

LAB-ammattikorkeakoulu  
Tekniikka Lappeenranta  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus  
Talonrakennustekniikka

Janne Liimatta

## **FEM- ja käsinlaskennan erot jatkuvien betonipalkkien mitoituksessa**

Opinnäytetyö 2020

## Tiivistelmä

Janne Liimatta

FEM- ja käsinlaskennan erot jatkuvien betonipalkkien mitoituksessa, 61 sivua, 13 liitettä

LAB-ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus

Talonrakennustekniikka

Opinnäytetyö 2020

Ohjaajat: lehtori Petri Himmi, LAB-ammattikorkeakoulu, projektipäällikkö Jouni Rytkönen, Sitowise Oy

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia eroja jatkuvien betonipalkkien mitoituksessa kahden eri laskentamenetelmän välillä ja pohtia mahdollisia syitä eroihin. Tarkoituksena oli myös löytää ratkaisuja mahdollisiin ongelmakohtiin. Työn tilaajana toimi Sitowise Oy.

Työ toteutettiin valitsemalla tutkittavat rakenne- ja materiaaliyhdistelmät. Molemmat laskentamenetelmät noudattavat eurokoodin periaatteita. Microsoft Excel -pohjainen laskenta-alusta tehtiin simuloimaan käsinlaskentaa. Erilaiset palkit mitoitettiin sekä FEM-design-ohjelman automaattisella suunnittelutyökalulla että luodulla alustalla. Tulokset kirjattiin ja niistä luotiin grafiikkaa havainnollistamaan trendejä ja suuruusluokkaeroja. Erojen ilmetessä pyrittiin arvioimaan, mistä kyseiset erot johtuivat.

Työn tuloksina havaittiin FEM-design-ohjelman automaattisen suunnittelutyökalun raudoittavan palkkeja enemmän kuin eurokoodipohjainen käsinlaskenta vaatisi. Erot voivat johtua esimerkiksi ohjelmiston virheestä tai liiallisesta varmuudesta. Manuaalisella suunnittelulla ohjelma kuitenkin hyväksyi käsinlaskien saadun raudoituksen riittäväksi. Tämä viittaisi ohjelman automaattisessa suunnittelussa olevan ylimääräistä varmuutta. Käyttäjän osaamisen merkitys FEM-pohjaisessa suunnittelussa on merkittävä.

Asiasanat: FEM, FEA, palkki, raudoite, Eurokoodi, betoni

## **Abstract**

Janne Liimatta

Differences between FEM and hand calculations in continuous beams, 61

Pages, 13 Appendices

LAB University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Degree Programme in Construction and Civil Engineering

Civil Engineering

Bachelor's Thesis 2020

Instructors: Mr Petri Himmi, lecturer, LAB University of Applied Sciences, Mr Jouni Rytönen, project manager, Sitowise Oy.

The purpose of the study was to find possible differences in two calculation methods, FEM and hand calculations, in continuous beams. If differences were to be found, reasons for them should also be investigated. The work was commissioned by Sitowise Oy.

The study began by selecting the wanted structure and material combinations. Both calculation methods follow the rules of Eurocode. Microsoft Excel-based calculation platform was created to simulate hand calculations. Different beams were calculated with FEM-design's auto design tool and Excel-platform. Results were collected and graphs were created to find out possible trends. Where differences were found, reasons for them were examined.

Based on the findings, FEM-design uses far more reinforcement than would be necessary when compared to hand calculations. Reasons for this might be that FEM-design has a flaw or it has been set to give safer results. The program would accept the same reinforcement as calculated by hand being sufficient. This would hint that there is some hidden safety factor in the program's automatic design. The user's skill has a high impact on the success of computer-based designing.

Keywords: FEM, FEA, beam, reinforcement, Eurocode, concrete

## Sisällys

1	Johdanto .....	6
2	Materiaalit .....	6
2.1	Betoni.....	6
2.2	Teräs.....	7
3	Tutkittava rakenne .....	8
3.1	Palkki .....	8
3.2	Jatkuva rakenne .....	11
3.3	Rasitukset.....	13
4	FEM-laskenta.....	15
4.1	Elementtimenetelmä .....	15
4.2	FEM-design ja StruSoft.....	17
5	Teräsbetonirakenteiden suunnittelu ja ilmiöt.....	17
5.1	Teräsbetonirakenteen toiminta .....	17
5.2	Tukimomentti .....	18
5.3	Ympäristörasitusluokka.....	18
5.4	Halkeilu .....	19
5.5	Viruma .....	20
5.6	Vääntö .....	20
5.7	Ankkurointi .....	21
5.8	Puristusraudoitus .....	21
6	Laskennan lähtötiedot.....	21
6.1	Tutkittava rakenne .....	21
6.2	Raudoitus.....	22
6.3	Kuormat .....	22
6.4	Ympäristörasitusluokka ja betonipeitepaksuus .....	25
7	Käsinlaskenta .....	26
7.1	Taivutusmitoitus .....	26
7.2	Leikkausmitoitus .....	29
7.3	Ankkurointimitoitus.....	30
7.4	Viruma .....	32
7.5	Halkeamaleveys .....	33
7.6	Taipumamitoitus .....	35
8	Excel-laskentapohja.....	38
9	FEM-laskennan kuvaus .....	40
10	Tulosten kokoaminen.....	44
11	Tulokset.....	45
11.1	Pääteräkset .....	46
11.2	Leikkaushaati .....	47
11.3	Ankkurointipituus .....	48
11.4	Kokonaisteräsmäärät.....	49
11.5	Halkeamaleveys .....	50
11.6	Käyttöasteet.....	50
11.7	Betonin lujuusluokan vaikutus .....	51
11.8	Taipuma.....	51
11.9	Optimointi .....	52
11.10	Tukimomentin pyöristys .....	53
11.11	Yhteenveto .....	55
12	Pohdinta.....	56

Liitteet

- Liite 1 Käsinelaskenta 280x480
- Liite 2 FEM-laskenta 280x480
- Liite 3 Pääteräsmäärät, %-erot
- Liite 4 Raudoitustonnit, pääteräkset
- Liite 5 Raudoitustonnit, haat
- Liite 6 Hakateräsmäärät, %-erot
- Liite 7 Raudoitustonnit
- Liite 8 Raudoitustonnit, %-erot
- Liite 9 Halkeamaleveydet
- Liite 10 Käyttöasteet
- Liite 11 FEM-käyttöasteet
- Liite 12 FEM-raudoitusmäärät
- Liite 13 FEM-laskenta, manuaalinen suunnittelu 280x480

# 1 Johdanto

Sitowise on voimakkaasti kasvanut 1700 hengen asiantuntijayritys. Yritys tarjoaa erilaisia rakennettuun ympäristöön liittyviä palveluja saman katon alta. Sitowise toimii 21:llä paikkakunnalla Suomessa ja kuudella Ruotsissa. Muut toimipisteet sijaitsevat Virossa ja Latviassa. (Sitowise Oy.)

Työn tarkoitus on selvittää työelämässä esiin tulleita eroja jatkuvien palkkirakenteiden mitoituksessa ja raudoitusmäärissä kahden eri laskentamenetelmän välillä. FEM-ohjelmien on havaittu antavan suurelta tuntuvia raudoitusmääriä. Käsiteltävät menetelmät ovat käsinlaskenta eurokoodin mukaisesti ja tietokonepohjainen FEM-laskenta. Käsinlaskenta suoritetaan BY211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1:n ohjeiden mukaan kansallisia parametreja käyttäen. FEM-laskentaan käytetään StruSoftin FEM-design 18 -ohjelmaa, joten mahdolliset ongelmat ja ratkaisut kohdistuvat tälle ohjelmalle, eikä tässä työssä tehtyjä johtopäätöksiä voida suoraan yleistää muihin laskentaohjelmiin. Saatuja tuloksia vertaillaan ja pyritään löytämään ratkaisuja mahdollisten ongelmakohtien poistamiseksi.

Työssä tarkastellaan betonipalkkien pääteräksiä, leikkaushakoja ja ankkurointia. Työssä tutkitaan betonin lujuuksia välillä C20/27-C50/60. Lujuusluokkia rajoittaa minimivaatimus rasitusluokan mukaisesti ja yksinkertaistetun jännitys jakauman käyttö. Työssä tutkitaan myös muita esiin tulevia eroavaisuuksia laskentamenetelmien välillä, esimerkiksi halkeamaleveyksiä ja ankkurointipituuksia. T-poikkeikkausta hyödyntäviä palkkeja ei tutkita. Työssä ei käsitellä jännitettyjä rakenteita. Palkkien rei'ityksiä ei myöskään huomioida eikä vääntömomenttia tutkita.

## 2 Materiaalit

### 2.1 Betoni

Betoni on maailman yleisin rakennusmateriaali, jota valmistetaan miljardeja kuutiometrejä vuosittain (Betoniteollisuus Ry). Betoni valmistetaan sementistä, ve-

destä ja runkoaineesta eli kivistä. Betoniin voidaan lisätä lisäaineita, joilla betonin ominaisuuksia, esimerkiksi pakkasenkestävyyttä saadaan parannettua. Betonissa kivi välittää kuormia ja sementtiliima sitoo runkoaineen toisiinsa. Betonin hyviä ominaisuuksia ovat lujuus, muovailtavuus, pitkä käyttöikä, vähäinen huollon tarve, kierrätettävyys, tiiveys, lyhyet kuljetusmatkat ja kustannustehokkuus. Betonin heikkouksia ovat toistaiseksi suurehkot hiilidioksidipäästöt ja uusiutumattomien kiviainesten kulutus.

Betonin säilyvyysominaisuuksiin vaikuttavat pääsääntöisesti ympäristöolosuhteet, sillä betonin vaurioituminen liittyy usein sen vedenläpäisevyyteen ja ioneihin, jotka esiintyvät veteen liuenneina ja ilmassa (Suomen betoniyhdistys ry 2008, 49).

Tässä opinnäytetyössä betonin lujuuden oletetaan olevan standardin EN 206-1 mukainen 28 vuorokauden ikäisenä määritetty lieriölujuuden ominaisarvo  $f_{ck}$ , eikä oteta kantaa mahdollisiin valmistusvirheisiin, jotka huonontaisivat betonin lujuutta.

## **2.2 Teräs**

Teräs on tärkein käyttömetalli, joka erottuu muista rakennusmateriaaleista suurella lujuudellaan. Se erottuu edukseen varsinkin vetorasitettuna, jossa monet muut materiaalit eivät juurikaan pärjää. Teräs eroaa valuraudasta alle 1,7 %:n hiilipitoisuudellaan. Teräslaatuja on olemassa lukuisia ja ne ovat standardisoituja. Suomi on sitoutunut EN-standardisointiin, jonka mukaisia teräslajeja myös tässä työssä käytetään. Teräksen etuja ovat muun muassa suuren lujuuden mahdollistamat pienet rakennemitat, hitsauksen mahdollistamat liitosmenetelmät, hyvä muuntojoustavuus, hyvä kulutuskestävyys ja palamattomuus. Teräs ei myöskään välitä juurikaan kosteuden vaihtelusta ja sitä voidaan valmistaa halutuilla ominaisuuksilla. Sen homogeenisyys helpottaa myös käyttöä. Teräksen käyttöä puoltavat myös sen hyvät uusiokäyttömahdollisuudet. Osia voidaan käyttää uusiksi sellaisinaan, tai ne voidaan sulattaa ja työstää uusiksi tuotteiksi. Huonoja ominaisuuksia ovat teräksen lujuuden merkittävä heikkeneminen tulipalotilanteissa, korrosio-ongelmat ja työmaalla työstämisen haasteet. Teräkseen voidaan seostaa

erinäisiä aineita, joilla voidaan muuttaa teräksen rakennetta, ominaisuuksia ja korroosionkestävyyttä. Jos teräksessä on kromia vähintään 10,5 %, on kyseessä ruostumaton teräs. (Väisänen 2007.)

### **3 Tutkittava rakenne**

#### **3.1 Palkki**

Palkki on sauvamainen rakenneosa, jonka pääasiallinen kuormitus on pituusakselia vastaan kohtisuoraan suuntautuvaa ja aiheuttaa ensisijaisesti taivutus- ja leikkausrasituksia (Suomen betoniyhdistys ry 2008, 79).

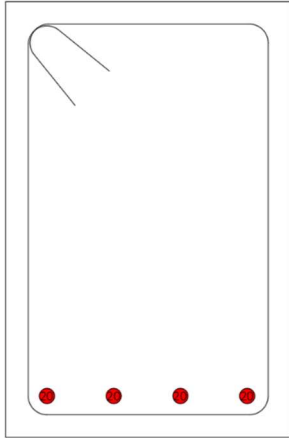
Palkkeja käytetään yleensä tasojen tukemiseen. Palkkien yleisimpiä käyttökohteita ovat kohteet, joissa tarvitaan avaria tiloja ja muuntojoustavuutta, kuten toimisto-, liike- ja teollisuusrakennukset. Pilari-palkkirunkojärjestelmän haaste on jäykistävien rakenneosien vähäisyys. (Betoniteollisuus Ry 2010 b.)

Kuvassa 1 on esitetty suorakaidepalkkien suositellut koot, joita tässä työssä on käytetty.

		PALKIN LEVEYS				
		2M 180	3M 280	4M 380	5M 480	
PALKIN KORKEUS	3M 280					
	4M 380					
	5M 480					
	6M 580					SUOSITELTAVIN
	7M 680					SUOSITELTAVA
	8M 780					
	9M 880					
	10M 980					

Kuva 1. Suorakaidepalkkien suositellut koot (Betoniteollisuus ry.)

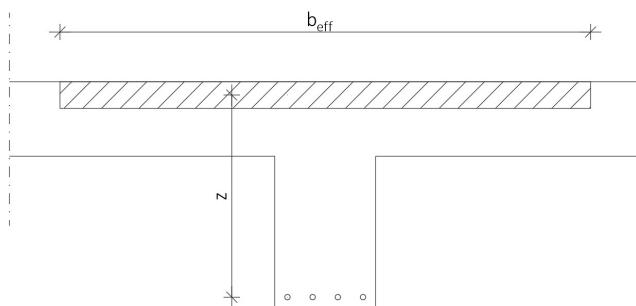
Palkkien rauditus koostuu pääteräksistä, jotka toimivat momenttia vastaan, sekä leikkaushaoista, jotka toimivat leikkausta ja vääntöä vastaan. Pääteräkset tulee ankkuroida ankkurointipituudella päistään. Raudoitusta tulee palkissa olla aina vähintään minimimäärä. Kuvassa 2 on esitetty periaatekuva palkin raudoituksesta poikkileikkauksessa, jossa momentti on positiivinen, eli palkin alareuna on vedetty.



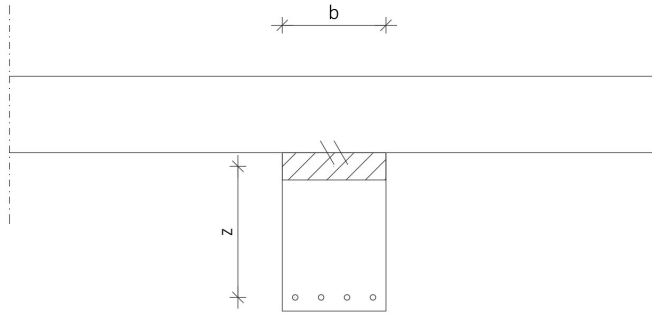
Kuva 2. Palkin poikkileikkaus

Betonirakenteissa voi olla erilaisia palkkeja, esimerkiksi laatansisäinen palkki. Erilaiset palkit toimivat hieman eri tavalla, joten tämä tulee huomioida FEM-mallin luomisessa. T-poikkileikkauksissa puristuspuolella voidaan laskettaessa levittää teholliselle leveydelle  $b_{eff}$  laattaaan, jolloin betonin puristuskestävyyttä saadaan hyödynnettyä huomattavasti paremmin. Mikäli esimerkiksi elementtipalkki on laatan kannattimena ilman liittotappeja, ei tällaista menetelmää voida käyttää.

Kuvissa 3 ja 4 on havainnollistettu rakenteiden eroja palkin toimiessa T-poikkileikkauksena ja palkin ja laatan toimiessa erillään. Puristuspuolella on esitetty rasteroituna. Tässä työssä on ajateltu palkin toimivan kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 3. T-poikkileikkaus



Kuva 4. Palkki ja laatta

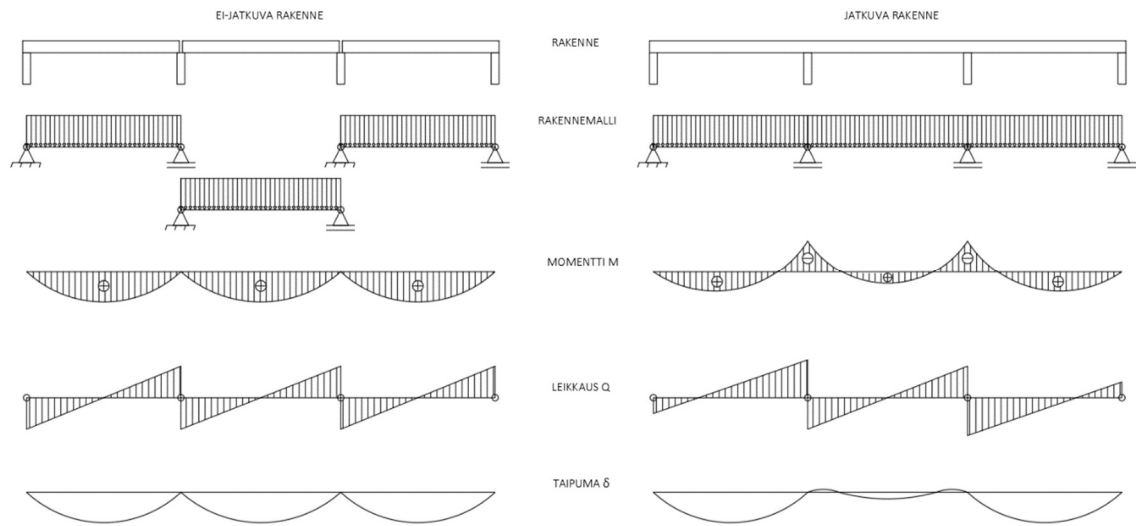
### 3.2 Jatkuva rakenne

Jatkuvilla rakenteilla on enemmän tukia kuin tasapainoehdot vaativat, jolloin rakenteet ovat hyperstaattisia, eli staattisesti määräämättömiä. Kun rakenne on staattisesti määräämätön, sen tukireaktioiden ja rasiusten määrittelyyn tarvitaan tasapainoehtojen lisäksi siirtymäkentän yhteensopivuusehtoja sekä materiaaliyh-tälöitä. (Salmi & Pajunen 2010, 217.)

Hyperstaattisten rakenteiden rasiusten ratkaisumenetelmä käsinlaskiessa voi olla esimerkiksi yksikkövoimamenetelmä. Tässä työssä on käytetty siirtymiin pe-rustuvaa menetelmää, jossa rakenteesta poistetaan tukia ja niitä korvataan 1:n arvoisilla voimilla, kunnes jäljelle jää rakenteen isostaattinen, eli staattisesti mää-rätty, perusmuoto. Perusmuodon avulla voidaan ratkaista rakenteen kuormista aiheutuvat siirtymät sekä rakenteen tukien tilalle asetettujen yksikkövoimien ai-heuttamat siirtymät rakenteen tarkastelukohdissa. Siirtymät merkitään nollassi tu-kien kohdalla ja muodostetaan yhtälöryhmä, jossa yhtälöitä on yhtä paljon kuin poistettuja tukia. Tästä yhtälöryhmästä voidaan ratkaista yksikkövoimaksi muu-tetun tukireaktion suuruus. Lopuksi, kun tukireaktiot tunnetaan, voidaan laskea

rakenteelle tulevat rasitukset ja piirtää niistä rasituskuvaajat normaalien statiikan sääntöjen mukaisesti. (Salmi & Pajunen 2010, 219.)

Kuvassa 5 on vertailtu rasituksen ja taipumien jakautumista ja suuruutta jatkuvien ja ei-jatkuvien palkkien välillä. Jatkuvat palkkirakenteet keräävät niin sanottua tukimomenttia, eli tuen kohdalle palkin yläpintaan syntyy vetoa, joka on havaittavissa momenttihuipuista momenttikuvaajassa.



Kuva 5. Ei-jatkuvan ja jatkuvan rakennemallin eroja

Lineaarisen kimmoteorian mukaisesti taivutusjäykkyys pysyy vakiona kuormitettaessa aina murtoon saakka. Yleisesti taivutusjäykkyys oletetaan vakioksi rakenteen pituusakselilla. Teräsbetonirakenteet eivät kuitenkaan käyttäydy lineaarisen kimmoteorian mukaisesti, sillä jäykkyys muuttuu kuormittaessa halkeilun ja myötämisen takia. Betonirakenne saadaan kuitenkin toimimaan lineaarisesti, mikäli se raudoitetaan ja suunnitellaan kimmoteorian mukaisen voimasuurejakauman mukaisesti. Palkkeja ei kuitenkaan ole pakko mitoittaa lineaarisen teorian mukaan, vaan yleinen ratkaisu on niin sanottu momentin siirto kenttään. Menetelmässä palkin tukimomenteja pienennetään ja kenttämomenteja kasvatetaan. Tätä yleisesti käytettyä menetelmää käytettäessä on varmistettava rakenteen riittävä muodonmuutoskyky, joka riippuu ensisijaisesti raudoituksesta. (Suomen betoniyhdistys ry 2013, 88.)

Eurokoodin mukaisesti jatkuvat laatat ja palkit voidaan yleensä analysoida siten, että tukien oletetaan sallivan vapaa kiertyminen. Tukien painuminen jatkuvissa

palkeissa pienentää painuvan tuen kohdalle tulevaa tukimomenttia (Suomen betoniyhdistys RY 2008, 102).

### 3.3 Rasitukset

Rakenteet tulee mitoittaa kestämään niille ulkoisista kuormista aiheutuvat rasitukset.

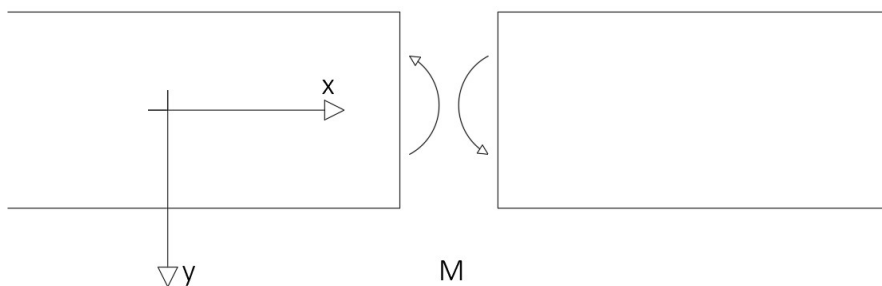
Palkin voimasuureita ovat

- leikkausvoima
- taivutusmomentti ja
- vääntömomentti. (Suomen betoniyhdistys 2013.)

Normaalivoiman vaikutus palkeissa on harvoin merkittävä.

*Momentti on poikkileikkauksen normaalijännityskentän momenttiresultantti poikkileikkauksen pintakeskiön kautta kulkevan z-akselin suhteen (Salmi & Pajula 2010, 167).*

Taivutusmomentti on positiivinen, jos palkin venyvä puoli on y-akselin positiiviseen suuntaan, kuvan 6 mukaisesti (Salmi & Pajula 2010, 167). Momenttia merkitään kirjaimella M.

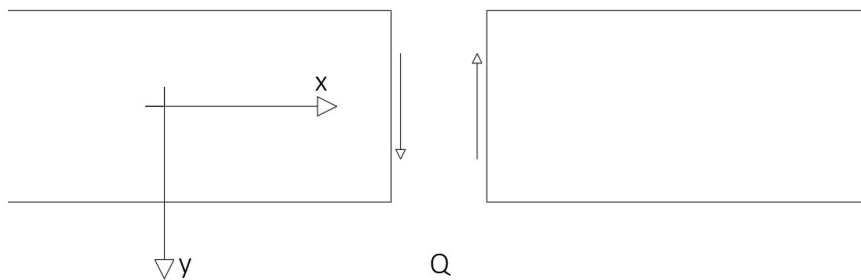


Kuva 6. Positiivinen taivutusmomentti

Taivutusmomentin ääriarvot ovat poikkileikkauksissa, joissa momenttifunktion derivaatta saa arvon nolla. Näissä kohdissa myös leikkausvoimakuvio vaihtaa merkkiä.

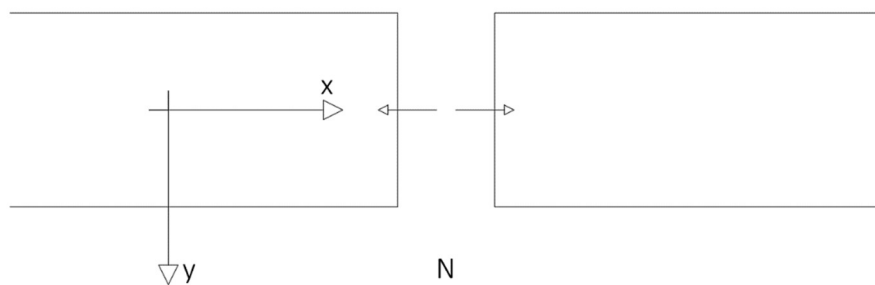
*Leikkausvoima on poikkileikkauksen leikkausjännityskentän resultantti ja se on positiivinen, jos se on y-akselin positiiviseen suuntaan siinä poikkileikkauspinnassa, jonka materiaalista poispäin suunnattu normaalin on x-akselin positiiviseen suuntaan, kuvan 7 mukaisesti (Salmi & Pajula 2010, 167).*

Leikkausvoimaa merkitään kirjaimella Q.



Kuva 7. Positiivinen leikkausvoima

Poikkileikkausta vastaan kohtisuoran sisäisen voimajakautuman resultanttia eli yhdistystulosta sanotaan poikkileikkauspinnan normaalivoimaksi (Salmi & Pajula 2010, 24). Sitä merkitään kirjaimella N. Normaalivoiman positiivinen suunta on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Positiivinen normaalivoima

Leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutusta betonirakenteissa on tutkittu kokeellisin menetelmin ja on havaittu, että kun palkin uumassa on riittävästi leikkausraudoitusta, ei leikkausvoimalla ole vaikutusta taivutuskestävyyteen, toisin kuin teräsrakenteissa. On kuitenkin huomioitavaa, että korkeissa palkeissa leikkausvoimat voivat pienentää plastisuusteorian mukaista taivutuskestävyyttä. (Suomen betoniyhdistys 2008, 265.)

## **4 FEM-laskenta**

### **4.1 Elementtimenetelmä**

Elementtimenetelmä, lyhyemmin FEM (Finite Element Method), on FEA:n (Finite Element Analysis) käytännön sovellus ja perustuu suuremman ja monimutkaisemman rakenteen pilkkomiseen pieniin osiin, joiden reaktiot rasitukseen ovat huomattavasti yksinkertaisemmin selvitettävissä kuin alkuperäisen kokonaisen rakenteen. Jokaisella osalla on omat sisäiset ja ulkoiset ehtonsa, ja laskenta pyrkii löytämään kaikkien osien rasitukset. (Manor; Harish 2019.)

Rakenteiden mekaniikan elementtimenetelmät jaetaan siirtymä- ja voimaperusteiseen menetelmään tuntemattoman suureen valinnan perusteella (Salmi & Kuula 2012, 318).

Tarkasteltava rakenne jaetaan osiin seuraavasti:

- 1) Solmu (node) on yksittäinen piste rakenteessa, jolla on sen sijaintikohdan mukaiset materiaaliominaisuudet.
- 2) Verkko (mesh) tarkoittaa suoria, jotka yhdistävät solmut toisiinsa.
- 3) Elementit ovat verkkojen sisään jääviä osia (Manor).

Solmujen tiheydellä voidaan säädellä laskennan tarkkuutta. Mitä enemmän solmuja tutkittavalla alueella on, sitä tarkempia laskentatuloksia saadaan. Tämä vaatii kuitenkin huomattavasti laskentatehoa, joten yleensä on paras tihentää verkkoa vain merkittävillä alueilla ja käyttää harvempaa verkkoa muualla. (Manor.)

Itse laskenta suoritetaan matriisialgebran avulla, joka johtaa siihen, että käsinlaskenta muuttuu hyvin työlääksi jo yksinkertaistenkin rakenteiden kanssa. Tästä syystä elementtimenetelmien kehitys lähti kunnolla vauhtiin vasta tietokonelaskennan tullessa käyttäjien saataville noin 1950 - 60-lukujen paikkeilla. (Salmi & Kuula 2012, 319.)

FEM-laskentaa on olemassa kahta eri laatua: lineaarinen ja epälineaarinen. Epälineaarinen laskenta tarkoittaa, että laskennassa huomioidaan epälineaariset tapahtumat. Esimerkiksi palkkia taivuttaessa betonin halkeamisen vuoksi jännityksen siirtyminen raudoitukselle on epälineaarinen tapahtuma. Lineaarinen analyysi on näistä yksinkertaisempi koska siinä ei huomioida esimerkin kaltaisia tapahtumia ja on näin ollen helpompi suorittaa. Yksinkertaistuksien vuoksi sen antamiin tuloksiin tulee suhtautua tietyllä varauksella. (Vertex systems.)

FEM-laskennan suurimmat haasteet tulevat sen onnistumisen riippuvuudesta käyttäjän osaamiseen. Yksi oleellisimpia asioita elementtimenetelmän käytössä on valita oikeanlainen malli kuvaamaan tutkittavaa rakennetta. Esimerkiksi epälineaarisuuksien ja ajan vaikutuksen tunnistaminen ovat tärkeitä asioita. Betonirakenteissa molemmat esimerkkinä mainitut tekijät vaikuttavat. Betonin halkeilun yhteydessä tapahtuva voiman siirtyminen vetoteräkselle on epälineaarista toimintaa ja viruma on ajasta riippuva ilmiö. Elementtityyppien valinnalla on myös merkitystä, sillä oikean kokoisen elementin valinta oikeaan paikkaan tarkoittaa tuloksia. Vääränlaisella elementillä voidaan mallin hyödyllisyys pilata täysin. Alueilla, jotka eivät ole mallintajaa kiinnostavia, voidaan käyttää suurempia elementtejä laskennan nopeuttamiseksi. Tutkittavilla alueilla elementtien tulisi olla mahdollisimman pieniä tarkempien tuloksien saamiseksi. Myös liitoskohtien mallintaminen asettaa haasteita mallintajalle. Liitoksen oikeanlaisen toiminnan mallintaminen on haastavaa. (Cook 1994.)

Singulariteetin muodostuminen on toinen merkittävä ongelma FEM-laskennassa. Tämä tarkoittaa sitä, että voiman kohdistuessa pisteeseen on sen aiheuttama jännitys teoriassa ääretön, koska pisteellä ei ole pinta-alaa. Singulariteettien muodostuessa korostuu käyttäjän merkitys entisestään. Asiantuntijan on tiedettävä, milloin rasihuippuja voidaan jättää huomioimatta ja milloin ei. (Sönnnerlind 2015.)

## **4.2 FEM-design ja StruSoft**

FEM-design on StruSoftin kehittämä kehittynyt mallinnusohjelma, jolla voidaan FEA-pohjaisesti suunnitella kantavia betoni-, teräs- ja puurakenteita eurokoodin mukaisesti. Ohjelman kehitystyö on aloitettu 1990-luvulla. StruSoft alkoi ruotsalaisen rakennusyhtiön Skanskan sovellushaarana 1980-luvulla, alkuperäisenä nimenä Skanska Software. Yritys tarjoaa tietokonepohjaisia työkaluja rakenne- ja energiateknisiin tarkasteluihin sekä suunnittelutehtäviin. (Strusoft.)

FEM-design jakautuu viiteen eri sovellukseen: FEM-Design Steel Joint, Plate, Wall, Frame ja 3D Structure. Steel Joint on tarkoitettu valmiiden teräsrakenteiden liitoksien analysointiin. Plate-sovelluksella voidaan analysoida betonilaattoja tai muita kaksiulotteisia poikittain kuormitettuja rakenteita. Wall-sovelluksella voidaan tutkia seinämäisiä rakenteita tai teräslevyjä. Framella voidaan tarkastella kolmiulotteisia runko- ja ristikkorakenteita. 3D-structure tarjoaa työkalut useita rakenteita ja materiaaleja yhdistävän mallin kokonaisvaltaiseen tarkasteluun. (Strusoft.)

Tässä työssä on käytetty FEM-Designin 3D Frame-sovellusta FEM-tarkastelujen suorittamiseen sen palkkien tarkasteluun riittävien ominaisuuksien vuoksi.

## **5 Teräsbetonirakenteiden suunnittelu ja ilmiöt**

### **5.1 Teräsbetonirakenteen toiminta**

Teräsbetonin toiminta perustuu betonin hyvään puristuslujuuteen ja teräksen vetolujuuteen, sekä materiaalien samankaltaisiin lämpölaajentumisominaisuuksiin, jolloin ne voivat toimia samassa rakenteessa. Terästen tartunta betoniin on oleellinen rakenteen toiminnan kannalta. Teräsbetonipalkissa betoni toimii puristetun reunan efektiä vastaan ja teräs vedettynä. Betoni halkeilee vetopuolella, joten sen ei lasketa ottavan vastaan vetorasitusta.

Betoni emäksisenä materiaalina suojaa raudoitusta hapen aiheuttamalta korroosiolta. Kun betoni karbonisoituu, eli sementtikiven ainesosat ja hiilidioksidi reagoivat siten, että hiiltä sitoutuu betoniin, sen emäksisyys laskee ja mahdollistaa raudoitteiden ruostumisen. (Suomen betoniyhdistys ry 2008, 53.)

## 5.2 Tukimomentti

Tukimomentilla tarkoitetaan yleensä jatkuvien rakenteiden keskitukien keräämää momenttia. Tämä momentti pienentää rakenteen kenttiin tulevaa momenttia, joten sillä saadaan pienennettyä yleensä myös rakenteen kokoa, varsinkin suurilla jänneväleillä. Tukimomenttia voi muodostua myös palkkien päiden tuille, jos kiinnitys on jäykkä. Esimerkiksi pilari-palkki-pilari-rakenteessa tämä on mahdollista. Tässä työssä ei ole huomioitu palkin päiden tuille tulevaa momenttia, vaan ne on ajateltu täysin nivelinä toimiviksi.

## 5.3 Ympäristörasitusluokka

Betonirakenteille määritellään ympäristörasitusluokka niihin vaikuttavien rasitusten perusteella. Ympäristörasitukset vaikuttavat esimerkiksi halkeamaleveyden määrittelyyn. Betonin rasitusluokat on määritelty standardin EN206-1 mukaisesti. Rasitusluokkia on esitetty yksinkertaistetusti taulukossa 1, tarkemmat määrittelyt löytyvät SFS-EN-1992-1-1-asiakirjasta.

X0	Ei korroosion tai rasituksen riskiä		
XC1-4	Karbonisoitumisen vaikutuksista aiheutuva korroosio		
XD1-3	Muun kuin meriveden kloridien aiheuttama korroosio		
XS1-3	Meriveden kloridien aiheuttama korroosio		
XF1-4	Jäädytys-sulatusrasitus jäänsulatusaineilla tai ilman niitä		
XA1-3	Kemiallinen rasitus		

Taulukko 1. Ympäristörasitusluokat

## 5.4 Halkeilu

Halkeilu on ilmiö, jota ei käytännössä voida välttää betonin pienen vetolujuuden vuoksi. Halkeilu ei ole kuitenkaan haitallista, kunhan se otetaan suunnittelussa huomioon. Sitä aiheuttavia tekijöitä ovat

- kuormitus
- betonin tilavuuden muutokset
- pakkovoimat
- kovettumattomassa betonissa tapahtuvat muutokset (Suomen betoniyhdistys 2008, 350).

Betonirakenteen vedettyjen osien halkeilu tapahtuu kohtisuorassa betonin pääjännityksen suuntaan nähden. Suunnittelussa tulee huomioida, ettei betonin kuormitukset aina määritä pääjännityksen suuntaa yksinään, vaan myös esimerkiksi kutistuman aiheuttamat jännitykset vaikuttavat. (Suomen betoniyhdistys 2008, 351).

Halkeamia syntyy, kun vetävä muodonmuutos ylittää betonin murtovenymän. Kun betoni halkeaa, eivät raudoituksen ja betonin venymät ole enää yhdensuuruksia, vaan raudoitus alkaa venyä enemmän. Venymien ero aiheuttaa liukuman, joka kasautuu halkeamaan. Halkeamaleveys vastaa halkeaman molemmilta puolilta laskettua liukumaa. Suunnitteluohjeissa puhuttaessa halkeamaleveydestä tarkoitetaan rakenteen pinnassa olevaa halkeamaleveyttä, eikä halkeaman leveyttä raudoituksen korkeudella. (Suomen betoniyhdistys 2008, 351).

*Halkeilu tulee rajoittaa siten, ettei se huononna rakenteen toimintaa tai säilyvyyttä tai vaikuta ulkonäköön tavalla, joka ei ole hyväksyttävä (SFS-EN 1992-1-1).*

Eurokoodin mukaisesti halkeamaleveyden  $w_k$  raja-arvo  $w_{max}$  määritellään huomioiden rakenteen suunniteltu toiminta, luonne ja halkeamaleveyden rajoittamisesta aiheutuvat kustannukset (SFS-EN 1992-1-1).

Halkeamaleveyden suositusarvot on esitetty EN 1992-1-1 taulukossa 7.1N, halkeamaleveyden  $w_{max}$  suositusarvot. Halkeamaleveyden maksimiarvo on riippuvainen rakenteen ympäristörasitusluokasta. (SFS-EN 1992-1-1).

## 5.5 Viruma

Viruma tarkoittaa ajasta riippuvaa betonin puristuman kasvua puristusjännityksen pysyessä vakiona. Suunnittelussa tämä huomioidaan pienentämällä betonin kimmoduulin  $E_{cm}$  arvoa virumaluvulla  $\phi$ . Virumaluvun määrittely voidaan suorittaa graafisesti tai tarkemmin laskemalla. (Betoniteollisuus Ry 2012, 3.)

Ilmiössä sementtikiven ajatellaan viruvan, koska kiviaines oletetaan virumattomaksi. Viruman aiheutuu sementtikiven huokosissa liikkuvien veden ja partikkelien tiivistymisestä. Merkittävimpiä viruman suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat hydrotaatioaste ja ikä kuormituksen alkaessa, sekä ympäristön suhteellinen kosteus. Mitä pienempi vesi-sementtisuhde betonilla on, sitä pienempää on viruminen. (Suomen betoniyhdistys Ry 2008, 44-45.)

Käytännössä viruma tarkoittaa vähitellen lisääntyvää taipumaa, joka voi kasvaa muutamassa kymmenessä vuodessa 2 - 3-kertaiseksi välittömään muodonmuutokseen nähden. Yleensä virumalla on vain haitallisia vaikutuksia, mutta esimerkiksi tässä työssä käsitellyissä hyperstaattisissa rakenteissa se voi pienentää jännityshuippuja, vähentää halkeilua ja parantaa kestävyyttä. (Suomen betoniyhdistys Ry 2013, 45.)

## 5.6 Vääntö

Vääntömomentti on ilmiö, joka aiheutuu palkeissa vinosta taivutuksesta, eli siitä, että kuormat eivät kulje poikkileikkauksen vääntökeskiön kautta. Vääntöä esiintyy esimerkiksi laatastojen reunapalkeissa ja laattojen asennuksenaikaisissa tilanteissa. (Suomen betoniyhdistys 2008, 303.)

Betonipalkeissa umpinaiset leikkaushaavat toimivat myös vääntöilmiötä vastaan.

## **5.7 Ankkurointi**

Raudoituksen tulee ankkuroitua betoniin sen toiminnan varmistamiseksi. Suorien tankojen ankkuroituminen perustuu tartuntajännitykseen. Tartuntajännitys pienee ankkurointipituuden matkalla nollaan. Sen suurinta arvoa kutsutaan tartuntalujuudeksi, johon vaikuttaa betonin vetolujuus, ankkuroitavan tangon paksuus, poikittainen jännitys ankkuroinnin alueella, betonipeitepaksuus sekä tartuntaolosuhteet. Ankkurointipituuteen vaikuttavat myös tankojen muoto ja poikittainen raudoitus. (Suomen betoniyhdistys 2015, 155-156.)

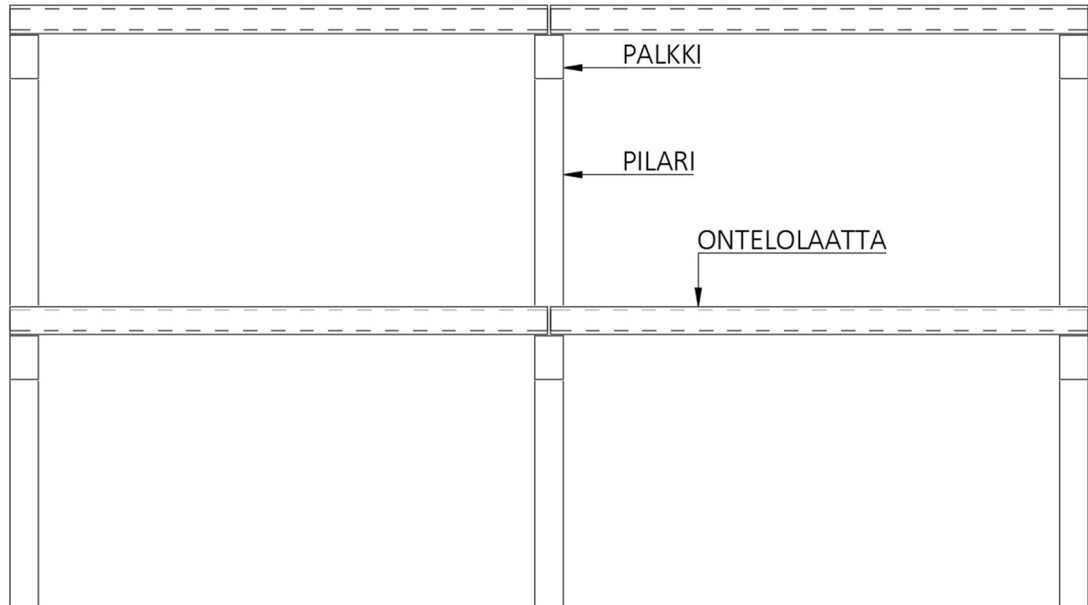
## **5.8 Puristusraudoitus**

Puristusraudoitusta on käytettävä, kun todetaan että valitulla poikkileikkauksella vetoraudoitus ei myötää murtorajatilassa ilman puristusraudoituksen käyttöä eikä poikkileikkausta voida kasvattaa riittävästi. Tämän työn puitteissa ei ole tarkasteltu puristusraudoitettavia palkkeja, sillä käytännössä yleensä on mahdollista kasvattaa palkki sellaiseksi, että puristusraudoitusta ei tarvita.

# **6 Laskennan lähtötiedot**

## **6.1 Tutkittava rakenne**

Työn rajatun laajuuden vuoksi päädyttiin valitsemaan tutkittavaksi rakenteeksi kolmiaukkoinen jatkuva palkkirakenne. Työssä oletetaan tutkittavien palkkien sijaitsevan toimistorakennuksessa, sillä se on tyypillinen esimerkki pilari-palkkirunkoisesta rakennuksesta. Tämä vaikuttaa rakenteen kuormien arviointiin. Rakenteelle valittu seuraamusluokka on CC2 ja toteutusluokka 2. Kuvassa 9 on esitetty runkorakenteen periaate leikkauksena rakennuksesta.



Kuva 9. Toimistorakennuksen runko

## 6.2 Raudoitus

Pää- ja hakaraudoituksina on käytetty yleisesti käytössä olevaa harjaterästä B500B, jonka ominaislujuus  $F_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$  ja kimmomoduuli  $E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$ . Leikkausraudoituksen puristussauvan  $\theta$ -kulmana on käytetty  $21,8^\circ$  ja hakojen kulmana  $90^\circ$ . Teräksen tiheytenä on käytetty  $7850 \text{ kg/m}^3$ .

## 6.3 Kuormat

Laskentaa varten pyrittiin löytämään mahdollisimman todennukaiset kuormitukset, jotta tuloksista saataisiin hyötyä oikeita suunnittelutehtäviä varten. Toimistotilat kuuluvat käyttöluokkaan B, taulukon 2 mukaisesti (SFS-EN 1991-1-1).

Taulukko 6.1 Käyttöluokat

Luokka	Käyttötarkoitus	Esimerkki
A	Asuin- ja majoitustilat	Asuinrakennusten huoneet, sairaaloiden potilas- ja toimenpidehuoneet, hotellien ja retkeilymajojen makuuhuoneet, keittiöt ja WC:t.
B	Toimistotilat	
C	Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua (poikkeuksena luokkiin A, B, ja D kuuluvat tilat) <sup>1)</sup>	<p><b>C1:</b> Tilat, joissa on pöytiä yms. esim. koulut, kahvilat, ravintolat, ruokasalit, lukusalit, vastaanottotilat.</p> <p><b>C2:</b> Tilat, joissa on kiinteät istuimet, esim. kirkot, teatterit, elokuvateatterit, konferenssisalit, luentosalit, kokoussalit, odotussalit, asemien odotustilat.</p> <p><b>C3:</b> Tilat, joissa ei ole liikkumista rajoittavia esteitä, esim. museo- ja näyttelytilat, julkisten rakennusten ja toimistorakennusten, hotellien ja sairaaloiden eteistilat, asemahallit.</p> <p><b>C4:</b> Liikuntatilat, esim. tanssisalit, voimistelusalit ja näyttämöt.</p> <p><b>C5:</b> Tilat, joihin voi syntyä tungosta esim. yleisötapahtumien rakennuksissa; tällaisia ovat konserttisalit, urheiluhallit mukaan luettuina katsomot, terassit ja eteistilat sekä rautatielaiturit.</p>
D	Myymätilat	<p><b>D1:</b> Tavallisten vähittäiskauppojen tilat.</p> <p><b>D2:</b> Tavaratalojen tilat.</p>
<p><sup>1)</sup> On syytä kiinnittää huomiota kohtaan 6.3.1.1(2), erityisesti luokkien C4 ja C5 osalta. Standardissa EN 1990 esitetään, milloin dynaamiset vaikutukset on tarpeen ottaa huomioon. Luokkaa E koskevat tiedot ovat taulukossa 6.3.</p> <p>HUOM. 1 Aiotusta käyttötarkoituksesta riippuen tilat, jotka todennäköisesti sijoitettaisiin luokkaan C2, C3 tai C4, voidaan tilaajan päätöksellä tai kansallisen liitteen perusteella sijoittaa luokkaan C5.</p> <p>HUOM. 2 Kansallisessa liitteessä luokat A, B, C1...C5, D1 ja D2 voidaan jakaa alaluokkiin.</p> <p>HUOM. 3 Varasto- ja teollisuustiloja tarkastellaan kohdassa 6.3.2.</p>		

Taulukko 2. Käyttöluokat (SFS-EN 1991-1-1)

Luokan B-tiloille annetut hyötykuorman arvot on esitetty alla taulukossa 3. Taulukon arvot edustavat kansallisia arvoja.

Taulukko 1. Rakennusten välipohjien, parvekkeiden ja portaiden hyötykuormat, pinta-alkuorma  $q_k$  ja pistekuorma  $Q_k$ .

Kuormitettujen tilojen luokat	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]			$Q_k$ [kN] (portaat suluisia)
	Välipohjat	Portaat	Parvekkeet	
Luokka A Asunto- ja majoitustilat	2,0	2,0	2,5	2,0 (2,0*)
Luokka B Toimistotilat	2,5	3,0	2,5	2,0 (2,0)
Luokka C Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua				
– C1	2,5	3,0	2,5	3,0 (2,0)
– C2	3,0	3,0	3,0	3,0 (2,0)
– C3	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
– C4	5,0	3,0	5,0	4,0 (2,0)
– C5	6,0	6,0	6,0	4,0 (2,0)
Luokka D Myymätilat				
– D1	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
– D2	5,0	6,0	5,0	7,0 (2,0)

\*Asunnon sisäiset portaat  $Q_k = 1,5$  kN

Taulukko 3. Hyötykuormat (Ympäristöministeriö)

Rakennuksen vaakakuormia ei ole huomioitu tässä työssä, sillä niiden ei ajatella vaikuttavan palkkeihin merkittävästi käsitellyissä laskennoissa.

Tyypillisiä tasoratkaisuja rakennuksissa ovat ontelolaatat. Tässä työssä on käytetty laskentoihin yleisessä käytössä olevaa O37-laattaa. Laatan massa on saumattuna  $510 \text{ kg/m}^2$  (Betoniteollisuus Ry 2010 a). Laatan paino saadaan siis kaavan 1 mukaan:

$$g_{O37} = g * m_{O37} \quad (1)$$

$$g_{O37} = 9,81 \text{ m/s}^2 * 510 \text{ kg/m}^2 = 5,0 \text{ kN/m}^2$$

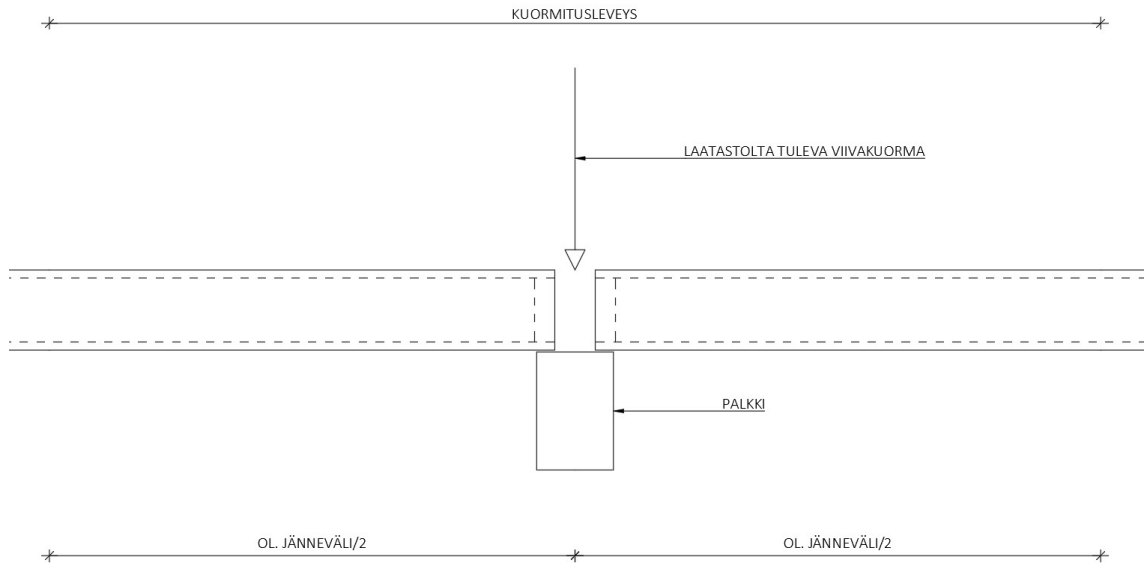
Ontelolaattojen päälle tulee tasausvalu 20 mm paksuna. Tähän laskentaan on lisätty 10 mm mittapoikkeamien huomioimiseksi, jolloin paksuus on 30 mm. Pintavalun painona on käytetty  $24 \text{ kN/m}^3$  (raudoittamaton betoni). Tasausbetonin paino saadaan kaavasta 2.

$$g_{Tasausvalu} = \text{betonin tilavuuspaino} * h_{pintavalu} \quad (2)$$

$$g_{Tasausvalu} = 24 \text{ kN/m}^3 * 0,03 \text{ m} = 0,7 \text{ kN/m}^2$$

Ontelolaattojen maksimi jännevälit ovat O37:lle 14,0 m (Betoniteollisuus Ry 2010 a). Tässä laskennassa on käytetty kohtuullisempaa seitsemän metrin jänneväliä, jotta jännepunoksia ei tarvittaisi suurta määrää ja suuren esijännityksen aiheuttamat ongelmat esimerkiksi työmaalla olisivat vähäisempiä.

Kuormien oletetaan johtuvan palkille puolelta jänneväliltä palkin molemmilta puolilta, jolloin rakenteeseen vaikuttava kuormitus on keskeinen. Kuvassa 9 on esitetty laskentaa varten tehty oletus kuormien siirtymisestä palkille.



Kuva 10. Tasoilta tulevat kuormat

Palkille tulevat pysyvät kuormat  $g_k$  ovat täten kaavan 3 mukaiset

$$g = \text{Kuormitusleveys} * (g_{037} + g_{Tasausvalu}) \quad (3)$$

$$g = 7 \text{ m} * (5,0 \text{ kN/m}^2 + 0,7 \text{ kN/m}^2) = 39,9 \text{ kN/m}^2$$

ja hyötykuormat  $q_k$  ovat kaavan 4 mukaiset.

$$q_k = \text{Kuormitusleveys} * q_k \quad (4)$$

$$q = 7 \text{ m} * 2,5 \text{ kN/m}^2 = 17,5 \text{ kN/m}^2$$

Palkkien metripainona on käytetty  $25 \text{ kN/m}^3$  \* poikkileikkauksen pinta-ala. Palkkien jänneväleiksi valittiin viisi metriä.

#### 6.4 Ympäristörasitusluokka ja betonipeitepaksuus

Tarkasteltavan rakenteen ympäristörasitusluokaksi oletetaan XC1, betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on alhainen (SFS-EN 1992-1-1). Betonipeitepaksuus  $C_{nom}$  saadaan kaavasta 5.

$$C_{nom} = C_{min} + C_{dev} \quad (5)$$

jossa

$C_{min} = 20 \text{ mm}$  (pääteräksen halkaisija)

$C_{dev} = 10 \text{ mm}$  (vaihteluväli)

$$C_{nom} = 20 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$$

Halkeamaleveyden raja-arvo ympäristörasitusluokissa X0, XC1 on  $w_{max} = 0,4 \text{ mm}$ .

## 7 Käsinlaskenta

Laskentamenetelmien tarkempaa vertailua varten valittiin yksi palkki tarkempaan tarkasteluun. Tästä palkista suoritettiin laskenta BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1:n ohjeiden mukaisesti. Näissä laskennoissa huomioitiin myös viruma sekä kutistuma, jotta voitaisiin havaita lisää eroja laskentamenetelmien välillä. Tutkittava palkki on 280x480 C40/50. Lähtötiedot ovat samat kuin muissa laskennoissa. Suhteellisen kosteuden arvoksi oletettiin 50 %. Laskennassa käytetyt kaavat on esitetty siinä järjestyksessä, jossa niitä käytetään. Laskenta on esitetty liitteessä 1.

### 7.1 Taivutusmitoitus

Taivutusmitoitus suoritetaan murtorajatilassa. Tapauksen murtorajatilassa käytetty kuormitusyhdistely on esitetty kaavassa 6.

$$1,15 * K_{FI} * \Sigma G_{k,i} + 1,5 * K_{FI} * \Sigma Q_{k,i} \quad (6)$$

Jossa

$K_{FI}$  = Seuraamusluokasta riippuva kerroin

$\Sigma G_{k,i}$  = yhteenlasketut omapainot

$\Sigma Q_{k,i}$  = yhteenlasketut muuttuvat kuormat.

Tehollinen korkeus  $d$  arvioidaan kaavalla 7.

$$d = h - c_{nom} - 1,1 * \emptyset_h - \frac{1,1 * \emptyset}{2} \quad (7)$$

Jossa:

$h$  = palkin korkeus

$c_{nom}$  = betonipeitepaksuuden laskenta-arvo

$\emptyset_h$  = hakateräksen halkaisija

$\emptyset$  = pääteräksen halkaisija.

Suhteellinen momentti  $\mu$  (suurin keskituella), lasketaan kaavalla 8:

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{b * d^2 * \eta * f_{cd}} \quad (8)$$

Jossa

$M_{Ed}$  = momentin mitoitusarvo murtorajatilassa

$b$  = palkin uuman keskimääräinen leveys

$\eta$  = jännitys jakauman parametri

$f_{cd}$  = betonin lieriölujuuden mitoitusarvo.

Jatkuvan palkin, jonka katsotaan toimivan nivelenä kiertymän suhteen, tukimomenttia voidaan pienentää määrällä  $\Delta M_{Ed}$ , joka saadaan kaavasta 9.

$$\Delta M_{Ed} = F_{Ed,sup} * t/8 \quad (9)$$

Jossa

$F_{Ed,sup}$  = tukireaktion mitoitusarvo

$t$  = tuen leveys jänteen suunnassa.

Tämän pienennyksen yhteydessä ei ole esitetty vaatimusta lisätä kenttämomenteja (SFS-EN 1992-1-1).

Tukimomentin pyöristystä ei ole käytetty tässä työssä, koska ei ole tietoa pyöristääkö FEM-design niitä ja tämä lisäisi eroja laskentamenetelmien välillä mutta ei auttaisi löytämään teknisiä eroja laskennoista.

Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus  $\beta$  lasketaan kaavalla 10.

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2 * \mu} \quad (10)$$

Mekaaninen raudoitussuhde  $\omega$  saadaan kaavasta 11.

$$\omega = \beta \quad (11)$$

Vaadittu teräspinta-ala  $A_{s,vaad}$  lasketaan kaavalla 12.

$$A_{s,vaad} = \omega * b * d * \frac{\eta * f_{cd}}{f_{yd}} \quad (12)$$

Jossa

$f_{yd}$  = raudoitusteräksen lujuuden mitoitusarvo.

Minimiraudoitus  $A_{s,min}$  lasketaan kaavalla 13.

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} * b * d; \\ 0,0013 * b * d \end{array} \right\} \quad (13)$$

Jossa

$f_{ctm}$  = betonin vetolujuuden arvo

Kokonaisraudoitusala  $A_{s,tot}$  saadaan kaavalla 14.

$$A_{s,tot} = n * \pi * r^2 \quad (14)$$

Jossa

$n$  = pääraudoitustankojen lukumäärä

$r$  = pääraudoitustankojen säde.

## 7.2 Leikkausmitoitus

Sisäinen momenttivarsi  $z$  lasketaan kaavalla 15.

$$z = 0,9 * d \quad (15)$$

Uuman teräspinta-ala  $A_{sw}$  saadaan kaavasta 16.

$$A_{sw} = 2 * \pi * r_h^2 \quad (16)$$

Jossa

$r_h$  = raudoitushaan säde.

Suurin sallittu hakaväli  $s$  saadaan kaavasta 17.

$$s \leq \frac{A_{sw}}{V_{Ed}} * z * f_{ywd} * (\cot \theta + \cot \alpha) * \sin \alpha \quad (17)$$

Minimi hakavaatimuksen mukainen hakaväli  $s$  lasketaan kaavalla 18.

$$s \leq \frac{A_{sw}}{0,08 * b_w * \sin \alpha} * \frac{\left( \frac{f_{yk}}{N} \right)}{\sqrt{\left( \frac{f_{ck}}{N} \right)}} \quad (18)$$

Jossa

$f_{yk}$  = raudoitusteräksen karakteristinen lujuus

$f_{ck}$  = betonin lieriölujuuden karakteristinen arvo

Maksimihakaväli  $s_{max}$  saadaan kaavasta 19.

$$S_{max} = 0,75 * d * (1 + \cot \alpha) \quad (19)$$

jossa

$\alpha$  = leikkausraudoituksen kulma.

Leikkauskestävyyden yläraja  $v$ , eli rakenteen puristusmurtokestävyys saadaan kaavasta 20.

$$v = 0,6 * \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250 \frac{N}{mm^2}} \right) \quad (20)$$

Leikkauskestävyyden maksimiarvo on tällöin kaavan 21 mukainen.

$$V_{Rd,max} = v * f_{cd} * b * z * \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + (\cot \theta)^2} \quad (21)$$

Jossa

$\theta$  = betonin puristussauvan kaltevuuskulma.

Palkin leikkauskestävyys saadaan kaavasta 22.

$$V_{Rd,s} = f_{ywd} * \frac{A_{sw}}{s} * z * \cot(\theta) \quad (22)$$

### 7.3 Ankkurointimitoitus

#### Ankkurointi päiden tuilla

Tuelle ankkuroitava voima  $F_{Ed}$  saadaan kaavasta 23.

$$F_{Ed} = 0,5 * V_{Ed} * (\cot \theta - \cot \alpha) \quad (23)$$

Jossa

$V_{Ed}$  = leikkausvoiman mitoitusarvo

Tartuntalujuuden mitoitusarvo  $F_{bd}$  lasketaan kaavalla 24.

$$F_{bd} = 2,25 * n_1 * n_2 * f_{ctd} \quad (24)$$

Jossa

$n_1$  = tartuntaolosuhteista riippuva kerroin

$n_2$  = tankopaksuudesta riippuva kerroin.

Vaadittu ankkurointipituus on kaavan 25 mukainen.

$$l_{b.rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{\frac{F_{Ed}}{A_s}}{f_{bd}} \quad (25)$$

Ankkurointipituuden vähimmäisarvo  $l_{b,min}$ , ellei muita rajoituksia ole, on vetovoimaa ankkuroitaessa kaavan 26 mukainen.

$$l_{b,min} = \min\{10 * \emptyset; 0,3 * l_{b.rqd}; 100 \text{ mm}\} \quad (26)$$

Tuella toteutuva ankkurointipituus on kaavan 27 mukainen.

$$l_{tot} = b - c_{nom} \quad (27)$$

### **Suorien tankojen ankkurointi**

Ankkurointipituutta tarkastellaan keskitukien leikkausvoiman vaikutusalueella. Tukimomenttia ottava raudoitus on sijoitettu palkin yläreunaan, jolloin tartuntaolosuhteet ovat muut kuin hyvät tartuntaolosuhteet.

Ankkurointipituuden vaadittua arvoa voidaan pienentää  $\alpha$ -kertoimilla. Tässä tapauksessa vain  $\alpha_2$ -kertoimella on vaikutusta ankkurointipituuteen, ja sen arvo saadaan kaavasta 28.

$$\alpha_2 = 1 - 0,15 * \left( \frac{c_d - \emptyset}{\emptyset} \right) \quad (28)$$

Jossa

$c_d$  = betonipeitepaksuus pääteräksen pintaan.

Ankkurointipituuden arvo suorilla osilla on kaavan 29 mukainen.

$$l_b = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 * l_{b,rqd} \quad (29)$$

Jossa

$\alpha_1$  = tankojen muodosta riippuva kerroin

$\alpha_2$  = betonipeitepaksuudesta riippuva kerroin

$\alpha_3$  = poikittaisesta hitsaamattomasta raudoituksesta riippuva kerroin

$\alpha_4$  = poikittaisesta hitsatusta raudoituksesta riippuva kerroin

$\alpha_5$  = poikittaispaineesta riippuva kerroin.

#### 7.4 Viruma

Virumaluvun perusarvo on määritelty graafisella menetelmällä. Määrittelyssä vaaditut lähtötiedot ovat:

- Olosuhteet: sisätilat, RH = 50 %
- Betoni: C40/50
- Sementti: normaali
- Kuormitusajankohta  $t_0$  = 28 päivää
- $h_0$ , kaavan 30 mukaan.

$$h_0 = \frac{2 * A_c}{u} \quad (30)$$

Jossa

$u$  = rakenteen kuivumiselle altis piiri.

Virumaluvun perusarvo  $\varphi_0$  määritellään graafisella menetelmällä. Menetelmä on esitetty SFS-EN 1992-1-1 kohdassa 3.1.4 Viruminen ja kutistuminen. Virumaluvun tehollinen arvo  $\varphi_{\text{eff}}$  lasketaan kaavalla 31.

$$\varphi_{eff} = \varphi_0 * \frac{P_{Pitkääikaisyhdistely}}{P_{Ominaisyhdi}} \quad (31)$$

Betonin kimmomoduulin tehollinen arvo  $E_{cm,eff}$  saadaan kaavasta 32.

$$E_{cm,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{eff}} \quad (32)$$

Jossa

$E_{cm}$  = betonin kimmomoduuli.

## 7.5 Halkeamaleveys

Kaavoja on sievennetty, koska rakenteessa ei ole käytetty puristusraudoitusta. Kimmokerrointen suhde  $\alpha_e$  saadaan kaavasta 33.

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} \quad (33)$$

jossa

$E_s$  = teräksen kimmomoduuli.

Tehollisten kimmokerrointen suhde  $\alpha_{e,eff}$  saadaan kaavasta 34.

$$\alpha_{e,eff} = \frac{E_s}{E_{cm,eff}} \quad (34)$$

Muunnettu poikkileikkauspinta-ala  $A_i$  lasketaan kaavalla 35.

$$A_i = A_c + (\alpha_e - 1) * A_s \quad (35)$$

Pintakeskiön etäisyys palkin alareunasta saadaan kaavasta 36.

$$y_{0i} = \frac{y_0 * A_c + (\alpha_e - 1) * A_s * (h - d)}{A_i} \quad (36)$$

Jossa

$y_0$  = vedetyn reunan etäisyys bruttopoikkileikkauksen taivutusakselista.

Poikkileikkauksen jäyhyysmomentti  $I_i$  saadaan kaavasta 37.

$$I_i = I_c + A_c * (y_{0i} - y_0)^2 + (\alpha_e - 1) * A_{s1} * (y_{0i} - h + d)^2 \quad (37)$$

Puristuspinnan korkeus halkeamattomassa tilassa  $X_I$  on kaavan 38 mukainen.

$$X_I = h - y_{0i} \quad (38)$$

Momentin ominaisarvo  $M_{Ek}$  lasketaan kaavalla 39.

$$M_{Ek} = M_{gk} + M_{qk} + \sum \psi_{0,i} * M_{qk,i} \quad (39)$$

Halkeilumomentti  $M_{R,cr}$  saadaan kaavasta 40.

$$M_{R,cr} = f_{ct,eff} * \frac{I_i}{h - X_I} \quad (40)$$

Mikäli momentin ominaisarvo on suurempi kuin rakenteen halkeilumomentti, rakenne halkeaa ja halkeamaleveydestarkastelu tulee suorittaa. Momentin pitkäaikaisyhdistelyn  $M_{Eqp}$  arvo lasketaan kaavalla 41.

$$M_{Eqp} = M_{gk} + \sum \psi_{2,i} * M_{qk,i} \quad (41)$$

Raudoituksen jännitys  $\sigma_s$  pitkäaikaisyhdistelyn rasituksilla lasketaan kaavalla 42.

$$\sigma_s = \frac{M_{Eqp}}{z * A_s} \quad (42)$$

Puristusvyöhykkeen korkeus haljenneessa tilassa  $X_{II}$  saadaan kaavasta 43.

$$X_{II} = \frac{1}{b} * \left\{ \left[ (\alpha_{e,eff} * A_{s1})^2 + 2 * b * (\alpha_{e,eff} * d * A_{s1}) \right]^{0,5} - \alpha_{e,eff} * A_{s1} \right\} \quad (43)$$

Tehollisen vetoalueen korkeus  $h_{c,eff}$  saadaan kaavasta 44.

$$h_{c,eff} = \min \left\{ 2,5 * (h - d); \frac{h - X_{II}}{3}; \frac{h}{2} \right\} \quad (44)$$

Tehollinen raudoitussuhde  $\rho_{p,eff}$  saadaan kaavasta 45.

$$\rho_{p.eff} = \frac{A_s}{A_{c.eff}} \quad (45)$$

Venymäero  $\varepsilon_{cm} - \varepsilon_{sm}$  lasketaan kaavalla 46.

$$\varepsilon_{cm} - \varepsilon_{sm} = \max \left\{ \frac{\sigma_s - k_t * \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p.eff}} * (1 + \alpha_e * \rho_{p.eff})}{E_s}; 0,6 * \varepsilon_s \right\} \quad (46)$$

Jossa

$k_t$  = kuorman vaikutusajasta riippuva kerroin.

Halkeamavälin maksimiarvo  $S_{r,max}$  saadaan kaavasta 47.

$$S_{r,max} = k_3 * c_d + k_1 * k_2 * k_4 * \frac{\phi}{\rho_{p.eff}} \quad (47)$$

Halkeamaleveys  $w_k$  lasketaan kaavalla 48.

$$w_k = S_{r,max} * (\varepsilon_{cm} - \varepsilon_{sm}) \quad (48)$$

jossa

$k_1$  = raudoituksen tartuntaominaisuudet huomioiva kerroin

$k_2$  = poikkileikkauksen jännitys jakauman huomioiva kerroin

$k_3$  ja  $k_4$  = kansallisesti valittuja kertoimia.

## 7.6 Taipumamitoitus

Eurokoodissa taipumarajaksi suositellaan arvoa  $a_{max}$  joka saadaan kaavasta 49.

$$a_{max} = \frac{L}{250} \quad (49)$$

Halkeamattoman tilan suuret.

Puristusvyöhykkeen korkeus  $X_{I,i}$  halkeamattomassa tilassa saadaan kaavasta 50.

$$X_{I,i} = \frac{\frac{b * h^2}{2} + (\alpha_e - 1) * A_s * d}{b * h + (\alpha_e - 1) * A_s} \quad (50)$$

Jäyhyysmomentti halkeamattomassa tilassa  $I_{I,i}$  lasketaan kaavalla 51.

$$I_{I,i} = \frac{b * h^3}{12} + b * h * \left(\frac{h}{2} - X_{I,i}\right)^2 + (\alpha_e - 1) * A_s * (d - X_{I,i})^2 \quad (51)$$

Haljenneen tilan suureet.

Puristusvyöhykkeen korkeus haljenneessa pitkäaikaisessa tilassa  $X_{II,LT}$  lasketaan kaavalla 52.

$$X_{II,LT} = \alpha_{e,eff} * d * \rho * \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_{e,eff} * \rho}}\right) \quad (52)$$

Sisäinen momenttivarsi haljenneessa pitkäaikaisessa tilassa  $z_{II,LT}$  lasketaan kaavalla 53.

$$z_{II,LT} = d - \frac{X_{II,LT}}{3} \quad (53)$$

Jäyhyysmomentti haljenneessa pitkäaikaisessa tilassa lasketaan kaavalla 54.

$$I_{II,LT} = \frac{b * X_{II,LT}^3}{3} + \alpha_{e,eff} * A_s * (d - X_{II,LT})^2 \quad (54)$$

Taipuman voidaan katsoa olevan sallituissa rajoissa, mikäli jännemitan ja tehollisen korkeuden suhde pysyy raja-arvojen alapuolella. Kaavaa 55 käytetään, kun raudoitussuhde on suurempi kuin raudoitussuhteen vertailuarvo  $\rho_0$ , joka on esitetty kaavassa 56.

$$\frac{L}{d} = K * \left( 11 + 1,5 * \sqrt{f_{ck}} * \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} * \sqrt{f_{ck}} * \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right) \quad (55)$$

$$\rho_0 = 10^{-3} * \sqrt{\frac{f_{ck}}{\frac{N}{mm^2}}} \quad (56)$$

Jossa

K = erilaiset rakennejärjestelmät huomioiva kerroin

$\rho'$  = puristusraudoitussuhde.

Liitteen 1 esimerkissä suhde jää raja-arvon alle, jolloin taipumatarkastelua ei tarvitsisi tehdä. Tarkastelu on tehty kuitenkin vertailutulosten vuoksi. Esimerkin laskenta on tehty kolmiaukkoisen rakenteen reunakentässä.

Halkeiluaste  $\zeta$  lasketaan kaavalla 57.

$$\zeta = 1 - \beta * \left( \frac{M_{cr}}{M_{Ek}} \right)^2 \quad (57)$$

Kaarevuus pitkäaikaisella kuormitusyhdistelyllä  $1/r_{i,lt}$  saadaan kaavasta 58.

$$\frac{1}{r_{i,LT}} = \frac{M_{Eqp}}{E_{c,eff} * I_{I,LT}} \quad (58)$$

Kaarevuuteen vaikuttava halkeiluaste huomioidaan interpoloimalla halkeilleen ja halkeamattoman rakenteen kaarevuuksien välillä kaavan 59 avulla.

$$\frac{1}{r_{LT}} = \zeta * \frac{1}{r_{II,LT}} + (1 - \zeta) * \frac{1}{r_{I,LT}} \quad (59)$$

Kuormituksen aiheuttama taipuma lasketaan kaavalla 60.

$$a_{LT,M} = K * L^2 * \frac{1}{r_{LT}} \quad (60)$$

Kutistuman aiheuttama kaarevuuden muutos on myös huomioitava taipumaa las-  
kiessa. Raudoituksen staattinen momentti poikkileikkauksen painopisteen suh-  
teen, halkeamattomassa tilassa lasketaan kaavalla 61.

$$S_{I,LT} = A_{SI} * (d - X_{I,LT}) \quad (61)$$

Raudoituksen staattinen momentti poikkileikkauksen painopisteen suhteen, hal-  
jenneessa tilassa saadaan kaavasta 62.

$$S_{II,LT} = A_{SI} * (d - X_{II,LT}) \quad (62)$$

Kutistuman aiheuttama kaarevuus saadaan kaavasta 63.

$$\frac{1}{r_{CS}} = \varepsilon_{CS} * \alpha_{e,eff} * \left( \zeta * \frac{S_{II,LT}}{I_{II,LT}} + (1 - \zeta) * \frac{S_{I,LT}}{I_{I,LT}} \right) \quad (63)$$

Kutistuman aiheuttama taipuma lasketaan kaavalla 64.

$$\alpha_{CS} = K_{CS} * L^2 * \frac{1}{r_{CS}} \quad (64)$$

Kokonaistaipuma pitkäaikaisella kuormituksella on kaavan 65 mukainen.

$$a = a_m + a_{CS} \quad (65)$$

## 8 Excel-laskentapohja

Laskentojen nopeuttamiseksi oli järkevää laatia Excel-laskentataulukko, joka suorittaa betonipalkin laskentaa BY 211 betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1 2013:n mukaisesti.

Tässä työssä tarvittujen rasi-  
tusten laskemista varten luotiin Exceliin yksikkövoimamenetelmää käyttävä laskentaosio. Laskennan tietokoneistamisen vaativuuden vuoksi, laskenta on tehty vain kolmiaukkoiselle palkille, jossa vaikuttaa tasainen kuormitus. Luodulla laskentapohjalla voidaan valita kuormitus ja aukkojen mittasuhteet. Laskennan tulosten hahmottamiseksi on Exceliin laadittu graafinen

esitys käyttäen x-y-koordinaatistoa. Itse laskenta perustuu Eurokoodiin ja sen perusteella laadittuihin laskentaohjeisiin.

Laskentataulukolla voidaan varioida seuraavia muuttujia:

- jänneväli
- seuraamusluokka
- kuormat, yhdistelykertoimet  $\psi$
- betonin lujuusluokka
- palkin poikkileikkaus
- betonipeitepaksuus
- raudituslaatu
- mitoitustilanne
- toteutusluokka
- pääteräkset
  - o halkaisija
  - o määrä
- leikkaushakojen kaltevuuskulma
- puristussauvan kaltevuuskulma
- hakojen leikkeisyys
- hakojen halkaisija
- tukileveys.

Taulukko laskee seuraavia tuloksia:

- rakennemallin mukaiset momentti- ja leikkausrasitukset
- valittujen raudoitusten teräspinta-alat
- vaaditut teräspinta-alat
- leikkaushakojen jakoväli
- käyttöasteet
- ankkurointipituuden  $\alpha$ -kertoimet huomioiden
- halkeamaleveys.

Laskentaohjelmaa on pyritty organisoimaan eri välilehtien avulla selkeyden ja käytettävyyden parantamiseksi. Tärkein osio on laskentaosio, jossa on esitetty

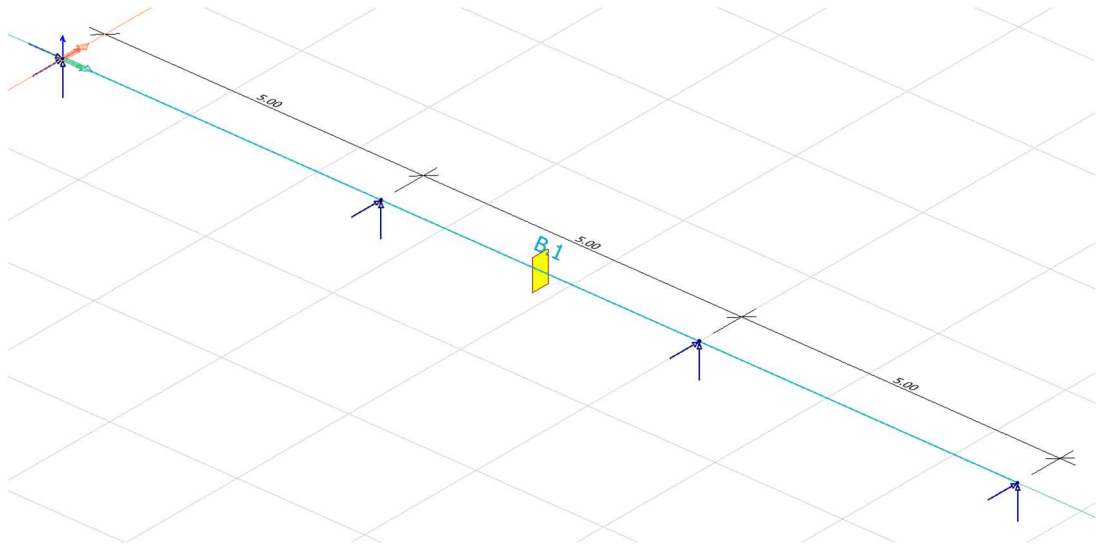
kaikki laskennassa käytetyt arvot ja laskennan kulku. Käyttäjä syöttää siihen haluamansa valinnat ja ohjelma laskee tänne tulokset. Laskennan sivulla on taulukoita ja kuvia, joissa on ohjeet tiettyjen arvojen määrittämiseksi. Tulostusvälehdelle on koottu laskennan kannalta tärkeitä lukuja helpon taltioinnin ja datan keräämisen nopeuttamisen takia.

Rasitusten laskenta suoritetaan hakemalla suurin momentin arvo eri kuormitus-tapauksista yksinkertaisen kertoimiin perustuvan menetelmän kautta. Ohjelma laskee momentin myös yksikkövoimamenetelmällä, mutta tämä ei huomioi kuorman liikkuvuutta. Leikkausvoimat määritellään vain yksikkövoimamenetelmän avulla. Työssä käytettiin kuormaa kaikissa aukoissa menetelmien vertailun takia.

Ohjelma on rakennettu siten, että sillä voidaan ohittaa tiettyjä lähtötietoja, esimerkiksi rakenteen kuormat. Ohjelma laskee rakennemallin mukaiset arvot, mutta mikäli rakennemallia ei haluta käyttää, tai laskentataulukko ei sisällä haluttua mallia, voidaan momentti- ja leikkausrasitukset laskea käsin ja syöttää niille varattuihin kenttiin. Myös esimerkiksi tehollisen korkeuden  $d$  syöttö on jätetty manuaalisesti suoritettavaksi, koska sen laskenta eri riviin niputettuja teräksiä käytettäessä olisi ollut työlästä toteuttaa Excelillä. Laskentaan on luotu vaihtoehto käyttää tukimomentin pyöritystä tai jättää käyttämättä ja laskea enemmän varmalle puolelle.

## 9 FEM-laskennan kuvaus

Elementtianalyysiin perustuva laskenta suoritettiin ohjelman oletusasetuksilla käyttäen Suomen kansallisen liitteen arvoja. Laskentaa varten mallinnettiin erilaisia poikkileikkaus- ja materiaaliyhdistelmistä palkkeja 3d Frame ohjelman beam-työkalulla. Muuttujiksi valittiin poikkileikkaus sekä betonin lujuus välillä C20/25-C50/60. Näin erilaisia palkkeja saatiin  $7 * 18 = 126$  kpl. Palkkien tukiehdot asetettiin kuvan 11 mukaisesti. Palkin toiseen päähän määritettiin pistemäinen tuki kaikkiin suuntiin ja välituille määritettiin Y- ja Z-suuntaiset tuennat.



Kuva 11. Palkkien tukiehdot

Palkeille lisättiin aiemmin esitetyt kuormat. Ohjelma huomioi materiaalien oma-painot automaattisesti. Laskentaa varten luotiin kuormitusyhdistelmät normaalien eurokoodien sääntöjen mukaisesti. Excel-laskentapohjaa käytettäessä havaittiin, että kuormitusyhdistelmä  $1,35 \cdot G$  ei kasvanut suurimmallakaan palkkikoolla  $480 \cdot 980$  määrääväksi. Palkkien koon ollessa ainut muuttuva kuormatekijä, todettiin että edellä mainittua kuormitusyhdistelmää tarvitse tarkastella FEM-designilla lainkaan tätä työtä varten.

Kuormien ja kuormitusyhdistelyjen määrittelyn jälkeen suoritettiin laskenta RC-design työkalulla. Laskennan jälkeen päästiin suunnittelemaan palkkien raudoituksia. Tämä tehtiin ohjelman auto design -toiminnolla. Palkeille määritellyt suunnitteluparametrit on esitetty kuvissa 12, 13 ja 14. Halkeamaleveyden raja-arvoksi määritettiin  $0,4$  mm ohjelman oletuksen ollessa  $1$  mm.

RC bar, design parameters

Reinforcement Manufacturing

**Stirrups**

Quality ..... B500B

Diameter [mm] .... 8

Profile ..... Ribbed

**Longitudinal, primary**

Quality ..... B500B

Diameter [mm] .... 20

Profile ..... Ribbed

**Longitudinal, auxiliary**

Quality ..... B500B

Diameter [mm] .... 6

Profile ..... Ribbed

**Cover [mm]** << >>

30 Set Set all

No preview

OK Cancel

Kuva 12. Raudoitusten suunnitteluparametrit

Calculation parameters

Maximal distance between calculated sections [m] .... 0.500

Consider 2nd order analysis, if available

Allowed crack width [mm] ..... 0.400

If possible do Not use compressed reinforcement

cot(Theta) (EC2 1-1: 6.2.3 (6.8))..... 2.50

Consider moments when calculating lambda\_lim (EC2 1-1: 5.13N)

OK Cancel

Kuva 13. Laskentaparametrit

Application data		
Gamma c (U   Ua,Us) .....	1.50	1.20
Gamma s (U   Ua,Us) .....	1.15	1.00
Gamma cE .....		1.20
Alpha cc .....		0.850
Alpha ct .....		1.00
Creep c. (S   U) .....	0.000	0.000
Shrinkage [%] .....		0.000
Modification for dynamic analysis .....		1.00
Reduction for stability analysis .....		1.00

Kuva 14. Betonin materiaaliominaisuudet

Tarkempaan tarkasteluun otetun palkin 280x480 materiaaliominaisuudet on määriteltä kuvassa 15. Muuttuneita arvoja ovat virumaluku ja kutistuma.

Application data		
Gamma c (U   Ua,Us) .....	1.50	1.20
Gamma s (U   Ua,Us) .....	1.15	1.00
Gamma cE .....		1.20
Alpha cc .....		0.850
Alpha ct .....		1.00
Creep c. (S   U) .....	1.70	0.000
Shrinkage [%] .....		0.420
Modification for dynamic analysis .....		1.00
Reduction for stability analysis .....		1.00

Kuva 15. 280x480 palkin materiaaliominaisuudet

Tässä vaiheessa havaittujen erojen vuoksi mainittu palkki suunniteltiin myös manuaalista raudoitusta käyttäen. Palkille asetettiin käsinlaskentaa vastaava raudoitus, jotta tuloksia voidaan vertailla. Tämä laskenta on esitetty liitteessä 13.

Kun suunnittelu oli valmis, tulostettiin dokumentaatiot PDF-muodossa ohjelman dokumentointityökalulla. FEM-designilla on mahdollista tulostaa dataa mallista taulukkomuodossa, joka helpotti työn tulosten keräämistä merkittävästi.

## 10 Tulosten kokoaminen

Jotta materiaalia pystyttiin tutkimaan, kerättiin haluttu data laskentojen tuloksista yhteen Excel-tiedostoon. Liitteissä 11 ja 12 on esitetty FEM-laskennasta tulostetut taulukot. Tuloksista voitiin nyt työstää kuvaajia trendien hahmottamiseksi. Liitteenä olevissa kuvaajissa vihreän sävyt edustavat käsinlaskennan tuloksia ja

vaaleanpuna-violetin sävyt FEM-laskennan tuloksia. Tummemmat sävyt edustavat suurempia lujuusluokkia ja vaaleammat pienempiä. Tuloksia editoitiin siten, että kaikki puristusraudoitusta vaativat tulokset sekä yli 100 % käyttöasteen raudoituksilla olevat palkit poistettiin. Tämä johti käytännössä siihen, että suurin osa pienimmistä palkeista jouduttiin jättämään pois.

Teräskilojen vertailu päättyi työn kannalta toteutettavimmissa olevaksi vaihtoehdoksi. FEM-designissa teräspinta-alat muuttuvat poikkileikkauksittain, joten niiden vertailu ei olisi ollut käytännössä järkevästi toteutettavissa. Pääteräksille kilot on laskettu kaavalla 66. Viidentoista metrin mittaiselle palkille on yläpintaan ajateltu tulevan noin 10 metriä valittuja teräksiä ja alapintaan 15 metrisiä teräksiä. Menetelmä on suhteellisen suurpiirteinen, mutta riittävän tarkka tämän työn virhemarginaalit huomioiden. T20 painona on käytetty 2,47 kg/m (Neliraudoitus Oy).

$$\text{Pääteräskilot} = 25 \text{ m} * \text{tankomäärä} * \text{pääteräksen paino/m} \quad (66)$$

Hakaterästen painot on laskettu arvioimalla yhden hakateräksen pituus, kertomalla se T8 harjateräksen painolla 0,395 kg/m ja kertomalla tämä hakojen kappalemäärällä kaavan 67 mukaisesti.

$$\text{Hakateräskilot} = \text{haan pituus} * \text{hakateräksen paino/m} * \text{kappalemäärä} \quad (67)$$

## 11 Tulokset

Liitteenä olevissa graafeissa, joissa esitetään prosenttieroja, kuvataan aina FEM-laskennan suhdetta käsinlaskentaan. Kun kuvaaja kulkee +20 %:n kohdalla, tarkoittaa se sitä, että FEM-laskennalla on tutkittavaa asiaa saatu 20 %:a enemmän kuin käsinlaskennalla. Tässä työssä palkkien suuruusjärjestyksen ajatellaan olevan liitteissä olevien Excel-graafien järjestyksen mukainen, eli pienimmästä suurimpaan määräävin ominaisuus on palkin leveys ja toiseksi määräävin on korkeus, jolloin esimerkiksi 380x480 palkin ajatellaan olevan suurempi kuin 280x780 palkin, vaikka poikkileikkauspinta-aloja vertaillaessa näin ei ole.

Liitteessä 2 on FEM-designilla lasketun palkin tarkka tuloste, jonka arvoja verrataan liitteen 1 käsinlaskennan arvoihin.

### 11.1 Pääteräkset

Pääterästen määriä on vertailtu liitteissä 3 ja 4. Taivutusmitoitusten tuloksia vertaillaessa voidaan havaita seuraavaa: käsinlaskennan ja FEM-laskennan tulokset asettuvat pääsääntöisesti pienemmällä kuin 380x680 palkeilla noin 10 %:n sisään toisistaan. Erot ovat sitä suurempia, mitä pienempää betonin lujuusluokkaa on laskennassa käytetty. Liitteen 3 kuvaajasta voidaan havaita, että korkeammilla palkeilla FEM-design valitsee vähemmän raudoitusta kuin käsinlaskenta. Suuremmissa kuin 380x680 palkeissa tulokset eivät ole enää yhtä yhdensuuntaisia, vaan FEM-laskenta antaa pienemmällä betonin lujuuksilla huomattavasti enemmän raudoitusta, jopa +30...+50 %. Mikäli palkkia käsitellään sauvaelementtinä, voi jännevälän suhteellinen lyhyys palkin kokoon vaikuttaa tähän. Kuvaajasta voidaan huomata myös piikit palkkien 280x580, 380x580 ja 480x580 kohdalla. Näissä palkkikoissa käsinlaskennalla on saatu vähemmän raudoitusta kuin FEM-laskennassa. Yhdistävä tekijä palkeilla on korkeus, mutta syytä tälle raudoitusmäärän kasvulle on vaikea löytää.

Pääteräksien raudoituskiloja vertaillaessa eri menetelmät ovat pääsääntöisesti noin 0,05 tonnin sisällä toisistaan. Tässä merkittävää on huomioida, että käsinlaskiessa yksittäistä palkkia päästäisiin edelleen hieman pienempiin raudoitusmääriin. Excel-laskennan toimintaperiaatteen ja erilaisten laskettavien palkkien määrän vuoksi on jouduttu tekemään kompromisseja, jotka lisäävät työn virhemarginaalia. Vaikka molemmissa laskentamenetelmissä lähtökohtana on käyttää samaa teräskokoa, ei käsinlaskennassa ollut tässä työssä järkevää lähteä suunnittelemaan teräspinta-alan vaihtelua eri pituisia teräksiä limittämällä. Kuvaajan taulukosta voidaankin huomata, että käsinlaskennassa samankokoiselle palkille on pääsääntöisesti aina käytetty samaa raudoitusta. Mikäli erilaisia palkkeja olisi vähemmän, luonteva tapa olisi valita esimerkiksi taulukosta valmiiksi laskettu ”teräsniippu”, jonka pinta-ala olisi mahdollisimman lähelle vaadittua teräspinta-alaa.

Verratessa käsinlaskettua palkkia 280x480 manuaalisesti FEM-designilla suunniteltuun, huomataan että käyttöasteet eri menetelmien välillä ovat hyvin samansuuntaisia. Käyttöasteeksi FEM-designilla on saatu 84 % ja käsinlaskennassa 89 %.

## 11.2 Leikkaushaات

Eri betonin lujuusluokkien välillä ei esiintynyt juurikaan vaihtelua, pois lukien suuremmat palkkikoot, jolloin suuremmat lujuudet vaativat käsinlaskennassa enemmän terästä. Liitteestä 5 voidaan havaita, että FEM-laskennasta saadut hakamäärät ovat selkeästi suurempia kuin käsinlaskennalla saadut. FEM-designilla automaattista suunnittelua käytettäessä raudoitusmäärät kasvavat pahimmillaan kolminkertaisiksi, kuten liitteestä 6 ilmenee, joka tarkoittaa käytännössä kolminkertaista työmäärää esimerkiksi hakojen asennuksessa ja kolminkertaista hintaa materiaalille. FEM-laskennalla voidaan myös havaita korkeampien/hoikempien palkkien vaativan suhteessa enemmän leikkausraudoitusta, kun taas käsinlaskennassa hakojen tarve kasvoi suhteellisen lineaarisesti.

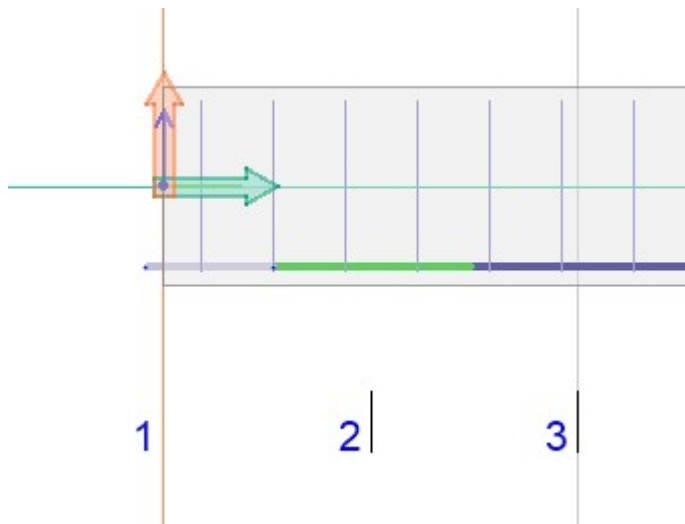
Eroille pyrittiin löytämään syy tutkimalla esimerkkipalkkia erilaisilla  $\theta$ -kulman arvoilla. Kulman muuttaminen FEM:in oletusarvoisesta 45 asteesta käsinlaskennassa käytettyyn 21,8 asteeseen vaikutti seuraavasti: tuilla ollut hakajako k70 ja aukoissa ollut k90 muuttui k90:ksi koko palkin matkalle. Palkkiin muutettiin manuaalisesti käsinlaskennasta saatu hakajako k175, mutta tällöin ohjelma ilmoitti hakaraudoituksen olevan suunnittelusääntöjen vastainen ja pyysi katsomaan ohjetta EN-1992-1-1 9.2.2. Kun palkin pääteräkset muutettiin käsinlaskennan mukaisiksi, 4 kappaletta T20 alapinnassa ja 4 kappaletta T20 yläpinnassa palkin läpi, meni hakojenkin osalta laskenta läpi normaalisti. Tästä voidaan päätellä pääraudoituksen vaikuttavan myös FEM-laskennan leikkausraudoituksen laskentaan, vaikka käsinlaskennassa sillä ei ole vaikutusta. Asiasta oltiin yhteydessä ohjelmiston kehittäjään, mutta syitä tälle ei löydetty työn valmistumiseen mennessä. Manuaalisesti FEM-ohjelmalla raudoitetun palkin käyttöasteet ja kä-

sinlaskennassa saadut käyttöasteet ovat pääraudoitusten tavoin samansuuntaisia, FEM:illä 89 % ja käsinlaskennalla 94 %. Palkin laskenta on esitetty liitteessä 13.

### **11.3 Ankkurointipituus**

Ankkurointipituuksien vertailu on tehty vain esimerkkipalkille koska FEM-designista pystytty tulostamaan järkevästi kaikkien palkkien ankkurointipituuksia. Tämä ei tietenkään ole työelämän kannalta tarpeellinen ominaisuus. Ohjelma käyttää 580 mm ankkurointipituutta kaikkialla esimerkkipalkissa. Käsinlaskien saadut arvot ovat 205 mm ankkurointipituus päiden tuilla ja 440 mm keskituilla, jolloin tätä arvoa voidaan käyttää turvallisesti aukkojen alueilla, missä leikkausvoima on pienempi. FEM-design ilmoittaa päiden ankkurointipituuden alkavaksi vasta palkin päästä, eikä tuen aukon puoleiselta reunalta, joka vielä pidentää vaadittua teräksen mittaa.

Käsinlaskennassa saatu 205 mm ankkurointipituus tuella tarkoittaa käytännössä sitä että 280 mm pitkällä tuella pääteräkset ankkuroituvat ilman lisätoimenpiteitä. Kun FEM-designiin asetetaan alapinnan teräksien ankkurointipituudeksi 0, eli teräkset loppuvat palkin päähän, hyväksyy sekin ankkurointipituuden kelvollisena. Ohjelma ilmoittaa virheestä, mikäli poikkileikkauksessa ei ole lainkaan pitkittäis-suuntaista raudoitusta, eli käytännössä palkki on raudoitettava ohjelmalla aina päähän asti. Kuitenkin, mikäli raudoitus tehdään esimerkiksi kuvan 16 mukaisesti, jossa harmaalla piirretty osuus pääteräksestä on syötetty ankkurointipituutena, antaa ohjelma saman virheilmoituksen. Toisin sanoen vaikka poikkileikkauksessa on samaa pääterästä, ei ohjelma ajattele syötettyä ankkurointipituutta enää pääteräksenä. Kuvasta voidaan myös havaita, että ankkurointi on viety selvästi palkin pään yli, jolloin palkissa ei pitäisi olla yhtään poikkileikkausta, jossa pitkittäistä raudoitusta ei ole.



Kuva 16. FEM-ankkurointi

#### 11.4 Kokonaisteräsmäärät

Liitteessä 7 on esitetty kokonaisraudoitusmäärät terästonneina ja liitteessä 8 prosenttieroit eri menetelmien välillä. Suurimmat erot ovat havaittavissa pienillä ja keskisuurilla lujuuksilla hoikissa palkeissa. FEM-laskennalla saadaan noin +30...+80 % enemmän raudoitustonneja kuin käsinlaskentana. Erot seuraavat toisiaan suhteellisen samanmuotoisina suurimpien erojen ollessa taas pienempien lujuusluokkien välillä. Suuremmilla palkeilla kuin 380x780 raudoitusmäärät hajautuvat, eikä trendiä ole enää havaittavissa.

FEM-design huomioi ankkurointiteräksien painon raudoitusmääriä ilmoittaessaan, vaikka se piirtää ne palkeista ulos. Tämän vaikutus kokonaiskilomäärään on melko pieni, mutta lisää kuitenkin virhemarginaalia. Käsinlaskennan raudoituskiloissa ankkurointipituuksia ei huomioitu. FEM-designista ei löytynyt vaihtoehtoa olla käyttämättä lisäraudoitusta automaattista suunnittelua käytettäessä. T6 lisäraudoitus jätettiin pois terästonnien laskennasta.

## 11.5 Halkeamaleveys

Halkeamaleveydet jäivät pääsääntöisesti raja-arvon alle, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Liitteen 9 kuvaajasta voidaan huomata FEM-laskennan antavan suurempia halkeamaleveyden arvoja pienemmillä palkeilla, mutta erot pienevät suurempiin palkkeihin mentäessä. 780 mm korkeilla palkeilla käsinlaskenta näyttäisi antavan kaikista pienimmät halkeamaleveyden arvot pois lukien sellaiset suuret palkit, joissa tarkastelua ei tarvitse suorittaa.

Huomionarvoista oli, että 480x880 palkin halkeamaleveys kasvoi pienemmillä lujuusluokilla raja-arvon yli. Tämä ei vaikuta johdonmukaiselta, sillä pykälää pienemmissä palkeissa ei ole ongelmia halkeamaleveyden kanssa ja suuremmissa tarkastelua ei tarvitse edes tehdä. C30:tä lujemmilla lujuusluokilla tälläkään palkilla ei tarvitse tutkia halkeamaleveyttä käsinlaskentana lainkaan.

Taivutusmitoituksessa havaituissa piikeissä palkkien 280x580 ja 380x580 kohdalla voidaan huomata myös halkeamaleveyden kasvua käsinlaskennassa.

Taulukkomitoituksella esimerkkirakenteeseen jouduttaisiin valitsemaan 16 mm pääteräkset teräsjännityksen ylittäessä suurimman sallitun 20 mm harjateräksillä. Käsinlaskentana 20 mm pääteräkset olivat kuitenkin täysin hyväksyttäviä. Taulukkomitointi on suhteellisen paljon varmalle puolelle, sillä tässä laskennassa käyttöaste jäi vain 57,5 prosenttiin.

Käsin FEM-designilla raudoitettussa palkissa halkeamaleveyden arvoksi saatiin 0,27 mm ja käsinlaskennassa 0,23 mm.

## 11.6 Käyttöasteet

Käyttöasteet on esitetty liitteessä 10. Liitteessä on esitetty suurin käyttöaste rakenteelle, eikä siinä ole eroteltu onko määräävänä taivutus vai leikkaus. Ne vaihtelevat varsinkin käsinlaskennan osalta huonon optimoinnin takia. FEM-laskennassa yleisin mitoittava tekijä vertailussa huomioituissa palkeissa oli poikkileikkaus (section). Tämä tarkoittaa käytännössä poikkileikkauksen momenttikestävyyttä, eli pääraudoitusta. Huomionarvoista on, että käyttöasteet ovat kuitenkin

suhteellisen alhaisia FEM-laskennan tuloksilla. Tämä korostuu etenkin korkeammilla lujuusluokilla sekä korkeammilla palkeilla. Käyttöasteet tippuvat suurimmalla palkkikoolla 480x980 jopa 32 prosenttiin. Tämä ero saattaisi selittyä sillä, että FEM-designin automaattisessa suunnittelutyökalussa on jokin piilotettu minimiraudoitusmäärä, joka aiheuttaa kestävyyttä niin paljon, ettei tässä työssä käytetty kuorma ole enää merkittävä.

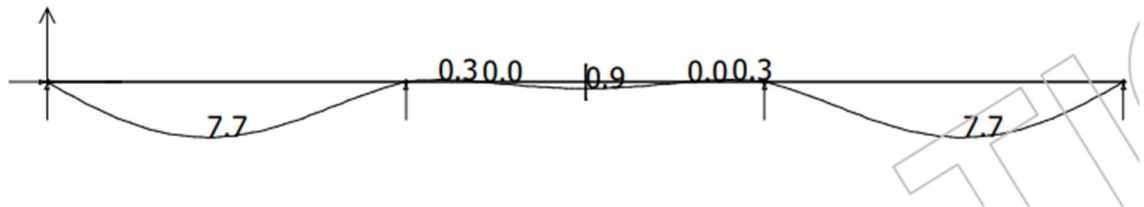
### **11.7 Betonin lujuusluokan vaikutus**

Liitteitä tutkimalla voidaan pääsääntöisesti todeta suuremman betonin lujuusluokan tarkoittavan pienempää teräsmäärää ja pienempiä halkeamaleveyksiä. Halkeamaleveyden rajaaminen ei yleisesti ollut suuri ongelma, joten sen osalta suuremman lujuusluokan valitseminen on todennäköisesti resurssien tuhlaamista. Myös terästonneja vertaillen huomataan FEM-laskentojen tuloksia tarkastelemalla vain hyvin pieniä eroja, jopa yksittäisiä kilogrammoja, joten lujuusluokan kasvattamiselle ei kustannussyistä löydy perusteita.

### **11.8 Taipuma**

Palkin taipuman arvot FEM-laskennalla on esitetty kuvassa 16. Käsinlaskennalla on tarkasteltu vain palkin reunakenttää sen ollessa merkittävin. Taipuman arvoksi saatiin 11 mm. Tämä on noin 43 % enemmän FEM-laskentaan verrattuna, joskin molemmat arvot ovat selkeästi taipumarajan 20 mm alapuolella. Koska momentin

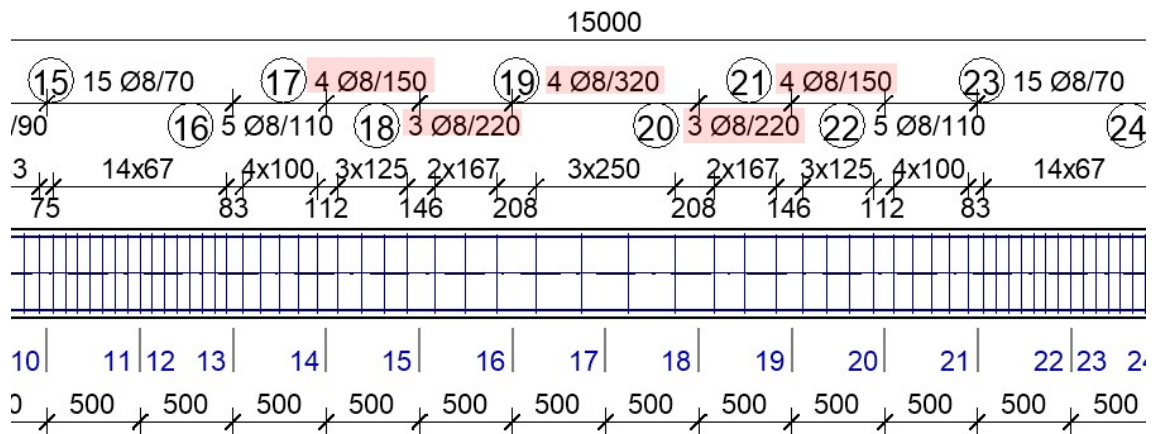
ja taipuman arvot ovat pienempiä kuin käsinlaskennassa, voisi tämän ajatella joh-  
tuvan pienemmistä kuormista, mutta tämän ei pitäisi olla mahdollista, kun kuor-  
mat on määritelty samoin.



Kuva 17. Taipuma, FEM-design

### 11.9 Optimointi

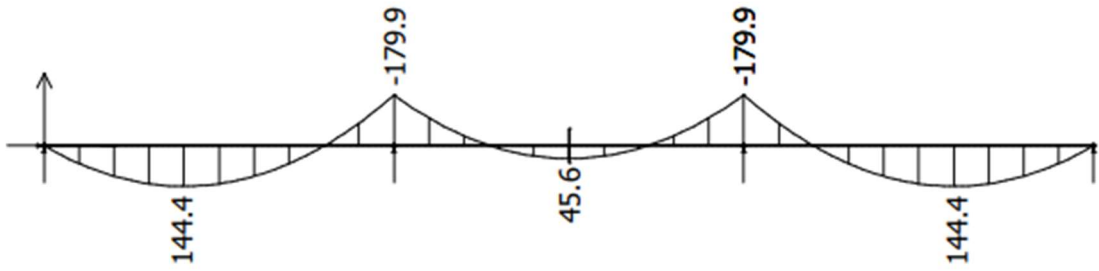
Työssä havaittiin, että FEM-designin kaltaiset ohjelmat optimoivat rakenteita jopa epäkäytännöllisen tarkasti, joka johtaa siihen, että raudoituksia pitää muokata manuaalisesti niiden toteutuskelpoisuuden varmistamiseksi. Toisaalta tämä lisää raudoitusmääriä ja aiheuttaa kustannuksia sekä materiaalin että suunnittelijan työn kautta, mutta sillä saadaan säästettyä aikaa palkin valmistusvaiheessa työn yksinkertaistamisen kautta. Kuvassa 17 on esitetty esimerkki FEM-designin optimoimasta epäkäytännöllisestä hakajaosta, joka käytännössä pitää muokata toteutuskelpoiseksi. Hakajaon vaihtuessa kolmen-neljän haan välein kasvattaa tuotantoon kuluvaan aikaan merkittävästi. Jaon pysyessä samana lisää toistojen määrä työn nopeutta, eikä esimerkiksi suunnitelmien lukemiseen tarvitse käyttää jatkuvasti aikaa ja keskeyttää työtä sitä varten.



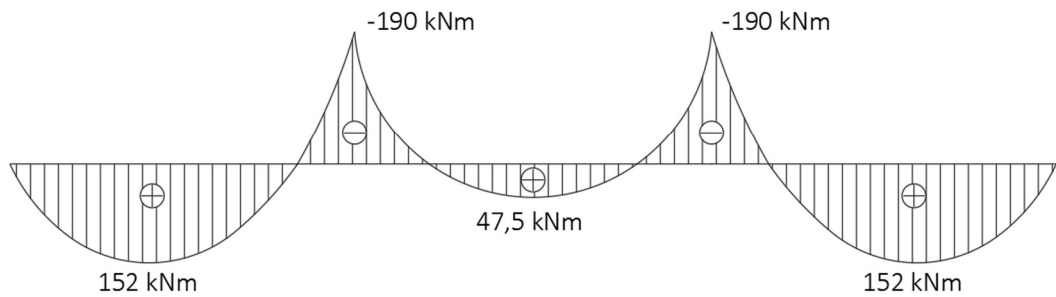
Kuva 18. FEM-hakaraudoitus

### 11.10 Tukimomentin pyöristys

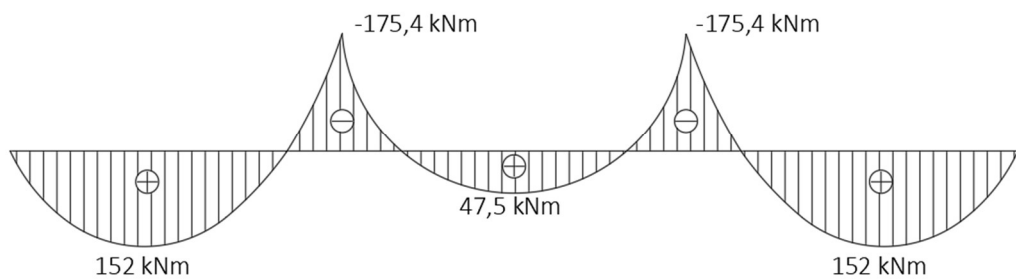
Kuvassa 18 on esitetty momentin arvot tasaisella kuormituksella FEM-designilla laskettuna. Kuvassa 19 ja 20 on esitetty käsinlaskentana saadut tulokset momentin arvoille ilman momentin pyöristystä ja momentin pyöristyksen kanssa. Tuloksia vertaamalla voitaisiin ensisilmäyksellä arvella FEM-designin oletettavasti käyttävän jonkinlaista momentin pyöristystä tai ajatella ohjelman laskevan palkin omapainon pienempänä, sillä myös aukkojen momentit ovat käsinlaskentaa pienemmät. FEM-design kuitenkin käyttää betonin massana oletusarvoisesti  $2,55 \text{ t/m}^3$ , joka vastaa käsinlaskennassa yleisesti käytettyä raudoitettun betonin painoa  $25 \text{ kN/m}^3$ , jolloin painoon liittyvä oletus on väärä. Verrattaessa momenttien suhteita toisiinsa jakamalla reuna-aukon momentti tuen momentilla, saadaan FEM-designin arvojen suhteeksi 0,802. Jakamalla käsinlaskettu reuna-aukon momentti tuen momentilla saadaan suhteeksi 0,800. Koska suhteet ovat käytännössä samat, tämä viittaisi kuitenkin siihen, että momentin pyöristystä ei ole käytetty, vaan jostakin syystä kuormaa olisi vähemmän. Kun tarkastellaan käsinlaskentaa momentin pyöristys huomioiden, saadaan suhteeksi 0,867, joka on huomattavasti suurempi kuin ilman pyöristystä.



Kuva 19. Esimerkkipalkin momenttikuvaaja, FEM-design



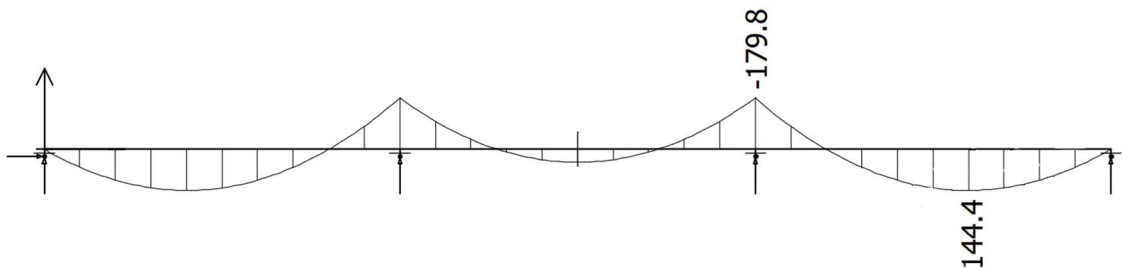
Kuva 20. Esimerkkipalkin momenttikuvaaja, käsinlaskenta, ei momentin pyöristystä



Kuva 21. Esimerkkipalkin momenttikuvaaja, käsinlaskenta, momentin pyöristys huomioitu

Yksi epäily syy pienemmille momenteille voisi olla tukileveyden vaikutus. FEM-designilla mallinnettiin palkin leveyden pituiset tuet rakennemallin mukaisesti,

mutta tällä ei ollut juuri mitään vaikutusta momentteihin, kuten kuvia 22 ja 19 vertaamalla voidaan havaita.



Kuva 22. Esimerkkipalkin momenttikuvaaja, FEM-design, tuet mallinnettu

Käsinlaskennassa yksinkertaisin menettely on käyttää suurimman momentin määräämää raudoitusalaä koko palkille ala- ja yläpintoihin. Suurimman momentin ollessa tuella saadaan pyörityksen käytöllä yleensä hieman kevyempi raudoitus palkille.

### 11.11 Yhteenveto

Pääteräsmäärät eri menetelmien välillä ovat suhteellisen yhdenmukaisia, mutta pienemmät betonin lujuusluokat aiheuttavat FEM-laskennassa enemmän raudoitusta. Hakateräksiä laskiessa FEM-designin automaattinen suunnittelutyökalu valitsee palkille jopa moninkertaisesti raudoitusta kuin käsinlaskentaan verrattuna. Teräsmäärät ovat automaattista suunnittelua käyttäessä suurempia johtuen pääsääntöisesti leikkausraudoituksista. Tukimomentin pyöritystä tutkiessa havaittu FEM-designin "pienempi kuormitus" aiheuttaa eroja myös taipumien laskennassa. Mikäli rasitukset vastaisivat toisiaan paremmin, voisivat erot olla tällä saralla pienempiä.

Taulukossa 4 on koottuna palkin 280x480 tärkeitä numeroarvoja eri menetelmillä laskettuna. Taulukossa FEM A = automaattinen suunnittelu, FEM M = manuaalinen suunnittelu ja EC Excel = käsinlaskentaa mukaileva Excel-laskentapohja. Käyttöasteita vertailemalla voidaan todeta suurimpien erojen tulevan juurikin leik-

kausraudoituksesta automaattista suunnittelua käytettäessä. Muilta osin raudoitusten laskennat ovat noin 5 %-yksikön sisällä toisistaan, joten suuria eroja menetelmien välillä ei ole. FEM-antoi tässä laskennassa noin 21 %:a suuremman halkeamaleveyden arvon manuaalisella suunnittelulla ja noin 40 %:a suuremman arvon automaattisella suunnittelulla. Taulukon arvoja vertaillaan tulee tiedostaa otannan rajallisuus, koska eri palkeilla tulokset voivat hieman poiketa.

	FEM A	FEM M	EC Excel	Käsinlaskenta
Pääteräs	85	84	88,7	89 %
Haat	46	89	94,3	94 %
Halkeamaleveys	0,324	0,27	0,223	0,23 mm
Raudoituskilot	308	289	296	296 kg

Taulukko 4. Tulosten vertailu

## 12 Pohdinta

Alun perin ajatuksena oli vain käyttää satunnaista vakiokuormaa kaikille palkeille, mutta työn kehittyessä mahdollisten pikavalintataulukoiden ja kustannusvertailujen vuoksi tuli käyttää todellisempia kuormia. Tämä osaltaan edisti suuruusluokkakäsityksen muodostamista kuormituksista ja kehitti työelämässä tarvittavaa näppituntumaa.

Alustaa kehittäessä havaittiin muutamia virheiden paikkoja, mutta ne pyrittiin paikkaamaan ennen laskentoja, jotta tulokset olisivat mahdollisimman luotettavia. Koska laskenta-alustalla haluttiin säilyttää mahdollisuus syöttää manuaalisesti väliin tietoja, kuten tehollinen korkeus  $d$  ja rasitukset, oli ohjelman rakenne alun perin erilainen ja vaati päivittämistä useaan kohtaan aina lähtötietojen muuttuessa. Virheiden mahdollisuus oli niin suuri, että ohjelmaan lisättiin mahdollisuus jättää syöttökohtia tyhjäksi, jolloin laskenta tapahtui automaattisesti lasketuilla arvoilla.

Laskenta-alustaa on mahdollista parantaa tulevaisuudessa lisäämällä erilaisia rakennemalleja ja pistekuormien laskenta. Excelin piirtämää grafiikkaa voitaisiin

parantaa, sillä se toimii nykymuodossaan vain kolmiaukkoiselle rakenteelle. Työn puitteissa tätä ei kuitenkaan nähty tarpeelliseksi. Erialaisten kuormitustapausten laskennan parantelu olisi suotavaa, esimerkiksi shakkilautakuormitus olettaa tällä hetkellä kaiken kuorman olevan liikkuvaa, vaikka omapainot eivät näin toimi. Tästä syystä Excel antaa hieman varmemmalle puolelle olevia tuloksia kuin käsinlaskennassa voitaisiin yksittäistä palkkia tutkiessa saada. Myös lumikuormien vaikutus voidaan lisätä ja optio sen liikkuvuuden huomioimiseen EN-1991-1-3:n kansallisen liitteen ohjeen mukaisesti. Excelin tulostusikkunaa voidaan myös kehittää ja suunnittelun automatisoimiseksi voitaisiin ohjelmoida makroja. Alustaa voitaisiin kehittää laskemaan myös lujemmilla kuin C50/60 betoneilla, mutta niiden käyttö ei ole kovin yleistä normaaleissa kohteissa ja laskenta monimutkaistuu hieman.

FEM-laskennan suorittaminen oli saadun opastuksen ja FEM-designin työkalujen kanssa vaivatonta. Ohjelmasta ei löytynyt toimintoa, jolla olisi voinut tulostaa kaikkien palkkien yksityiskohtaiset laskennat suoraan, vaan jokainen palkki piti yksitellen käydä tutkimassa ja lisätä eri kuormitusyhdistelyt yksitellen dokumentaatioon. Työn kannalta järkevimmäksi tavaksi osoittautui tulostaa halutut tiedot suoraan taulukoksi, joskin tässä ohjelmisto voisi tarjota hieman tarkempia rajauksia tulostettavien arvojen valinnassa. Taulukoiden muuntaminen Excel-käyttöön oli taulukon ominaisuuksien vuoksi hieman haastavaa, mutta toteutettavissa. Suoraan Excel-muotoon tulostaminen olisi myös hyödyllinen ominaisuus.

Eurokoodilaskennassa olevia useita lievennyksiä voitaisiin käyttää edelleen käsinlaskennan tulosten "pienentämiseen". Esimerkiksi mitoittava leikkausvoima voitaisiin ottaa tehollisen korkeuden etäisyydeltä tuen reunasta, joka pienentäisi arvoa ja leikkausraudoitusta. Betonipeitteen minimipaksuutta voitaisiin pienentää esimerkkitapauksen ympäristörasitusluokassa käytettäessä vähintään lujuusluokan C30/37 betonia. Betonipeitepaksuuden pienentämisellä saataisiin lisää tehollista korkeutta, joka lisäisi palkin taivutuskestävyyttä. Raudoituksen painopisteen siirtyessä alemmas sisäinen momenttivarsi kasvaa, jolloin leikkausraudoitusta mitoittava leikkausjännitys on pienempi. Tehollisen korkeuden kasvaessa saataisiin pääraudoitusala pienemmäksi. Näiden ja muiden vastaavien "helpo-

tusten” käytöllä saataisiin rakenteita optimoitua enemmän, mutta työelämän kannalta tämä aiheuttaa ainakin kahdenlaisia haasteita. Käsien optimointiin kuluu aikaa, joka on yksi syistä FEM-ohjelmien suosioon. Työelämässä suunnitelmat myös yleensä elävät, joten rakenteiden mitoittaminen liian tarkasti käyttöaste maksimoiden aiheuttaa sen, että kuorman lisääntyessä edes hieman se pakottaa käytännössä suunnittelemaan rakenteen uudelleen.

Käsinlaskennassa halkeamaleveyttä ei käytetty mitoittavana parametrina, mutta FEM-designia käytettäessä havaittiin sen vaikuttavan raudoitusmääriin. Vaikutukset olivat kuitenkin lähes olemattomia muilla osa-alueilla havaittujen erojen mittakaavassa. Eroja ei myöskään syntynyt kaikissa palkeissa.

Työn aihe on tärkeä suunnittelutyön siirtyessä jatkuvasti enemmän digitaaliseksi. Erot normipohjaisen käsinlaskennan ja ohjelmistoilla laskettujen rakenteiden välillä tulisi saada mahdollisimman pieneksi, jotta ohjelmistojen käytöstä saataisiin maksimaalinen hyöty. Työstä syntyneet havainnot voidaan tiivistää seuraavasti:

- Raudoitusmäärät automaattisia suunnittelutyökaluja käyttäessä voivat olla merkittävästi suurempia kuin käsinlaskennassa.
- Käyttäjän osaamisen merkitys FEM-laskennassa on erittäin suuri.
- Betonin lujuusluokan nostaminen ei todennäköisesti säästä kustannuksia, sillä vaikutukset kokonaisraudoitusmäärään ovat pienet.

Menetelmien välisiä eroja on työelämässä havaittu, mutta niiden analysointi vaatisi aikaa ja resursseja. Ohjelmistojen kehittäjille voisi olla aiheellista luoda matalan kynnyksen palautepalvelu, jossa esimerkiksi ohjelman sisältä voisi suoraan raportoida havaitsemiaan asioita. Lopuksi on hyvä muistuttaa siitä, että vaikka laskentamenetelmien välille syntyi suuria eroja, on automaattinen suunnittelu merkittävimpiä syitä tässä työssä havaittuihin eroihin. Ohjelmistoja käyttäessä voidaan saada lähes käsinlaskentaa vastaavia arvoja, kun suunnitellaan manuaalisesti, mutta tämä vie hieman pohjaa koko tekniikalta sillä yksi merkittävimpiä syitä digitaalisten työkalujen käytölle on ajan säästäminen. Eri ohjelmistojen välillä on oletettavasti myös eroja. Suunnittelijoiden olisi hyvä tehdä esimerkiksi ver-

tailulaskelmia eri menetelmällä suuruusluokkakäsityksen kehittämiseksi ja ohjelmien tarkistamiseksi. Ohjelmiston käyttäjän taidot näyttelevät suurta osaa FEM-pohjaisen suunnittelun onnistumisessa.

## Lähteet

Betoniteollisuus Ry. 2012. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan: Taipuma. [https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet\\_8\\_Taipuma.pdf](https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_8_Taipuma.pdf). Luettu 17.1.2020

Betoniteollisuus Ry. Betoni rakennusmateriaalina. <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/>. Luettu 13.1.2020.

Betoniteollisuus Ry. Suorakaidepalkit. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/palkit/suorakaidepalkit>. Luettu 8.1.2020.

Betoniteollisuus Ry 2010 a. Runkorakenteet. [https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22592/Runkorakenteet\\_9%203%202010.pdf](https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22592/Runkorakenteet_9%203%202010.pdf). Luettu 20.1.2020.

Betoniteollisuus Ry 2010 b. Toimisto- ja liikerakennukset. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/toimisto-ja-liikerakennukset>. Luettu 13.1.2020.

Cook, R. 1994. Finite Element Modeling for Stress Analysis. USA: John Wiley & Sons, Inc.

Harish 2019. Finite Element Method – What is it? FEM and FEA explained, <https://www.simscale.com/blog/2016/10/what-is-finite-element-method/>. Luettu 9.1.2020.

Nelirauditus Oy. Harjaterästen painot. <http://www.nelirauditus.fi/index.php?id=49&kieli=1>. Luettu 10.2.2020.

Manor. The benefits of finite element analysis in manufacturing. <https://www.manortool.com/finite-element-analysis>. Luettu 9.1.2020

Salmi, T & Kuula, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere: Pressus Oy.

Salmi, T & Kuula, K. 2012. Rakenteiden mekaniikka. Tampere: Pressus Oy.

SFS 2019. Eurokoodit: eurooppalaiset kantavien rakenteiden suunnittelustandardit. [https://www.sfs.fi/files/309/Eurokoodi\\_2019\\_web.pdf](https://www.sfs.fi/files/309/Eurokoodi_2019_web.pdf). Luettu 13.1.2020.

Sitowise Oy. Sitowise. <https://www.sitowise.com/fi/sitowise/yritys>. Luettu 15.1.2020

StruSoft. About Strusoft. <https://strusoft.com/about>. Luettu 13.1.2020.

StruSoft. FEM-design. <https://strusoft.com/products/fem-design>. Luettu 13.1.2020.

Suomen betoniyhdistys 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus BY210. Helsinki: Suomen betonitieto Oy.

Suomen betoniyhdistys 2015. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1 2013 BY211 toinen painos. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Sönnnerlind 2015. Singularities in Finite Element Models: Dealing with Red spots. <https://www.comsol.com/blogs/singularities-in-finite-element-models-dealing-with-red-spots/>. Luettu 13.1.2020.

Vertex systems. FEA-laskennan teoriaa. <https://kb.vertex.fi/fea2017fi/tutustu-tarkemmin-ominaisuuksiin/yleiset-aiheet/fea-laskennan-teoriaa>. Luettu 9.1.2020.

Väisänen, P. 2007. Teräs – Perustietoa arkkitehtiopiskelijoille. TKK Arkkitehtipisto. Vammala: Vammalan kirjapaino oy.

Ympäristöministeriö 2019. Rakenteiden lujuus ja vakaus - rakenteiden kuormat. <https://www.ym.fi/download/noname/%7B5070311E-F267-47BC-A593-AEAA20EA31FE%7D/153592>. Luettu 20.1.2020.

## Liite 1. Käsinlaskenta

### Sisällys

1	Käsinlaskenta .....	2
1.1	Rasitukset .....	2
1.2	Taivutusmitoitus .....	2
1.2.1	Tehollinen korkeus .....	2
1.2.2	Suhteellinen momentti .....	2
1.2.3	Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus .....	2
1.2.4	Mekaaninen raudoitussuhde .....	3
1.2.5	Vaadittu teräspinta-ala .....	3
1.2.6	Minimiraudoitus .....	3
1.2.7	Kokonaisraudoitusala .....	3
1.2.8	Käyttöaste .....	3
1.3	Leikkausmitoitus .....	3
1.3.1	Sisäinen momenttivarsi .....	3
1.3.2	Uuman teräspinta-ala .....	3
1.3.3	Suurin sallittu hakaväli .....	4
1.3.4	Minimi hakavaatimuksen mukainen hakaväli .....	4
1.3.5	Suurin sallittu hakaväli .....	4
1.3.6	Leikkauskestävyyden yläraja .....	4
1.3.7	Leikkausvoiman maksimiarvo/uuman puristusmurtokestävyys .....	4
1.3.8	Leikkauskestävyys .....	4
1.3.9	Käyttöaste .....	5
1.4	Ankkurointimitoitus .....	5
1.4.1	Ankkurointi päiden tuilla .....	5
1.4.2	Suorien tankojen ankkurointi .....	6
1.5	Viruma .....	7
1.6	Halkeamaleveys .....	7
1.6.1	Kimmokertoimien suhde .....	7
1.6.2	Tehollisten kimmokertoimien suhde .....	7
1.6.3	Muunnettu poikkileikkauspinta-ala .....	8
1.6.4	Pintakeskiön etäisyys palkin alareunasta .....	8
1.6.5	Jäyhyysmomentti .....	8
1.6.6	Puristuspuinnan korkeus halkeamattomassa tilassa .....	8
1.6.7	Momentin ominaisarvo .....	8
1.6.8	Halkeilumomentti .....	8
1.6.9	Momentin pitkäaikaisyhdistely .....	8
1.6.10	Raudoituksen jännitys pitkäaikaisyhdistelyn rasituksilla .....	9
1.6.11	Puristusvyöhykkeen korkeus haljenneessa tilassa .....	9
1.6.12	Tehollisen vetoalueen korkeus .....	9
1.6.13	Tehollinen raudoitussuhde .....	9
1.6.14	Venymäero .....	9
1.6.15	Halkeamavälin maksimiarvo .....	9
1.6.16	Halkeamaleveys .....	10
1.7	Taipuma .....	10

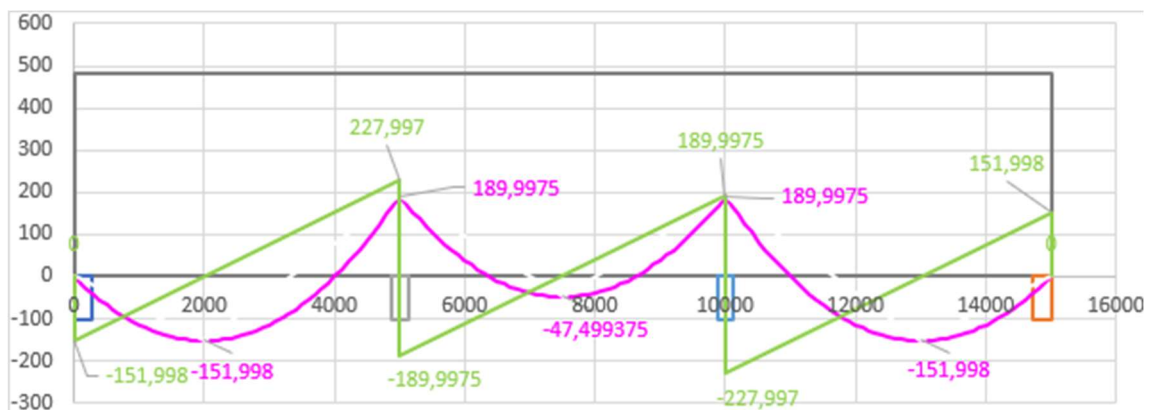
1.7.1	Taipumaraja .....	10
1.7.2	Halkeamaton tila.....	10
1.7.3	Haljennut tila .....	11
1.7.4	Taipumarajatila.....	11
1.7.5	Kutistuma .....	12

## 1 Käsinlaskenta

Valittu palkki on 280x480 C40/50. Lähtötiedot ovat samat kuin muissa laskennoissa. Suhteellisen kosteuden arvoksi oletettiin 50%.

### 1.1 Rasitukset

Rasitukset Excel-laskennasta:



### 1.2 Taivutusmitoitus

#### 1.2.1 Tehollinen korkeus

$$d = 480 \text{ mm} - 30 \text{ mm} - 1,1 * 8 \text{ mm} - \frac{1,1 * 20 \text{ mm}}{2} = 430,2 \text{ mm}$$

#### 1.2.2 Suhteellinen momentti

$$\mu = \frac{190000000 \text{ Nmm}}{280 \text{ mm} * (430,2 \text{ mm})^2 * 1 * 22,7 \text{ N/mm}^2} = 0,162$$

#### 1.2.3 Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,162} = 0,178$$

## 1.2.4 Mekaaninen raudoitussuhde

$$\omega = \beta = 0,178$$

## 1.2.5 Vaadittu teräspinta-ala

$$A_{s,vaad} = 0,178 * 280 \text{ mm} * 430,2 \text{ mm} * \frac{1 * 22,7 \frac{N}{\text{mm}^2}}{434,8 \frac{N}{\text{mm}^2}} = 1119,4 \text{ mm}^2$$

## 1.2.6 Minimiraudoitus

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 * \frac{3,51 \frac{N}{\text{mm}^2}}{434,8 \frac{N}{\text{mm}^2}} * 280 \text{ mm} * 430,2 \text{ mm} = 252,8 \text{ mm}^2; \\ 0,0013 * 280 \text{ mm} * 430,2 \text{ mm} = 156,6 \text{ mm}^2 \end{array} \right\}$$
$$= 252,8 \text{ mm}^2$$

Pääraudoitukseksi valitaan seuraavat teräkset: 4 kappaletta T20 B500B.

## 1.2.7 Kokonaisraudoitusala

$$A_{s,tot} = 4 * \pi * (10 \text{ mm})^2 = 1256,6 \text{ mm}^2$$

## 1.2.8 Käyttöaste

$$\frac{1119,4 \text{ mm}^2}{1256,6 \text{ mm}^2} * 100\% = 89 \%$$

## 1.3 Leikkausmitoitus

### 1.3.1 Sisäinen momenttivarsi

$$z = 0,9 * 430,2 \text{ mm} = 387,2 \text{ mm}$$

Valitaan haat 8 mm 2-leikkeisinä.

### 1.3.2 Uuman teräspinta-ala

$$A_{sw} = 2 * \pi * (4 \text{ mm})^2 = 100,5 \text{ mm}^2$$

### 1.3.3 Suurin sallittu hakaväli

$$s \leq \frac{100,5 \text{ mm}^2}{228000N} * 387,2 \text{ mm} * 434,8 \text{ mm} * (\cot 21,8^\circ + \cot 90^\circ) * \sin 90^\circ \\ = 185,3 \text{ mm}$$

### 1.3.4 Minimi hakavaatimuksen mukainen hakaväli

$$s \leq \frac{100,5 \text{ mm}^2}{0,08 * 280 \text{ mm} * \sin 90^\circ} * \frac{\frac{500 \frac{N}{\text{mm}^2}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}}{\sqrt{\frac{40 \frac{N}{\text{mm}^2}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}}} = 354,7 \text{ mm}$$

### 1.3.5 Suurin sallittu hakaväli

$$S_{max} = 0,75 * 430,2 \text{ mm} * (1 + \cot 90^\circ) = 322,7 \text{ mm}$$

Valitaan leikkausraudoitus T8 k175.

### 1.3.6 Leikkauskestävyyden yläraja

$$v = 0,6 * \left( 1 - \frac{40 \frac{N}{\text{mm}^2}}{250 \frac{N}{\text{mm}^2}} \right) = 0,504$$

### 1.3.7 Leikkausvoiman maksimiarvo/uuman puristusmurtokestävyyys

$$V_{Rd,max} = 0,504 * 22,7 \frac{N}{\text{mm}^2} * 280 \text{ mm} * 387,2 \text{ mm} * \frac{\cot 21,8^\circ + \cot 90^\circ}{1 + (\cot 21,8^\circ)^2} \\ = 458240 \text{ N}$$

### 1.3.8 Leikkauskestävyys

$$V_{Rd,s} = 434,8 \text{ N/mm}^2 * \frac{100,5 \text{ mm}^2}{175 \text{ mm}} * 387,2 \text{ mm} * \cot 21,8^\circ = 241726 \text{ N}$$

### 1.3.9 Käyttöaste

$$\frac{228000 \text{ N}}{241726 \text{ N}} * 100\% = 94\%$$

## 1.4 Ankkurointimitoitus

### 1.4.1 Ankkurointi päiden tuilla

#### 1.4.1.1 Tuelle ankkuroitava voima

$$F_{Ed} = 0,5 * 152000 \text{ N} * (\cot 21,8^\circ - \cot 90^\circ) = 190014 \text{ N}$$

#### 1.4.1.2 Tartuntalujuuden mitoitusarvo

$$F_{bd} = 2,25 * 1 * 1 * 1,64 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 3,69 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

#### 1.4.1.3 Vaadittu ankkurointipituus

$$l_{b.rqd} = \frac{20 \text{ mm}}{4} * \frac{\frac{190014 \text{ N}}{1256,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}{3,69 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 205 \text{ mm}$$

#### 1.4.1.4 Ankkurointipituuden vähimmäisarvo

$l_{b,min}$ , ellei muita rajoituksia ole, on vetovoimaa ankkuroitaessa:

$$l_{b,min} = \min \{10 * 20 \text{ mm} = 200 \text{ mm}; 0,3 * 205 \text{ mm} = 61,5 \text{ mm}; 100 \text{ mm}\} \\ = 200 \text{ mm}$$

#### 1.4.1.5 Ankkurointipituus

$$l_b = 205 \text{ mm}$$

Laskennassa on oletettu päiden tukien olevan palkin leveyden mukaisia, eli tässä tapauksessa 280 mm.

#### 1.4.1.6 Tuella toteutuva ankkurointipituus

$$l_{tot} = 280 \text{ mm} - 30 \text{ mm} = 250 \text{ mm}$$

#### 1.4.1.7 Ehdon tarkistus:

$$l_{tot} = 250 \text{ mm} \geq l_b = 205 \text{ mm}$$

#### 1.4.2 Suorien tankojen ankkurointi

Ankkurointipituuden laskenta keskitukien leikkausvoiman vaikutusalueella. Tuki-momenttia ottava raudoitus on sijoitettu palkin yläreunaan, jolloin tartuntaolosuhteet ovat muut kuin hyvät tartuntaolosuhteet.

##### 1.4.2.1 Ankkuroitava voima

$$F_{Ed} = 0,5 * 228000 \text{ N} * (\cot 21,8^\circ - \cot 90^\circ) = 285020 \text{ N}$$

##### 1.4.2.2 Tartuntalujuuden mitoitusarvo

$$F_{bd} = 2,25 * 0,7 * 1 * 1,64 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 2,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

##### 1.4.2.3 Vaadittu ankkurointipituus

$$l_{b,rqd} = \frac{20 \text{ mm}}{4} * \frac{\frac{285020 \text{ N}}{1256,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}{2,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 440 \text{ mm}$$

##### 1.4.2.4 $\alpha$ -Pienennyskertoimet

Ankkurointipituuden vaadittua arvoa voidaan pienentää  $\alpha$ -kertoimilla. Tässä tapauksessa vain  $\alpha_2$ -kertoimella on vaikutusta ankkurointipituuteen.

$$\alpha_2 = 1 - 0,15 * \left( \frac{38 \text{ mm} - 20 \text{ mm}}{20 \text{ mm}} \right) = 0,9$$

##### 1.4.2.5 Ankkurointipituuden arvo suorilla osilla

$$l_b = 1 * 0,9 * 1 * 1 * 1 * 440 \text{ mm} = 396 \text{ mm}$$

## 1.5 Viruma

Virumaluvun perusarvo on määritelty graafisella menetelmällä. Määrittelyssä vaaditut lähtötiedot ovat:

- Olosuhteet: sisätilat,  $rh = 50\%$
- Betoni: C40/50
- Sementti: normaali
- Kuormitusajankohta  $t_0 = 28$  päivää
- $h_0$

$$h_0 = \frac{2 * 133143 \text{ mm}^2}{1520 \text{ mm}} = 175,2 \text{ mm}$$

### 1.5.1.1 Virumaluvun perusarvo

$$\varphi_0 = 1,7$$

### 1.5.1.2 Virumaluvun tehollinen arvo

$$\varphi_{eff} = 1,7 * \frac{48500 \text{ N/m}}{60800 \text{ N/m}} = 1,36$$

### 1.5.1.3 Betonin kimmomoduulin tehollinen arvo

$$E_{cm,eff} = \frac{35220 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1 + 1,36} = 14924 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## 1.6 Halkeamaleveys

Kaavoja on sievennetty, koska rakenteessa ei ole käytetty puristusraudoitusta ja yläpinnan teräkset päätetään jättää laskennallisesti huomioimatta.

### 1.6.1 Kimmokertoimien suhde

$$\alpha_e = \frac{200000 \text{ N/mm}^2}{35220 \text{ N/mm}^2} = 5,7$$

### 1.6.2 Tehollisten kimmokertoimien suhde

$$\alpha_{e,eff} = \frac{200000 \text{ N/mm}^2}{14924 \text{ N/mm}^2} = 13,4$$

### 1.6.3 Muunnettu poikkileikkauspinta-ala

$$A_I = 133143 \text{ mm}^2 + (5,7 - 1) * 1256,6 \text{ mm}^2 = 138295 \text{ mm}^2$$

### 1.6.4 Pintakeskiön etäisyys palkin alareunasta

$$y_{OI} = \frac{240 \text{ mm} * 133143 \text{ mm}^2 + (5,7 - 1) * 1256,6 \text{ mm}^2 * (480 \text{ mm} - 430,2 \text{ mm})}{138295 \text{ mm}^2}$$
$$= 233 \text{ mm}$$

### 1.6.5 Jäyhyysmomentti

$$I_I = \frac{280 \text{ mm} * (480 \text{ mm})^3}{12} + 133143 \text{ mm}^2 * (233 \text{ mm} - 240 \text{ mm})^2 + (5,7 - 1) * 1256,6 \text{ mm}^2 * (233 \text{ mm} - 480 \text{ mm} + 430,2 \text{ mm})^2$$
$$= 2785223268 \text{ mm}^4$$

### 1.6.6 Puristuspuunnan korkeus halkeamattomassa tilassa

$$X_I = 480 \text{ mm} - 233 \text{ mm} = 247 \text{ mm}$$

### 1.6.7 Momentin ominaisarvo

$$M_{Ek} = M_{gk} + M_{qk} + \Sigma \psi_{0,i} * M_{qk,i} = 151900 \text{ Nm}$$

### 1.6.8 Halkeilumomentti

$$M_{R,cr} = 3,51 \frac{\text{N}^2}{\text{mm}} * \frac{2785223268 \text{ mm}^4}{480 \text{ mm} - 247 \text{ mm}} = 41958 \text{ Nm}$$

Mikäli momentin ominaisarvo on suurempi kuin rakenteen halkeilumomentti, rakenne halkeaa ja halkeamaleveystarkastelu tulee suorittaa.

$$151900 \text{ Nm} > 41958 \text{ Nm} = \text{Rakenne halkeaa}$$

### 1.6.9 Momentin pitkäaikaisyhdistely

$$M_{Eqp} = M_{gk} + \Sigma \psi_{2,i} * M_{qk,i} = 121300 \text{ Nm}$$

### 1.6.10 Raudoituksen jännitys pitkäaikaisyhdistelyn rasituksilla

$$\sigma_s = \frac{121300000 \text{ Nmm}}{387,2 \text{ mm} * 1256,6 \text{ mm}^2} = 249,3 \text{ N/mm}^2$$

### 1.6.11 Puristusvyöhykkeen korkeus haljenneessa tilassa

$$\begin{aligned} X_{II} &= \frac{1}{280 \text{ mm}} * \{ [(13,4 * 1256,6 \text{ mm}^2)^2 + 2 * 280 \text{ mm} \\ &\quad * 13,4 * 430,2 \text{ mm} * 1256,6 \text{ mm}^2]^{0,5} - 13,4 * 1256,6 \text{ mm}^2 \} \\ &= 175,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

### 1.6.12 Tehollisen vetoalueen korkeus

$$\begin{aligned} h_{c,eff} &= \min \left\{ 2,5 * (480 \text{ mm} - 430,2 \text{ mm}) = 124,5 \text{ mm}; \frac{480 \text{ mm} - 175,1 \text{ mm}}{3} \right. \\ &\quad \left. = 101,6 \text{ mm}; \frac{480 \text{ mm}}{2} = 240 \text{ mm} \right\} = 101,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

### 1.6.13 Tehollinen raudoitussuhde

$$\rho_{p,eff} = \frac{1256,6 \text{ mm}^2}{(280 \text{ mm} * 101,6 \text{ mm})} = 0,044$$

### 1.6.14 Venymäero

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{sm} &= \max \left\{ \frac{249,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - 0,4 * \frac{3,51 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{0,044} * (1 + 13,4 * 0,044)}{200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \right. \\ &\quad \left. = 0,00109; 0,6 * \frac{\sigma_s}{E_s} = 0,6 * \frac{249,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,0008 \right\} = 0,00109 \end{aligned}$$

### 1.6.15 Halkeamavälin maksimiarvo

$$S_{r,max} = 3,4 * 38 \text{ mm} + 0,8 * 0,5 * 0,425 * \frac{20 \text{ mm}}{0,044} = 206,5 \text{ mm}$$

### 1.6.16 Halkeamaleveys

$$w_k = 206,5 \text{ mm} * 0,00109 = 0,23 \text{ mm}$$

Halkeamaleveyden raja-arvo ympäristörasitusluokissa X0, XC1 on  $w_{max} = 0,4$  mm.

$$w_k = 0,23 \text{ mm} < w_{max} = 0,4 \text{ mm}$$

## 1.7 Taipuma

### 1.7.1 Taipumaraja

$$a_{max} = \frac{5000 \text{ mm}}{250} = 20 \text{ mm}$$

### 1.7.2 Halkeamaton tila

#### 1.7.2.1 Puristusvyöhykkeen korkeus, halkeamaton lyhytaikainen tila

$$X_{I,ST} = \frac{\frac{280 \text{ mm} * (480 \text{ mm})^2}{2} + (5,7 - 1) * 1256,6 \text{ mm}^2 * 430,2 \text{ mm}}{280 \text{ mm} * 480 \text{ mm} + (5,7 - 1) * 1256,6 \text{ mm}^2} = 248,0 \text{ mm}$$

#### 1.7.2.2 Jäyhyysmomentti, halkeamaton lyhytaikainen tila

$$\begin{aligned} I_{I,ST} &= \frac{280 \text{ mm} * (480 \text{ mm})^3}{12} + 280 \text{ mm} * 480 \text{ mm} * \left( \frac{480 \text{ mm}}{2} - 248,0 \text{ mm} \right)^2 \\ &\quad + (5,7 - 1) * 1256,6 \text{ mm}^2 * (430,2 \text{ mm} - 248,0 \text{ mm})^2 \\ &= 2785142801 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

#### 1.7.2.3 Puristusvyöhykkeen korkeus, halkeamaton pitkäaikainen tila

$$X_{I,LT} = \frac{\frac{280 \text{ mm} * (480 \text{ mm})^2}{2} + (13,4 - 1) * 1256,6 \text{ mm}^2 * 430,2 \text{ mm}}{280 \text{ mm} * 480 \text{ mm} + (13,4 - 1) * 1256,6 \text{ mm}^2} = 259,8 \text{ mm}$$

#### 1.7.2.4 Jäyhyysmomentti, halkeamaton pitkäaikainen tila

$$\begin{aligned} I_{I,LT} &= \frac{280 \text{ mm} * (480 \text{ mm})^3}{12} + 280 \text{ mm} * 480 \text{ mm} * \left( \frac{480 \text{ mm}}{2} - 259,8 \text{ mm} \right)^2 \\ &\quad + (13,4 - 1) * 1256,6 \text{ mm}^2 * (430,2 \text{ mm} - 259,8 \text{ mm})^2 \\ &= 3085606975 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

### 1.7.3 Haljennut tila

#### 1.7.3.1 Puristusvyöhykkeen korkeus, haljennut pitkäaikainen tila

$$X_{II,LT} = 13,4 * 430,2 \text{ mm} * 0,044 * \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2}{13,4 * 0,044}} \right) = 277,9 \text{ mm}$$

#### 1.7.3.2 Sisäinen momenttivarsi, haljennut pitkäaikainen tila

$$z_{II,LT} = 430,2 \text{ mm} - \frac{277,9 \text{ mm}}{3} = 337,6 \text{ mm}$$

#### 1.7.3.3 Jäyhyysmomentti, haljennut pitkäaikainen tila

$$\begin{aligned} I_{II,LT} &= \frac{280 \text{ mm} * (277,9 \text{ mm})^3}{3} + 13,4 * 1256,6 \text{ mm}^2 * (430,2 \text{ mm} - 277,9 \text{ mm})^2 \\ &= 2393671512 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

### 1.7.4 Taipumarajatila

#### 1.7.4.1 Raudoitussuhteen vertailuarvo

$$\rho_0 = 10^{-3} * \sqrt{\frac{40 \frac{N}{\text{mm}^2}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}} = 0,0063$$

#### 1.7.4.2 Jännemitan ja tehollisen korkeuden suhteen raja-arvo, kun $\rho \geq \rho_0$ .

$$\frac{L}{d} = 1,3 * \left( 11 + 1,5 * \sqrt{40 \frac{N}{\text{mm}^2} * \frac{0,0063}{0,044 - 0}} + \frac{1}{12} * \sqrt{40 \frac{N}{\text{mm}^2} * \sqrt{\frac{0}{0,044}}} \right) = 16,07$$

#### 1.7.4.3 Jännevälin ja tehollisen korkeuden suhde

$$\frac{L}{d} = \frac{5000 \text{ mm}}{430,2 \text{ mm}} = 11,52$$

$$11,62 < 16,07$$

Taipumatarkastelu on tehty kolmiaukkoisen rakenteen reunakentässä.

#### 1.7.4.4 Halkeiluaste

$$\zeta = 1 - 0,5 * \left( \frac{42100 \text{ Nm}}{151900 \text{ Nm}} \right)^2 = 0,96$$

#### 1.7.4.5 Kaarevuus, pitkäaikainen yhdistelmä

#### 1.7.4.6 Halkeamattoman tilan kaarevuus, pitkäaikainen yhdistelmä

$$\frac{1}{r_{I,LT}} = \frac{121300000 \text{ Nmm}}{14924 \text{ N/mm}^2 * 3085606975 \text{ mm}^4} = 2,63 * 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}}$$

#### 1.7.4.7 Haljenneen tilan kaarevuus, pitkäaikainen yhdistelmä

$$\frac{1}{r_{II,LT}} = \frac{121300000 \text{ Nmm}}{14924 \text{ N/mm}^2 * 2393671512 \text{ mm}^4} = 3,40 * 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}}$$

#### 1.7.4.8 Osittain haljenneen tilan kaarevuus

K:n arvo betoniteollisuuden taipuma-leaflet.

$$\frac{1}{r_{LT}} = 0,96 * 3,40 * 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}} + (1 - 0,96) * 2,63 * 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}} = 3,37 * 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}}$$

#### 1.7.4.9 Kuormituksen taipuma

$$a_{LT,M} = 0,104 * \left( 1 - \frac{\left( \frac{0 \text{ kNm} + (-151,9 \text{ kNm})}{121,5 \text{ kNm}} \right)}{10} \right) * (5000 \text{ mm})^2 * 3,37 * 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}} = 9,6 \text{ mm}$$

#### 1.7.5 Kutistuma

##### 1.7.5.1 Raudoituksen staattinen momentti poikkileikkauksen painopisteen suhteen, halkeamaton tila

$$S_{I,LT} = 1256,6 \text{ mm}^2 * (430,2 \text{ mm} - 259,8 \text{ mm}) = 214125 \text{ mm}^3$$

##### 1.7.5.2 Raudoituksen staattinen momentti poikkileikkauksen painopisteen suhteen, haljennut tila

$$S_{II,LT} = 1256,6 \text{ mm}^2 * (430,2 \text{ mm} - 277,9 \text{ mm}) = 191380 \text{ mm}^3$$

### 1.7.5.3 Kutistuman aiheuttama kaarevuus

Betonin C40/50 kutistuma, kun RH=50% on noin 0,42‰.

$$\begin{aligned}\frac{1}{r_{cs}} &= 0,00042 * 13,4 \\ &* \left( 0,96 * \frac{191380 \text{ mm}^3}{2393671512 \text{ mm}^4} + (1 - 0,96) * \frac{214125 \text{ mm}^3}{3085606975 \text{ mm}^4} \right) \\ &= 4,48 * 10^{-7} \frac{1}{\text{mm}}\end{aligned}$$

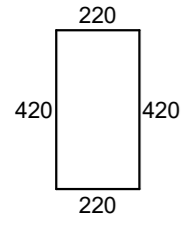
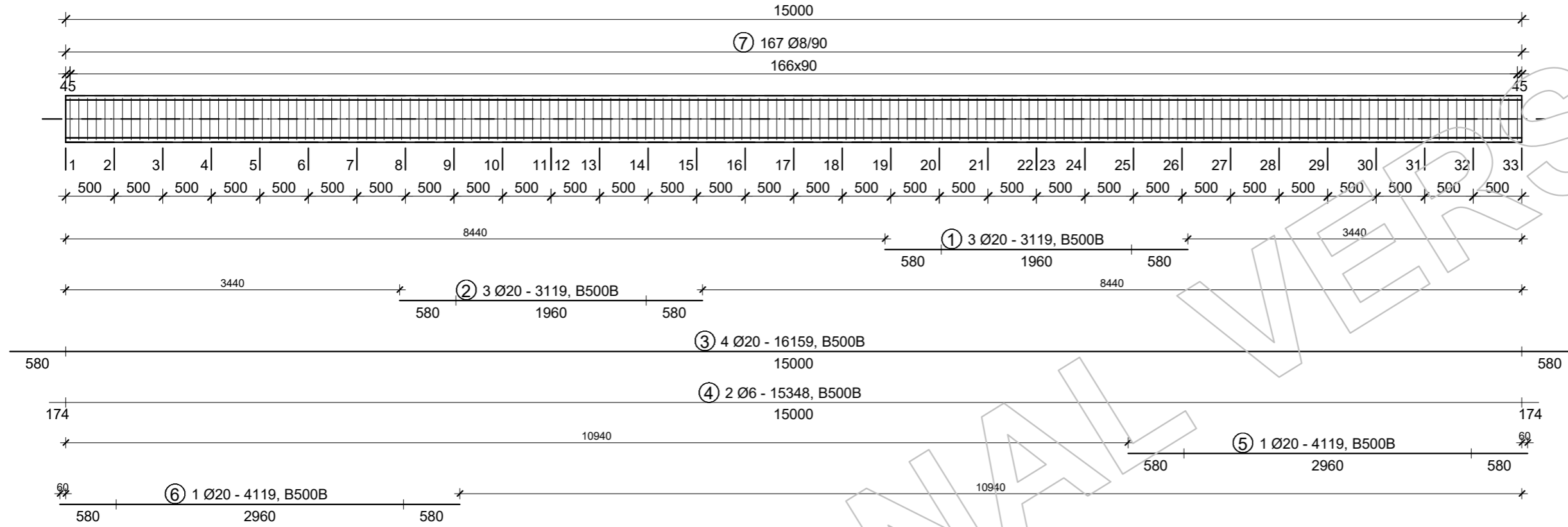
### 1.7.5.4 Kutistuman aiheuttama taipuma

$$\alpha_{cs} = 0,125 * (5000 \text{ mm})^2 * 4,48 * 10^{-7} \frac{1}{\text{mm}} = 1,4 \text{ mm}$$

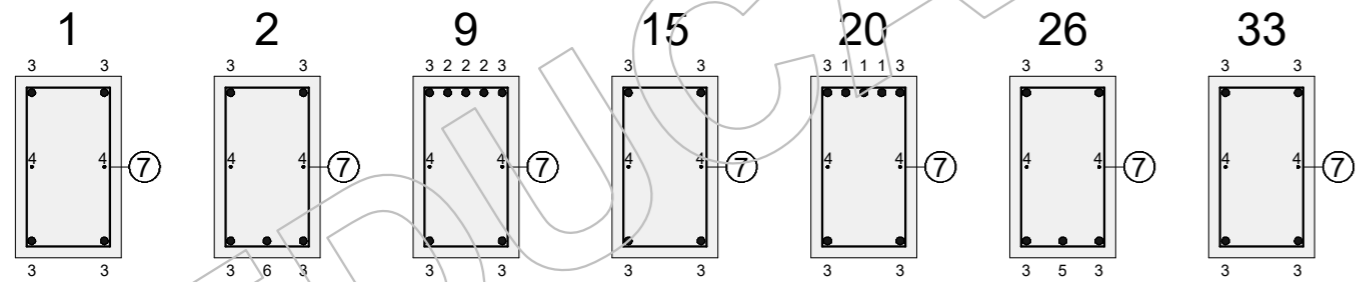
### 1.7.5.5 Kokonaistaipuma pitkäaikaisella kuormituksella

$$a = 9,6 \text{ mm} + 1,4 \text{ mm} = 11 \text{ mm}$$

Reinforcement



⑦  
167 Ø8 - 1280  
B500B





LIITE 2. FEM-LASKENTA, 280x480

Sections	2	5	8	12	17	23	26	29	32
$i_2$ [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\lambda_2$ [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2nd order effect in direction 2	not considered	not considered	not considered	not considered	not considered	not considered	not considered	not considered	not considered

$$n = N_{Ed} / (A_c f_{cd})$$

$$k_1 = \sqrt{f_{ck} / 20} \quad (5.23)$$

$$k_2 = \min\left(n \frac{\lambda}{170}, 0.20\right) \quad (5.24)$$

$$K_c = k_1 \cdot k_2 / (1 + \phi_{ef}) \quad (5.22)$$

$$K_s = 1.00 \quad (5.22)$$

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s \quad (5.21)$$

$$N_B = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2} \quad (5.17)$$

$$M_{0Ed} = M_{Ed}^I + s N_{Ed} \frac{l_0}{400} \quad (5.17)$$

$$M_{Ed}^{II} = \frac{M_{0Ed}}{1 - |N_{Ed}| / N_B} \quad (5.30)$$

$$e_{min,1} = \max(20 \text{ mm}, h_1 / 30) = \max(20 \text{ mm}, h_1 / 30) = 20 \text{ mm} \quad (6.1(4))$$

$$e_{min,2} = \max(20 \text{ mm}, h_2 / 30) = \max(20 \text{ mm}, h_2 / 30) = 20 \text{ mm} \quad (6.1(4))$$

$$|M_{Ed}^{II}| \leq |N_{Ed} e_{min}| \rightarrow M_{Ed} = s N_{Ed} e_{min}$$

$$|M_{Ed}^{II}| > |N_{Ed} e_{min}| \rightarrow M_{Ed} = M_{Ed}^{II}$$

Sections	2	5	8	12	17	23	26	29	32
$N_{Ed}$ [kN]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$n$ [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$k_1$ [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$k_{2,1}$ [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$K_{c,1}$ [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$(E_s I_s)_1$ [Nmm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$(EI)_1$ [Nmm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$N_{B,1}$ [kN]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$M_{Ed,1}^I$ [kNm]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$s_1$ [-]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$M_{0Ed,1}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$M_{Ed,1}^{II}$ [kNm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$M_{Ed,1}$ [kNm]	63.17	144.46	63.45	-179.86	45.56	-179.86	63.45	144.46	63.17



LIITE 2. FEM-LASKENTA, 280x480

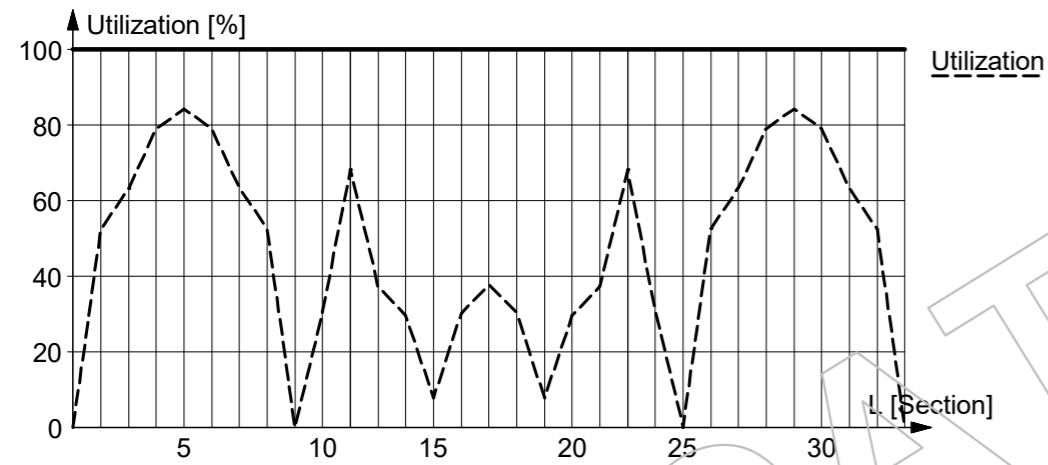
Sections	2	5	8	12	17	23	26	29	32
$(\epsilon_{\text{steel}}/\epsilon_{\text{steel,lim}})_{\text{max}} [-]$	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03
$\epsilon_{\text{c,max}} [-]$	-0.00049	-0.00103	-0.00049	-0.00109	-0.00035	-0.00109	-0.00049	-0.00103	-0.00049
$\epsilon_{\text{c,comp}} [-]$	0.00033	0.00039	0.00033	0.00015	0.00024	0.00015	0.00033	0.00039	0.00033
$\max(\epsilon_{\text{c,max}}/\epsilon_{\text{cu2}}, \epsilon_{\text{c,comp}}/\epsilon_{\text{c2}}) [-]$	0.14	0.29	0.14	0.31	0.10	0.31	0.14	0.29	0.14

Section utilization

Ultimate internal forces:  $N_{\text{ult}} = v N_{\text{Ed}}$ ;  $M_{\text{ult},1} = v M_{\text{Ed},1}$ ;  $M_{\text{ult},2} = v M_{\text{Ed},2}$

Utilization:  $1 / v$

Sections	2	5	8	12	17	23	26	29	32
$N_{\text{Ed}}$ [kN]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$M_{\text{Ed},1}$ [kNm]	63.17	144.46	63.45	-179.86	45.56	-179.86	63.45	144.46	63.17
$M_{\text{Ed},2}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Utilization [%]	52	84	53	68	38	68	53	84	52



LIITE 2. FEM-LASKENTA, 280x480

Stirrup utilization for shear and torsion (Part 1.1: 6.2, 6.3)

$$C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c}$$

$$k_1 = 0.15$$

$$\sigma_{cp} = \min\left(\frac{N_{Ed}}{A_c}, 0.2 f_{cd}\right)$$

$$k = \min\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, 2.0\right)$$

$$\rho_1 = \min\left(\frac{A_{sl}}{b_w d}, 0.02\right)$$

$$v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (6.3.N)$$

$$V_{Rd,c} = \max\left([C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d, (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d\right) \quad (6.2.a, 6.2.b)$$

$$V_{Rd,s} = \max\left(\frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot(\Theta), V_{Rd,c}\right) \quad (6.8)$$

$$T_{Rd,c} = 2 f_{ctd} t_{ef} A_k \quad (6.26)$$

$$T_{Rd,s} = \max\left(2 \frac{A_{sw,min}}{s} f_{ywd} A_k, T_{Rd,c}\right) \quad (6.8, 6.26, 6.27)$$

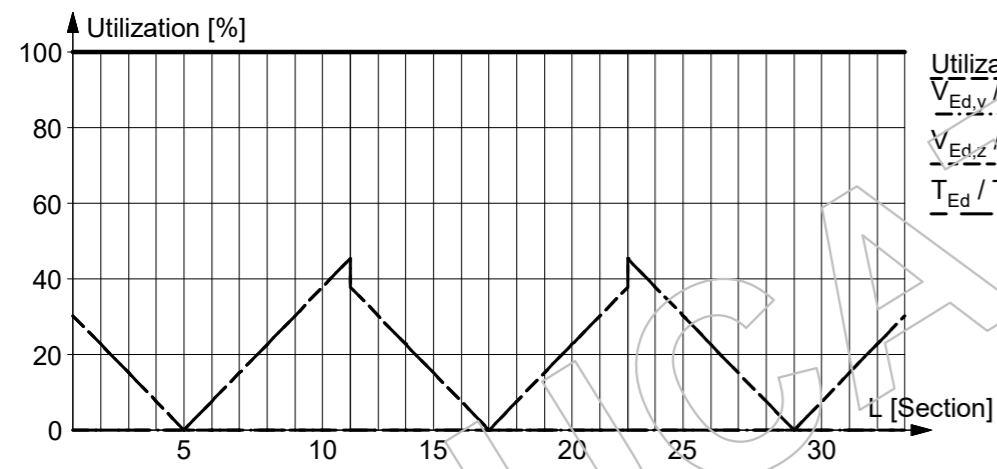
$$\text{Utilization: } \max\left(\frac{V_{Ed,y} + (T_{Ed}/A_k) d_y}{V_{Rd,s,y}}, \frac{V_{Ed,z} + (T_{Ed}/A_k) d_z}{V_{Rd,s,z}}\right)$$

If the stirrups are not correct by the detailing rules, the utilization is 1000%. (9.2.2 or 9.5.3)

Sections	23
$N_{Ed}$ [kN]	0.00
$V_{Ed,y}$ [kN]	0.00
$V_{Ed,z}$ [kN]	216.31
$T_{Ed}$ [kNm]	0.00
$\sigma_{cp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.00
$A_{sl}$ [mm <sup>2</sup> ]	1627
$d_y$ [mm]	236
$k_y$ [-]	1.92
$b_{w,y}$ [mm]	480
$\rho_{1,y}$ [-]	0.01437
$v_{min,y}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.59
$V_{Rd,c,y}$ [kN]	100.75
$(A_{sw,y}/s) f_{ywd}$ [N/mm]	485.66
$z_y$ [mm]	212
$V_{Rd,s,y}$ [kN]	257.88
$V_{Ed,y}/V_{Rd,s,y}$ [-]	0.00
$d_z$ [mm]	436

LIITE 2. FEM-LASKENTA, 280x480

Sections	23
$k_z$ [-]	1.68
$b_{w,z}$ [mm]	280
$\rho_{1,z}$ [-]	0.01333
$v_{\min,z}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.48
$V_{Rd,c,z}$ [kN]	92.48
$(A_{sw,z}/s) f_{ywd}$ [N/mm]	485.66
$z_z$ [mm]	392
$V_{Rd,s,z}$ [kN]	476.43
$V_{Ed,z}/V_{Rd,s,z}$ [-]	0.45
$A_k$ [mm <sup>2</sup> ]	75018
$t_{ef}$ [mm]	88
$T_{Rd,c}$ [kNm]	22.11
$(A_{sw,\min}/s) f_{ywd}$ [N/mm]	242.83
$T_{Rd,s}$ [kNm]	36.43
$T_{Ed}/T_{Rd,s}$ [-]	0.00
Utilization [%]	45



LIITE 2. FEM-LASKENTA, 280x480

Concrete utilization for shear and torsion (Part 1.1: 6.2, 6.3)

$$\sigma_{cp} = \min\left(\frac{N_{Ed}}{A_c}, 0.2 f_{cd}\right)$$

$\alpha_{cw} = 1.0$  for non-prestressed structural elements.

$$\sigma_{cp} \leq 0.25 f_{cd} \rightarrow \alpha_{cw} = 1.0 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \quad (6.11.aN)$$

$$0.25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} < 0.50 f_{cd} \rightarrow \alpha_{cw} = 0.25 \quad (6.11.bN)$$

$$0.50 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \rightarrow \alpha_{cw} = 2.5 \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \quad (6.11.cN)$$

$$v_1 = 0.60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (6.6.N)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w (0.9 d) v_1 f_{cd}}{\cot(\Theta) + \tan(\Theta)} \quad (6.9)$$

$$v = 0.60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (6.6.N)$$

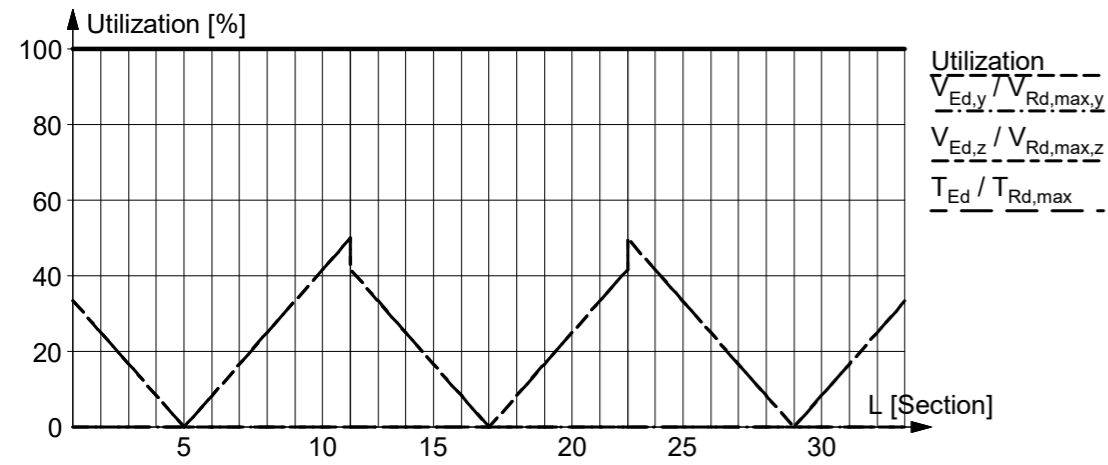
$$T_{Rd,max} = 2 v \alpha_{cw} f_{cd} A_k t_{ef} \sin(\Theta) \cos(\Theta) \quad (6.30)$$

$$\text{Utilization: } \frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \max\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Rd,max,y}}, \frac{V_{Ed,z}}{V_{Rd,max,z}}\right) \quad (6.29)$$

Sections	1	11	23	33
$N_{Ed}$ [kN]	0.00	0.00	0.00	0.00
$V_{Ed,y}$ [kN]	0.00	0.00	0.00	0.00
$V_{Ed,z}$ [kN]	144.37	216.31	216.31	144.37
$T_{Ed}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00	0.00
$\sigma_{cp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.00	0.00	0.00	0.00
$\alpha_{cw}$ [-]	1.00	1.00	1.00	1.00
$v_1$ [-]	0.50	0.50	0.50	0.50
$d_y$ [mm]	236	236	236	236
$b_{w,y}$ [mm]	480	480	480	480
$V_{Rd,max,y}$ [kN]	401.62	401.62	401.62	401.62
$V_{Ed,y} / V_{Rd,max,y}$ [-]	0.00	0.00	0.00	0.00
$d_z$ [mm]	436	436	436	436
$b_{w,z}$ [mm]	280	280	280	280
$V_{Rd,max,z}$ [kN]	432.82	432.82	432.82	432.82
$V_{Ed,z} / V_{Rd,max,z}$ [-]	0.33	0.50	0.50	0.33
$v$ [-]	0.50	0.50	0.50	0.50
$A_k$ [mm <sup>2</sup> ]	75018	75018	75018	75018
$t_{ef}$ [mm]	88	88	88	88
$T_{Rd,max}$ [kNm]	52.26	52.26	52.26	52.26

LIITE 2. FEM-LASKENTA, 280x480

Sections	1	11	23	33
$T_{Ed} / T_{Rd,max} [-]$	0.00	0.00	0.00	0.00
Utilization [%]	33	50	50	33

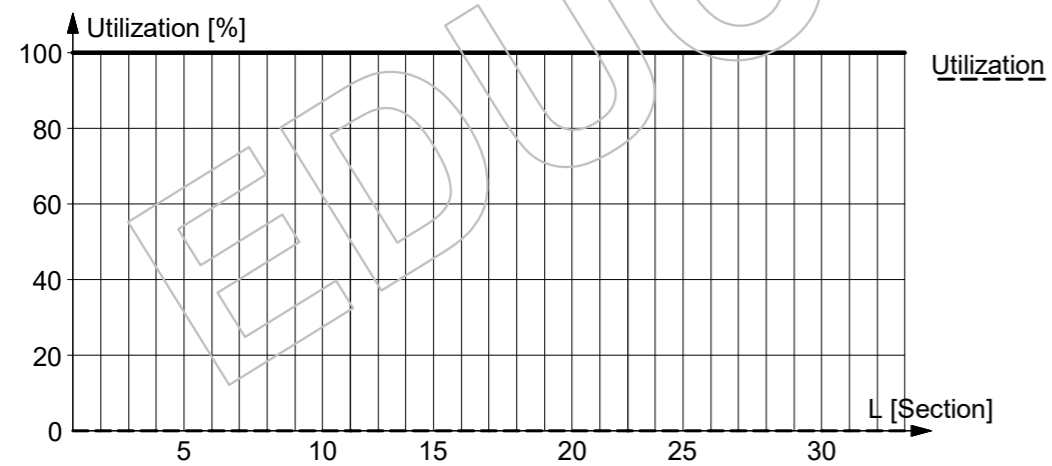


Torsional reinforcement utilization (Part 1.1: 6.3)

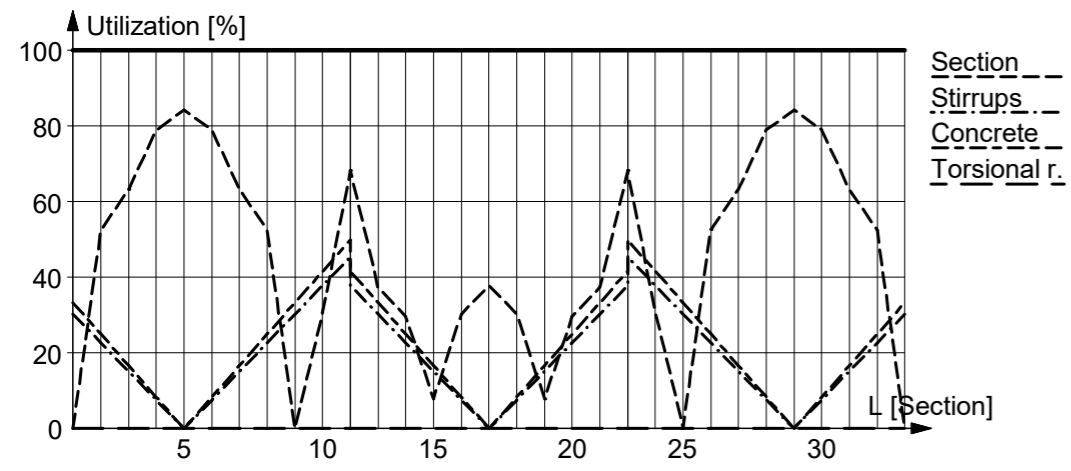
$$T_{Rd,sl} = 2 A_k \frac{\Sigma (A_{sl} f_{yd})}{u_k} \tan(\Theta) \quad (6.28)$$

Utilization:  $\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,sl}}$

Sections	2	7	9	13	20	24	26	31	33
$T_{Ed}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$A_k$ [mm <sup>2</sup> ]	75018	75018	75018	75018	75018	75018	75018	75018	75018
$u_k$ [mm]	1166	1166	1166	1166	1166	1166	1166	1166	1166
$\Sigma(A_{sl} f_{yd})$ [N]	570950	707541	570950	980723	570950	980723	570950	707541	570950
$T_{Rd,sl}$ [kNm]	29.38	36.41	29.38	50.46	29.38	50.46	29.38	36.41	29.38
Utilization [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0

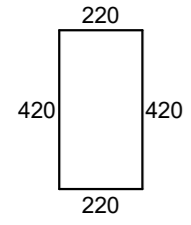
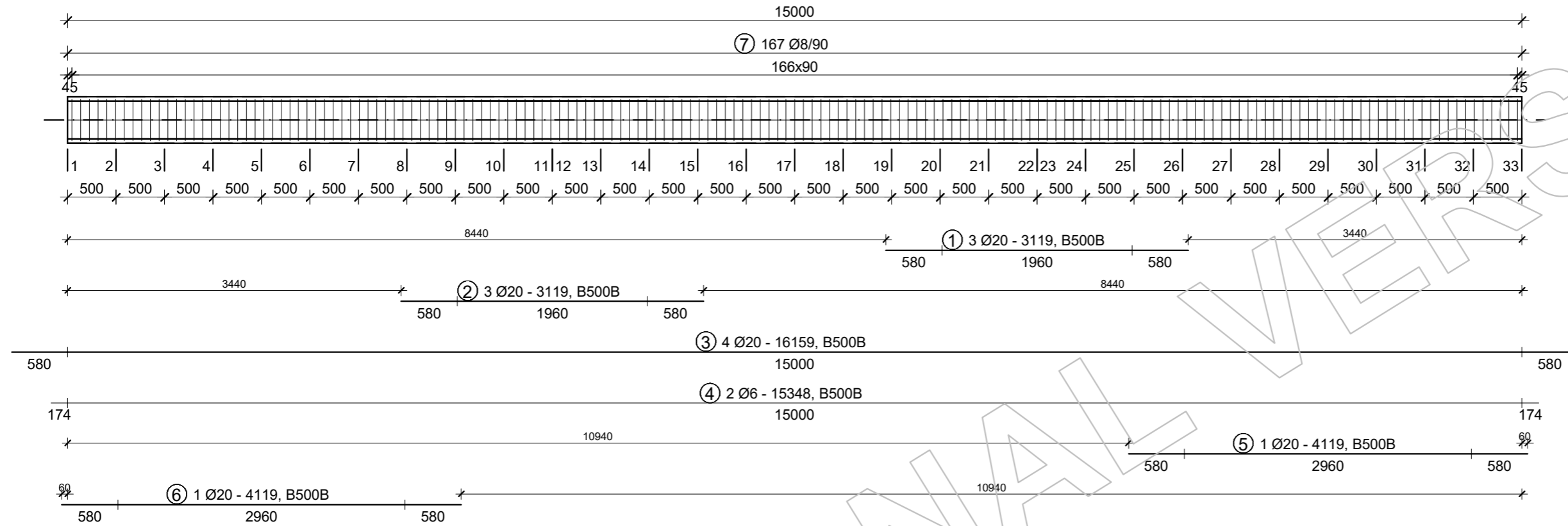


Summary

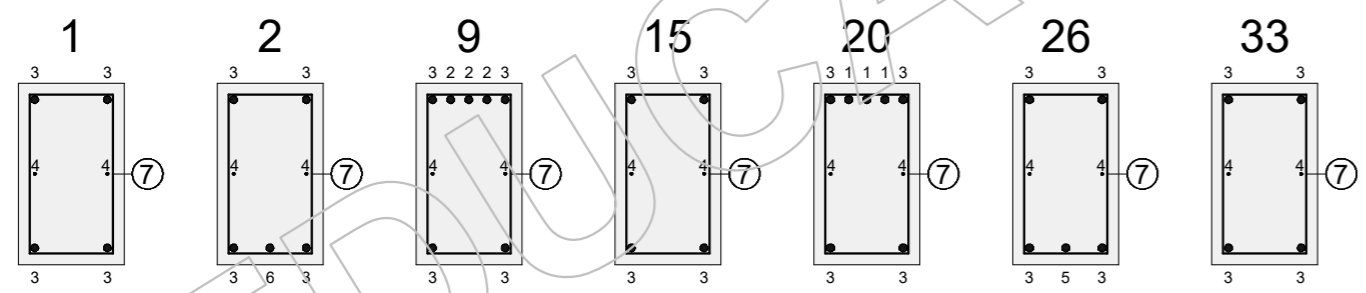


EDUCATIONAL VERSION

Reinforcement

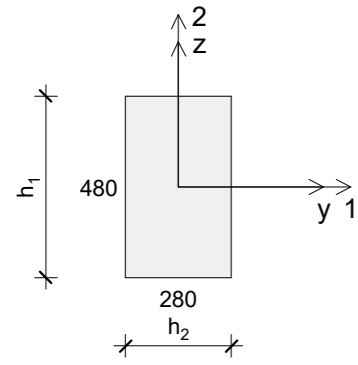


7) 167 Ø8 - 1280  
B500B



## LIITE 2. FEM-LASKENTA, 280x480

### Cross-section



$$\begin{aligned}h_1 &= 480 \text{ mm} \\h_2 &= 280 \text{ mm} \\A_c &= 134400 \text{ mm}^2 \\I_{cy} &= 2580480000 \text{ mm}^4 \\I_{cz} &= 878080000 \text{ mm}^4 \\I_{c1} &= 2580480000 \text{ mm}^4 \\I_{c2} &= 878080000 \text{ mm}^4\end{aligned}$$

### Materials

#### C40/50

$$\begin{aligned}f_{ctm} &= 3.50 \text{ N/mm}^2 \\f_{ctk,0.05} &= 2.50 \text{ N/mm}^2 \\E_{cm} &= 35000.00 \text{ N/mm}^2 \\\alpha_{cc} &= 0.85 \\\alpha_{ct} &= 1.00 \\Y_{CE} &= 1.20 \\\varphi_{ef} &= 0.00 \\E_{cd} = E_{cm} / Y_{CE} &= 29166.67 \text{ N/mm}^2 \\\cot(\Theta) &= 2.50 \text{ (Eq. 6.8)}\end{aligned}$$

#### B500B

$$E_s = 200000.00 \text{ N/mm}^2$$

#### Section utilization for axial effects (Part 1.1: 5.8, 6.1)

Not relevant

#### Stirrup utilization for shear and torsion (Part 1.1: 6.2, 6.3)

Not relevant

#### Concrete utilization for shear and torsion (Part 1.1: 6.2, 6.3)

Not relevant

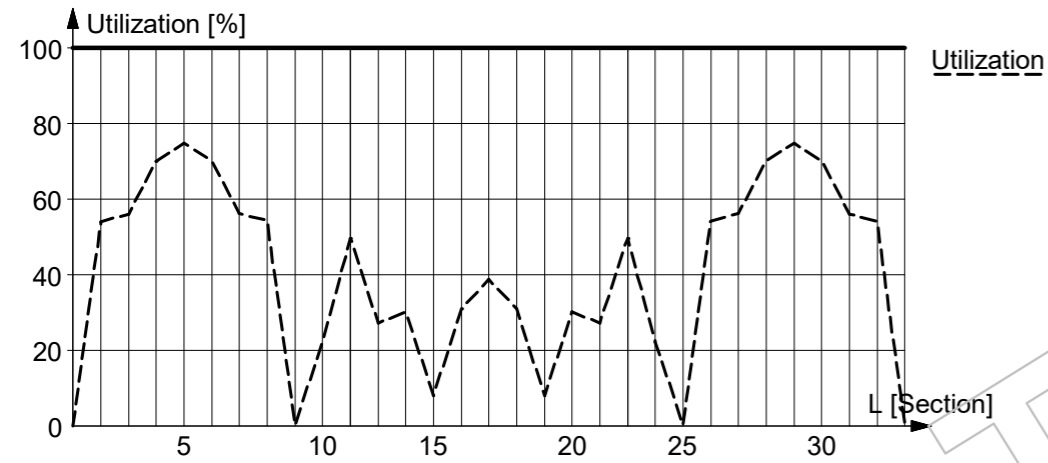
#### Torsional reinforcement utilization (Part 1.1: 6.3)

Not relevant

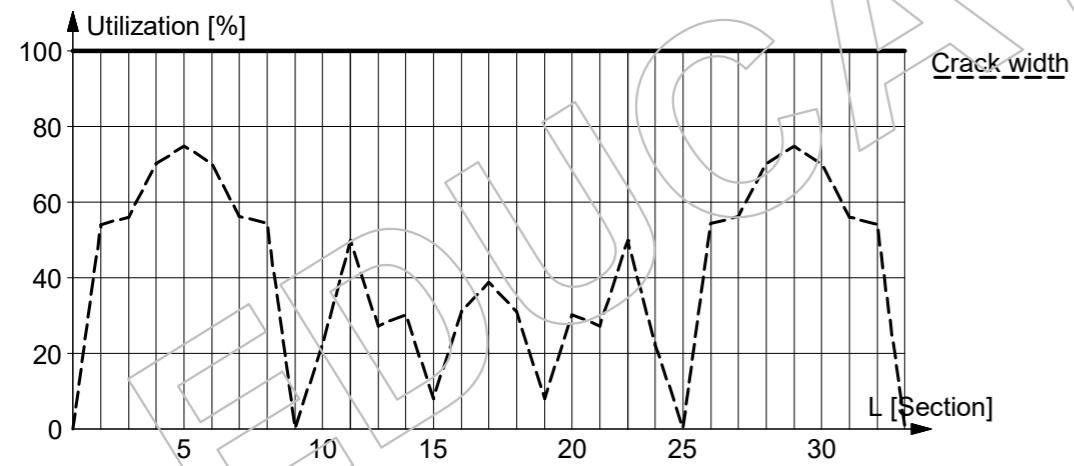


LIITE 2. FEM-LASKENTA, 280x480

Sections	2	5	8	12	17	23	26	29	32
$\epsilon_1$ [-]	0.00110	0.00173	0.00110	0.00134	0.00079	0.00134	0.00110	0.00173	0.00110
$\epsilon_2$ [-]	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
$k_2$ [-]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
$h_{c,ef}$ [mm]	110	110	110	110	110	110	110	110	110
$A_{c,eff}$ [mm <sup>2</sup> ]	30800	30800	30800	30800	30800	30800	30800	30800	30800
$\rho_{p,eff}$ [-]	0.02	0.03	0.02	0.05	0.02	0.05	0.02	0.03	0.02
$x$ [mm]	96	114	96	140	96	140	96	114	96
$s_{r,max}$ [mm]	282	227	282	182	282	182	282	227	282
$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ [-]	0.000590	0.001250	0.000595	0.000990	0.000421	0.000990	0.000595	0.001250	0.000590
$w_k$ [mm]	0.17	0.28	0.17	0.18	0.12	0.18	0.17	0.28	0.17
Utilization [%]	54	75	54	50	39	50	54	75	54

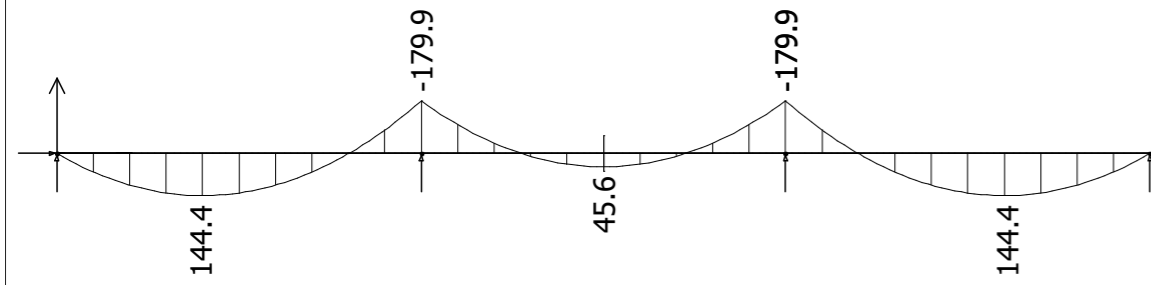


Summary

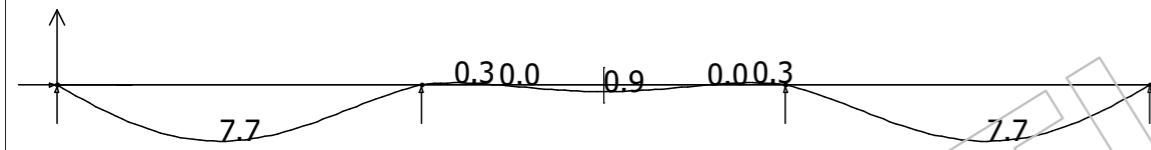


LIITE 2. FEM-LASKENTA, 280x480

Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - Load combinations - MRT - Bars, My' - Graph - [kNm]

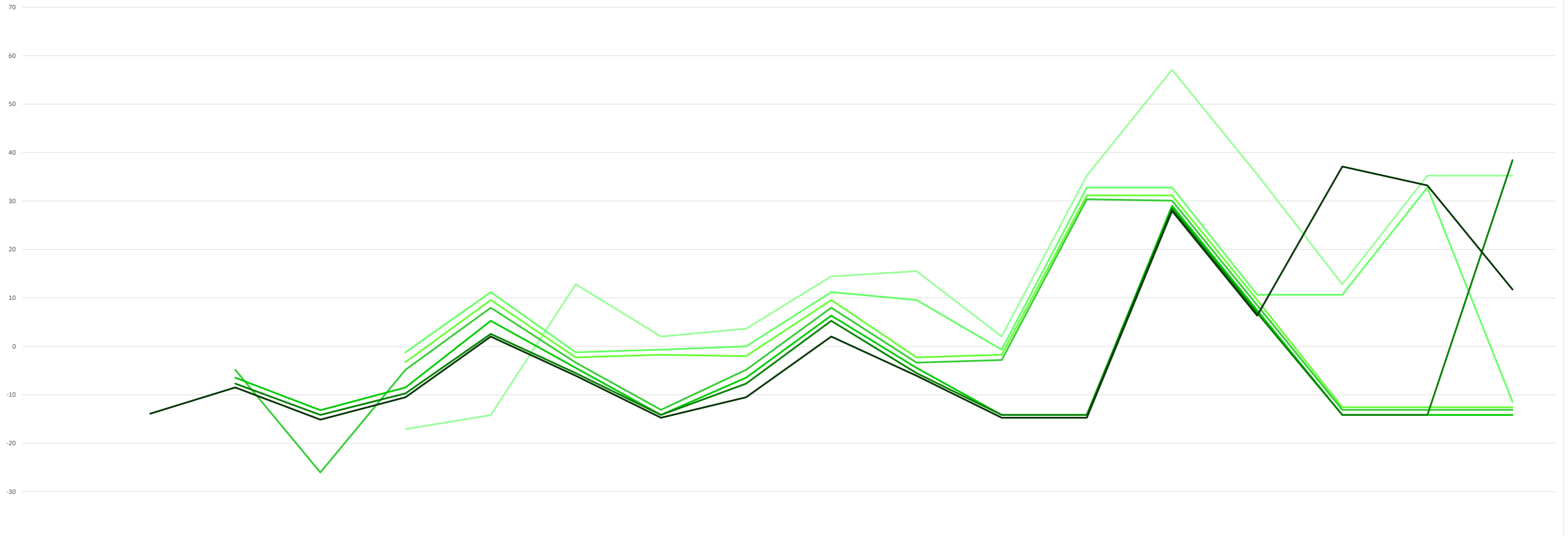


Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - Load combinations - KRt - Translational displacements - Graph - [mm]



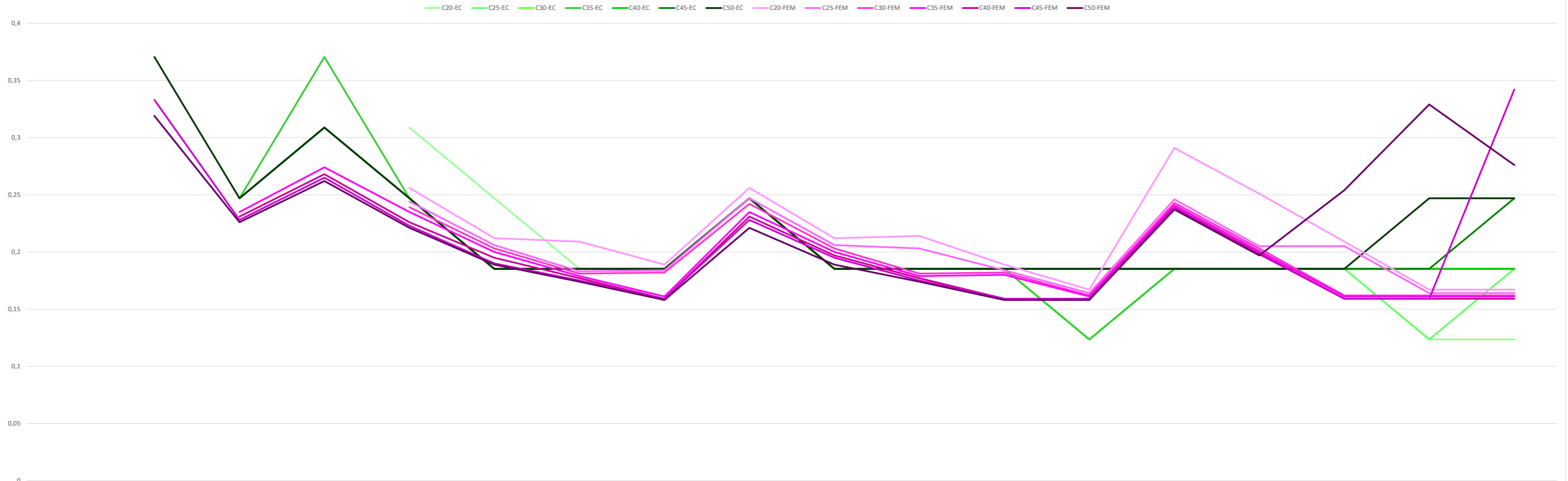
LIITE 3. PÄÄTERÄSMÄÄRÄT, %-EROT

C20 C25 C30 C35 C40 C45 C50



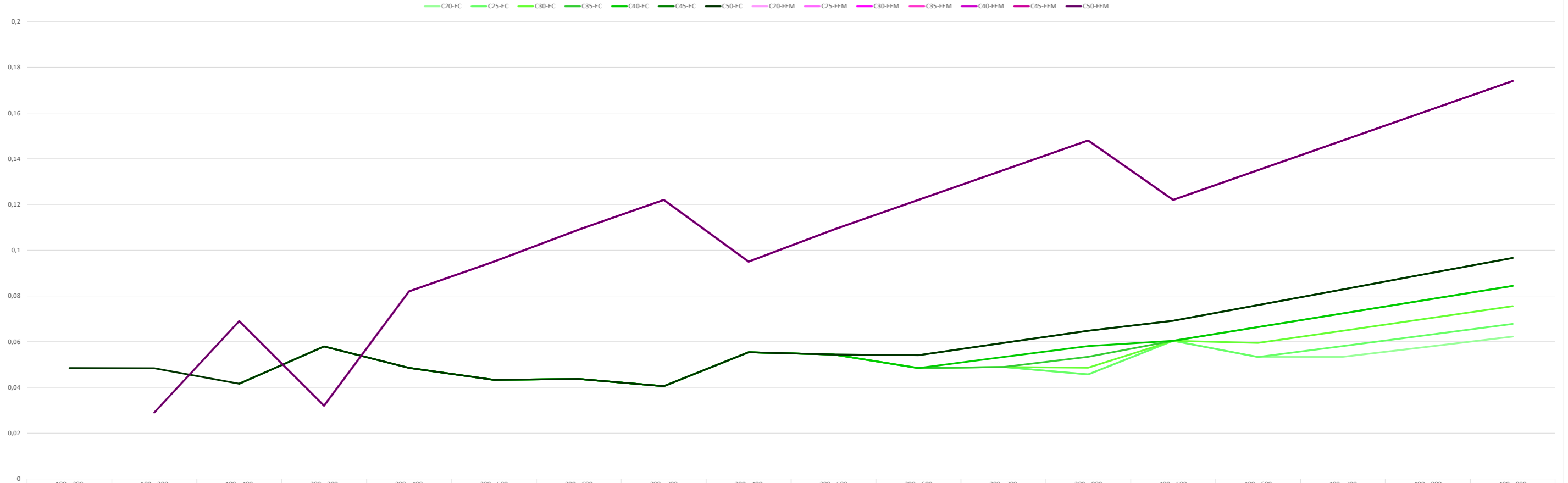
	180 x 280	180 x 380	180 x 480	280 x 380	280 x 480	280 x 580	280 x 680	280 x 780	380 x 480	380 x 580	380 x 680	380 x 780	380 x 880	480 x 580	480 x 680	480 x 780	480 x 880	480 x 980
C20					-17,08502024	-14,17004049	12,82051282	2,024291498	3,643724696	14,43994602	15,51956815	2,024291498	35,22267206	57,08502024	35,4925776	12,82051282	35,22267206	35,22267206
C25					-1,214574899	11,20107962	-1,214574899	-0,674763833	-1,12371E-14	11,20107962	9,581646424	-0,674763833	32,79352227	32,79352227	10,66126856	10,66126856	32,79352227	-11,47098516
C30					-3,238866397	9,581646424	-2,294197031	-1,754385965	-2,024291498	9,581646424	-2,294197031	-1,754385965	31,17408907	31,17408907	9,581646424	-12,55060729	-12,55060729	-12,55060729
C35			-4,858299595	-26,04588394	-4,858299595	7,962213225	-3,373819163	-13,09041835	-4,858299595	7,962213225	-3,373819163	-2,834008097	30,36437247	30,09446694	8,502024291	-13,09041835	-13,09041835	-13,09041835
C40			-6,477732794	-13,19838057	-8,502024291	5,263157895	-4,453441296	-14,17004049	-6,477732794	6,342780027	-4,453441296	-14,17004049	-14,17004049	29,0148448	7,422402159	-14,17004049	-14,17004049	-14,17004049
C45			-7,692307692	-14,17004049	-9,71659919	2,564102564	-5,533063428	-14,17004049	-7,692307692	5,263157895	-5,533063428	-14,17004049	-14,17004049	28,47503374	6,882591093	-14,17004049	-14,17004049	38,46153846
C50		-13,90013495	-8,502024291	-15,1417004	-10,52631579	2,024291498	-6,072874494	-14,70985155	-10,52631579	2,024291498	-6,072874494	-14,70985155	-14,70985155	27,93522267	6,342780027	37,1120108	33,19838057	11,74089069

LIITE 4. RAUDOITUSTONNIT, PÄÄTERÄKSET



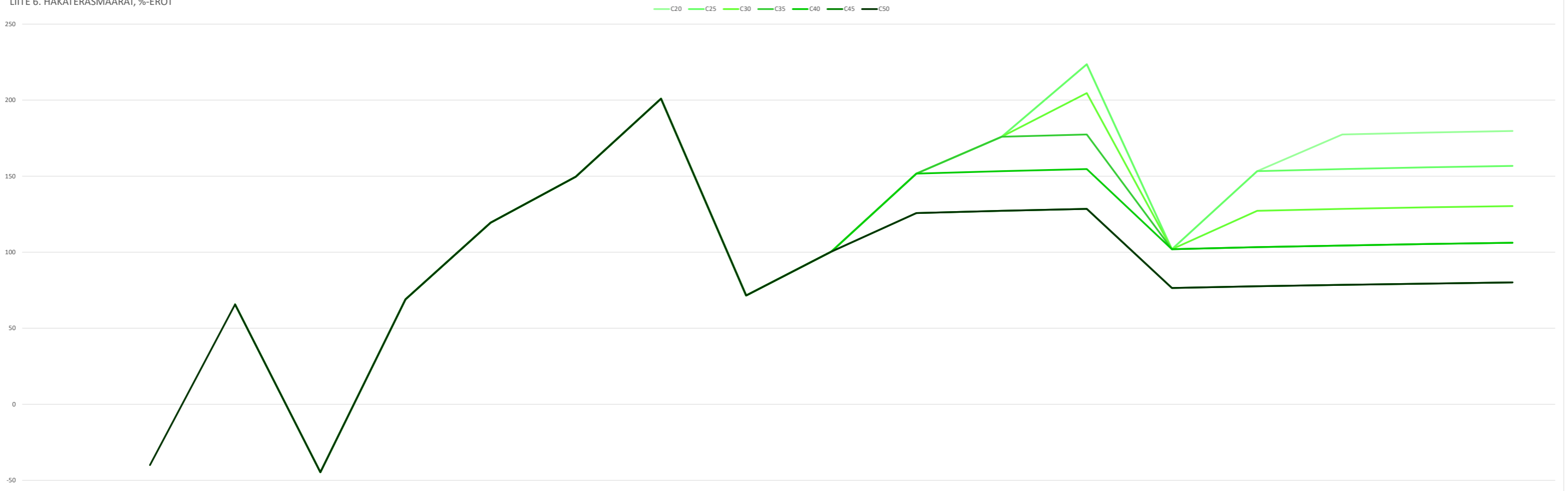
	180 x 280	180 x 380	180 x 480	280 x 380	280 x 480	280 x 580	280 x 680	280 x 780	380 x 480	380 x 580	380 x 680	380 x 780	380 x 880	480 x 580	480 x 680	480 x 780	480 x 880	480 x 980
C20-EC					0,30875	0,247	0,18525	0,18525	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,1235	0,18525	0,18525	0,18525	0,1235	0,1235
C25-EC					0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,1235	0,18525	0,18525	0,18525	0,1235	0,18525
C30-EC					0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,1235	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525
C35-EC			0,247	0,3705	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,1235	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525
C40-EC			0,247	0,30875	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525
C45-EC			0,247	0,30875	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,247
C50-EC		0,3705	0,247	0,30875	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,247	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,18525	0,247	0,247
C20-FEM					0,256	0,212	0,209	0,189	0,256	0,212	0,214	0,189	0,167	0,291	0,251	0,209	0,167	0,167
C25-FEM					0,244	0,206	0,183	0,184	0,247	0,206	0,203	0,184	0,164	0,246	0,205	0,205	0,164	0,164
C30-FEM					0,239	0,203	0,181	0,182	0,242	0,203	0,181	0,182	0,162	0,243	0,203	0,162	0,162	0,162
C35-FEM			0,273		0,235	0,2	0,179	0,161	0,235	0,2	0,179	0,18	0,161	0,241	0,201	0,161	0,161	0,161
C40-FEM			0,235	0,274	0,235	0,2	0,179	0,161	0,235	0,2	0,179	0,18	0,161	0,241	0,201	0,161	0,161	0,161
C45-FEM			0,231	0,268	0,226	0,195	0,177	0,159	0,231	0,197	0,177	0,159	0,159	0,239	0,199	0,159	0,159	0,159
C50-FEM		0,333	0,228	0,265	0,223	0,19	0,175	0,159	0,228	0,195	0,175	0,159	0,159	0,238	0,198	0,159	0,159	0,342
		0,319	0,226	0,262	0,221	0,189	0,174	0,158	0,221	0,189	0,174	0,158	0,158	0,237	0,197	0,254	0,329	0,276

LIITE 5. RAUDOITUSTONNIT, HAAT



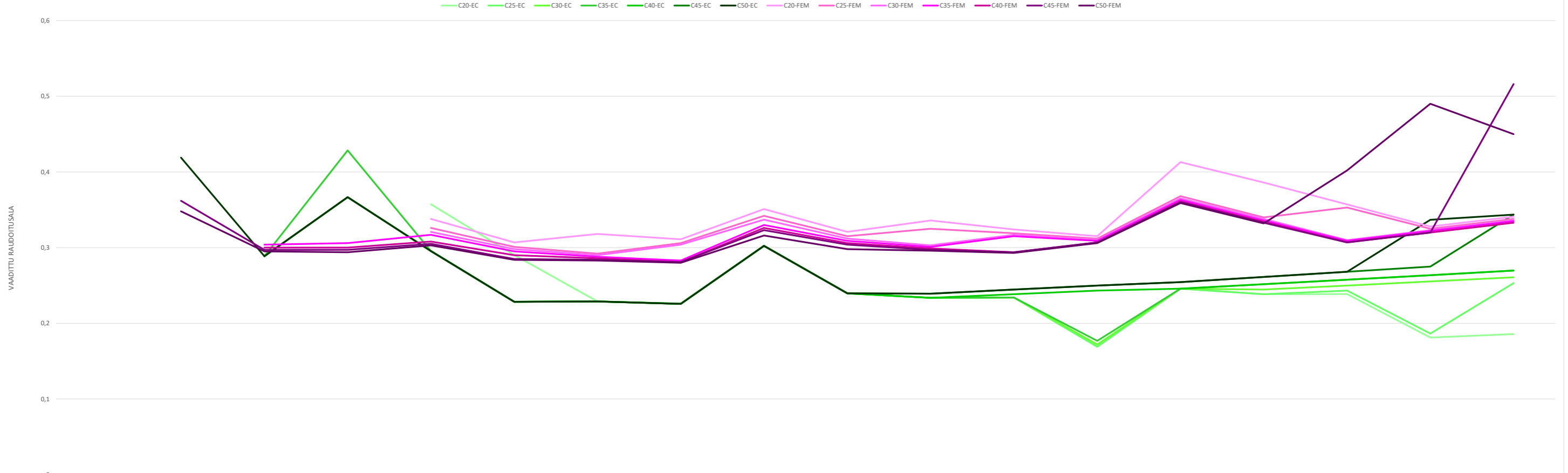
	180 x 280	180 x 380	180 x 480	280 x 380	280 x 480	280 x 580	280 x 680	280 x 780	380 x 480	380 x 580	380 x 680	380 x 780	380 x 880	480 x 580	480 x 680	480 x 780	480 x 880	480 x 980
C20-EC					0,04852338	0,04329832	0,04366014	0,04053174	0,05539638	0,05439624	0,04847914	0,04892944	0,04573152	0,06040024	0,05329814	0,05335344	0,05777744	0,06220144
C25-EC					0,04852338	0,04329832	0,04366014	0,04053174	0,05539638	0,05439624	0,04847914	0,04892944	0,04573152	0,06040024	0,05329814	0,05811714	0,06293614	0,06775514
C30-EC					0,04852338	0,04329832	0,04366014	0,04053174	0,05539638	0,05439624	0,04847914	0,04892944	0,04858974	0,06040024	0,05941432	0,06478632	0,07015832	0,07553032
C35-EC			0,04165038	0,05792754	0,04852338	0,04329832	0,04366014	0,04053174	0,05539638	0,05439624	0,04847914	0,04892944	0,05335344	0,06040024	0,06640424	0,07240824	0,07841224	0,08441624
C40-EC			0,04165038	0,05792754	0,04852338	0,04329832	0,04366014	0,04053174	0,05539638	0,05439624	0,04847914	0,05329814	0,05811714	0,06040024	0,06640424	0,07240824	0,07841224	0,08441624
C45-EC			0,04165038	0,05792754	0,04852338	0,04329832	0,04366014	0,04053174	0,05539638	0,05439624	0,05404232	0,05941432	0,06478632	0,06914238	0,07601538	0,08288838	0,08976138	0,09663438
C50-EC	0,048	0,048	0,042	0,058	0,049	0,043	0,044	0,041	0,055	0,054	0,054	0,059	0,065	0,069	0,076	0,083	0,090	0,097
C20-FEM					0,082	0,095	0,109	0,122	0,095	0,109	0,122	0,135	0,148	0,122	0,135	0,148	0,161	0,174
C25-FEM					0,082	0,095	0,109	0,122	0,095	0,109	0,122	0,135	0,148	0,122	0,135	0,148	0,161	0,174
C30-FEM			0,069		0,082	0,095	0,109	0,122	0,095	0,109	0,122	0,135	0,148	0,122	0,135	0,148	0,161	0,174
C35-FEM			0,069	0,032	0,082	0,095	0,109	0,122	0,095	0,109	0,122	0,135	0,148	0,122	0,135	0,148	0,161	0,174
C40-FEM			0,069	0,032	0,082	0,095	0,109	0,122	0,095	0,109	0,122	0,135	0,148	0,122	0,135	0,148	0,161	0,174
C45-FEM		0,029	0,069	0,032	0,082	0,095	0,109	0,122	0,095	0,109	0,122	0,135	0,148	0,122	0,135	0,148	0,161	0,174
C50-FEM		0,029	0,069	0,032	0,082	0,095	0,109	0,122	0,095	0,109	0,122	0,135	0,148	0,122	0,135	0,148	0,161	0,174

LIITE 6. HAKATERÄSMÄÄRÄT, %-EROT



	180 x 280	180 x 380	180 x 480	280 x 380	280 x 480	280 x 580	280 x 680	280 x 780	380 x 480	380 x 580	380 x 680	380 x 780	380 x 880	480 x 580	480 x 680	480 x 780	480 x 880	480 x 980
C20					68,99070098	119,4080509	149,6556356	200,9986741	71,49135016	100,381497	151,6546292	175,9075109	223,6279922	101,9859524	153,2921412	177,3954219	178,6554752	179,7362891
C25					68,99070098	119,4080509	149,6556356	200,9986741	71,49135016	100,381497	151,6546292	175,9075109	223,6279922	101,9859524	153,2921412	177,3954219	178,6554752	179,7362891
C30					68,99070098	119,4080509	149,6556356	200,9986741	71,49135016	100,381497	151,6546292	175,9075109	204,5910515	101,9859524	127,2179502	128,4432886	129,4809796	130,3710616
C35			65,66475504	-44,75857252	68,99070098	119,4080509	149,6556356	200,9986741	71,49135016	100,381497	151,6546292	175,9075109	177,3954219	101,9859524	103,3002712	104,3966267	105,325087	106,1214762
C40			65,66475504	-44,75857252	68,99070098	119,4080509	149,6556356	200,9986741	71,49135016	100,381497	151,6546292	153,2921412	154,6580923	101,9859524	103,3002712	104,3966267	105,325087	106,1214762
C45			65,66475504	-44,75857252	68,99070098	119,4080509	149,6556356	200,9986741	71,49135016	100,381497	125,7490056	127,2179502	128,4432886	76,44749863	77,5956392	78,55337503	79,36444382	80,06014009
C50		-40,04367302	65,66475504	-44,75857252	68,99070098	119,4080509	149,6556356	200,9986741	71,49135016	100,381497	125,7490056	127,2179502	128,4432886	76,44749863	77,5956392	78,55337503	79,36444382	80,06014009

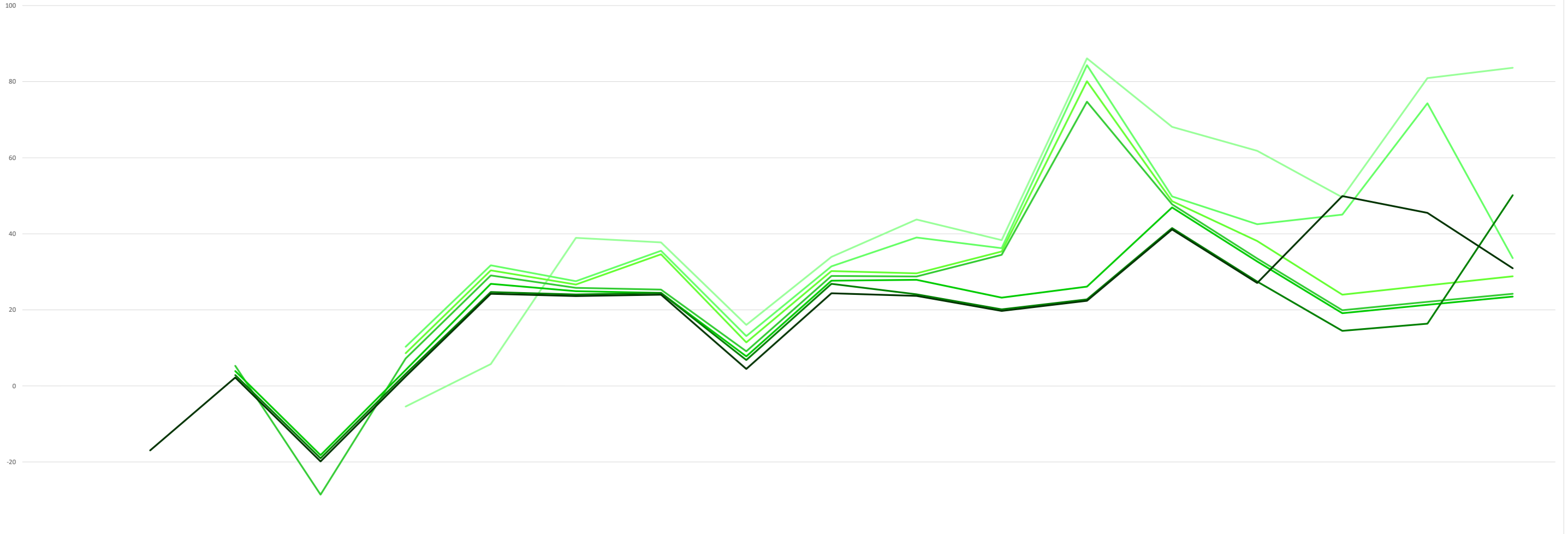
LIITE 7. RAUDOITUSTONNIT



	180 x 280	180 x 380	180 x 480	280 x 380	280 x 480	280 x 580	280 x 680	280 x 780	380 x 480	380 x 580	380 x 680	380 x 780	380 x 880	480 x 580	480 x 680	480 x 780	480 x 880	480 x 980
C20-EC					0,35727338	0,29029832	0,22891014	0,22578174	0,30239638	0,23964624	0,23372914	0,23417944	0,16923152	0,24565024	0,23854814	0,24336714	0,18127744	0,18570144
C25-EC					0,29552338	0,22854832	0,22891014	0,22578174	0,30239638	0,23964624	0,23372914	0,23417944	0,16923152	0,24565024	0,23854814	0,24336714	0,18643614	0,25300514
C30-EC					0,29552338	0,22854832	0,22891014	0,22578174	0,30239638	0,23964624	0,23372914	0,23417944	0,17208974	0,24565024	0,24466432	0,25003632	0,25540832	0,26078032
C35-EC			0,28865038	0,42842754	0,29552338	0,22854832	0,22891014	0,22578174	0,30239638	0,23964624	0,23372914	0,23417944	0,17685344	0,24565024	0,25165424	0,25765824	0,26366224	0,26966624
C40-EC			0,28865038	0,36667754	0,29552338	0,22854832	0,22891014	0,22578174	0,30239638	0,23964624	0,23372914	0,23854814	0,24336714	0,24565024	0,25165424	0,25765824	0,26366224	0,26966624
C45-EC			0,28865038	0,36667754	0,29552338	0,22854832	0,22891014	0,22578174	0,30239638	0,23964624	0,23929232	0,24466432	0,25003632	0,25439238	0,26126538	0,26813838	0,27501138	0,34363438
C50-EC		0,41886854	0,28865038	0,36667754	0,29552338	0,22854832	0,22891014	0,22578174	0,30239638	0,23964624	0,23929232	0,24466432	0,25003632	0,25439238	0,26126538	0,26813838	0,33676138	0,34363438
C20-FEM					0,338	0,307	0,318	0,311	0,351	0,321	0,336	0,324	0,315	0,413	0,386	0,357	0,328	0,341
C25-FEM					0,326	0,301	0,292	0,306	0,342	0,312	0,325	0,319	0,312	0,368	0,34	0,353	0,325	0,338
C30-FEM			0,342		0,321	0,298	0,29	0,304	0,337	0,312	0,303	0,317	0,31	0,365	0,338	0,31	0,323	0,336
C35-FEM			0,304	0,306	0,317	0,295	0,288	0,283	0,33	0,309	0,301	0,315	0,309	0,363	0,336	0,309	0,322	0,335
C40-FEM			0,3	0,3	0,308	0,29	0,286	0,281	0,326	0,306	0,299	0,294	0,307	0,361	0,334	0,307	0,32	0,333
C45-FEM		0,362	0,297	0,297	0,305	0,285	0,284	0,281	0,323	0,304	0,297	0,294	0,307	0,36	0,333	0,307	0,32	0,516
C50-FEM		0,348	0,295	0,294	0,303	0,284	0,283	0,28	0,316	0,298	0,296	0,293	0,306	0,359	0,332	0,402	0,49	0,45

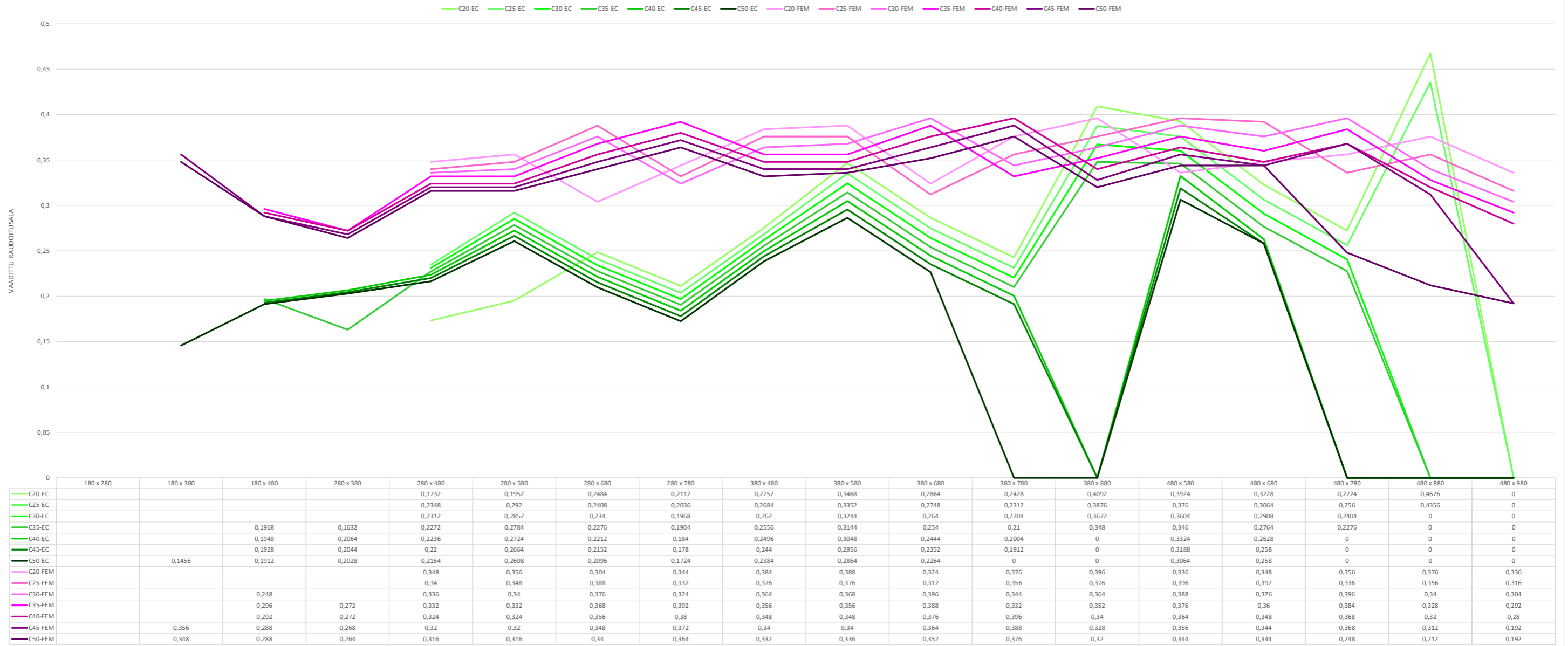
LIITE 8. RAUDOITUSTONNIT, %-EROT

C20 C25 C30 C35 C40 C45 C50



	180 x 280	180 x 380	180 x 480	280 x 380	280 x 480	280 x 580	280 x 680	280 x 780	380 x 480	380 x 580	380 x 680	380 x 780	380 x 880	480 x 580	480 x 680	480 x 780	480 x 880	480 x 980
C20					-5,394574877	5,753281659	38,91914093	37,7436457	16,07281807	33,94743852	43,7561444	38,35544231	86,13553787	68,12521738	61,81220277	49,62064252	80,93812446	83,62808603
C25					10,31276104	31,70081495	27,56097218	35,52911763	13,09659196	31,44374808	39,04984205	36,22032745	84,36281846	49,8064891	42,52888327	45,04834137	74,32242483	33,59412382
C30					8,620847528	30,38818225	26,68726689	34,64330641	11,44313302	30,19190286	29,63723736	35,36628151	80,13857189	48,58524054	38,14846399	23,9819879	26,4641653	28,84407842
C35			5,317720351	-28,57602011	7,267316718	29,07554954	25,8135616	25,34228853	9,128290491	28,94005764	28,78154602	34,51223557	74,72094408	47,77107484	33,51652648	19,92630238	22,12594416	24,22763784
C40			3,931960873	-18,18424439	4,221872395	26,88782836	24,93985631	24,4564773	7,805523333	27,68821243	27,92585469	23,24556377	26,14685779	46,95690914	32,72178526	19,15008035	21,36739793	23,4859803
C45			2,892641264	-19,00240195	3,206724287	24,70010718	24,06615102	24,4564773	6,813447965	26,85364895	24,11597664	20,16464027	22,78216221	41,5136727	27,45661136	14,49312105	16,35882122	50,15959695
C50		-16,919041	2,199761525	-19,8205595	2,529958882	24,26256295	23,62929838	24,01357169	4,49860544	24,34995851	23,69807773	19,755917	22,38222031	41,12057916	27,07385877	49,92258848	45,5036204	30,95313688

LIITE 9. HALKEAMALEVEYDET





LIITE 11. FEM-KÄYTTÖASTEET

Bar, Utilization, Load comb.: MRT

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C12.1.1	430	233	47	430	0	-
C12.2.1	300	112	33	300	0	-
C12.3.1	231	96	25	231	0	-
C12.4.1	193	97	80	193	0	-
C12.5.1	148	98	31	148	0	-
C12.6.1	120	87	25	120	0	-
C12.7.1	101	84	26	101	0	-
C12.8.1	87	77	27	87	0	-
C12.9.1	109	93	38	109	0	-
C12.10.1	89	77	37	89	0	-
C12.11.1	78	78	31	75	0	-
C12.12.1	65	65	27	64	0	-
C12.13.1	63	63	24	57	0	-
C12.14.1	73	73	37	70	0	-
C12.15.1	75	75	31	59	0	-
C12.16.1	69	69	27	51	0	-
C12.17.1	59	59	24	45	0	-
C12.18.1	64	64	21	40	0	-
C16.1.1	328	224	47	328	0	-
C16.2.1	229	108	40	229	0	-
C16.3.1	176	94	25	176	0	-
C16.4.1	147	92	97	147	0	-
C16.5.1	113	81	38	113	0	-
C16.6.1	97	97	37	92	0	-
C16.7.1	79	79	31	77	0	-
C16.8.1	74	74	27	67	0	-
C16.9.1	93	93	46	83	0	-
C16.10.1	73	73	37	68	0	-
C16.11.1	74	74	31	57	0	-
C16.12.1	72	72	27	49	0	-
C16.13.1	61	61	24	43	0	-
C16.14.1	70	70	37	54	0	-
C16.15.1	72	72	31	45	0	-
C16.16.1	67	67	27	39	0	-
C16.17.1	70	70	24	34	0	-
C16.18.1	62	62	21	31	0	-
C20.1.1	267	216	54	267	0	-
C20.2.1	186	104	60	186	0	-
C20.3.1	143	86	31	143	0	-
C20.4.1	120	83	99	120	0	-
C20.5.1	95	95	46	92	0	-
C20.6.1	92	92	37	75	0	-
C20.7.1	75	75	31	63	0	-
C20.8.1	73	73	27	54	0	-
C20.9.1	90	90	46	68	0	-
C20.10.1	88	88	37	55	0	-
C20.11.1	72	72	31	46	0	-
C20.12.1	70	70	27	40	0	-
C20.13.1	73	73	24	35	0	-

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C20.14.1	69	69	37	44	0	-
C20.15.1	71	71	31	37	0	-
C20.16.1	66	66	27	32	0	-
C20.17.1	68	68	24	28	0	-
C20.18.1	60	60	21	25	0	-
C25.1.1	218	204	54	218	0	-
C25.2.1	152	99	60	152	0	-
C25.3.1	117	93	38	117	0	-
C25.4.1	99	91	99	98	0	-
C25.5.1	91	91	46	75	0	-
C25.6.1	89	89	37	61	0	-
C25.7.1	83	83	31	51	0	-
C25.8.1	71	71	27	44	0	-
C25.9.1	87	87	46	56	0	-
C25.10.1	85	85	37	45	0	-
C25.11.1	71	71	31	38	0	-
C25.12.1	69	69	27	33	0	-
C25.13.1	71	71	24	29	0	-
C25.14.1	83	83	37	36	0	-
C25.15.1	76	76	31	30	0	-
C25.16.1	65	65	27	26	0	-
C25.17.1	68	68	24	23	0	-
C25.18.1	56	56	21	20	0	-
C30.1.1	196	196	81	186	0	-
C30.2.1	130	99	80	130	0	-
C30.3.1	99	99	46	99	0	-
C30.4.1	99	96	99	84	0	-
C30.5.1	88	88	46	64	0	-
C30.6.1	87	87	37	52	0	-
C30.7.1	82	82	31	44	0	-
C30.8.1	70	70	27	38	0	-
C30.9.1	85	85	46	47	0	-
C30.10.1	84	84	37	38	0	-
C30.11.1	79	79	31	32	0	-
C30.12.1	68	68	27	28	0	-
C30.13.1	70	70	24	25	0	-
C30.14.1	82	82	37	30	0	-
C30.15.1	76	76	31	26	0	-
C30.16.1	80	80	27	22	0	-
C30.17.1	64	64	24	19	0	-
C30.18.1	47	47	21	17	0	-
C35.1.1	192	192	81	163	0	-
C35.2.1	114	94	99	114	0	-
C35.3.1	99	99	46	88	0	-
C35.4.1	99	98	99	73	0	-
C35.5.1	87	87	46	56	0	-
C35.6.1	85	85	37	46	0	-
C35.7.1	81	81	31	38	0	-
C35.8.1	85	85	27	33	0	-

LIITE 11. FEM-KÄYTTÖASTEET

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C35.9.1	83	83	46	41	0	-
C35.10.1	83	83	37	34	0	-
C35.11.1	79	79	31	28	0	-
C35.12.1	65	65	27	24	0	-
C35.13.1	60	60	24	22	0	-
C35.14.1	81	81	37	27	0	-
C35.15.1	75	75	31	22	0	-
C35.16.1	79	79	27	19	0	-
C35.17.1	56	56	24	17	0	-
C35.18.1	46	46	21	15	0	-
C40.1.1	187	187	95	146	0	-
C40.2.1	102	99	99	102	0	-
C40.3.1	96	96	46	78	0	-
C40.4.1	99	96	99	66	0	-
C40.5.1	85	85	46	50	0	-
C40.6.1	84	84	37	41	0	-
C40.7.1	79	79	31	34	0	-
C40.8.1	84	84	27	30	0	-
C40.9.1	82	82	46	37	0	-
C40.10.1	81	81	37	30	0	-
C40.11.1	78	78	31	25	0	-
C40.12.1	72	72	27	22	0	-
C40.13.1	55	55	24	19	0	-
C40.14.1	80	80	37	24	0	-
C40.15.1	75	75	31	20	0	-
C40.16.1	75	75	27	17	0	-
C40.17.1	52	52	24	15	0	-
C40.18.1	46	46	21	14	0	-
C45.1.1	182	182	95	133	0	-
C45.2.1	99	98	99	93	0	-
C45.3.1	93	93	46	71	0	-
C45.4.1	99	93	99	60	0	-

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C45.5.1	84	84	46	46	0	-
C45.6.1	83	83	37	37	0	-
C45.7.1	78	78	31	31	0	-
C45.8.1	78	78	27	27	0	-
C45.9.1	81	81	46	34	0	-
C45.10.1	80	80	37	27	0	-
C45.11.1	78	78	31	23	0	-
C45.12.1	65	65	27	20	0	-
C45.13.1	54	54	24	18	0	-
C45.14.1	80	80	37	22	0	-
C45.15.1	74	74	31	18	0	-
C45.16.1	68	68	27	16	0	-
C45.17.1	51	51	24	14	0	-
C45.18.1	32	32	21	12	0	-
C50.1.1	178	178	95	123	0	-
C50.2.1	99	92	99	86	0	-
C50.3.1	91	91	46	66	0	-
C50.4.1	99	91	99	55	0	-
C50.5.1	83	83	46	42	0	-
C50.6.1	82	82	37	34	0	-
C50.7.1	78	78	31	29	0	-
C50.8.1	70	70	27	25	0	-
C50.9.1	80	80	46	31	0	-
C50.10.1	80	80	37	25	0	-
C50.11.1	73	73	31	21	0	-
C50.12.1	61	61	27	18	0	-
C50.13.1	52	52	24	16	0	-
C50.14.1	79	79	37	20	0	-
C50.15.1	73	73	31	17	0	-
C50.16.1	56	56	27	15	0	-
C50.17.1	40	40	24	13	0	-
C50.18.1	32	32	21	11	0	-

Bar, Utilization, Load comb.: KRT

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C12.1.1	0	-	-	-	-	0
C12.2.1	104	-	-	-	-	104
C12.3.1	81	-	-	-	-	81
C12.4.1	59	-	-	-	-	59
C12.5.1	49	-	-	-	-	49
C12.6.1	77	-	-	-	-	77
C12.7.1	79	-	-	-	-	79
C12.8.1	93	-	-	-	-	93
C12.9.1	75	-	-	-	-	75
C12.10.1	84	-	-	-	-	84
C12.11.1	87	-	-	-	-	87
C12.12.1	77	-	-	-	-	77
C12.13.1	88	-	-	-	-	88

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C12.14.1	91	-	-	-	-	91
C12.15.1	94	-	-	-	-	94
C12.16.1	99	-	-	-	-	99
C12.17.1	85	-	-	-	-	85
C12.18.1	93	-	-	-	-	93
C16.1.1	35	-	-	-	-	35
C16.2.1	101	-	-	-	-	101
C16.3.1	80	-	-	-	-	80
C16.4.1	58	-	-	-	-	58
C16.5.1	66	-	-	-	-	66
C16.6.1	92	-	-	-	-	92
C16.7.1	78	-	-	-	-	78
C16.8.1	89	-	-	-	-	89

## LIITE 11. FEM-KÄYTTÖASTEET

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C16.9.1	98	-	-	-	-	98
C16.10.1	81	-	-	-	-	81
C16.11.1	84	-	-	-	-	84
C16.12.1	98	-	-	-	-	98
C16.13.1	84	-	-	-	-	84
C16.14.1	87	-	-	-	-	87
C16.15.1	90	-	-	-	-	90
C16.16.1	93	-	-	-	-	93
C16.17.1	99	-	-	-	-	99
C16.18.1	88	-	-	-	-	88
C20.1.1	62	-	-	-	-	62
C20.2.1	98	-	-	-	-	98
C20.3.1	74	-	-	-	-	74
C20.4.1	57	-	-	-	-	57
C20.5.1	87	-	-	-	-	87
C20.6.1	89	-	-	-	-	89
C20.7.1	76	-	-	-	-	76
C20.8.1	86	-	-	-	-	86
C20.9.1	96	-	-	-	-	96
C20.10.1	97	-	-	-	-	97
C20.11.1	81	-	-	-	-	81
C20.12.1	94	-	-	-	-	94
C20.13.1	99	-	-	-	-	99
C20.14.1	84	-	-	-	-	84
C20.15.1	87	-	-	-	-	87
C20.16.1	89	-	-	-	-	89
C20.17.1	94	-	-	-	-	94
C20.18.1	84	-	-	-	-	84
C25.1.1	170	-	-	-	-	170
C25.2.1	95	-	-	-	-	95
C25.3.1	69	-	-	-	-	69
C25.4.1	56	-	-	-	-	56
C25.5.1	85	-	-	-	-	85
C25.6.1	87	-	-	-	-	87
C25.7.1	97	-	-	-	-	97
C25.8.1	83	-	-	-	-	83
C25.9.1	94	-	-	-	-	94
C25.10.1	94	-	-	-	-	94
C25.11.1	78	-	-	-	-	78
C25.12.1	89	-	-	-	-	89
C25.13.1	94	-	-	-	-	94
C25.14.1	99	-	-	-	-	99
C25.15.1	98	-	-	-	-	98
C25.16.1	84	-	-	-	-	84
C25.17.1	89	-	-	-	-	89
C25.18.1	79	-	-	-	-	79
C30.1.1	166	-	-	-	-	166
C30.2.1	99	-	-	-	-	99
C30.3.1	62	-	-	-	-	62
C30.4.1	57	-	-	-	-	57

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C30.5.1	84	-	-	-	-	84
C30.6.1	85	-	-	-	-	85
C30.7.1	94	-	-	-	-	94
C30.8.1	81	-	-	-	-	81
C30.9.1	91	-	-	-	-	91
C30.10.1	92	-	-	-	-	92
C30.11.1	99	-	-	-	-	99
C30.12.1	86	-	-	-	-	86
C30.13.1	91	-	-	-	-	91
C30.14.1	97	-	-	-	-	97
C30.15.1	94	-	-	-	-	94
C30.16.1	99	-	-	-	-	99
C30.17.1	85	-	-	-	-	85
C30.18.1	76	-	-	-	-	76
C35.1.1	162	-	-	-	-	162
C35.2.1	95	-	-	-	-	95
C35.3.1	74	-	-	-	-	74
C35.4.1	68	-	-	-	-	68
C35.5.1	83	-	-	-	-	83
C35.6.1	83	-	-	-	-	83
C35.7.1	92	-	-	-	-	92
C35.8.1	98	-	-	-	-	98
C35.9.1	89	-	-	-	-	89
C35.10.1	89	-	-	-	-	89
C35.11.1	97	-	-	-	-	97
C35.12.1	83	-	-	-	-	83
C35.13.1	88	-	-	-	-	88
C35.14.1	94	-	-	-	-	94
C35.15.1	90	-	-	-	-	90
C35.16.1	96	-	-	-	-	96
C35.17.1	82	-	-	-	-	82
C35.18.1	73	-	-	-	-	73
C40.1.1	158	-	-	-	-	158
C40.2.1	92	-	-	-	-	92
C40.3.1	73	-	-	-	-	73
C40.4.1	68	-	-	-	-	68
C40.5.1	81	-	-	-	-	81
C40.6.1	81	-	-	-	-	81
C40.7.1	89	-	-	-	-	89
C40.8.1	95	-	-	-	-	95
C40.9.1	87	-	-	-	-	87
C40.10.1	87	-	-	-	-	87
C40.11.1	94	-	-	-	-	94
C40.12.1	99	-	-	-	-	99
C40.13.1	85	-	-	-	-	85
C40.14.1	91	-	-	-	-	91
C40.15.1	87	-	-	-	-	87
C40.16.1	92	-	-	-	-	92
C40.17.1	80	-	-	-	-	80
C40.18.1	70	-	-	-	-	70

## LIITE 11. FEM-KÄYTTÖASTEET

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C45.1.1	155	-	-	-	-	155
C45.2.1	89	-	-	-	-	89
C45.3.1	72	-	-	-	-	72
C45.4.1	67	-	-	-	-	67
C45.5.1	80	-	-	-	-	80
C45.6.1	80	-	-	-	-	80
C45.7.1	87	-	-	-	-	87
C45.8.1	93	-	-	-	-	93
C45.9.1	85	-	-	-	-	85
C45.10.1	85	-	-	-	-	85
C45.11.1	91	-	-	-	-	91
C45.12.1	97	-	-	-	-	97
C45.13.1	82	-	-	-	-	82
C45.14.1	89	-	-	-	-	89
C45.15.1	86	-	-	-	-	86
C45.16.1	92	-	-	-	-	92
C45.17.1	78	-	-	-	-	78
C45.18.1	48	-	-	-	-	48

Bar	Max.	SEC	ST	C	T	CW
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C50.1.1	151	-	-	-	-	151
C50.2.1	87	-	-	-	-	87
C50.3.1	72	-	-	-	-	72
C50.4.1	66	-	-	-	-	66
C50.5.1	79	-	-	-	-	79
C50.6.1	79	-	-	-	-	79
C50.7.1	85	-	-	-	-	85
C50.8.1	91	-	-	-	-	91
C50.9.1	83	-	-	-	-	83
C50.10.1	84	-	-	-	-	84
C50.11.1	88	-	-	-	-	88
C50.12.1	94	-	-	-	-	94
C50.13.1	80	-	-	-	-	80
C50.14.1	86	-	-	-	-	86
C50.15.1	86	-	-	-	-	86
C50.16.1	62	-	-	-	-	62
C50.17.1	53	-	-	-	-	53
C50.18.1	48	-	-	-	-	48

LIITE 12. FEM-RAUDOITUSMÄÄRÄT

Quantity estimation, Reinforcement

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter	Quantity
				[mm]	[t]
-	Beam	C12.1	B500B	20	0.549
-	Beam	C12.1	B500B	8	0.066
-	Beam	C12.2	B500B	20	0.602
-	Beam	C12.2	B500B	8	0.087
-	Beam	C12.3	B500B	20	0.495
-	Beam	C12.3	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.3	B500B	8	0.104
-	Beam	C12.4	B500B	20	0.649
-	Beam	C12.4	B500B	8	0.067
-	Beam	C12.5	B500B	20	0.785
-	Beam	C12.5	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.5	B500B	8	0.097
-	Beam	C12.6	B500B	20	0.273
-	Beam	C12.6	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.6	B500B	8	0.113
-	Beam	C12.7	B500B	20	0.228
-	Beam	C12.7	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.7	B500B	8	0.122
-	Beam	C12.8	B500B	20	0.200
-	Beam	C12.8	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.8	B500B	8	0.122
-	Beam	C12.9	B500B	20	0.368
-	Beam	C12.9	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.9	B500B	8	0.107
-	Beam	C12.10	B500B	20	0.278
-	Beam	C12.10	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.10	B500B	8	0.109
-	Beam	C12.11	B500B	20	0.228
-	Beam	C12.11	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.11	B500B	8	0.122
-	Beam	C12.12	B500B	20	0.225
-	Beam	C12.12	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.12	B500B	8	0.135
-	Beam	C12.13	B500B	20	0.201
-	Beam	C12.13	B500B	6	0.014
-	Beam	C12.13	B500B	8	0.148
-	Beam	C12.14	B500B	20	0.308
-	Beam	C12.14	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.14	B500B	8	0.122
-	Beam	C12.15	B500B	20	0.261
-	Beam	C12.15	B500B	6	0.007
-	Beam	C12.15	B500B	8	0.135
-	Beam	C12.16	B500B	20	0.217
-	Beam	C12.16	B500B	6	0.011
-	Beam	C12.16	B500B	8	0.148
-	Beam	C12.17	B500B	20	0.217
-	Beam	C12.17	B500B	6	0.018
-	Beam	C12.17	B500B	8	0.161
-	Beam	C12.18	B500B	20	0.174

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter	Quantity
				[mm]	[t]
-	Beam	C12.18	B500B	6	0.021
-	Beam	C12.18	B500B	8	0.174
-	Beam	C16.1	B500B	20	0.519
-	Beam	C16.1	B500B	8	0.066
-	Beam	C16.2	B500B	20	0.554
-	Beam	C16.2	B500B	8	0.073
-	Beam	C16.3	B500B	20	0.472
-	Beam	C16.3	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.3	B500B	8	0.093
-	Beam	C16.4	B500B	20	0.564
-	Beam	C16.4	B500B	8	0.049
-	Beam	C16.5	B500B	20	0.513
-	Beam	C16.5	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.5	B500B	8	0.092
-	Beam	C16.6	B500B	20	0.218
-	Beam	C16.6	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.6	B500B	8	0.095
-	Beam	C16.7	B500B	20	0.215
-	Beam	C16.7	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.7	B500B	8	0.109
-	Beam	C16.8	B500B	20	0.194
-	Beam	C16.8	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.8	B500B	8	0.122
-	Beam	C16.9	B500B	20	0.265
-	Beam	C16.9	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.9	B500B	8	0.095
-	Beam	C16.10	B500B	20	0.266
-	Beam	C16.10	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.10	B500B	8	0.109
-	Beam	C16.11	B500B	20	0.220
-	Beam	C16.11	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.11	B500B	8	0.122
-	Beam	C16.12	B500B	20	0.194
-	Beam	C16.12	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.12	B500B	8	0.135
-	Beam	C16.13	B500B	20	0.195
-	Beam	C16.13	B500B	6	0.014
-	Beam	C16.13	B500B	8	0.148
-	Beam	C16.14	B500B	20	0.298
-	Beam	C16.14	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.14	B500B	8	0.122
-	Beam	C16.15	B500B	20	0.255
-	Beam	C16.15	B500B	6	0.007
-	Beam	C16.15	B500B	8	0.135
-	Beam	C16.16	B500B	20	0.212
-	Beam	C16.16	B500B	6	0.010
-	Beam	C16.16	B500B	8	0.148
-	Beam	C16.17	B500B	20	0.170
-	Beam	C16.17	B500B	6	0.021

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter	Quantity
				[mm]	[t]
-	Beam	C16.17	B500B	8	0.161
-	Beam	C16.18	B500B	20	0.170
-	Beam	C16.18	B500B	6	0.021
-	Beam	C16.18	B500B	8	0.174
-	Beam	C20.1	B500B	20	0.482
-	Beam	C20.1	B500B	8	0.056
-	Beam	C20.2	B500B	20	0.518
-	Beam	C20.2	B500B	8	0.058
-	Beam	C20.3	B500B	20	0.437
-	Beam	C20.3	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.3	B500B	8	0.081
-	Beam	C20.4	B500B	20	1.303
-	Beam	C20.4	B500B	8	0.043
-	Beam	C20.5	B500B	20	0.256
-	Beam	C20.5	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.5	B500B	8	0.082
-	Beam	C20.6	B500B	20	0.212
-	Beam	C20.6	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.6	B500B	8	0.095
-	Beam	C20.7	B500B	20	0.209
-	Beam	C20.7	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.7	B500B	8	0.109
-	Beam	C20.8	B500B	20	0.189
-	Beam	C20.8	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.8	B500B	8	0.122
-	Beam	C20.9	B500B	20	0.256
-	Beam	C20.9	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.9	B500B	8	0.095
-	Beam	C20.10	B500B	20	0.212
-	Beam	C20.10	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.10	B500B	8	0.109
-	Beam	C20.11	B500B	20	0.214
-	Beam	C20.11	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.11	B500B	8	0.122
-	Beam	C20.12	B500B	20	0.189
-	Beam	C20.12	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.12	B500B	8	0.135
-	Beam	C20.13	B500B	20	0.167
-	Beam	C20.13	B500B	6	0.014
-	Beam	C20.13	B500B	8	0.148
-	Beam	C20.14	B500B	20	0.291
-	Beam	C20.14	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.14	B500B	8	0.122
-	Beam	C20.15	B500B	20	0.251
-	Beam	C20.15	B500B	6	0.007
-	Beam	C20.15	B500B	8	0.135
-	Beam	C20.16	B500B	20	0.209
-	Beam	C20.16	B500B	6	0.010
-	Beam	C20.16	B500B	8	0.148

## LIITE 12. FEM-RAUDOITUSMÄÄRÄT

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter	Quantity
				[mm]	[t]
-	Beam	C20.17	B500B	20	0.167
-	Beam	C20.17	B500B	6	0.021
-	Beam	C20.17	B500B	8	0.161
-	Beam	C20.18	B500B	20	0.167
-	Beam	C20.18	B500B	6	0.021
-	Beam	C20.18	B500B	8	0.174
-	Beam	C25.1	B500B	20	0.438
-	Beam	C25.1	B500B	8	0.056
-	Beam	C25.2	B500B	20	0.451
-	Beam	C25.2	B500B	8	0.058
-	Beam	C25.3	B500B	20	0.324
-	Beam	C25.3	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.3	B500B	8	0.077
-	Beam	C25.4	B500B	20	0.685
-	Beam	C25.4	B500B	8	0.032
-	Beam	C25.5	B500B	20	0.244
-	Beam	C25.5	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.5	B500B	8	0.082
-	Beam	C25.6	B500B	20	0.206
-	Beam	C25.6	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.6	B500B	8	0.095
-	Beam	C25.7	B500B	20	0.183
-	Beam	C25.7	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.7	B500B	8	0.109
-	Beam	C25.8	B500B	20	0.184
-	Beam	C25.8	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.8	B500B	8	0.122
-	Beam	C25.9	B500B	20	0.247
-	Beam	C25.9	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.9	B500B	8	0.095
-	Beam	C25.10	B500B	20	0.206
-	Beam	C25.10	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.10	B500B	8	0.109
-	Beam	C25.11	B500B	20	0.203
-	Beam	C25.11	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.11	B500B	8	0.122
-	Beam	C25.12	B500B	20	0.184
-	Beam	C25.12	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.12	B500B	8	0.135
-	Beam	C25.13	B500B	20	0.164
-	Beam	C25.13	B500B	6	0.014
-	Beam	C25.13	B500B	8	0.148
-	Beam	C25.14	B500B	20	0.246
-	Beam	C25.14	B500B	6	0.007
-	Beam	C25.14	B500B	8	0.122
-	Beam	C25.15	B500B	20	0.205
-	Beam	C25.15	B500B	6	0.010
-	Beam	C25.15	B500B	8	0.135
-	Beam	C25.16	B500B	20	0.205
-	Beam	C25.16	B500B	6	0.010

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter	Quantity
				[mm]	[t]
-	Beam	C25.16	B500B	8	0.148
-	Beam	C25.17	B500B	20	0.164
-	Beam	C25.17	B500B	6	0.021
-	Beam	C25.17	B500B	8	0.161
-	Beam	C25.18	B500B	20	0.164
-	Beam	C25.18	B500B	6	0.021
-	Beam	C25.18	B500B	8	0.174
-	Beam	C30.1	B500B	20	0.426
-	Beam	C30.1	B500B	8	0.045
-	Beam	C30.2	B500B	20	0.392
-	Beam	C30.2	B500B	8	0.044
-	Beam	C30.3	B500B	20	0.273
-	Beam	C30.3	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.3	B500B	8	0.069
-	Beam	C30.4	B500B	20	0.311
-	Beam	C30.4	B500B	8	0.032
-	Beam	C30.5	B500B	20	0.239
-	Beam	C30.5	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.5	B500B	8	0.082
-	Beam	C30.6	B500B	20	0.203
-	Beam	C30.6	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.6	B500B	8	0.095
-	Beam	C30.7	B500B	20	0.181
-	Beam	C30.7	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.7	B500B	8	0.109
-	Beam	C30.8	B500B	20	0.182
-	Beam	C30.8	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.8	B500B	8	0.122
-	Beam	C30.9	B500B	20	0.242
-	Beam	C30.9	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.9	B500B	8	0.095
-	Beam	C30.10	B500B	20	0.203
-	Beam	C30.10	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.10	B500B	8	0.109
-	Beam	C30.11	B500B	20	0.181
-	Beam	C30.11	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.11	B500B	8	0.122
-	Beam	C30.12	B500B	20	0.182
-	Beam	C30.12	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.12	B500B	8	0.135
-	Beam	C30.13	B500B	20	0.162
-	Beam	C30.13	B500B	6	0.014
-	Beam	C30.13	B500B	8	0.148
-	Beam	C30.14	B500B	20	0.243
-	Beam	C30.14	B500B	6	0.007
-	Beam	C30.14	B500B	8	0.122
-	Beam	C30.15	B500B	20	0.203
-	Beam	C30.15	B500B	6	0.010
-	Beam	C30.15	B500B	8	0.135
-	Beam	C30.16	B500B	20	0.162

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter	Quantity
				[mm]	[t]
-	Beam	C30.16	B500B	6	0.014
-	Beam	C30.16	B500B	8	0.148
-	Beam	C30.17	B500B	20	0.162
-	Beam	C30.17	B500B	6	0.021
-	Beam	C30.17	B500B	8	0.161
-	Beam	C30.18	B500B	20	0.162
-	Beam	C30.18	B500B	6	0.021
-	Beam	C30.18	B500B	8	0.174
-	Beam	C35.1	B500B	20	0.417
-	Beam	C35.1	B500B	8	0.045
-	Beam	C35.2	B500B	20	0.383
-	Beam	C35.2	B500B	8	0.038
-	Beam	C35.3	B500B	20	0.235
-	Beam	C35.3	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.3	B500B	8	0.069
-	Beam	C35.4	B500B	20	0.274
-	Beam	C35.4	B500B	8	0.032
-	Beam	C35.5	B500B	20	0.235
-	Beam	C35.5	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.5	B500B	8	0.082
-	Beam	C35.6	B500B	20	0.200
-	Beam	C35.6	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.6	B500B	8	0.095
-	Beam	C35.7	B500B	20	0.179
-	Beam	C35.7	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.7	B500B	8	0.109
-	Beam	C35.8	B500B	20	0.161
-	Beam	C35.8	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.8	B500B	8	0.122
-	Beam	C35.9	B500B	20	0.235
-	Beam	C35.9	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.9	B500B	8	0.095
-	Beam	C35.10	B500B	20	0.200
-	Beam	C35.10	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.10	B500B	8	0.109
-	Beam	C35.11	B500B	20	0.179
-	Beam	C35.11	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.11	B500B	8	0.122
-	Beam	C35.12	B500B	20	0.180
-	Beam	C35.12	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.12	B500B	8	0.135
-	Beam	C35.13	B500B	20	0.161
-	Beam	C35.13	B500B	6	0.014
-	Beam	C35.13	B500B	8	0.148
-	Beam	C35.14	B500B	20	0.241
-	Beam	C35.14	B500B	6	0.007
-	Beam	C35.14	B500B	8	0.122
-	Beam	C35.15	B500B	20	0.201
-	Beam	C35.15	B500B	6	0.010
-	Beam	C35.15	B500B	8	0.135

## LIITE 12. FEM-RAUDOITUSMÄÄRÄT

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter	Quantity
				[mm]	[t]
-	Beam	C35.16	B500B	20	0.161
-	Beam	C35.16	B500B	6	0.014
-	Beam	C35.16	B500B	8	0.148
-	Beam	C35.17	B500B	20	0.161
-	Beam	C35.17	B500B	6	0.021
-	Beam	C35.17	B500B	8	0.161
-	Beam	C35.18	B500B	20	0.161
-	Beam	C35.18	B500B	6	0.021
-	Beam	C35.18	B500B	8	0.174
-	Beam	C40.1	B500B	20	0.411
-	Beam	C40.1	B500B	8	0.036
-	Beam	C40.2	B500B	20	0.338
-	Beam	C40.2	B500B	8	0.038
-	Beam	C40.3	B500B	20	0.231
-	Beam	C40.3	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.3	B500B	8	0.069
-	Beam	C40.4	B500B	20	0.268
-	Beam	C40.4	B500B	8	0.032
-	Beam	C40.5	B500B	20	0.226
-	Beam	C40.5	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.5	B500B	8	0.082
-	Beam	C40.6	B500B	20	0.195
-	Beam	C40.6	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.6	B500B	8	0.095
-	Beam	C40.7	B500B	20	0.177
-	Beam	C40.7	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.7	B500B	8	0.109
-	Beam	C40.8	B500B	20	0.159
-	Beam	C40.8	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.8	B500B	8	0.122
-	Beam	C40.9	B500B	20	0.231
-	Beam	C40.9	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.9	B500B	8	0.095
-	Beam	C40.10	B500B	20	0.197
-	Beam	C40.10	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.10	B500B	8	0.109
-	Beam	C40.11	B500B	20	0.177
-	Beam	C40.11	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.11	B500B	8	0.122
-	Beam	C40.12	B500B	20	0.159
-	Beam	C40.12	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.12	B500B	8	0.135
-	Beam	C40.13	B500B	20	0.159
-	Beam	C40.13	B500B	6	0.014
-	Beam	C40.13	B500B	8	0.148
-	Beam	C40.14	B500B	20	0.239
-	Beam	C40.14	B500B	6	0.007
-	Beam	C40.14	B500B	8	0.122
-	Beam	C40.15	B500B	20	0.199
-	Beam	C40.15	B500B	6	0.010

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter	Quantity
				[mm]	[t]
-	Beam	C40.15	B500B	8	0.135
-	Beam	C40.16	B500B	20	0.159
-	Beam	C40.16	B500B	6	0.014
-	Beam	C40.16	B500B	8	0.148
-	Beam	C40.17	B500B	20	0.159
-	Beam	C40.17	B500B	6	0.020
-	Beam	C40.17	B500B	8	0.161
-	Beam	C40.18	B500B	20	0.159
-	Beam	C40.18	B500B	6	0.020
-	Beam	C40.18	B500B	8	0.174
-	Beam	C45.1	B500B	20	0.405
-	Beam	C45.1	B500B	8	0.036
-	Beam	C45.2	B500B	20	0.333
-	Beam	C45.2	B500B	8	0.029
-	Beam	C45.3	B500B	20	0.228
-	Beam	C45.3	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.3	B500B	8	0.069
-	Beam	C45.4	B500B	20	0.265
-	Beam	C45.4	B500B	8	0.032
-	Beam	C45.5	B500B	20	0.223
-	Beam	C45.5	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.5	B500B	8	0.082
-	Beam	C45.6	B500B	20	0.190
-	Beam	C45.6	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.6	B500B	8	0.095
-	Beam	C45.7	B500B	20	0.175
-	Beam	C45.7	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.7	B500B	8	0.109
-	Beam	C45.8	B500B	20	0.159
-	Beam	C45.8	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.8	B500B	8	0.122
-	Beam	C45.9	B500B	20	0.228
-	Beam	C45.9	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.9	B500B	8	0.095
-	Beam	C45.10	B500B	20	0.195
-	Beam	C45.10	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.10	B500B	8	0.109
-	Beam	C45.11	B500B	20	0.175
-	Beam	C45.11	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.11	B500B	8	0.122
-	Beam	C45.12	B500B	20	0.159
-	Beam	C45.12	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.12	B500B	8	0.135
-	Beam	C45.13	B500B	20	0.159
-	Beam	C45.13	B500B	6	0.014
-	Beam	C45.13	B500B	8	0.148
-	Beam	C45.14	B500B	20	0.238
-	Beam	C45.14	B500B	6	0.007
-	Beam	C45.14	B500B	8	0.122
-	Beam	C45.15	B500B	20	0.198

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter	Quantity
				[mm]	[t]
-	Beam	C45.15	B500B	6	0.010
-	Beam	C45.15	B500B	8	0.135
-	Beam	C45.16	B500B	20	0.159
-	Beam	C45.16	B500B	6	0.014
-	Beam	C45.16	B500B	8	0.148
-	Beam	C45.17	B500B	20	0.159
-	Beam	C45.17	B500B	6	0.020
-	Beam	C45.17	B500B	8	0.161
-	Beam	C45.18	B500B	20	0.342
-	Beam	C45.18	B500B	6	0.014
-	Beam	C45.18	B500B	8	0.174
-	Beam	C50.1	B500B	20	0.395
-	Beam	C50.1	B500B	8	0.036
-	Beam	C50.2	B500B	20	0.319
-	Beam	C50.2	B500B	8	0.029
-	Beam	C50.3	B500B	20	0.226
-	Beam	C50.3	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.3	B500B	8	0.069
-	Beam	C50.4	B500B	20	0.262
-	Beam	C50.4	B500B	8	0.032
-	Beam	C50.5	B500B	20	0.221
-	Beam	C50.5	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.5	B500B	8	0.082
-	Beam	C50.6	B500B	20	0.189
-	Beam	C50.6	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.6	B500B	8	0.095
-	Beam	C50.7	B500B	20	0.174
-	Beam	C50.7	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.7	B500B	8	0.109
-	Beam	C50.8	B500B	20	0.158
-	Beam	C50.8	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.8	B500B	8	0.122
-	Beam	C50.9	B500B	20	0.221
-	Beam	C50.9	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.9	B500B	8	0.095
-	Beam	C50.10	B500B	20	0.189
-	Beam	C50.10	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.10	B500B	8	0.109
-	Beam	C50.11	B500B	20	0.174
-	Beam	C50.11	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.11	B500B	8	0.122
-	Beam	C50.12	B500B	20	0.158
-	Beam	C50.12	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.12	B500B	8	0.135
-	Beam	C50.13	B500B	20	0.158
-	Beam	C50.13	B500B	6	0.014
-	Beam	C50.13	B500B	8	0.148
-	Beam	C50.14	B500B	20	0.237
-	Beam	C50.14	B500B	6	0.007
-	Beam	C50.14	B500B	8	0.122

## LIITE 12. FEM-RAUDOITUSMÄÄRÄT

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter [mm]	Quantity [t]
-	Beam	C50.15	B500B	20	0.197
-	Beam	C50.15	B500B	6	0.010
-	Beam	C50.15	B500B	8	0.135
-	Beam	C50.16	B500B	20	0.254
-	Beam	C50.16	B500B	6	0.007

Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter [mm]	Quantity [t]
-	Beam	C50.16	B500B	8	0.148
-	Beam	C50.17	B500B	20	0.329
-	Beam	C50.17	B500B	6	0.014
-	Beam	C50.17	B500B	8	0.161
-	Beam	C50.18	B500B	20	0.276

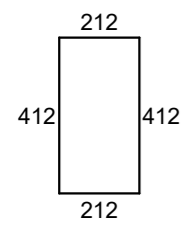
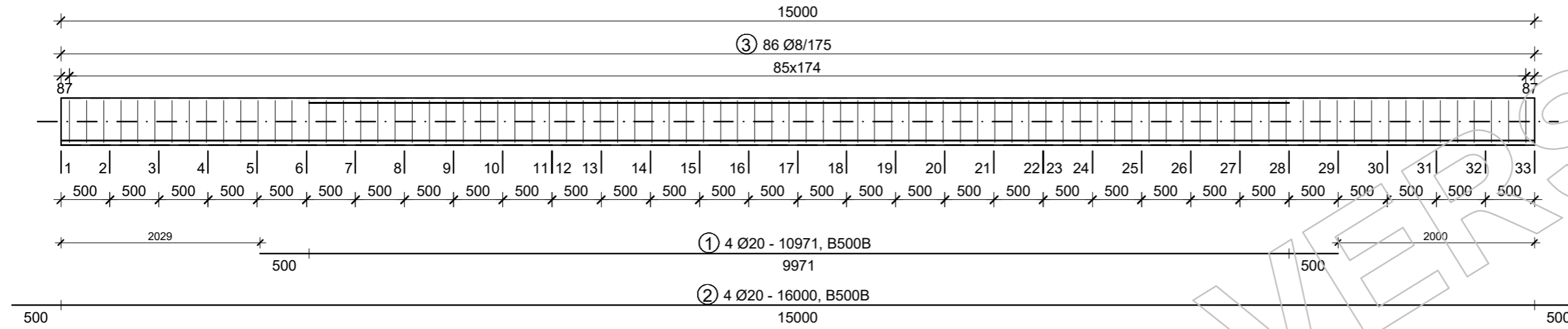
Storey	Struct.	Identifier	Quality	Diameter [mm]	Quantity [t]
-	Beam	C50.18	B500B	6	0.014
-	Beam	C50.18	B500B	8	0.174
TOTAL					61.342

EDUCATIONAL VERSION

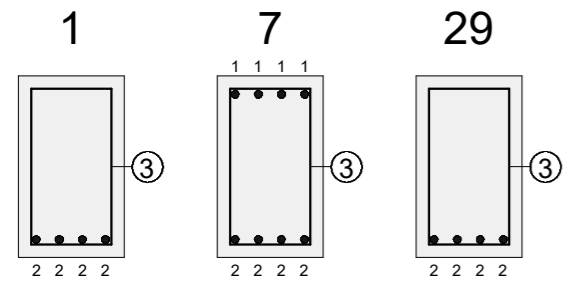
**C40.1.1**

**Load combination: 'MRT'**

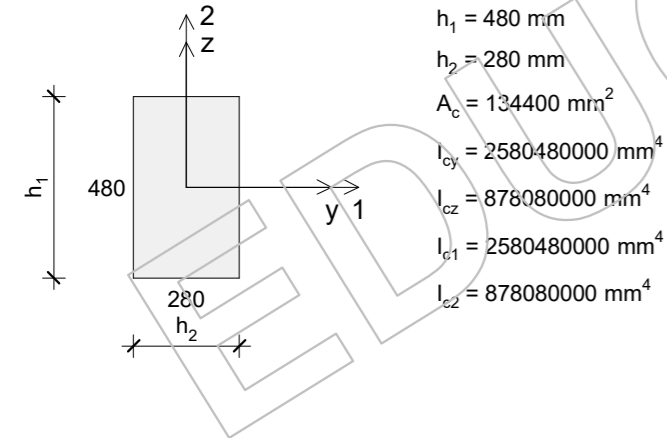
**Reinforcement**



③  
86 Ø8 - 1248  
B500B



**Cross-section**



LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU

Materials

**C40/50**

$f_{ck}$	=	40.00 N/mm <sup>2</sup>
$f_{ctm}$	=	3.50 N/mm <sup>2</sup>
$f_{ctk,0.05}$	=	2.50 N/mm <sup>2</sup>
$E_{cm}$	=	35000.00 N/mm <sup>2</sup>
$\alpha_{cc}$	=	0.85
$\alpha_{ct}$	=	1.00
$\gamma_c$	=	1.50
$\gamma_{CE}$	=	1.20
$\gamma_s$	=	1.15
$\varphi_{ef}$	=	0.00
$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$	=	22.67 N/mm <sup>2</sup>
$f_{ctd} = \alpha_{ct} f_{ctk} / \gamma_c$	=	1.67 N/mm <sup>2</sup>
$E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{CE}$	=	29166.67 N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{c2}$	=	0.00200 (Table 3.1)
$\varepsilon_{cu2}$	=	0.00350 (Table 3.1)
$\cot(\Theta)$	=	2.50 (Eq. 6.8)

**B500B**

$f_{yd} = f_{ywd}$	=	434.78 N/mm <sup>2</sup>
$E_s$	=	200000.00 N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s$	=	0.00217
$\varepsilon_{ud}$	=	0.04500

**Section utilization for axial effects (Part 1.1: 5.8, 6.1)**

Consideration of second order effects

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \quad (5.14)$$

2nd order effect is considered according to nominal stiffness method. (Part 1.1: 5.8.7)

Sections	5	23	29
$\lambda_{lim,1}$ [-]	-	-	-
$l_{0,1}$ [mm]	-	-	-
$i_1$ [mm]	-	-	-
$\lambda_1$ [-]	-	-	-
2nd order effect in direction 1	not considered	not considered	not considered
$\lambda_{lim,2}$ [-]	-	-	-
$l_{0,2}$ [mm]	-	-	-
$i_2$ [mm]	-	-	-
$\lambda_2$ [-]	-	-	-
2nd order effect in direction 2	not considered	not considered	not considered

LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU

$$n = N_{Ed} / (A_c f_{cd})$$

$$k_1 = \sqrt{f_{ck} / 20} \quad (5.23)$$

$$k_2 = \min\left(n \frac{\lambda}{170}, 0.20\right) \quad (5.24)$$

$$K_c = k_1 \cdot k_2 / (1 + \varphi_{ef}) \quad (5.22)$$

$$K_s = 1.00 \quad (5.22)$$

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s \quad (5.21)$$

$$N_B = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2} \quad (5.17)$$

$$M_{0Ed} = M_{Ed}^I + s N_{Ed} \frac{l_0}{400} \quad (5.17)$$

$$M_{Ed}^{II} = \frac{M_{0Ed}}{1 - |N_{Ed}| / N_B} \quad (5.30)$$

$$e_{min,1} = \max(20 \text{ mm}, h_1 / 30) = \max(20 \text{ mm}, h_1 / 30) = 20 \text{ mm} \quad (6.1(4))$$

$$e_{min,2} = \max(20 \text{ mm}, h_2 / 30) = \max(20 \text{ mm}, h_2 / 30) = 20 \text{ mm} \quad (6.1(4))$$

$$|M_{Ed}^{II}| \leq |N_{Ed} e_{min}| \rightarrow M_{Ed} = s N_{Ed} e_{min}$$

$$|M_{Ed}^{II}| > |N_{Ed} e_{min}| \rightarrow M_{Ed} = M_{Ed}^{II}$$

Sections	5	23	29
$N_{Ed}$ [kN]	0.00	0.00	0.00
$n$ [-]	-	-	-
$k_1$ [-]	-	-	-
$k_{2,1}$ [-]	-	-	-
$K_{c,1}$ [-]	-	-	-
$(E_s I_s)_1$ [Nmm <sup>2</sup> ]	-	-	-
$(EI)_1$ [Nmm <sup>2</sup> ]	-	-	-
$N_{B,1}$ [kN]	-	-	-
$M_{Ed,1}^I$ [kNm]	0.00	0.00	0.00
$s_1$ [-]	0.00	0.00	0.00
$M_{0Ed,1}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00
$M_{Ed,1}^{II}$ [kNm]	-	-	-
$M_{Ed,1}$ [kNm]	144.46	-179.86	144.46
$k_{2,2}$ [-]	-	-	-
$K_{c,2}$ [-]	-	-	-
$(E_s I_s)_2$ [Nmm <sup>2</sup> ]	-	-	-
$(EI)_2$ [N mm <sup>2</sup> ]	-	-	-
$N_{B,2}$ [kN]	-	-	-

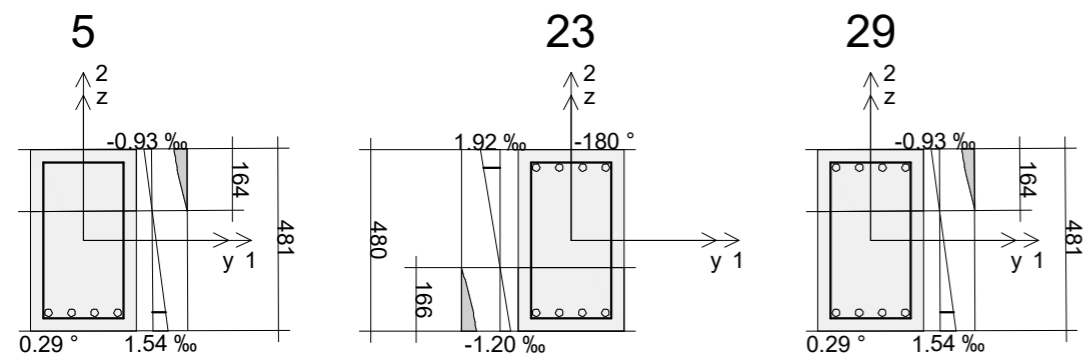
LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU

Sections	5	23	29
$M_{Ed,2}^I$ [kNm]	0.00	0.00	0.00
$s_2$ [-]	0.00	0.00	0.00
$M_{0Ed,2}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00
$M_{Ed,2}^{II}$ [kNm]	-	-	-
$M_{Ed,2}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00

Stresses and strains (Part 1.1: 6.1(2), 6.1(8), 3.1.7)

$$\epsilon_{steel,lim} = \epsilon_{ud}$$

Ultimate limit state



Sections	5	23	29
$\epsilon_{steel}$ [-]	0.00154	0.00192	0.00154
$\epsilon_{steel,lim}$ [-]	0.04500	0.04500	0.04500
$(\epsilon_{steel}/\epsilon_{steel,lim})_{max}$ [-]	0.03	0.04	0.03
$\epsilon_{c,max}$ [-]	-0.00093	-0.00120	-0.00093
$\epsilon_{c,comp}$ [-]	0.00024	0.00028	0.00024
$\max(\epsilon_{c,max}/\epsilon_{cu2}, \epsilon_{c,comp}/\epsilon_{c2})$ [-]	0.27	0.34	0.27

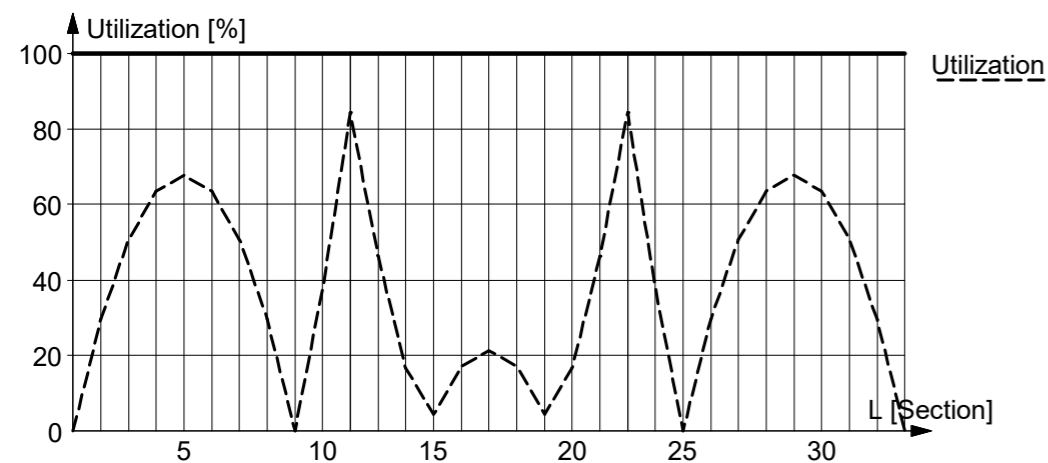
Section utilization

Ultimate internal forces:  $N_{ult} = v N_{Ed}$ ;  $M_{ult,1} = v M_{Ed,1}$ ;  $M_{ult,2} = v M_{Ed,2}$

Utilization:  $1 / v$

Sections	5	23	29
$N_{Ed}$ [kN]	0.00	0.00	0.00
$M_{Ed,1}$ [kNm]	144.46	-179.86	144.46
$M_{Ed,2}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00
Utilization [%]	68	84	68

LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU



**Stirrup utilization for shear and torsion (Part 1.1: 6.2, 6.3)**

$$C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c}$$

$$k_1 = 0.15$$

$$\sigma_{cp} = \min\left(\frac{N_{Ed}}{A_c}, 0.2 f_{cd}\right)$$

$$k = \min\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, 2.0\right)$$

$$\rho_1 = \min\left(\frac{A_{sl}}{b_w d}, 0.02\right)$$

$$v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (6.3.N)$$

$$V_{Rd,c} = \max\left([C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d, (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d\right) \quad (6.2.a, 6.2.b)$$

$$V_{Rd,s} = \max\left(\frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot(\Theta), V_{Rd,c}\right) \quad (6.8)$$

$$T_{Rd,c} = 2 f_{ctd} t_{ef} A_k \quad (6.26)$$

$$T_{Rd,s} = \max\left(2 \frac{A_{sw,min}}{s} f_{ywd} A_k, T_{Rd,c}\right) \quad (6.8, 6.26, 6.27)$$

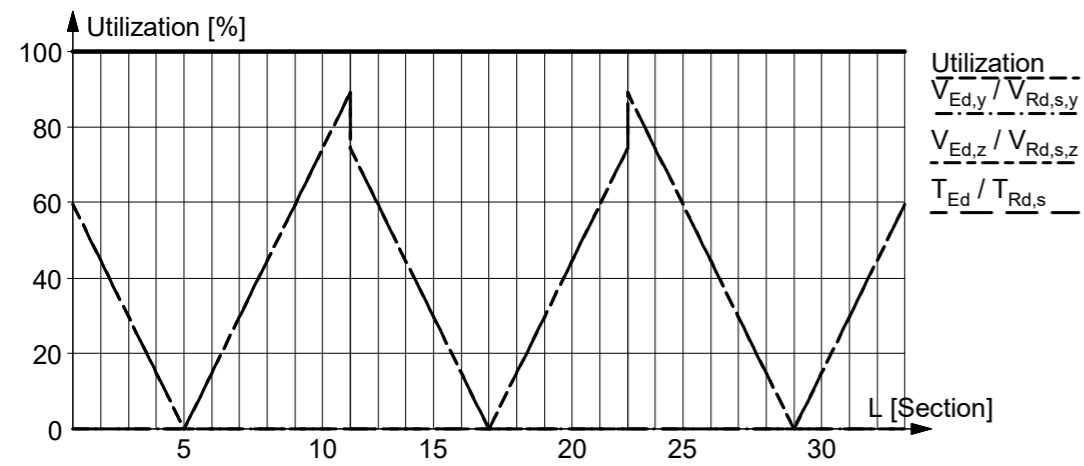
$$\text{Utilization: } \max\left(\frac{V_{Ed,y} + (T_{Ed} / A_k) d_y}{V_{Rd,s,y}}, \frac{V_{Ed,z} + (T_{Ed} / A_k) d_z}{V_{Rd,s,z}}\right)$$

If the stirrups are not correct by the detailing rules, the utilization is 1000% (9.2.2 or 9.5.3)

Sections	23
$N_{Ed}$ [kN]	0.00
$V_{Ed,y}$ [kN]	0.00
$V_{Ed,z}$ [kN]	216.31
$T_{Ed}$ [kNm]	0.00
$\sigma_{cp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.00
$A_{sl}$ [mm <sup>2</sup> ]	1257
$d_y$ [mm]	232
$k_y$ [-]	1.93

## LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU

Sections	23
$b_{w,y}$ [mm]	480
$\rho_{1,y}$ [-]	0.01128
$v_{\min,y}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.59
$V_{Rd,c,y}$ [kN]	91.76
$(A_{sw,y}/s) f_{ywd}$ [N/mm]	249.77
$z_y$ [mm]	209
$V_{Rd,s,y}$ [kN]	130.38
$V_{Ed,y}/V_{Rd,s,y}$ [-]	0.00
$d_z$ [mm]	432
$k_z$ [-]	1.68
$b_{w,z}$ [mm]	280
$\rho_{1,z}$ [-]	0.01039
$v_{\min,z}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.48
$V_{Rd,c,z}$ [kN]	84.49
$(A_{sw,z}/s) f_{ywd}$ [N/mm]	249.77
$z_z$ [mm]	389
$V_{Rd,s,z}$ [kN]	242.77
$V_{Ed,z}/V_{Rd,s,z}$ [-]	0.89
$A_k$ [mm <sup>2</sup> ]	75018
$t_{ef}$ [mm]	88
$T_{Rd,c}$ [kNm]	22.11
$(A_{sw,\min}/s) f_{ywd}$ [N/mm]	124.88
$T_{Rd,s}$ [kNm]	22.11
$T_{Ed}/T_{Rd,s}$ [-]	0.00
Utilization [%]	89


**Concrete utilization for shear and torsion (Part 1.1: 6.2, 6.3)**

$$\sigma_{cp} = \min\left(\frac{N_{Ed}}{A_c}, 0.2 f_{cd}\right)$$

$\alpha_{cw} = 1.0$  for non-prestressed structural elements.

$$\sigma_{cp} \leq 0.25 f_{cd} \rightarrow \alpha_{cw} = 1.0 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \quad (6.11.aN)$$

$$0.25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} < 0.50 f_{cd} \rightarrow \alpha_{cw} = 0.25 \quad (6.11.bN)$$

$$0.50 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \rightarrow \alpha_{cw} = 2.5 \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \quad (6.11.cN)$$

$$v_1 = 0.60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (6.6.N)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w (0.9 d) v_1 f_{cd}}{\cot(\Theta) + \tan(\Theta)} \quad (6.9)$$

$$v = 0.60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (6.6.N)$$

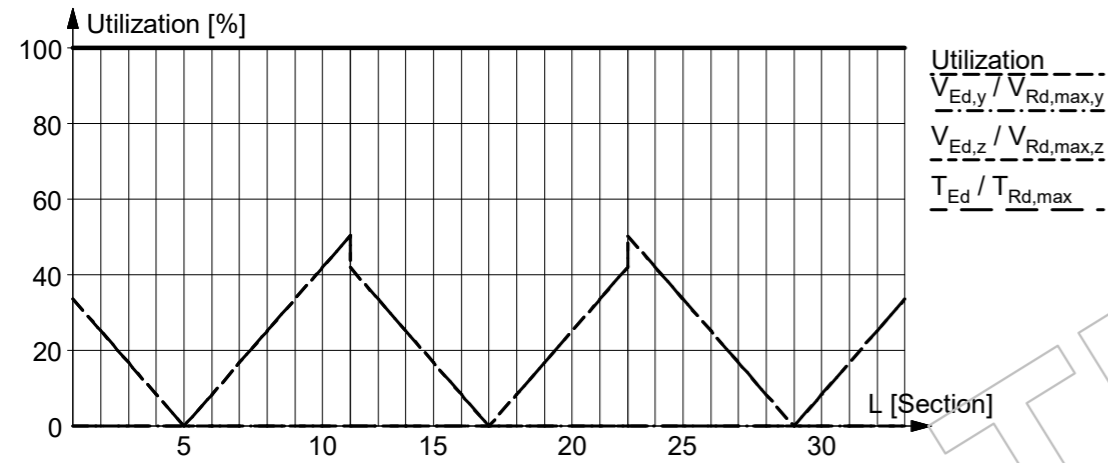
$$T_{Rd,max} = 2 v \alpha_{cw} f_{cd} A_k t_{ef} \sin(\Theta) \cos(\Theta) \quad (6.30)$$

$$\text{Utilization: } \frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \max\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Rd,max,y}}, \frac{V_{Ed,z}}{V_{Rd,max,z}}\right) \quad (6.29)$$

Sections	1	11	23	33
$N_{Ed}$ [kN]	0.00	0.00	0.00	0.00
$V_{Ed,y}$ [kN]	0.00	0.00	0.00	0.00
$V_{Ed,z}$ [kN]	144.37	216.31	216.31	144.37
$T_{Ed}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00	0.00
$\sigma_{cp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.00	0.00	0.00	0.00
$\alpha_{cw}$ [-]	1.00	1.00	1.00	1.00
$v_1$ [-]	0.50	0.50	0.50	0.50
$d_y$ [mm]	232	232	232	232
$b_{w,y}$ [mm]	480	480	480	480
$V_{Rd,max,y}$ [kN]	394.81	394.81	394.81	394.81

LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU

Sections	1	11	23	33
$V_{Ed,y} / V_{Rd,max,y}$ [-]	0.00	0.00	0.00	0.00
$d_z$ [mm]	432	432	432	432
$b_{w,z}$ [mm]	280	280	280	280
$V_{Rd,max,z}$ [kN]	428.85	428.85	428.85	428.85
$V_{Ed,z} / V_{Rd,max,z}$ [-]	0.34	0.50	0.50	0.34
$v$ [-]	0.50	0.50	0.50	0.50
$A_k$ [mm <sup>2</sup> ]	75018	75018	75018	75018
$t_{ef}$ [mm]	88	88	88	88
$T_{Rd,max}$ [kNm]	52.26	52.26	52.26	52.26
$T_{Ed} / T_{Rd,max}$ [-]	0.00	0.00	0.00	0.00
Utilization [%]	34	50	50	34



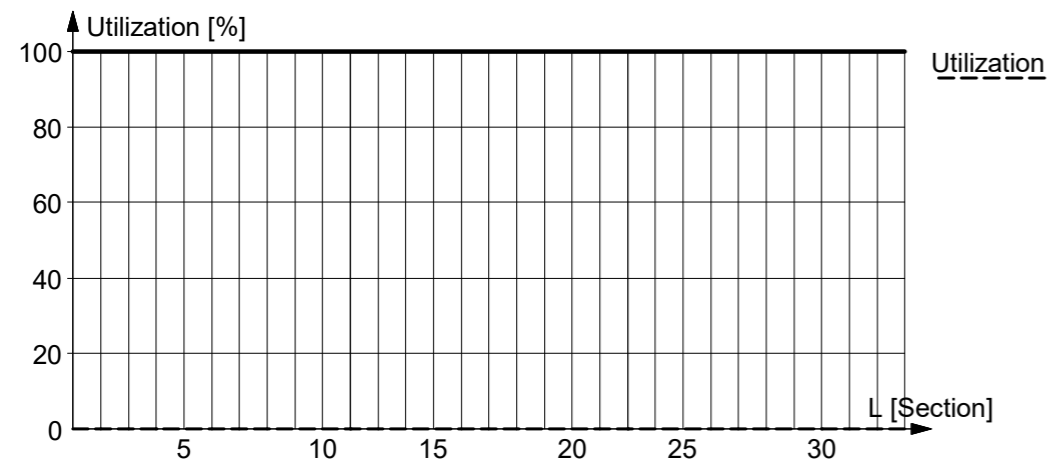
**Torsional reinforcement utilization (Part 1.1: 6.3)**

$$T_{Rd,sl} = 2 A_k \frac{\Sigma (A_{sl} f_{yd})}{u_k} \tan(\Theta) \quad (6.28)$$

Utilization:  $\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,sl}}$

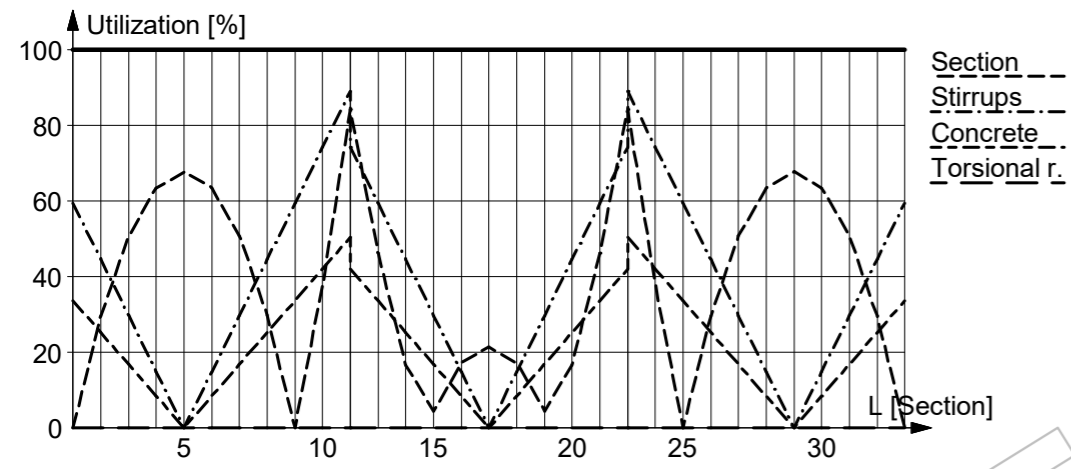
Sections	7	27	33
$T_{Ed}$ [kNm]	0.00	0.00	0.00
$A_k$ [mm <sup>2</sup> ]	75018	75018	75018
$u_k$ [mm]	1166	1166	1166
$\Sigma(A_{sl} f_{yd})$ [N]	546364	1092728	546364
$T_{Rd,sl}$ [kNm]	28.11	56.23	28.11
Utilization [%]	0	0	0

LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU



**Crack width (Part 1.1: 7.3)**  
Not relevant

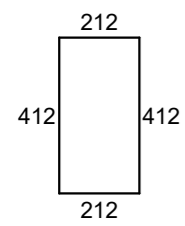
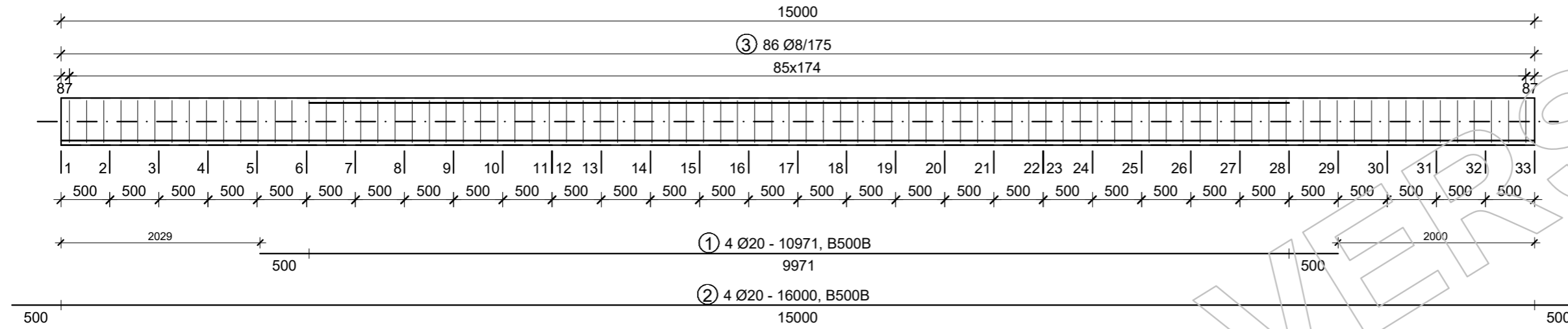
**Summary**



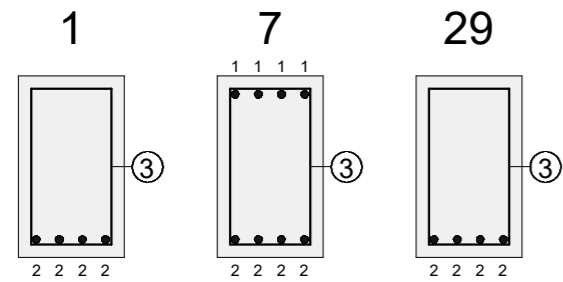
**C40.1.1**

**Load combination: 'KRt'**

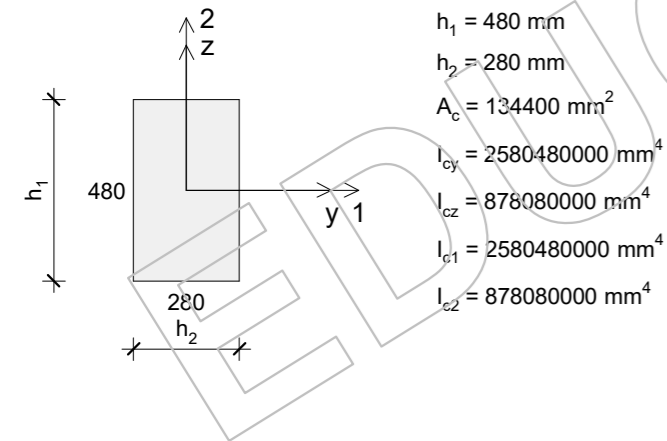
**Reinforcement**



③  
86 Ø8 - 1248  
B500B



**Cross-section**



LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU

**Materials**

**C40/50**

**B500B**

$$\begin{aligned}
 f_{ctm} &= 3.50 \text{ N/mm}^2 & E_s &= 200000.00 \text{ N/mm}^2 \\
 f_{ctk,0.05} &= 2.50 \text{ N/mm}^2 \\
 E_{cm} &= 35000.00 \text{ N/mm}^2 \\
 \alpha_{cc} &= 0.85 \\
 \alpha_{ct} &= 1.00 \\
 Y_{CE} &= 1.20 \\
 \Phi_{ef} &= 0.00 \\
 E_{cd} = E_{cm} / Y_{CE} &= 29166.67 \text{ N/mm}^2 \\
 \cot(\Theta) &= 2.50 \text{ (Eq. 6.8)}
 \end{aligned}$$

**Section utilization for axial effects (Part 1.1: 5.8, 6.1)**

Not relevant

**Stirrup utilization for shear and torsion (Part 1.1: 6.2, 6.3)**

Not relevant

**Concrete utilization for shear and torsion (Part 1.1: 6.2, 6.3)**

Not relevant

**Torsional reinforcement utilization (Part 1.1: 6.3)**

Not relevant

**Crack width (Part 1.1: 7.3)**

$$k_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2 \varepsilon_1} \quad (7.13)$$

$$k_3 = 3.40$$

$$k_4 = 0.425$$

$$h_{c,ef} = \min\left(2.5 (h - d), \frac{h-x}{3}, \frac{h}{2}\right)$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (7.10)$$

$$s_{r,max} = \min(k_3 c + k_1 k_2 k_4 \Phi_{eq} / \rho_{p,eff}, 1.3 (h - x)) \quad (7.14)$$

$$k_t = 0.4$$

$$f_{ct,eff} = f_{ctm}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \max\left(\frac{\sigma_s - k_t \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \rho_{p,eff}\right) \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}}}{E_s}, 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}\right) \quad (7.9)$$

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (7.8)$$

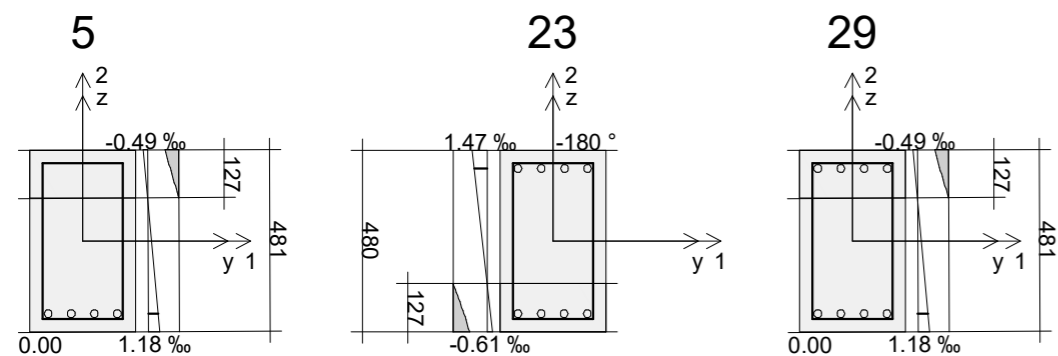
$$w_{lim} = 0.40 \text{ mm}$$

Crack width limit internal forces:  $N_{crack} = v N_{Ed}$ ;  $M_{crack,1} = v M_{Ed,1}$ ;  $M_{crack,2} = v M_{Ed,2}$

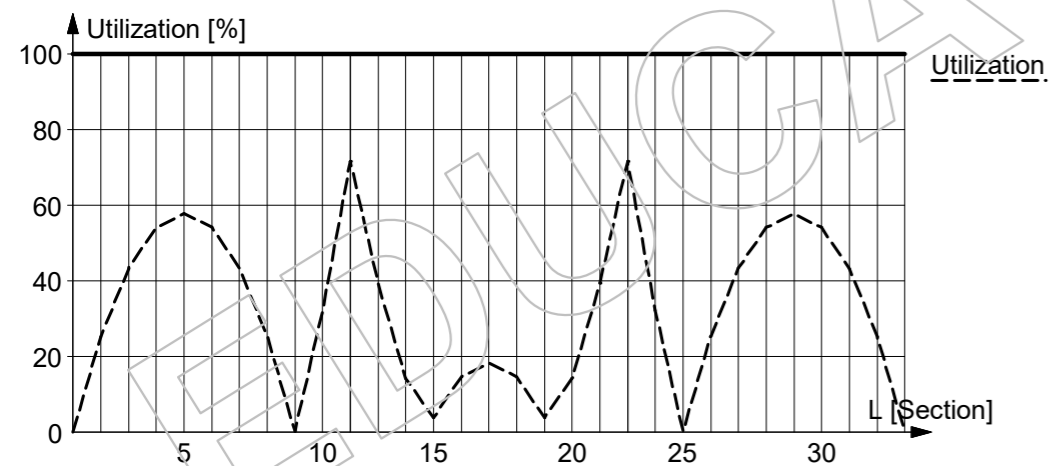
Utilization:  $1 / v$

LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU

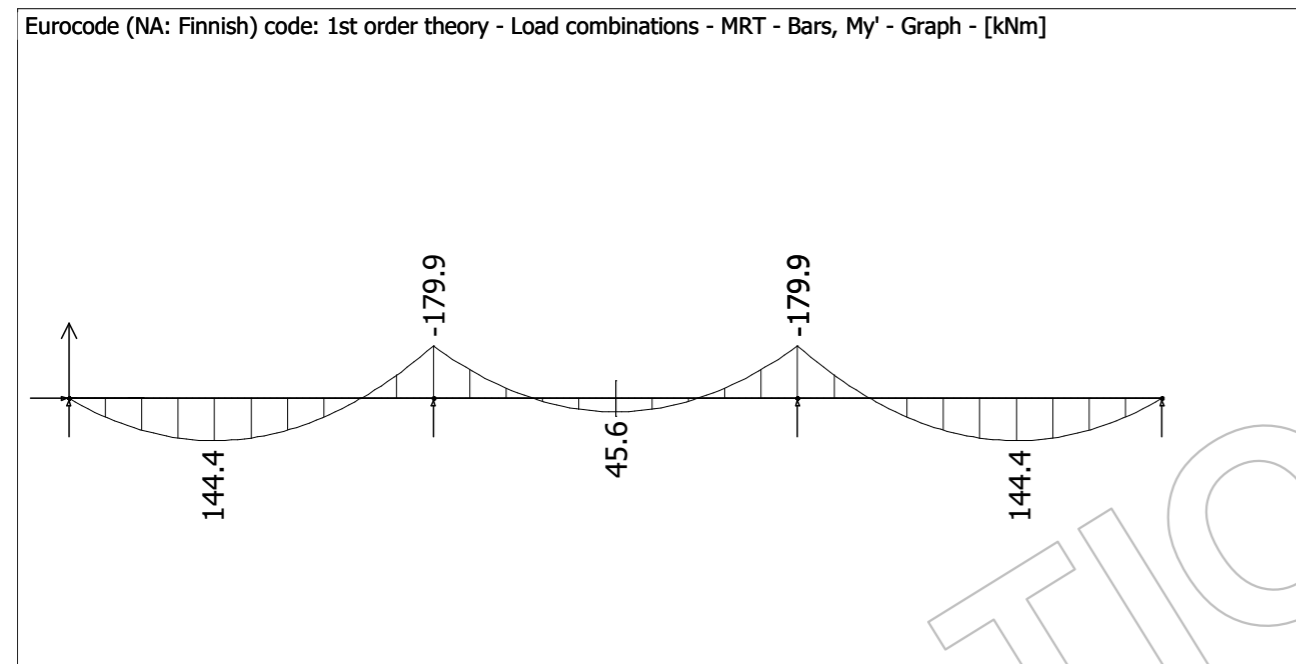
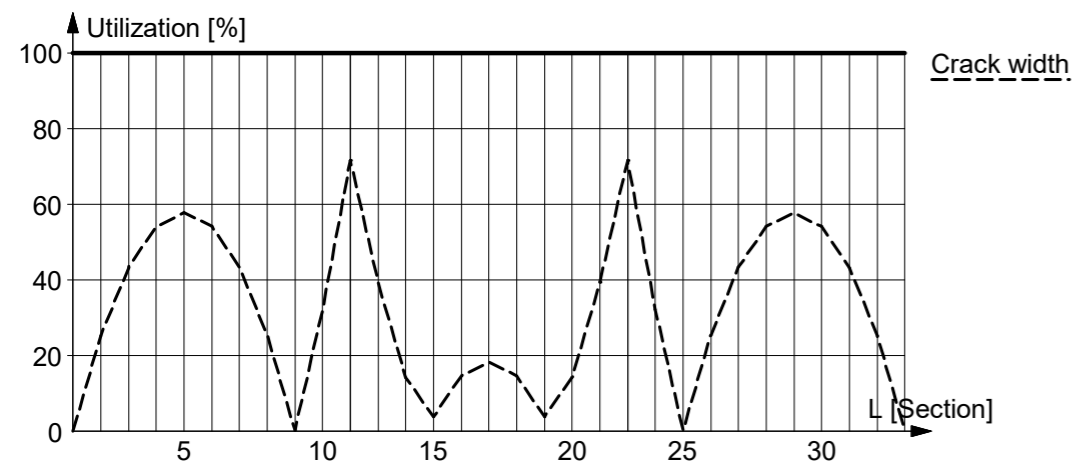
Quasi-permanent limit state



Sections	5	23	29
$k_1$ [-]	0.80	0.80	0.80
$\epsilon_1$ [-]	0.00136	0.00170	0.00136
$\epsilon_2$ [-]	0.00000	0.00000	0.00000
$k_2$ [-]	0.50	0.50	0.50
$h_{c,eff}$ [mm]	118	118	118
$A_{c,eff}$ [mm <sup>2</sup> ]	32899	32920	32899
$\rho_{p,eff}$ [-]	0.04	0.04	0.04
$x$ [mm]	127	127	127
$s_{r,max}$ [mm]	219	218	219
$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ [-]	0.000955	0.001244	0.000955
$w_k$ [mm]	0.21	0.27	0.21
Utilization [%]	58	72	58

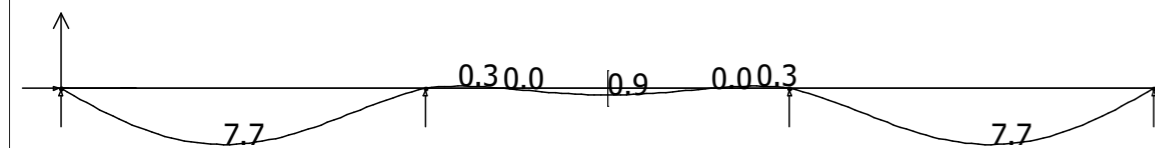


Summary



LIITE 13. FEM-LASKENTA, MANUAALINEN SUUNNITTELU

Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - Load combinations - KRt - Translational displacements - Graph - [mm]



EDUCATIONAL VERSION