 Raudoituksen käsinlaskenta

Palkin raudoitus lasketaan standardin EN 1992-1-1 mukaan. Standardi tunnetaan myös Eurokoodi kakkosena, josta Suomen Betoniyhdistys ry on tehnyt julkaisun BY60. Julkaisu on tehty auttamaan standardin käyttöön ottoa ja käyttöä Suomessa.

Palkin pääraudoituksen eli vetoraudoituksen pinta-ala saadaan kaavasta (BY 60 2009)

$$A_s = \beta b d \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (5)$$

Jossa

d on poikkileikkauksen tehollinen korkeus

b on poikkileikkauksen kokonaisleveys

f_{cd} on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo

f_{yd} on betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo

β ratkaistaan kaavasta (BY 60 2009)

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} \quad (6)$$

μ ratkaistaan kaavasta (BY 60 2009)

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{bd^2 f_{cd}} \quad (7)$$

Jotta palkki saataisiin normaaliraudoitetuksi, on β ja μ arvojen oltava pienempiä kuin β_{bd} ja μ_{bd} . normaaliraudoitus saavutetaan kun vetoteräkset myötäävät ennen betonin murtumista. Näin syntyy sitkeä murtuminen, jolloin murtumista edeltää voimakas halkeilu ja muodonmuutos. (BY50) Kun f_{yk} on 500 MPa ja teräksen osavarmuus $\gamma_s = 1,15$, saadaan β_{bd} ja μ_{bd} arvoiksi 0,467 ja 0,372. (BY 210. 2008)

Betonipeitteen arvon perusteella lasketaan poikkileikkauksen tehollinen korkeus d .

$$d = 680 \text{ mm} - 30 \text{ mm} - 8 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 632 \text{ mm}$$

$$f_{cd} = 17,0 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = 435,0$$

$$\mu = 574\,700\,000 \text{ Nm} / (380 \text{ mm} * (632 \text{ mm})^2 * 17,0 \text{ N/mm}^2) =$$

$$0,222728 < 0,372$$

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,222728} = 0,2555322 < 0,467$$

Palkki on normaaliraidoitettu. Mikäli palkista olisi tullut yliraidoitettu eli β ja μ arvot olisivat ylittäneen raja-arvot, olisi palkin poikkileikkausta muutettava.

Lasketaan vetoraidoituksen pinta-ala

$$A_s = (0,2555322 * 380 \text{ mm} * 632 \text{ mm} * 17 \text{ N/mm}^2) / 435 \text{ N/mm}^2 = 2398 \text{ mm}^2$$

Vähimmäisraidoitus lasketaan kaavasta (RIL 202-2011)

$$A_{s,min} = 0,26 * f_{ctm} * d * b / f_{yk} > 0,0013 * b * d \quad (8)$$

Jossa

f_{ctm} on betonin keskimääräinen vetolujuus

f_{yk} on betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo

$$A_{s,min} = 0,26 * 2,9 \text{ N/mm}^2 * 632 \text{ mm} * 380 \text{ mm} / 500 \text{ N/mm}^2 = 362 \text{ mm}^2 > 0,0013 * 380 \text{ mm} * 632 \text{ mm} = 312 \text{ mm}^2$$

Minimiteräsmäärä täyttyy.

Leikkausraidoitus lasketaan kaavasta (BY 211 2013)

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad (9)$$

Jossa

A_{sw} on leikkausraidoituksen poikkileikkausala

s on hakojen jakoväli

f_{ywd} on leikkausraidoituksen myötölujuuden mitoitusarvo

θ on puristussauvan kaltevuus väliltä $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$

z on sisäinen momenttivarsi $0,9 * d$

Kaava käännetään muotoon,

$$s \leq \frac{A_{sw}}{V_{Ed}} z f_{ywd} \cot \theta \quad (10)$$

jotta saadaan hakaväli suurimmalle leikkausvoimalle. θ kulma valitaan $21,8^\circ$, jolloin $\cot\theta = 2,5$. Pääraudoituksen ankkurointivaatimus riippuu θ kulman arvosta. Tämä tulisi normaalisti myöhemmin tarkistaa ja tarvittaessa muuttaa. Tässä työssä ankkurointipituutta ei oteta kuitenkaan huomioon, jolloin puristussauvan kaltevuudeksi valitaan pienin mahdollinen. Näin leikkausraudoituksen hakajako pienenee. (BY 211. 2013)

Haka on umpihaka, jolloin sen poikkileikkauspinta-ala on kaksi kertaa valittu poikkileikkaus. Näin $\varnothing 8$ mm haan poikkileikkausala on 101 mm^2

$$s = (101 \text{ mm}^2 / 328\,400 \text{ N}) * 569 \text{ mm} * 435 \text{ N/mm}^2 * 2,5 = 190,3 \text{ mm}$$

Hakojen suurin sallittu väli lasketaan kaavasta

$$s_{max} = 0,75d (1 + \cot\alpha) = 0,75 * 632 \text{ mm} * (1 + 0) = 474 \text{ mm}$$

5.3.2 Raudoituksen laskenta RFEM-lisämoduulilla

Raudoitus lasketaan käyttämällä ohjelman lisämoduulia *RF-CONCRETE Members*. Lisämoduuli laskee palkeille raudoituksen ohjelman laskemien rasitusten mukaisesti. Moduulilla voi laskea mitä tahansa betonista palkkia, joka malliin on luotu. Moduulilla pystyy tekemään myös erillisen palomitoituksen, mutta tässä laskelmassa sitä ei oteta huomioon.

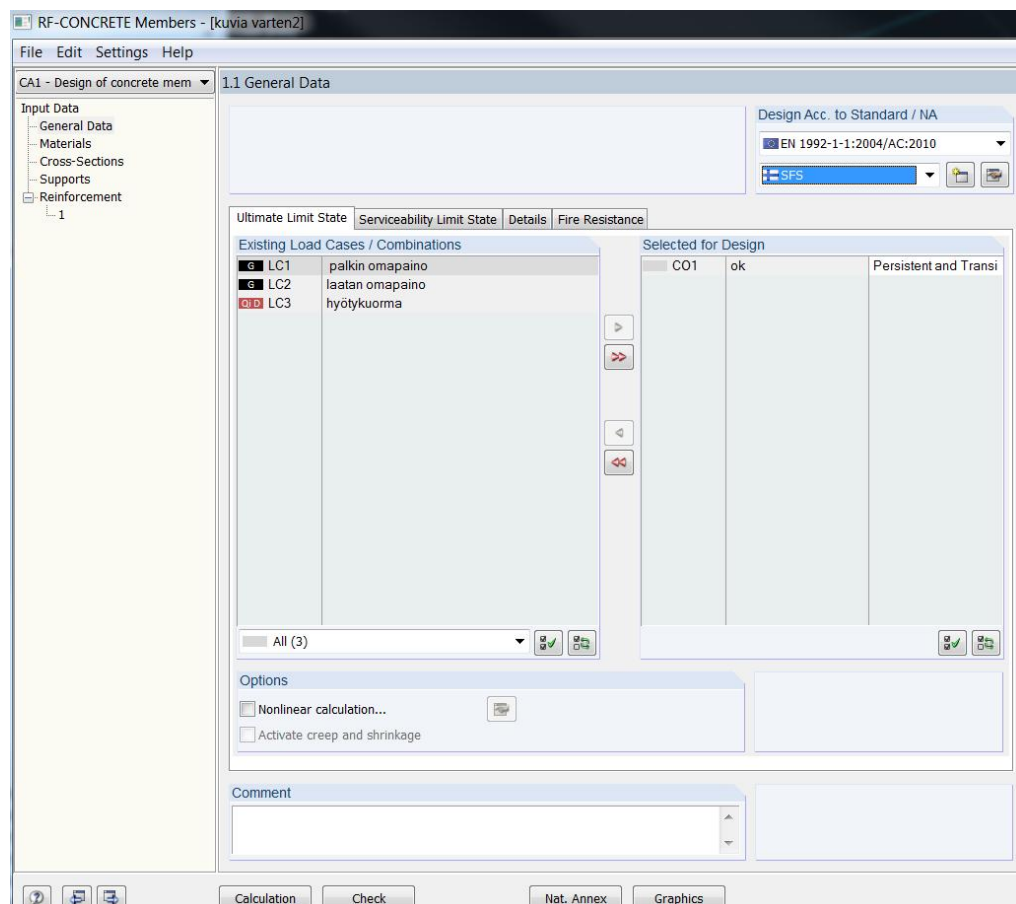
Lisämoduulissa valitaan haluttu palkki, jonka jälkeen syötetään halutut tiedot. Ensimmäisenä tarkastetaan laskennassa käytettävä standardi ja sen kansallinen liite. Samalta välilehdeltä valitaan käytettävä kuormitusyhdistelmä. Käytetään samaa kuormitusyhdistelmää kuin rasitusten laskennassa.

Materiaalivalikosta valitaan käytettävä teräslaatu kullekin betonilujuudelle. Tässä laskennassa käytetään betoniteräksenä B500B. Kyseisen teräksen myötölujuuden ominaisarvo on 500 MPa. Tämä on tarkistettava aina. Ohjelmassa on paljon samankaltaisia teräslajeja, jotka eroavat toisistaan hieman lähinnä murtolujuudessa. Tämä ei ole kuitenkaan olennainen tieto laskettaessa palkin raudoitusta. Valitaan käytetäänkö holvivaikutusta leikkausraudoituksen minimoimiseksi. Laskennan alussa päätettiin

olla hyödyntämättä holvivaikutusta, joten se otetaan pois asetuksista. Tässä vaiheessa määritetään myös käytetäänkö betonin vetolujuutta. Yleisesti betonin vetolujuutta ei käytetä laskelmissa ja sitä ei ole myöskään huomioitu käsinlaskennassa. Mikäli valitaan raudoituksen optimointi, ohjelma laskee raudoituksen lähes minimiin. Tätä ei kuitenkaan suositella, sillä virheille ei jää tässä tapauksessa varaa.

Ennen laskentaa valitaan vielä raudoituksen tiedot. Tärkeimpänä ovat pääraudoituksen koko, hakaraidoituksen koko, haan muoto, betonipeite, vähimmäisraudoitus, raudoituksen jako sekä betonin ja teräksen osavarmuuskertoimet.

Pääraudoituksen kooksi valitaan $\varnothing 20$ mm, haaksi $\varnothing 8$ mm umpihaka, betonipeite 30 mm, vähimmäisraudoitus ja jako standardin mukaan. Osavarmuuskertoimet betonille 1,5 ja teräkselle 1,15.



Kuvio 8. Lisämoduuli RF-CONCRETE Members. (Heikonen 2016)

Ohjelma esittää tiedot laskennan jälkeen jokaiselle laskemalleen osalle. Tässä laskennassa kiinnostaa vain palkin raudoitus. Ohjelma antaa raudoitusten pinta-alat ja raudoitusehdotuksen. Ohjelman esittämä pääraudoituksen pinta-ala on 2337 mm² ja halka-raudoituksen pinta-ala 525 mm²/m. Tuloksissa vertaillaan raudoitusten eroja.

6 Tulokset

6.1 Rasitukset

Rasitusten arvot saatiin määritettyä standardien mukaisesti sekä käsin että RFEM-ohjelmalla. Taulukossa 3 on listattu rasitusten arvot ja niiden prosentuaalinen ero. Nämä rasitukset kuvaavat momentin ja leikkauksen huippuarvoja palkissa. Tuloksista nähdään, että eroa ei ole. Tuloksien yhtenevyys johtuu todennäköisesti rakenteen yksinkertaisuudesta. Näin ollen huomattavia virheitä ei pääse tapahtumaan laskelmien välillä. Mikäli tutkittava rakenne olisi ollut esimerkiksi kehä, eroja olisi todennäköisesti syntynyt enemmän. On myös huomioitava että työssä on tarkastettu laskelmaa tuloksien saamiseksi. Näin ollen tyypillisesti saatavat rasitukset saattaisivat poiketa saaduista.

Taulukko 3. Palkin rasitusten vertailu

Rasitus	M _{ed} , kNm	V _{ed} , kN
Käsinlaskenta	574,70	328,40
RFEM	574,70	328,40
Ero	0 %	0 %

6.2 Palkin raudoitus

Raudoitukset määriteltiin käsinlaskennalla EN-1992-1 mukaisesti käyttäen apuna BY 60 ja BY211 julkaisuja. Taulukossa 4 on esitetty raudoitusten arvot pinta-aloina ja kappalemäärinä.

Taulukko 4. Palkin raudoituksen vertailu

Raudoitus	Pääraudoitus	Leikkausraudoitus, mm ²
Käsinlaskenta	2398	531
RFEM	2337	525
Ero	3 %	1 %

7 Pohdinta

7.1 Ohjelman käyttö

RFEM:llä tapahtuva rakenteiden suunnittelu vaatii huomattavaa perehtymistä ohjelmaan, koska tulokset voivat heitellä suuresti käyttäjästä riippuen. Suunnittelijan tulee opetella ohjelman ominaisuudet hyvin ennen kuin pystyy suunnittelemaan edes yksinkertaisia rakenteita. Monimutkaisempia rakenteita suunniteltaessa ohjelmaan on täytynyt syventyä kauan, jotta tuloksista saadaan luotettavia.

Myös *Autodeskin Robot Structures* -ohjelmaan hieman tutustuneena voin kuitenkin todeta, että *RFEM* on paljon käyttäjäystävällisempi ja ominaisuuksiltaan hieman kattavampi. Myös työyhteisöni jäsenet ovat kertoneet vastaavaa.

Ohjelmaa voi hyödyntää yhdessä 2D- ja 3D- ohjelmien kanssa. *RFEM*:in lisäksi täytyy kuitenkin hallita nämäkin ohjelmat ja osata näiden yhteensovittaminen.

7.2 Hyödyt

Kokenut käyttäjä voi hyödyntää ohjelmaa monilla eri tavoilla. Jos rakennuksesta on luotu laskentamalli, rakennesuunnittelija voi mitoittaa kaikki rakenneosat saman mallin avulla. Näin ei tarvitse käyttää muita laskentapohjia tai käsin laskentaa. Samalla pystytään tarkastelemaan stabiliteettia. Stabiliteetin tarkasteleminen on erittäin tärkeää ja vaativaa jo tavanomaisessa rakennuksessa. Vaikeusaste kasvaa siirryttäessä monimutkaisiin rakennuksiin, jotka on tehty useasta eri materiaalista ja ovat erikoisen muotoisia. Käsin näiden laskeminen on työlästä, ja tuloksiin voi olla hankala luottaa, mikäli kokemusta ei ole.

Vaikka rakennuksesta ei olisi luotu kaiken kattavaa laskentamallia, käyttäjä voi tehdä mallin yksittäisistä vaikeimmista rakenneosista. Yksi tällainen osa on usein laatat. Laatat voivat olla monikulmaisia ja niissä voi olla paljon reikiä, jolloin rasiusten käsin laskenta vaikeutuu. Laskentamallin tekeminen laatasta ei kestä kokeneelta käyttäjältä sen enempää kuin käsin laskenta ja tulokset ovat paljon kattavammat.

Ohjelman yksi suurimmista hyödyistä verrattuna käsinlaskentaan on muutoksien teko. Rakennuksia suunniteltaessa muutoksia tulee yleensä alussa jatkuvasti. Laskentaa voidaan joutua tekemään stabiliteetin takia aluksi hyvinkin paljon, vaikka rakenteet eivät ole vielä selvillä. Kun muutoksia tulee, mallia ei tarvitse tehdä kokonaan alusta vaan tarvittavat muutokset mallinnetaan ja lasketaan uudestaan. Käsin laskennassa joudutaan usein aloittamaan alusta, mikä lisää työmäärää huomattavasti.

7.3 Ongelmat

Jotta ohjelmaa voi hyödyntää, sitä on opeteltava paljon. Vaikka malli olisi jo tehty oikein, tuloksien ulos saaminen aloittelijalle on melkoisen työn takana. Tuloksista otetaan usein yksittäisiä tulosteita, joita pitää myös osata lukea. Käytännössä projektissa on yksi henkilö, joka vastaa laskentamallista. Hän mallintaa ja ottaa rasituksista tulosteita, joita muut hyödyntävät suunnitellessaan rakenteita. Mikäli ison projektin aikataulu on tiukka ja laskelmia tarvitaan paljon, voi laskentamallivastaavalla olla liikaa töitä. Tässä vaiheessa projektiin voidaan lisätä toinen henkilö, joka tekee malliin

muutoksia. Kun kaksi henkilöä tekee mallia, on oltava tiedossa kuka tekee mitäkin osaa ja mitä muutoksia on tehty.

Ongelmaksi muodostuu myös, mikäli mallin tehnyt henkilö jää yllättäen töistä pois esimerkiksi sairausloman ajaksi. Mikäli hän on ainut projektissa mukana oleva, joka osaa käyttää ohjelmaa, voivat tulokset jäädä saamatta tältä ajalta. Mikäli tätä tehtävää otetaan hoitamaan joku projektin ulkopuolinen henkilö, tulee hänen tutustua projektiin ja laskentamalliin ennen kuin hän voi alkaa tekemään tulosteita rasiuksista.

7.4 Mahdollisuudet

Tietokoneohjelmille on tyypillistä kehittyä jatkuvasti. Dlubal työstää jatkuvasti uusia mitoitusmoduuleita, joita voidaan hyödyntää ohjelmassa. Tällä hetkellä lisämoduleita kehitetään mm. puuliitoksille Eurokoodi 5 mukaan ja teräslitoksille Eurokoodi 3 mukaan. Ohjelmassa on jo nyt mahdollista tuoda kokonainen 3D-malli esimerkiksi Tekla structuresista ja laskea se. Näin säästytään kahden eri mallin tekemiseltä rinnakkain. 3D-mallin tuonnissa on kuitenkin vielä ongelmia, sillä malli tarvitsee olla tietynlainen. Muuten tuloksia ei saada tai ne ovat virheellisiä.

FEM-malli on syytä säilyttää koko rakennuksen elinkaaren ajan, sillä se on hyödynnettävissä myös korjausrakentamisessa ja tilojen käyttötarpeen muuttuessa. Korjausrakentamisessa voidaan tutkia miten tiettyjen rakenteiden muuttaminen tai poistaminen vaikuttaa koko rakennukseen. Käyttötarpeen muuttuessa voidaan tutkia, kestävätkö rakenteet uudet kuormat.

FEM-laskennan tulevaisuuden utopiana voidaan pitää tilannetta, jossa valmis 3D-malli tuodaan laskentaohjelmaan, jossa lisätään kuormat ja valitaan itselle sopivat kuormitusyhdistelmät. Tämän jälkeen ohjelma laskisi rasiukset ja tämän perusteella mitoittaisi rakenteet. Tämän jälkeen laskentaohjelma veisi mitoituksen antaman raudituksen suoraan 3D-malliin.

7.5 Johtopäätökset

FEM-laskennan ideana on tuottaa voimasuureet rakenteesta. Samalla voidaan pyrkiä tuottamaan rakenteellinen ratkaisu. Tähän RFEM-ohjelma antaa hyvän lähtökohdan. Työssäni kehitin ohjeen, jotta päästäisiin lähemmäksi tätä ratkaisua. Työn edetessä päätin tehdä myös vertailulaskelman, jotta nähtäisiin onko ohjelman laskentamoduulit hyödynnettävissä päivittäisessä suunnittelussa.

Vertailulaskelmien rasituksien erot olivat 0 %. Tulos olisi epäilemättä erilainen, mikäli rakenne olisi monimutkaisempi ja kaksi eri henkilöä olisi suorittanut laskelmat. Toinen olisi tehnyt käsinlaskennan ja toinen käyttänyt ohjelmaa laskentaan. Näin yksinkertaisessa rakenteessa ei pääse syntymään eroja laskennan välillä ilman huomattavaa virhettä.

Raudoituksen laskennassa syntyi pientä eroa. Kuitenkaan huomattavaa, rakenteisiin vaikuttavaa, eroa ei ole havaittavissa. Käytännössä siis valittaisiin sama raudoitus molemmilla tapauksissa. Tähän vaikuttaa ennalta valittu palkki ja raudoituksen koko. Mikäli kumpikin laskelma olisi tehty erikseen piittaamatta toisessa tehdyistä valinnoista, olisivat palkin koko ja raudoitus varmasti erilaisia.

RFEM-ohjelman monipuolista hyödyntämistä varten tulee käyttäjällä olla kokemusta tietotekniikasta, FEM-laskennasta, ohjelman käytöstä ja rakennesuunnittelusta. Vain kaikki nämä yhdistämällä voidaan saada luotettavia tuloksia aikaiseksi. Mikäli ohjelmaa osaa käyttää, mutta muut osatekijät puuttuvat on syytä antaa toisen henkilön tarkastaa laskelmat.

Yksinkertaisten yksittäisten rakenneosien mitoitukseseen RFEM soveltuu erittäin hyvin. Ohje on tehty tätä käyttöä mielessä pitäen. Toisaalta myös käsinlaskenta on suhteellisen helppoa yksinkertaisille rakenneosille. Tämä mielessä ohjeeni toimii hyvänä perustana, mutta konsernissa on jo mietitty lisäohjeiden tekemistä ohjelmaan. Tämän tavoitteena on saada ohjelman käytöstä yleisempää, helpompaa ja monipuolisempaa.

Vaikeuksia täydellisen betonirakenteiden mitoituksen tekemiseen ohjelmalla on. Tähän on syynä käyttörajatilamitoitus, joka kyllä huomioidaan ohjelmassa. Ohjelma ei kuitenkaan huomioi raudoitusta, joka pienentää halkeamia ja taipumaa. Tulokset

ovat siis lähtökohtaisesti väärin. Näin ollen halkeilu ja taipuma tulee mitoitaa usein tarkemmin.

7.6 Tavoitteiden saavuttaminen

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda RFEM-ohjelman käyttöohje konsernin työntekijöiden käyttöön. Samalla oli tarkoitus opetella ohjelman käyttöä, jotta sitä osaamista voitaisiin hyödyntää työelämässä. Tavoitteet saavutettiin ja lopputuloksena syntyi 28 sivuinen käyttöohje. Ohje käsittelee rakenneosien mallintamista sekä kuormien ja kuormitusyhdistelmien luontia. Tämän lisäksi keskitytään mallin laskentaan ja tuloksien tarkasteluun.

Toimeksiantaja esitti, että ohjeessa keskitytään betonirakenteisiin ja näiden rasiuksien mitoitamiseen. Näin ohjetta voi tällä hetkellä käyttää vain betonirakenteiden suunnitteluun, mutta sitä voidaan soveltaa käytännössä myös teräsrakenteisiin. Ohjetta tullaan laajentamaan jatkossa joko erillisillä lisäosilla tai tuottamalla lisää materiaalia suoraan ohjeeseen.

Tavoitteena oli myös vertailla käsinlaskennan ja ohjelman antamien rasiusten eroja, sekä ohjelman laskentamoduulin antamaa raudoitusta käsin saatavaan raudoitukseen. Tavoitteeseen päästiin, mutta tuloksien luotettavuus ei ole allekirjoittaneen mielestä hyvä. Tulos ei ole toistettavissa ja näin ollen tapauskohtainen.

Toimeksiantaja Sweco Rakennetekniikka Oy on hyödyntänyt FEM-laskentaa jo vuosia ja kyselyjeni perusteella *RFEM* on paras ja monipuolisin ohjelma. Tämän vuoksi ohjeita kyseiselle ohjelmalle tullaan kehittämään lisää. Toivon, että tekemäni ohje palvelee niin aloittelevia kuin kokeneita käyttäjiä.

Lähteet

Betoniteollisuus. N.d Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan: Osa 4, Palkit

BY210. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Julk. Suomen Betoniyhdistys. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

BY 211. 2013. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja: Osa 1. Julk. Suomen Betoniyhdistys. Helsinki: BY-koulutus.

BY 50. 2012. Betoninormit. Julk. Suomen Betoniyhdistys. Helsinki: BY-koulutus.

BY 51. 2007. Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu. Julk. Suomen betoniyhdistys. Helsinki: BY-koulutus.

BY 60. 2009. Suunnitteluohje EC 2: osat 1-1 ja 1-2. Julk. Suomen Betoniyhdistys.

Cook, R. D., Malkus D. S., Plesha M. E., Witt R. J. 2001. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. Neljäs painos. 1-3

Dlupal a. N.d. Dlupalin kotisivut. viitattu 20.2.2016

<https://www.dlupal.com/en/company/about-us/history-and-facts>

Dlupal b. N.d. Manual RFEM 5. 2013. viitattu 12.4.2016

<https://www.dlupal.com/en/downloads-and-information/documents/manuals>

Kvalitatiivinen tutkimus luo aina uutta. N.d. Inspirans Oy. Viitattu 5.5.2016.

<http://www.inspirans.fi/kvalitatiivinen-tutkimus/>

Lähteenmäki. M. N.d. Elementtimeneltelmän perusteet. Viitattu 15.3.2016

http://personal.inet.fi/koti/mlahteen/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf

Rakentajainkalenteri 2014. 2014. Rakennustieto Oy. Helsinki

RIL 201-1-2011. 2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat: Eurokoodit EN 1990, EN1991-1-1, EN 1991-1-3 ja EN 1991-1-4. Helsinki 2011, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 202-2011/BY 61. 2011. Betonirakenteiden suunnitteluohje: Eurokoodit EN 1992-1-1 ja EN 1992-1-2. 2011. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ja Suomen Betoniyhdistys.

Sweco Finlandin organisaatiokaavio ja juridisesta omistusrakenteesta kertova kaavio julkaistu. n. d. Swecon Intranet. Viitattu 18.2.2016.

<http://intranet.sweco.se/fi/Inside-Sweco/Uutisarkisto/2015/1/Sweco-Finlandin-organisaatiokaavio-ja-juridisesta-omistusrakenteesta-kertova-kaavio-julkaistu/>

Sweco Suomessa. n.d. Swecon Internet-sivut. Viitattu 18.2.2016. <http://www.sweco.fi/fi/Finland/Sweco-Suomessa/>.

Tikkanen E. 2016. Rakennetekniikan DI. Sweco rakennetekniikka. Keskustelu 1.4.2016

Liitteet

Liite 1. RFEM käyttöohje 2016, ei-julkinen