



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Tam Thien Vuong

Savilahden liikuntakeskuksen rakenneosien mitoit- us Autodesk Robot Structural Analysis Professi- onal ohjelman avulla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

07.05.2020

Tekijä	Tam Thien Vuong
Otsikko	Savilahden liikuntakeskuksen rakenneosien mitoitus Autodesk Robot ohjelman avulla
Sivumäärä	50 sivua
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennesuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori, tutkintovastaava (rakennustekniikka) Riikka Jääskeläinen
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin Kuopiossa sijaitsevan Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotilan teräsbetonirakenteiden rakenteiden mitoitusta käyttämällä Autodesk Robot Structural Analysis Professional:n analyysisovellusta ja Excel:n mitoitusohjelmia kansallisten liitteiden mukaan.</p> <p>Työn tavoitteena oli selvittää, voiko tietokoneen apuohjelmia, kuten laskentaohjelmia tai mallinnusohjelmia, käyttämällä ymmärtää rakennesuunnittelun laskelmia paremmin ja tehdä suunnittelutöitä sekä nopeammin että hyödyllisemmin.</p> <p>Työ toteutettiin tutkimalla kalliotilassa olevan toimistotilan rakennesuunnittelutehtäviä.</p> <p>Työn teoriaosuudessa kerrottiin kalliosuojarakentamiseen liittyvistä määräyksistä sekä rakenteiden kuormituksista.</p> <p>Työn tuloksena mitoitettiin toimistotilaan liittyviä palkkeja, pilareita, laattoja ja seiniä sekä vertailtiin FEM-, BIM- ja CAD-ohjelmia.</p>	
Avainsanat	Autodesk Robot, FEM, SKOL excel, mitoitus, Savilahti

Author	Tam Thien Vuong
Title	Office building design with Autodesk Structural Professional in Savilahti project
Number of Pages	50 pages
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building engineer
Professional Major	Structural design
Instructors	Riikka Jääskeläinen, Lecturer, Degree manager (Building Engineer)
<p>In this thesis, the reinforced concrete structural design of the Savilahti Sports and Event Center's office in Kuopio was studied by using the analysis application Autodesk Robot Structural Analysis Professional and Microsoft Excel's calculations' macros according to national annexes.</p> <p>The aim of the thesis was to find out whether computer utilities, such as calculation programs or modeling programs, can be used to better understand structural design's calculations and to do structural design's work faster and more effectively.</p> <p>The thesis was carried out by studying the structural design tasks of an office inside mountain.</p> <p>In the theoretical part of the thesis, the regulations of mountain protection in construction and the loads on the structures were described.</p> <p>As a result of the thesis the office's beams, pillars, tiles and walls were calculated and FEM, BIM and CAD programs were compared.</p>	
Keywords	Autodesk Robot, FEM, SKOL excel, mitoitus, Savilahti

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tavoitteet	1
1.2	Tutkimusmenetelmät	3
2	Rakentamisen määräykset	4
2.1	Savilahden projektin perustiedot	4
2.2	Eurokoodit ja kansalliset liitteet	5
2.3	Kallionväestönsuoja	6
2.3.1	Tärähdyskuorma	7
2.3.2	Painekuorma	9
3	Suunniteltavat rakenteet	10
3.1	Rakenteet	11
3.2	Kuormitus	12
4	Suunnittelun toteutuminen	16
4.1	Autodesk ja Autodesk Robot Structural Professional:n kehitys	16
4.2	Autodesk Robot Structural Professional:n käyttö	17
4.2.1	Ohjelman alustavat tarkistukset ja valinnat	18
4.2.2	Mallintaminen	20
4.2.3	Rakenteiden voimasuureiden analysointi	25
5	Rakenteiden voimasuureiden tulokset sovelluksesta	27
5.1	Palkkien voimasuuret	27
5.2	Pilarien ja anturoiden voimasuuret	28
5.3	Laatan voimasuuret	30
5.4	Seinien voimasuuret	31
6	Mitoitukset	33
6.1	Palkkien suunnittelu	33

6.1.1	Palkkien pääraudoitus	34
6.1.2	Palkkien leikkaushakojen raudoitus	37
6.2	Pilarien ja anturoiden suunnittelu	38
6.2.1	Pilarien raudoitus	38
6.2.2	Anturoiden raudoitus	41
6.3	Laatan suunnittelu	41
6.4	Seinän suunnittelu	45
7	Ohjelmien vertailu	47
7.1	FEM-ohjelmien vertailu	47
7.2	BIM ohjelmien vertailu	47
7.3	CAD ohjelmien vertailu	48
8	Tulokset	49
9	Yhteenveto ja pohdinta	50
	Lähteet	51

Lyhenteet

2D	Kaksiulotteinen
3D	Kolmiulotteinen
CAD	Computer-aided design - Tietokoneavusteinen suunnittelu
FEM	Finite element method - Elementtimenetelmä
BIM	Building Information Modeling - Rakennuksen tietomalli
Makro	Tietty pohja tai tietty kaava tietokoneohjelmille
MBP	Massiva Betongplattor-metod

1 Johdanto

1.1 Tavoitteet

Tässä insinööriyössä tutkitaan Kuopiossa sijaitsevan Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotilan teräsbetonirakenteiden rakenteiden mitoitus käyttämällä Autodesk Robot Structural Analysis Professional:n analyysisovellusta ja Excel:n mitoitusohjelmia kansallisten liitteiden mukaan. Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskus sijaitsee Kuopion keskustan länsipuolella kallioalueella, joka kuuluu Puijonlaakson kaupunginosaan. Kaikki rakennesuunnitelmat on suunniteltava sekä Eurokoodien että kalliosuojan suunnittelun ja väestönsuojan rakentamisen määräysten mukaan.

Tavoitteena on selvittää, voiko tietokoneen apuohjelmia, kuten laskentaohjelmia tai mallinnusohjelmia, käyttämällä ymmärtää rakennesuunnittelun laskelmia paremmin ja tehdä suunnittelutöitä sekä nopeammin että hyödyllisemmin. Rakennesuunnittelun laskelmia on vaikea tehdä pelkästään käsin laskemalla. Rakennesuunnittelun sovellusohjelmilla, kuten Autodesk Robot Structural Analysis Professional, Autodesk AutoCAD, Tekla tai Revit sekä Microsoft Excelin makroilla voidaan säästää merkittävästi työaikaa ja tehostaa työntekoa. Sen lisäksi voidaan myös aina varmistaa, että laskelmat on tehty oikein. Säästetty työaika voidaan hyödyntää tutkimalla ja etsimällä menetelmiä parhaiden ratkaisujen saamiseksi suunnittelutyölle. Toisaalta tekemällä todellista projektia tulee jatkossa rakennesuunnittelun tehtävissä ja tietokoneen ohjelmien käsittelyssä sujuvammaksi ja tarkemmaksi.

Tässä insinööriyössä tutkitaan projektin toimistotilan rakennesuunnittelun osaa. Kohde sijaitsee kalliotilassa ja se on vain osa isosta projektista ja yksi monista rakennuksista



Kuva 1. Savilahden nykyinen tilanne. (1)

Tämä insinööriyö tehdään Metropolia Ammattikorkeakoululle Riikka Jääskeläisen toimiessa ohjaajana. Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen rakennesuunnittelusta vastaava Insinööritoimisto Pontek Oy (myöhemmin Pontek) tukee insinööriyön toteutusta. Pontekin insinööritoimisto on toimittanut kaikki tarvittavia tiedot Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen projektista ja ohjeista sekä mitoituksista sekä 3D-mallinnuksesta ja 2D-piirustuksista tälle insinööriyölle. Sen lisäksi, Pontekin insinööritoimisto on myös auttanut antamalla kaikki yrityksen käytössä olevat lisenssit AutoCad:n sovellukselle, Tekla Structural:n mallinnussovellukselle, Autodesk:n Robot Structural Analysis Professional:n FEM-sovellukselle ja Microsoft Excel:n laskentapohjalle koulutuksellista tutkimusta varten.

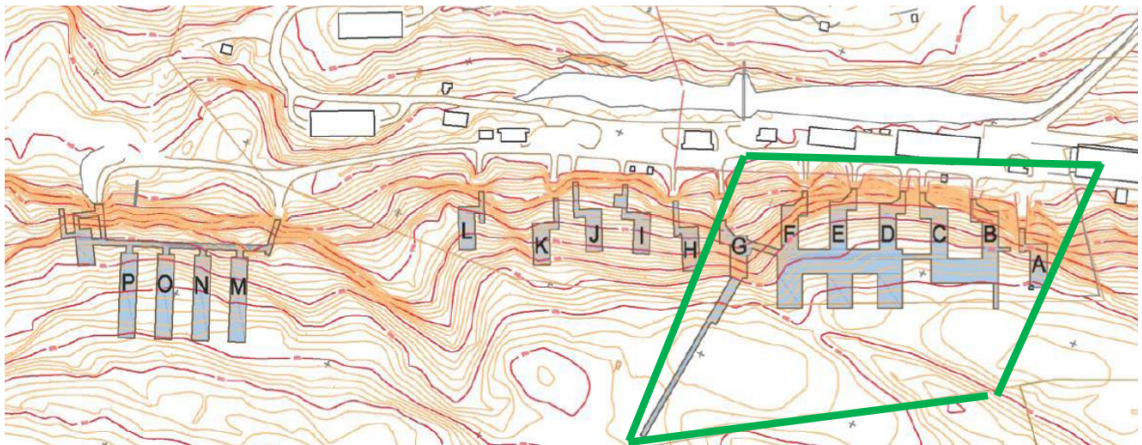
1.2 Tutkimusmenetelmät

Tässä työssä tarkastellaan osaa Savilahden projektin rakennusosista. Työssä tutkitaan ja esitetään, miten jäykistysrakenteita mitoitetaan ja lasketaan FEM (Finite element method - elementtimenetelmä) laskentasovelluksen avulla ja miten rakenneosien kuvia ja piirustuksia tehdään BIM (Building information modeling - rakennuksen tietomalli) mallinnussovelluksella. Rakennesuunnittelijan tehtävät ovat vaihtelevasti monimutkaisia ja yleisiä. Sen takia tämä insinööriyö paneutuu syvälle rakenneosien mitoitukseen ja laskentatehtäviin Eurokoodin mukaan. Sen lisäksi projektin mallinnusohje ja BIM-malli tehtynä mallinnusohjelma Teklan avulla, on myös esiteltävä. Tarkemmin sanottuna Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotila tässä tapauksessa tutkitaan FEM:n menetelmällä ja esitetään BIM:n menetelmällä.

2 Rakentamisen määräykset

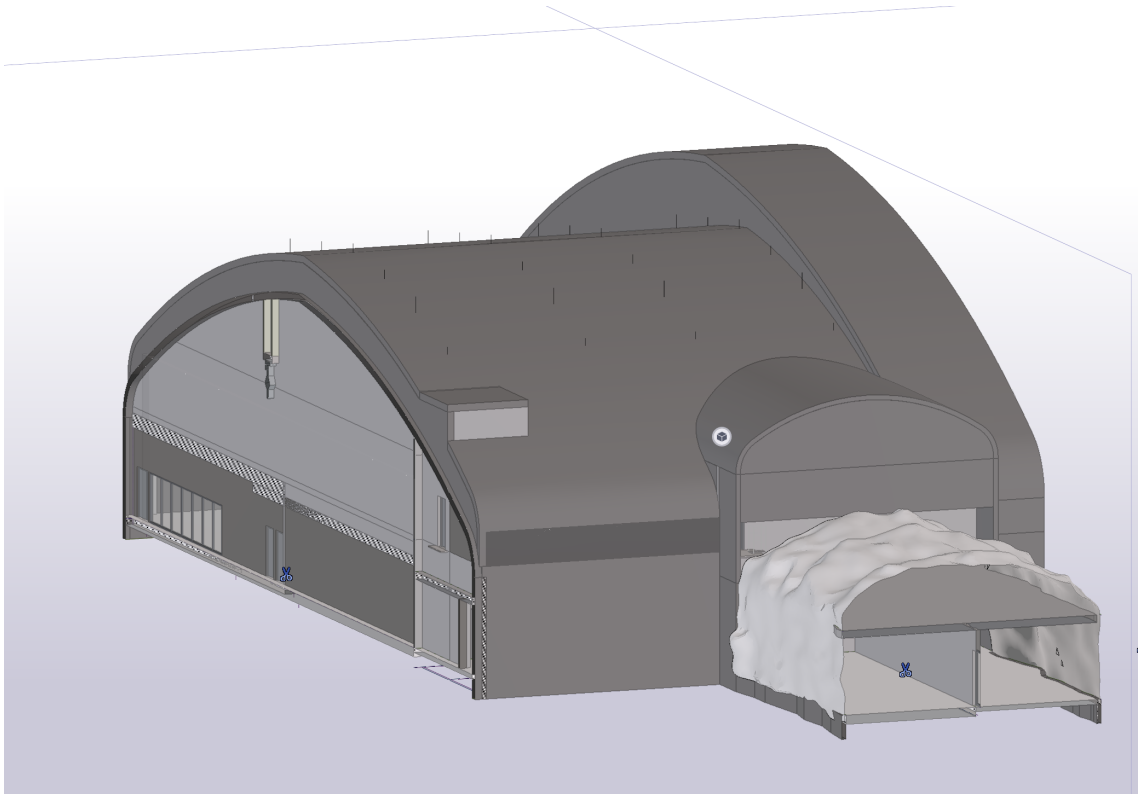
2.1 Savilahden projektin perustiedot

Savilahden kallioalue on ollut Puolustusvoimille kuulunutta aluetta. Se on vanha varikkoalue, joka ei ole ollut käytössä enää pitkään aikaan ja on nyt vapautunut muuhun käyttöön. Kuopion kaupunginhallitus halusi, että Savilahden aluekokonaisuuden täydentäjäksi rakennetaan uusi liikuntakeskus. Savilahden liikunta -ja tapahtumakeskus on sen perustella syntynyt ja kuuluu Kuopion kaupungin tilaamaan hankkeeseen. Savilahti-projektin tarkoituksena ja tavoitteena on yhteiskäyttöisen väestösuojan ja liikuntapainotteisen tapahtumakeskuksen toimintojen yhdistäminen. Hanketta ovat valmistelleet Kuopion kaupungin kanssa Itä-Suomen yliopisto, Savonia-ammattikorkeakoulu ja Savon koulutuskuntayhtymä



Kuva 2. Savilahden liikuntakeskuksen sijainti kalliossa. (2)

Savilahden liikunta -ja tapahtumakeskus on iso hanke ja tarvitsee monia erilaisia suunnitteluryhmiä. Insinööritoimisto Pontek on vastuussa projektin kaikesta rakennesuunnitteluun liittyvästä. (2)



Kuva 3. Toimistotila Savilahden arkkitehdin IFC-mallista. (3)

Tässä insinööriyössä tutkitaan suunnittelutapaa, kuten rakenteisiin kohdistuvien voimien ja teräsbetonin suunnittelutyön toteutumista. Analyysisovellus Autodesk Robot Structural Professional (FEM) on käytännössä välttämätön ohjelma tutkimaan rakenteiden voimasuureita. Toisaalta Microsoft Excel:n tehty laskentapohja (makro) on erittäin hyödyllinen ja nopein manuaalinen tapa mitoittamaan Autodesk Robot laskentaohjelman antamia voimasuureita. Kun rakenteiden suunnittelu on tehty, AutoCAD:a on käytetty tekemään 2D-kuvia tai piirustuksia ja Tekla (BIM) -ohjelmaa on käytetty tekemään 3D-mallia.

2.2 Eurokoodit ja kansalliset liitteet

Kaikkien tutkittujen rakenteiden suunnittelu tehdään tässä insinööriyössä SFS-EN 1991, SFS-EN 1992 ja SFS-EN 1997 sekä näiden standardien Suomen kansallisten liitteiden mukaan. Lisäksi jatkuvan sortuman estäminen toteutetaan SFS-EN 1991-1-7, kansallisen liitteen sekä RIL 201-4-2016 mukaisesti. Täydentävät rakenteet suunnitellaan

rakenteeseen soveltuvien eurokoodien ja tuotestandardien ja muiden hyväksyntäasia-
kirjojen mukaan (RIL 202, Betonirakenteiden suunnitteluohje). Seuraavissa taulukoissa
esitetään tarkempia kriteereitä betonis suunnitteluun, kuten toteutusluokka, toleranssi-
luokka ja betonirakenteiden rasitusluokat ja raudoitusluokat. (7) (8)

Taulukko 1. Teräsbetonin luokat erilaisissa tilanteissa. (4)

Toteutusluokka (SFS-EN 13670)			2
Toleranssiluokka (SFS-EN 13670)			2
Betonirakenteiden rasitusluokat (SFS-EN 206-1)	Anturat		XC2
	Betonirakenteet sisätiloissa		XC1
	Pystyrakenteet ulkotiloissa		XC4, XF1
	Vaakarakenteet ulkotiloissa		XC4, XF3

Taulukko 2. Raudoitusluokka (4)

Raudoitus	Hitsattava harjatanko	T = B500B SFS 1300
	Verkot	K = B500A SFS 1300
	Ruostumaton harjatanko	E = B600KX SFS 1259

Jokaiseen tapaukseen käytetään erilaisia kertoimia laskemaan ja mitoittamaan rakentei-
den osia, ja nämä kertoimet riippuvat näistä luokista. Näistä luokista valitaan tarkoituk-
seen sopivimman kertoimen, jotta saatu tulos on hyödyllisin ja edullisin erilaisissa tilan-
teissa tai erilaisissa tapauksissa. Betonin ja raudoituksen määrä riippuvat myös merkit-
tävästi näistä luokista.

2.3 Kallioväestönsuoja

Kallioväestönsuojan suunnitteluohjeiden mukaan kaikki teräsbetonirakenteet tulee beto-
noida vähintään C25/30 betonilla. Lisäksi väestönsuojan teräsbetonirakenteet on suun-
niteltavaa myös Suomen rakentamismääräyskokoelmassa säädetyn rakenneluokan 1

mukaan. Muuten, betoniraudoituksen suojuille teräsbetonirakenteille pitää täyttää kokonaistasavenymävaatimus 5 prosenttia. (2)

Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskus rakennetaan kalliopinnan sisäpuolelle ja se tarvitsee jopa 7340 hengen väestönsuojan. Projektinsuunnitteluvaiheessa rakennusvalvontaviranomaiselta voidaan saada vaikka poikkeuslupa toteuttamaan kallioväestönsuoja- paikkojen määräksi jopa 7500 paikkaa (2). Sen takia koko projekti tulee rakentaa kaikilla parhaimmilla materiaaleilla. Tärkeimpänä tavoitteena on taata ehdoton turvallisuus kaikille ihmisille.

2.3.1 Tärähdyskuorma

Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotila sijaitsee Savilahdessa kallion sisällä. Sen takia sen tulee täyttää kallioväestönsuojan asetuksen ja Eurokoodin mukaiset suunnittelutyölle asetetut määräykset. Kallioväestönsuojan suunnittelumääräysten mukaan, kaikki kalliossa sijaitsevat rakenteet on mitoitettava kestäämään monta kertaa enemmän kuin normaalit rakenteet. Kriittisten osien, kuten paineseinien painekuormitukset tai kallioväestönsuojarakenteiden tärähdyskuormitukset, on oltava jopa neljä kertaa suurempia kuin normaalien rakenteiden kuormat tai niiden rakenneosien riittävät paksuudet lain mukaan. Seuraavissa taulukoissa on esitetty painekuormat ja tärähdyskuormat erilaisissa tapauksissa.

Taulukko 3. Tärähdyskuormitus. (5)

Pystysuunnassa kuormitukselle	$q_{v+} = (1+n_v) (g+q) + q_l$ $q_{v-} = (1-n_v) (g+q) + q_l$
Vaakasuunnassa kuormitukselle	$q_{h+} = n_h g$ $q_{h-} = -n_h g$

Ylemmässä taulukossa, kaavoissa q_v tarkoittaa kohdistuvaa kuormitusta tarkasteltavalle rakenneosalle pystysuunnassa ja q_h tarkoittaa kohdistuvaa kuormitusta tarkisteltavalle. Sitten, g on rakenteiden omapaino, joka on olemassa vain pystysuunnassa maan painovoiman takia ja q on rakenteiden kuormitusmääräysten mukainen kuorma, joka riippuu arkkitehdin piirustuksiin merkityistä tilojen käyttötarkoituksista ja löytyy tarkemmin kuormitusasiakirjasta RIL 201-1-2017 ”Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat”. q_l on pitkäaikaiset kuormat, joka johtuivat tärähdyksen vaimentimilla varustetuista laitteista suojautumisen aikana. On tärkeää myös, että rakenteiden kuormituksesta välipohjalle otetaan huomioon yksi kolmasosa. Kuormitusten osavarmuuskerroin on 1. S2-luokan teräsbetoni- ja kallioväestönsuojan kertoimen n_v ja n_h arvot ovat seuraavassa taulukossa. (5)

Taulukko 4. n_v ja n_h arvot teräsbetonisuoja ja kalliosuojan. (5)

	S2-teräsbetonisuoja	Kalliosuojat
Suoja kalliossa n_v	3	4
Suoja maassa n_v	2	-
Suoja kalliossa n_h	2	3
Suoja maassa n_h	1	-

2.3.2 Painekuorma

Suomen Pelastusalan Keskusjärjestöstä (SPEK) on ohjeistanut, että kalliossa sijaitsevat painerakenteet on suunniteltava seuraavien väestönsuojelujen ehtojen mukaan (5):

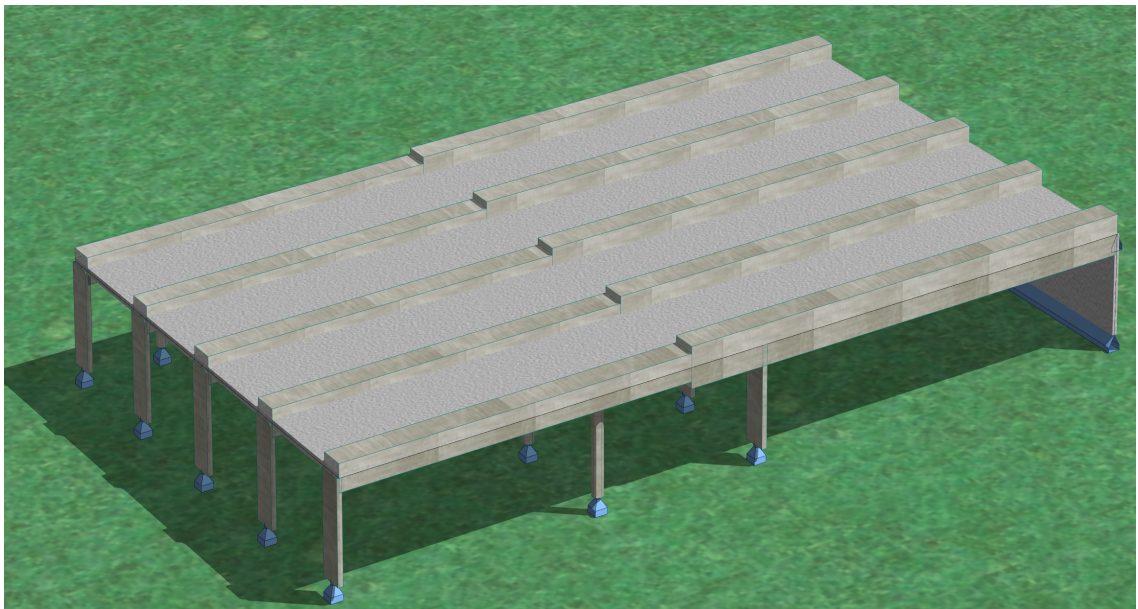
- Laattojen ja seinien pää- ja jakoraidoituksena tulee käyttää halkaisijaltaan vähintään 8 millimetrin ja enintään 20 millimetrin terästankoja. Paine- ja sortumakuormille mitoitettavissa rakenteissa sekä maata vasten olevassa lattiassa raudoituksen tankojen keskiöväli molempiin suuntiin voi olla enintään 150 millimetriä rakenteen sisäpinnassa ja enintään 300 millimetriä rakenteen ulkopinnassa.
- Raudoituksen poikkileikkauspinta-alan tulee olla taivutetuissa rakenteissa vähintään 0,17 prosenttia staattisesti yhdessä toimivasta betonin poikkileikkauspinta-alasta, molemmissa suunnissa ja erikseen kummassakin pinnassa.
- Palkeissa ja laattoina mitoitettavissa rakenteissa pääraudoitus on vietävä tuelle ja ankkuroitava vetorasituksen voimille.
- Kallioväestönsuojan kalliotunnelissa olevien painekuormituksia vastaan ottavien ympärysseiniä tulee olla vähintään 800 millimetriä paksua teräsbetonia.
- Kallioväestönsuojan sisällä olevien teräsbetoniseiniä, -pilarien ja -välipohjien minimi paksuus: 200mm teräsbetonia.

Kaikki rakenneosat, jotka ovat kallioväestösuojoissa, on otettava huomioon suunnittelussa. Tärähdyskuorma ja painekuorma paineseinälle ja sulkuhuoneelle ovat eniten vaikuttavia kuormituksia kalliorakenteille. Sen lisäksi kalliosuunnittelulle on myös paljon muita säännöksiä takaamaan ihmisten turvallisuutta

3 Suunniteltavat rakenteet

Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotila sijaitsee syvällä kallionpinnan sisäpuolella. Rakennuksessa on kaksi kerrosta. Ensimmäisen kerroksen rakenteet ovat teräsbetonia ja toisen kerroksen rakenteet ovat teräsrakenteisia ja tuetut ensimmäisestä kerroksesta. Ensimmäisen kerroksen betonirakenteet toisaalta ovat tuetut kallionpinnasta sekä pystysuunnasta, että vaakasuunnasta. Tässä toimistotilassa on paljon erilaisia rakenteita, koska se kuuluu kallioväestönsuojan suunnitteluun. Toimistotilan rakenteet tarvitsevat monta kertaa jäykempiä rakenteita kuin normaaleissa toimistotaloissa. Väestönsuojassa kantavien rakenteiden pitää kestää sekä omapaino että kaikki siihen kohdistuvat hyötykuormat onnettomuustilanteissa.

Toimistotilan arkkitehdin IFC-mallin mukaiset rakenteet ovat monimutkaisia ja erittäin vaikeita suunnitella. Toimistotilan kokonaisalue on 700 m² ja sen mitat ovat 35 m pituus, 20 m leveys ja 10 m korkeus. Rakenteeseen käytetään eri mittaisia teräsbetonipalkkeja, teräsbetonilaattoja, teräsbetoniseiniä, teräsbetonipilareita ja teräsbetonianturoita. Seuraavassa kuvassa on toimistotilan Autodesk Robot Structural Professional:n malli, jossa näkyy rakenneosien määriä, mittoja ja sijainteja.



Kuva 4. suunniteltavien rakenteiden kokonaisalue Autodesk Robot Structural Professional:lla.

Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotilan rakenteissa käytetään paikallavalettua raudoitettua betonia C30/37, C40/50 ja C50/60 lujuudella. Betonielementtejä ei olla suostuttu käyttämään tässä tapauksessa, koska koko suunnittelualue kuuluu kallioväestönsuoja-alueeseen. Kallioon liittyvät rakenteiden liitokset ovat erittäin monimutkaisia, ne tarvitsevat erilaisia tartuntoja ja eivät sovi elementtirakenteille.

3.1 Rakenteet

Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotilan rakenteet sisältävät yhden ison laatan, jonka mitat ovat 35 000 mm x 20 000 mm. Laatan päälle tulee toinen teräsrakennekerros. Laatat ovat kiinnitetyt kallioon terässauvojen liitoksilla ja tuettu palkeilla 1000 mm x 800 mm ja 1000 mm x 1200 mm, kantavilla raudoitetuilla pilareilla, joiden halkaisija on D450 ja kantavilla raudoitetuilla seinillä, joiden paksuus h = 150 mm ja 200 mm. Alemmassa taulukossa on kerrottu kaikki toimistotilan rakenneosien betonin lujuusluokat, paksuudet ja mitat.

Taulukko 5. Toimistotilan rakenneosien mitat

Rakenneosa	Lujuusluokat	Paksuudet/ Profiilit	Mitat: Pituus [L] ja korkeus [H]
Laatat	C30/37	200mm	35000mm x 20000mm
Palkit	C50/60	1000mm x 800mm 1000mm x 1200mm	L=15000mm L=20000mm
Pilarit	C50/60	Pilarit D4501	H=4000mm

Seinät		150mm/ 200mm	-
Anturat	C30/37	1700mm x 1700mm	600mm
		1600mm x 1600mm	600mm
		1000mm x1000mm	400mm

3.2 Kuormitus

Kuormituksen oikea määrittäminen on erittäin tärkeää suunnittelutyössä, koska se vaikuttaa kaikkiin laskelmiin ja kuormitusten perusteella valitaan oikeat suunnittelun normit. Vain pienikin kuormituksen muutos voi aiheuttaa koko suunnitteluun muutoksen raudoituksiin, liitoksiin, betonin valintaan ja teräksen tyyppin valintaan. Kuormitukset on tarkistettava erittäin huolellisesti ennen suunnittelun aloittamista. Kuormitukset toimistotilalle kuuluu rakenteiden omapainoon ja toimistotilan hyötykuormaan.

Rakenteiden omapainon ja kaikista tasoista kertyvien hyötykuormien kanssa muodostuu erilaisia kuormituksen yhdistelmiä. Kuormituksen yhdistelmät riippuvat rakenteiden sijainnista, tilanteesta ja väestönsuojan rakentamisen määräysten. Tässä tapauksessa, koska rakenteet ovat kallioväestönsuojassa, otetaan onnettomuuskuorma huomioon huolellisemmin kertaamalla tärähdyskuormituksen kerroin (ks. taulukosta 4). Tärähdyskuormitus vaikuttaa rakenteille molemmista suunnista, sekä pystysuunnassa että vaakasuunnassa. Siten kuormitusten yhdistelmät on tarkistettava kaikissa tapauksissa. Sen lisäksi on muita kuormitustilanteita, kuten käyttörajatilan tai murtorajatila, jotka myös vaikuttavat suunnitteluun ja on otettava huomioon. Seuraavissa taulukoissa esitetään ohjeiden mukaisia rakenteiden kuormitusarvoja suunnittelukohteessa.

Taulukko 6. Rakenteiden kuormituksen arvo RIL mukaan.

1.krs	Ensimmäisestä tasosta	Arvo
Omapaino	Raudoitettu betoni omapaino	$g_1=25 \text{ kN/m}^3$
Hyötykuorma	Toimistotilan Luokka	$q_1=2,5 \text{ kN/m}^2$
2.krs	Toisesta Tasosta	Arvo
Omapaino	Teräsrakenteiden omapaino	$g_2=3,5 \text{ kN/m}^2$
Hyötykuorma	Toimistotilan Luokka	$q_2=2,5 \text{ kN/m}^2$

Koska toimistotila on kalliopinnan sisäpuolella, on tärähdyskuormitus vaakasuunnassa nolla ja tärähdyskuormituksen kertoimet pystysuunnassa lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$q_{v+} = (1+n_v)(g+q) + q_l = (1+4)(g+1/3q) \quad (n_v=4 \text{ ks. taulukko 4.})$$

$$q_{v-} = (1-n_v)(g+q) + q_l = (1-4)(g+1/3q) \quad (n_v=4 \text{ ks. taulukko 4.})$$

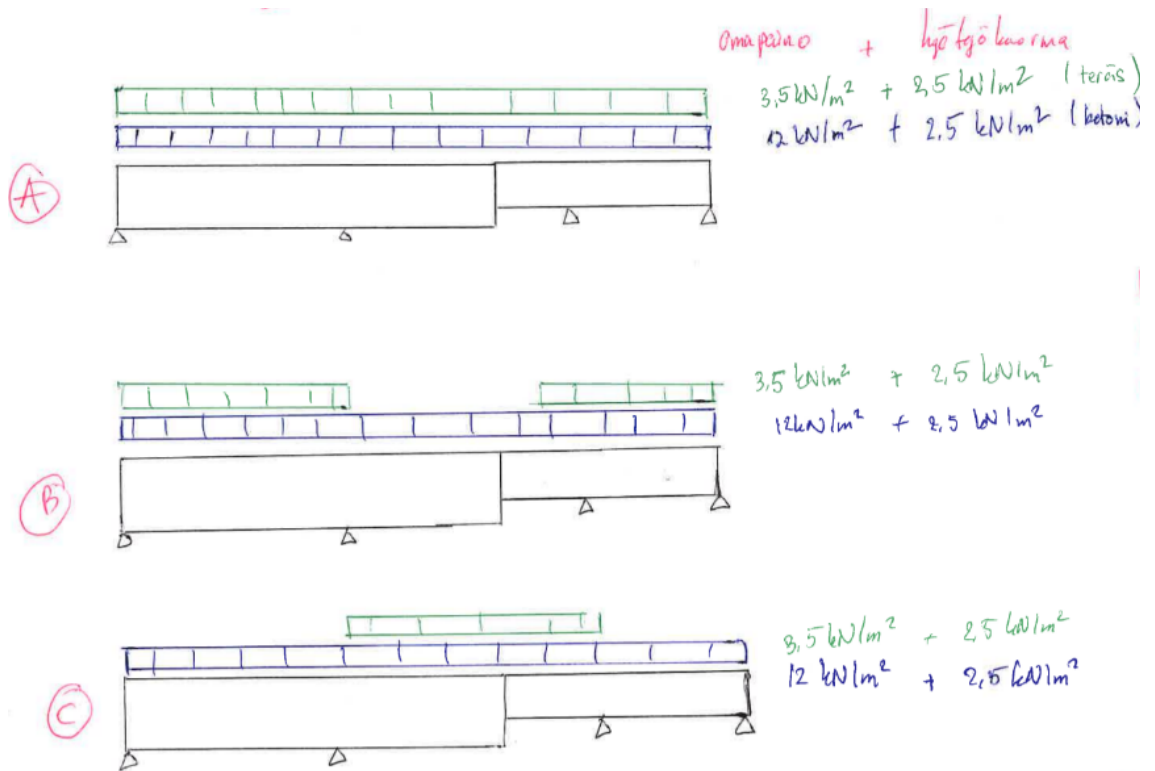
Seuraavassa taulukossa on esitetty lisää rakenteiden kuormitusyhdistelmien laskennassa käytettäviä kaavoja.

Taulukko 7. Rakenteiden kuormituksen yhdistelmiä 1 tasolle kallionväestösuojaan mukaan.

Yhdistelmät	Kaava
Käyttörajatila	$KRT = g_1 + g_2 + q_1 + q_2$
Murtorajatila	$MRT = 1,15(g_1 + g_2) + 1,5(q_1 + q_2)$
Onnettomuustila (Tärähdyskuorma +)	$ONN+ = (1+4) \times (g_1+g_2+1/3(q_1+q_2))$
Onnettomuustila (Tärähdyskuorma -)	$ONN- = (1-4) \times (g_1+g_2+1/3(q_1+q_2))$

(RIL 201-1-2017 asiakirjan mukaan)

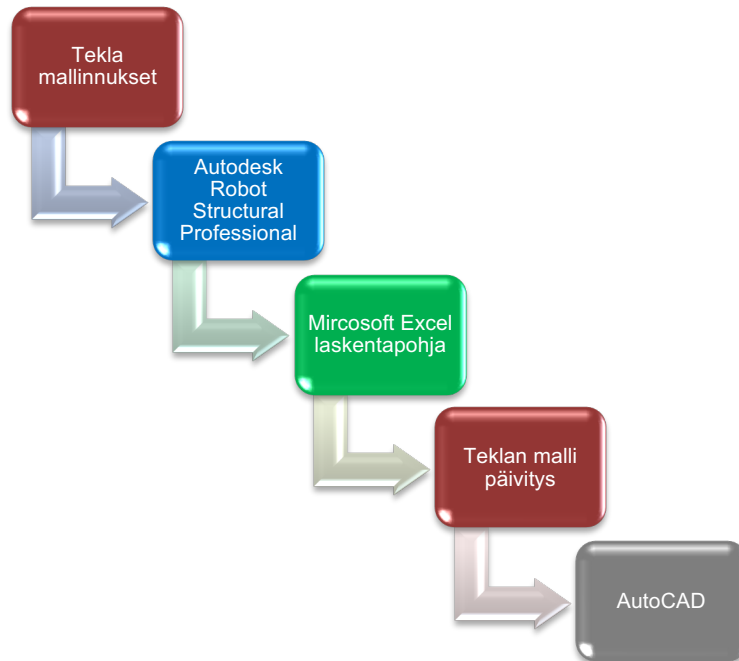
Teräsrakenteelle kuormituksen sijainti on tässä vaiheessa tuntematonta, ja siten se on määriteltävä ja mitoittava kaikille mahdollisuuksille. Seuraavaan kuvaan (kuva 5) on piirretty teräksen ja betonin omapainot ja niiden hyötykuormien sijainnit betonitasolle jokaisessa laskettavassa tapauksessa. Teräskuormitukset on piirretty vihreällä värillä, betonikuormitukset on piirretty sinisellä värillä ja betonirakenteet, jotka sisältävät betonilaatan ja sitä tukevat palkit, on piirretty mustalla värillä



Kuva 5. Kuormitusten sijainnit betonitasolle.

4 Suunnittelun toteutuminen

Seuraavassa kuvassa esitetään lyhyesti järjestyksessä tietokoneavusteisen suunnittelutyön vaiheet.



Kuva 6. Rakennesuunnittelun prosessi.

Tässä insinööriyössä on keskitytty ja tarkennettu Autodesk Robot Structural Professional -sovelluksen käytön kuin muita sovelluksia.

4.1 Autodesk ja Autodesk Robot Structural Professional:n kehitys

Autodesk on 30. tammikuuta vuonna 1982 perustettu yritys Mill Valleysssa, Californiassa, Yritys on John Walker:n ja Dan Drake:n perustama. Autodesk:n ensimmäinen tuote on John Walkerin kehittämä AutoCAD, joka on ollut myös yrityksen tunnetuin tuote ja sitä käytetään eniten insinöörien tai arkkitehtien tehdessä 2D-piirustuksia tai 2D-kuvia. Toinen kuuluisa Autodesk:n tuote on BIM sovellus Revit, jota käytetään tehdessä ja rakennettaessa tietokoneella visuaalisia 3D-rakennuksia tai rakenneosia käyttämällä 2D teknisten piirustuksia pohjana. Autodesk:n Structural Analysis for Revit kehitettiin Revit:n

sovellukselle, ja se toimii FEM analyysiohjelmana. Se on korvattu Robot Structural Analysis Professional sovelluksella myöhemmin. (6)

Autodesk Robot Structural Professional on tietokoneen rakenneanalyysi- ja koodien vaatimustenmukaisuuden tarkistustyökalu (Finite Element Method – englanniksi). Sovelluksella tutkitaan ja analysoidaan rakenteita tai kuormien vaikutuksia rakenneosille, kuten tukireaktioita, voimasuureita, rakenteiden jännityksiä, rasituksia, stabiilisuuksia tai siirtymiä. Autodesk Robot Structural Professional:n rakenneanalyysi on erittäin hyödyllinen ohjelma suunniteltaessa rakennuksia, rakenneosia tai siltoja.

4.2 Autodesk Robot Structural Professional:n käyttö

Autodesk Robot Structural Professional:n toimintaprosessi kuvaillaan seuraavassa kuvassa. Toimintaprosessi sisältää monta erilaisia vaiheita, jotka ovat järjestyksessä sovelluksen tarkistus, tukittujen rakenteiden mallinnus, kuormitusten määrittely, sauvojen voimasuureiden analyysi ja seinien pintojen tai laattojen pintojen analyysi.

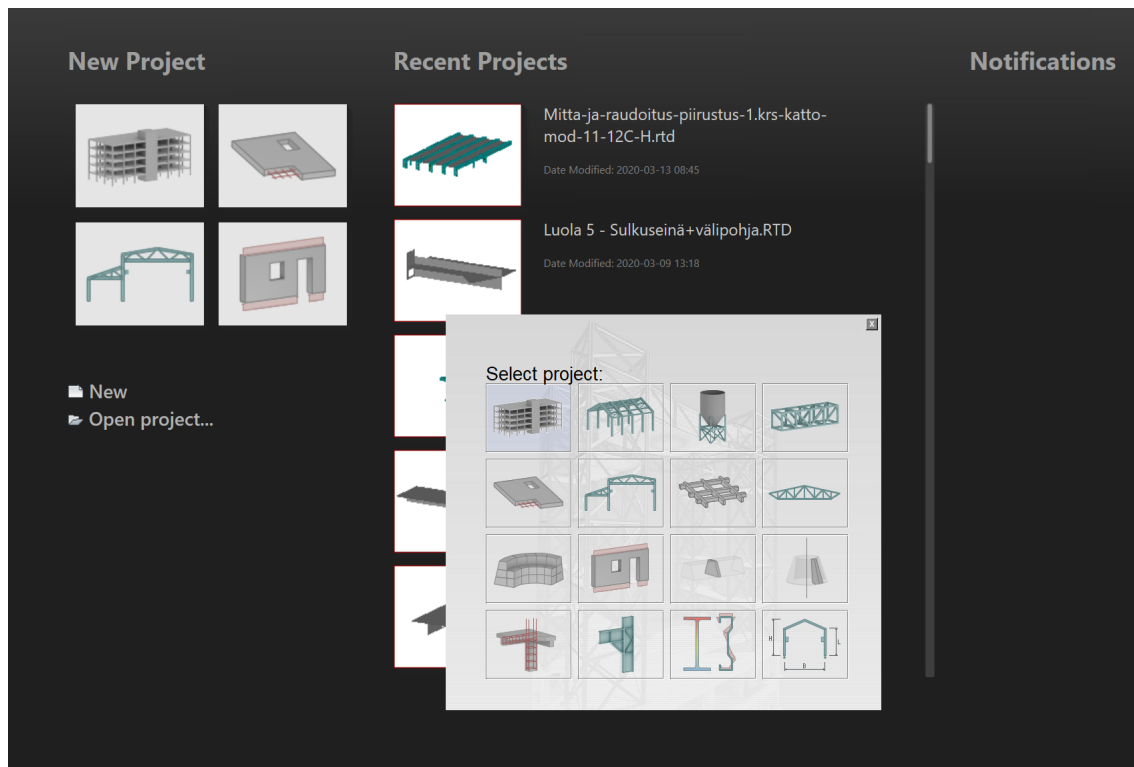


Kuva 7. Autodesk Robot Structural Professional:n toimintaprosessi.

4.2.1 Ohjelman alustavat tarkistukset ja valinnat

Ennen uuden projektin aloitusta Autodesk Robot Structural Professional:n sovelluksella, on helpompi tehdä työtä, jos on ensin käyty läpi ohjelman alustavat tarkistukset ja tehty alustavat valinnat. Nämä vaikuttavat merkittävästi tuleviin sovelluksella tehtäviin töihin.

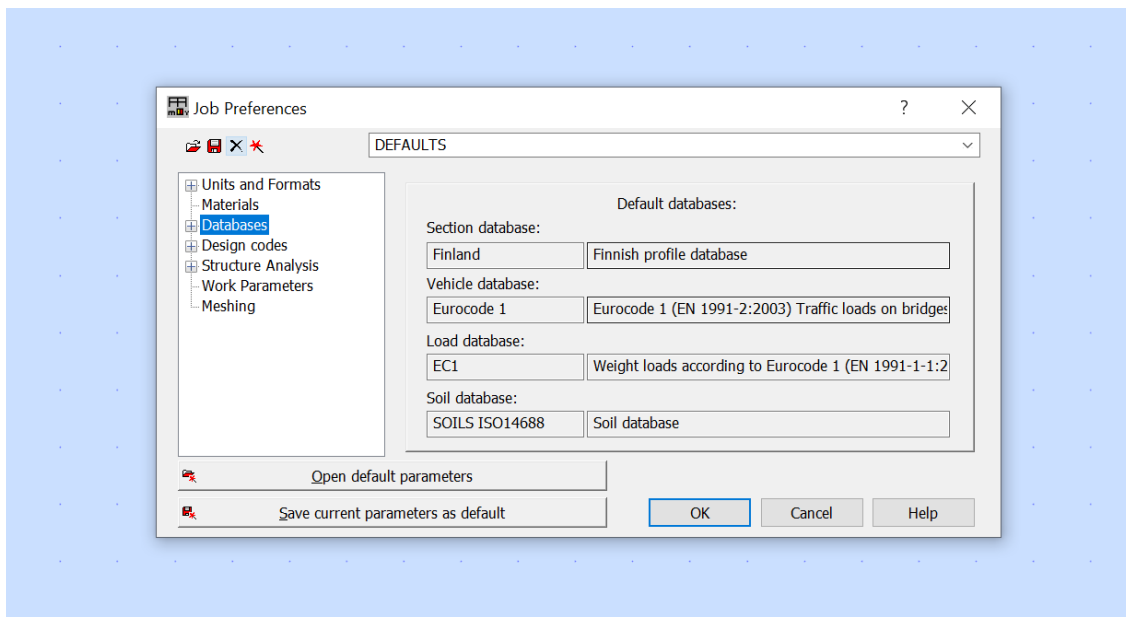
Autodesk Robot Structural Professional:n sovelluksella on monia erilaisia toimintoja, jotka sopivat erilaiseen tehtäviin kuten 2D-suunnitteluun tai 3D-suunnitteluun. Sovelluksen eri suunnittelutyytit ovat 3D-rakennussuunnittelu, 2D- ja 3D-runkosuunnittelu, rakenteen kuoren suunnittelu, 2D- ja 3D-ristikkopalkin suunnittelu, laatan suunnittelu ja seinän suunnittelu. Ensin on valittavarakenneyyppi ja sen pystyy vaihtamaan suunnittelun ja mallituksen aikana. Seuraavassa kuvassa on esitetty Autodesk Robot Structural Professional:n ohjelmassa alustavan rakennetyypin valinta.



Kuva 8. Autodesk Robot Structural Professional:n ohjelman alustavan rakennetyypin valinta.

Tässä insinööriyössä tutkitaan toimistotilaa, joka on tehty sovelluksen 3D-rakennussuunnitteluna. Tämä toiminto on ohjelman eniten käytetty valinta, koska se sisältää kaikki tarvittavat perustoiminnot yksikertaisen rakennuksen mallinukselle ja suunnittelutyölle. Yksinkertaisten elementtien ja rakennusosien voimasuureet, siirtymät, leikkausvoimat, momentit, kuormitusten yhdistelmillä erilaisilla suunnilla, voidaan tutkia ja analysoida Robotin sovelluksen 3D-rakennussuunnittelun toiminnolla.

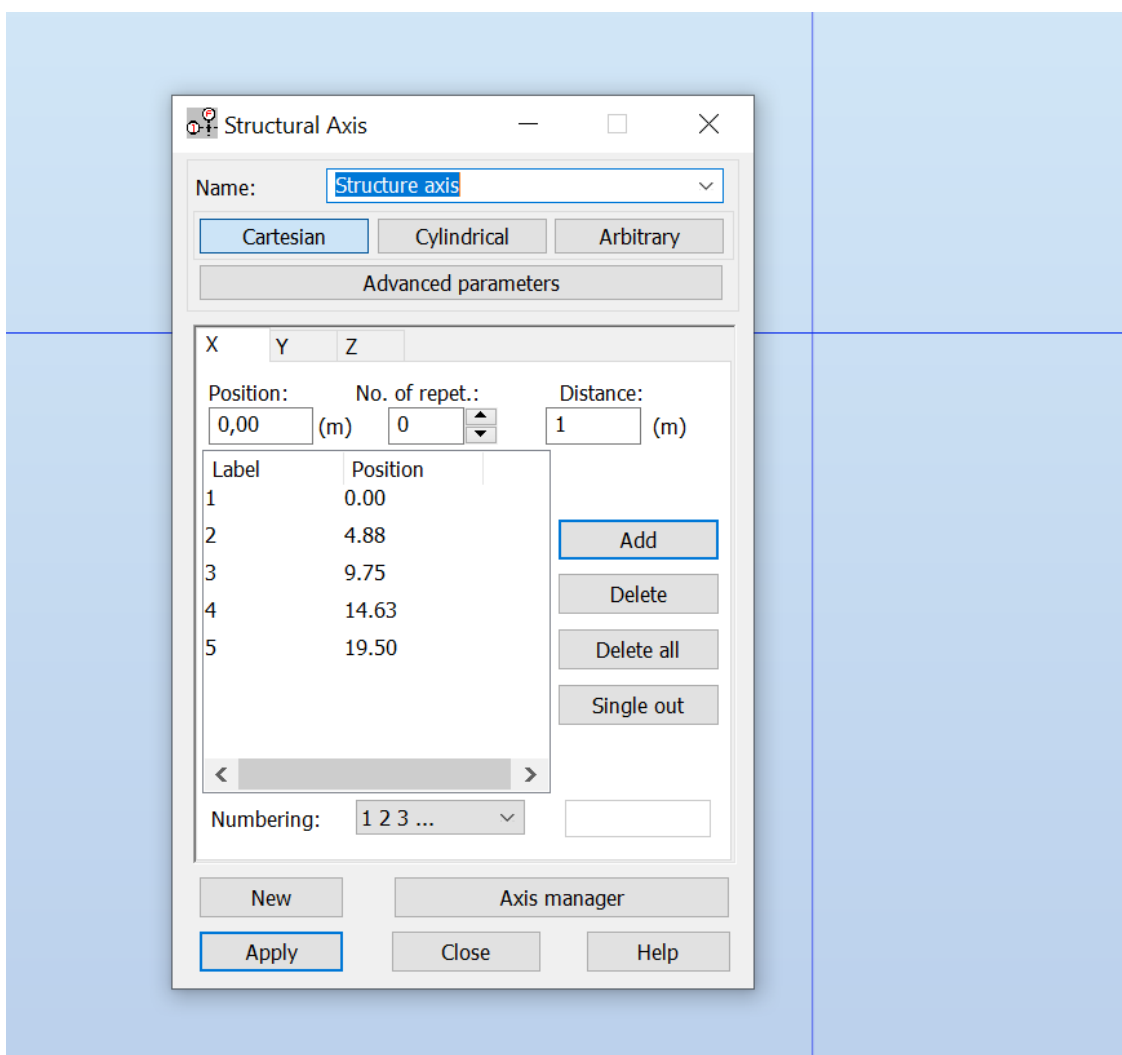
Toinen tärkeä asia alustavan tarkistuksen ja suunnittelutyypin valinnan vaiheessa, on suunnittelukohteen kuormien koodien tarkistus ja mittayksikön määrittely. Ohjelma tallentaa alustavat valinnat aina automattisesti. Kuitenkin, tämä vaihe on hyvä tarkistaa ennen koko projektien aloittamista ja välttää turhia virheitä mallinnuksessa. Jos Autodesk Robot Structural Professional:n sovellus on asennettu tietokoneeseen Suomen alueella, kaikki Suomen ja kansalliset liitteet ja Suomessa käytetyt Eurokoodit tulevat automattisesti valituiksi. Mittayksikkö on siis myös automattisesti valittu metrijärjestelmänä, jonka voi myös aina vaihtaa. Seuraavassa kuvassa on Autodesk Robot Structural Professional:n sovelluksen alustavat työtoiminnot (Job Preferences).



Kuva 9. Autodesk Robot Structural Professional:n sovelluksen alustavat työtoiminnot (Job Preferences).

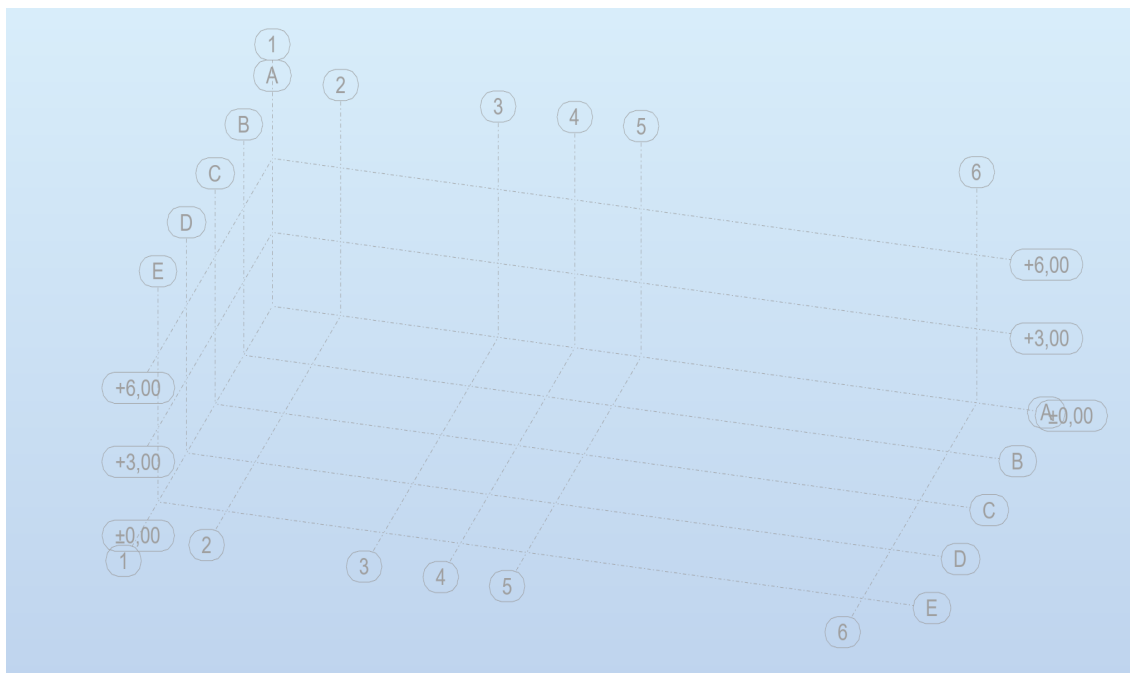
4.2.2 Mallintaminen

Autodesk Robot Structural Professional sovelluksen 3D-rakennussuunnittelussa, mallinnuksen oletustila on kolmiulotteinen kolmella akselilla (X, Y, X). Mallintaakseen täsmällisen rakenteen, moduuliviivasto on erittäin tärkeä. Koska rakenteet mallinnetaan moduuliviivaston päälle, niin rakenteiden mittojen tarkkuus ja niiden analysoitujen tulosten tarkkuus riippuu mallinnuksen moduuliviivastosta. Moduuliviivaston luonti on määriteltävä mahdollisimman tarkalleen noudattaen arkkitehdin mallia. Moduuliviivasto voidaan luoda Autodesk Robot Structural Professional:n moduuliviivaston ”Structural Axis” työkalulla. Seuraavassa kuvassa näytetään miten moduuliviivasto määritellään.



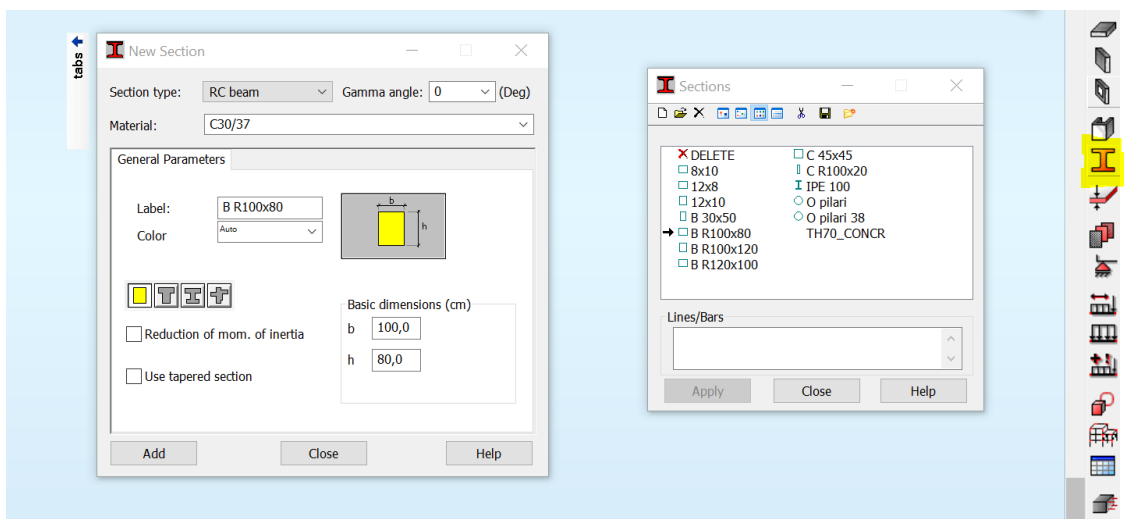
Kuva 10. Autodesk Robot Structural Professional:n moduuliviivaston työkalu.

Moduuliviivasto määritellään valitsemalla Structural Axis -valikko Autodesk Robot Structural Professional:n työkaluista. Sen jälkeen määritellään järjestyksessä X akselin, Y akselin ja Z akselin viivastot arkkitehdin piirustuksen mukaan. Kun kaikki arvot on syötetty ja voidaan luoda moduuliviivasto, painetaan "Apply" nappia. Seuraavassa kuvassa on Savilahden liikunta -ja tapahtumakeskuksen toimistotilaan määritelty moduuliviiva.



Kuva 11. Savilahden liikunnan -ja tapahtumakeskuksen toimistotilan moduuliviivasto.

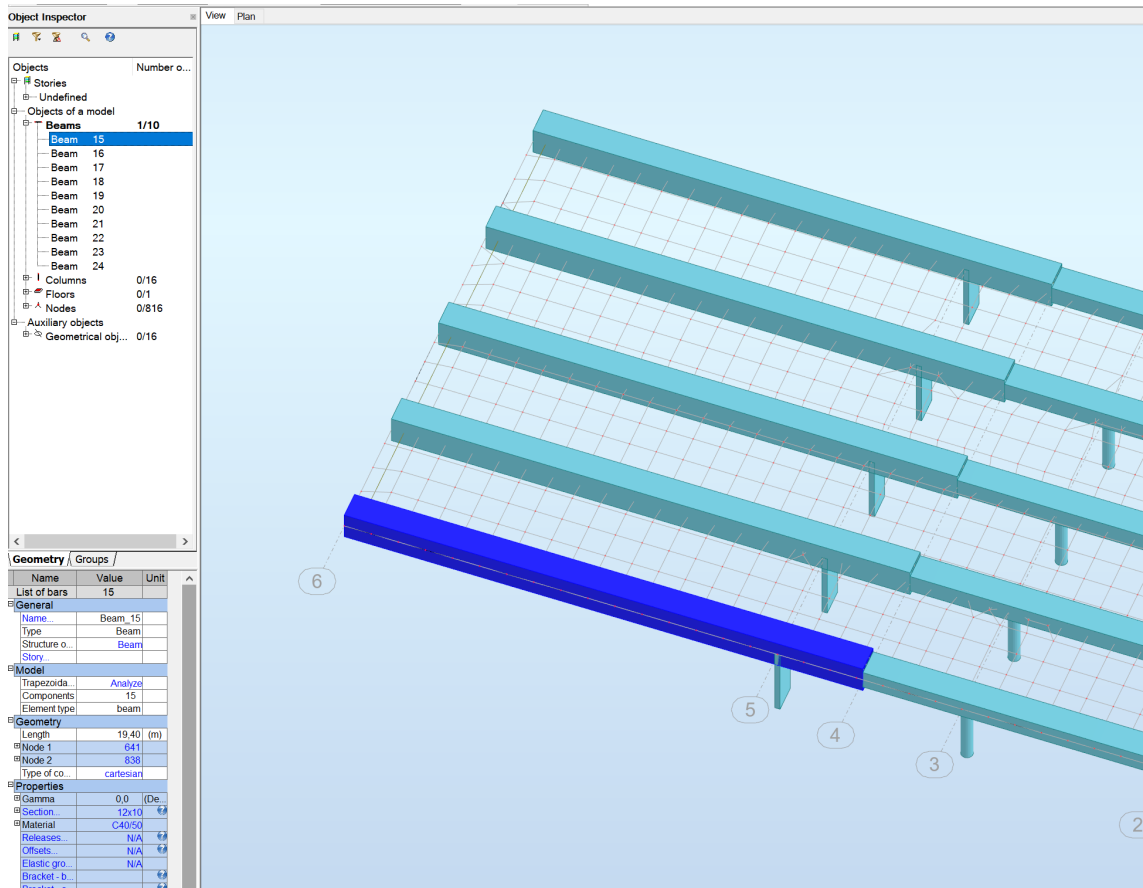
Kun moduuliviivasto on luotu, voidaan seuraavaksi aloittaa mallinnustyö. Jokainen malli sisältää erilaisia elementtejä, kuten seiniä, pilaria, palkkeja, laattoja ja niin edelleen, erilaisilla mitoilla. Sen takia, jotta mallinnustyö voidaan tehdä sujuvammin ja tehokkaammin, on elementtien profiilit lisättävä Autodesk Robot Structural Professional:n "Sections" ja "Thickness" työkaluihin. "Sections" työkaluun voidaan lisätä kaikki tarvittavien sauvaelementtien profiilit ja "Thickness" työkaluun voidaan lisätä kaikki tarvittavien laattojen paksuudet mallille. Kuitenkin nämä vaiheet voidaan aina tehdä myös myöhemmin, mallinnuksen aikana. Seuraavassa kuvassa on kuvattuna elementtien profiilien määrittämisen prosessi



Kuva 12. Elementtien profiilien määrittäminen prosessi.

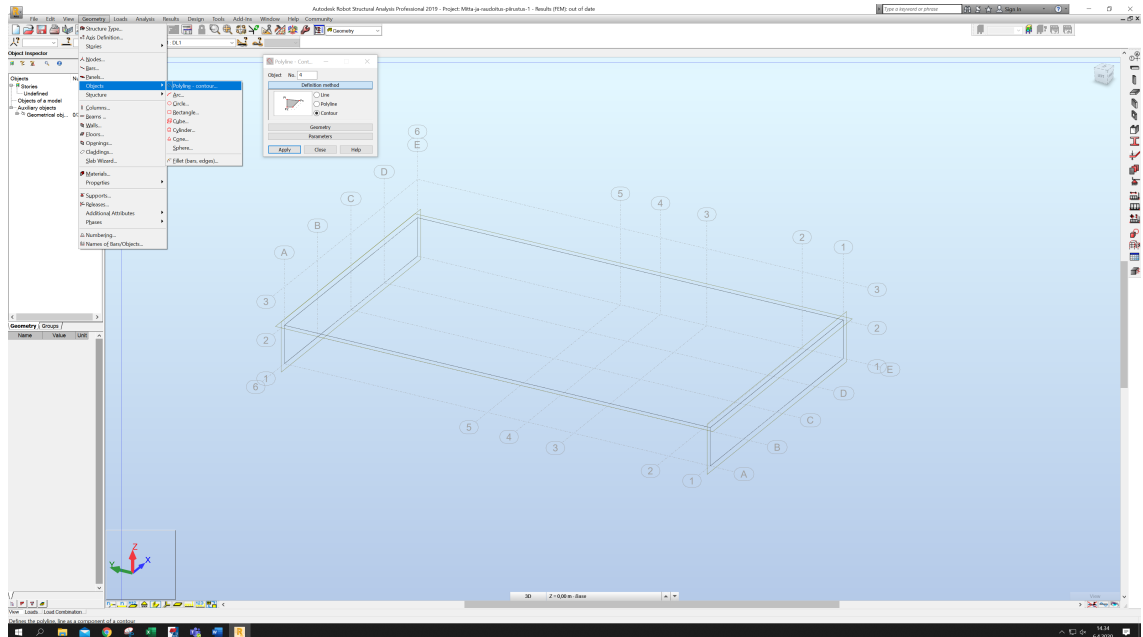
Kun moduuliviivasto on luotu, määritellään tarvittavat elementtien profiilit. Seuraavassa vaiheessa voidaan tehdä mallin luonti. Tässä insinööriyössä todellisen Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotilan mallia käytetään esimerkkinä kuvailemaan lyhyesti Autodesk Robot Structural Professional:n mallituksen prosessia.

On myös tärkeä ymmärtää Autodesk Robot Structural Professional:n elementtien järjestys. Jokainen elementti on merkitetty numerolla, esimerkiksi palkki numero 15 tai seinä numero 27. Elementtien listaa muodostuu sovelluksen työtilan vasemmalle puolella. Seuraavassa kuvassa on esitetty miltä elementtilista näyttää sovelluksessa.

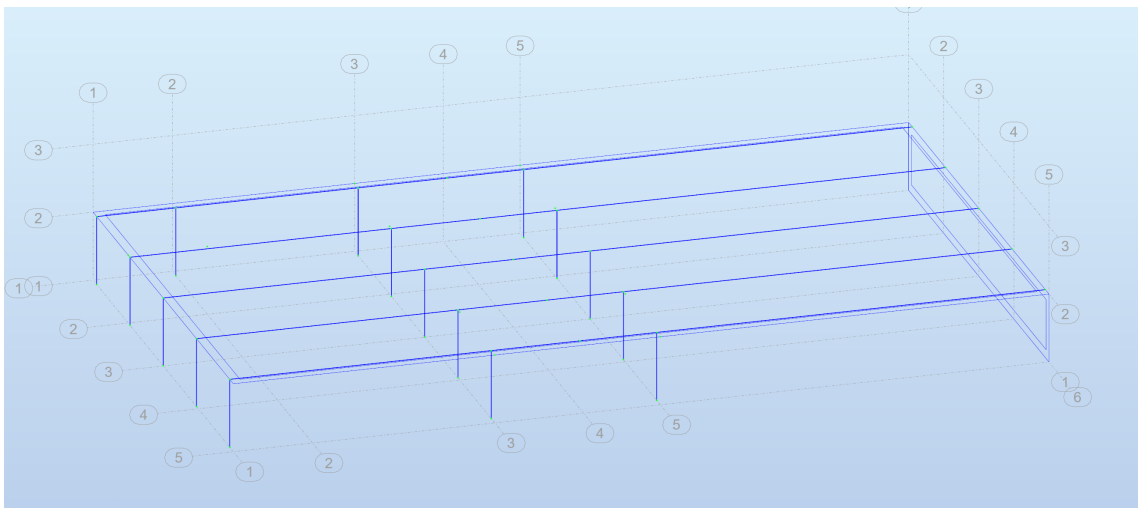


Kuva 13. elementtien listaa on sovelluksella "Object Inspector".

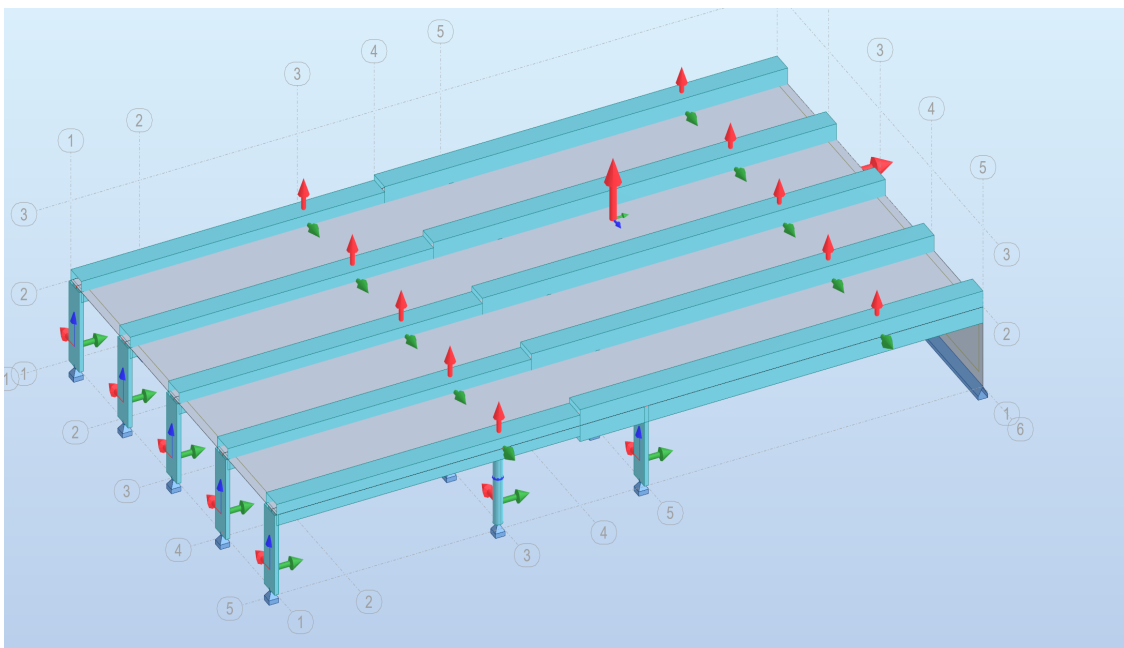
Autodesk Robot Structural Professional:n mallin elementit voidaan luoda ensi apuviivoilla ja apumuodoilla. Elementit kuitenkin voidaan mallintaa vaikka suoraan moduulivii-vastolle, mutta apuviivoilla ja apumuodoilla on tehokkaampi ja nopeampi tapa tehdä välttääkseen virheitä mallituksen aikana. Apuviivat, joille tulee sauvaelementtejä tai apumuodot, joille tulee seiniä ja laattoja, löytyvät "Geometry – Object" työkalusta. Sen jälkeen elementteihin tulee vaihtaa piirretyt apuviivat ja apumuodot "Panels, Beam, Columns, Walls, Floors" työkalulla. Seuraavissa kuvissa näytetään järjestyksessä, miten apuviivat ja apumuodot on piirretty ja vaihdettu elementeille.



Kuva 14. "Geometry – Object" työkalu ja toimiston mallin runko apumuodoilla.



Kuva 15. Apuviivat ja apumuodot on piirretty ja vaihdettu elementeille.

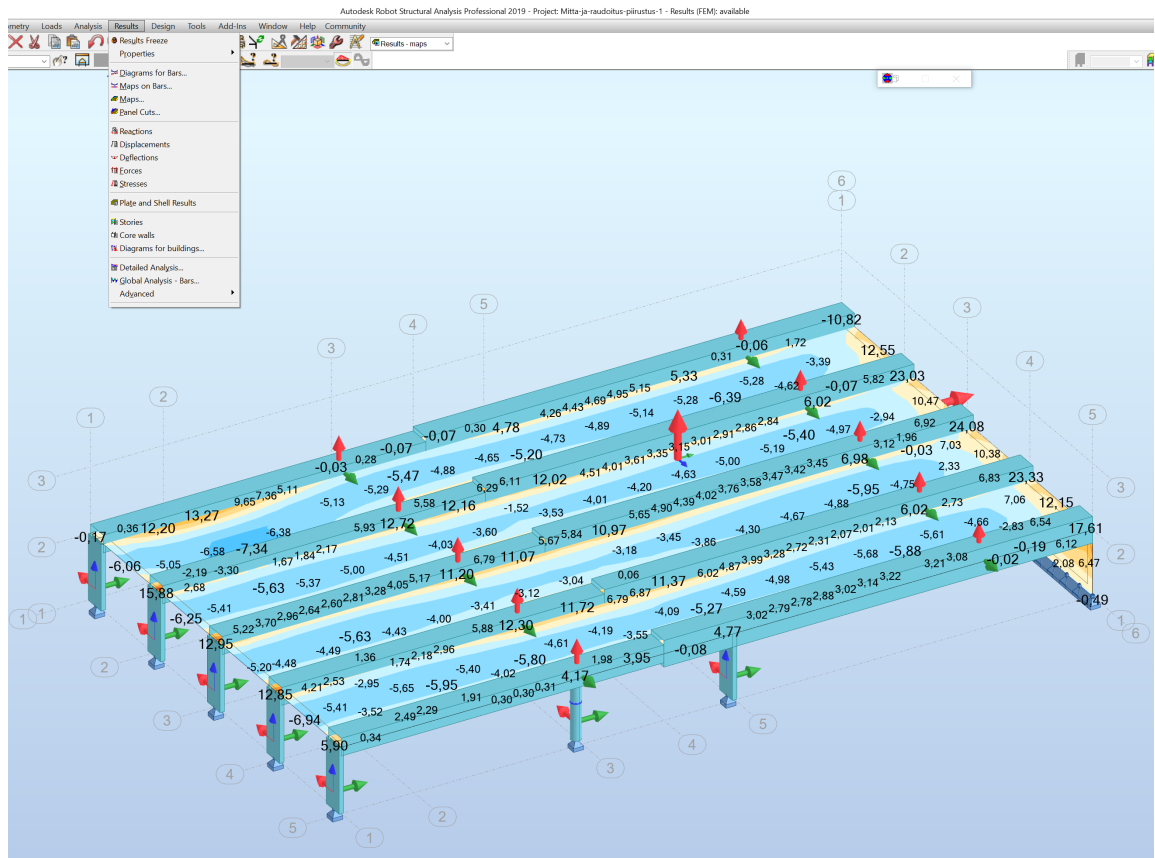


Kuva 16. Autodesk Robot Structural Professional:n toimistotilan FEM-malli.

4.2.3 Rakenteiden voimasuureiden analysointi

Autodesk Robot Structural Professional:n tärkein käyttötarkoitus on saada automaattisesti statiikan tulokset käyttämällä sovelluksen FEM-laskentaa. Kun Autodesk Robot Structural Professional:n malli on valmis, ohjelma aloittaa FEM-laskennat ja antaa kaikki tarvittavat tiedot suunnittelutyölle jokaisesta mallin elementistä muutamassa sekunnissa. Kohteen rakennesuunnittelun laatiminen aloitetaan ohjelman tulosten avulla, kun kaikki elementit voidaan helposti tarkistaa, tutkia ja analysoida. Lisäksi toinen FEM-sovelluksen ehdoton hyöty, joka voi säästää merkittävästi työaikaa verrattuna käsilaskennalliseen suunnitteluun, on sen kyky antaa uudet arvot muutetuilla lähtötiedoilla laskematta kaikkea uudestaan. Laskentatehtävien mukaan, joka mallin antama tulos ohjelmassa tutkitaan ja analysoidaan erikseen. Tässä insinööriyössä tutkitaan Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotilan raudoitettua betonin suunnittelusta kaikki kohteen elementtien leikkausvoimat, rakenteiden momentit, normaalivoimat, siirtymät ja keskitetyt tukireaktiot.

Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimistotilan sauvarakenteita ovat laattaan tuettu palkit ja pilarit. Autodesk Robot Structural Professional:n sovelluksella niiden tulokset löytyvät tulostyökalusta "Result-Diagrams". Laatan ja seinien tulokset löytyvät tulostyökalusta "Result-Maps". Nämä työkalut antavat sauvojen ja pintojen tarvittavat tiedot kuvina suunnittelua varten, kuten momentit, leikkausvoiman, normaalivoiman ja siirtymän. Seuraavassa kuvassa näytetään "Result" työkalu, josta löytyy sauvojen ja pintojen kuvia suunnittelulle.



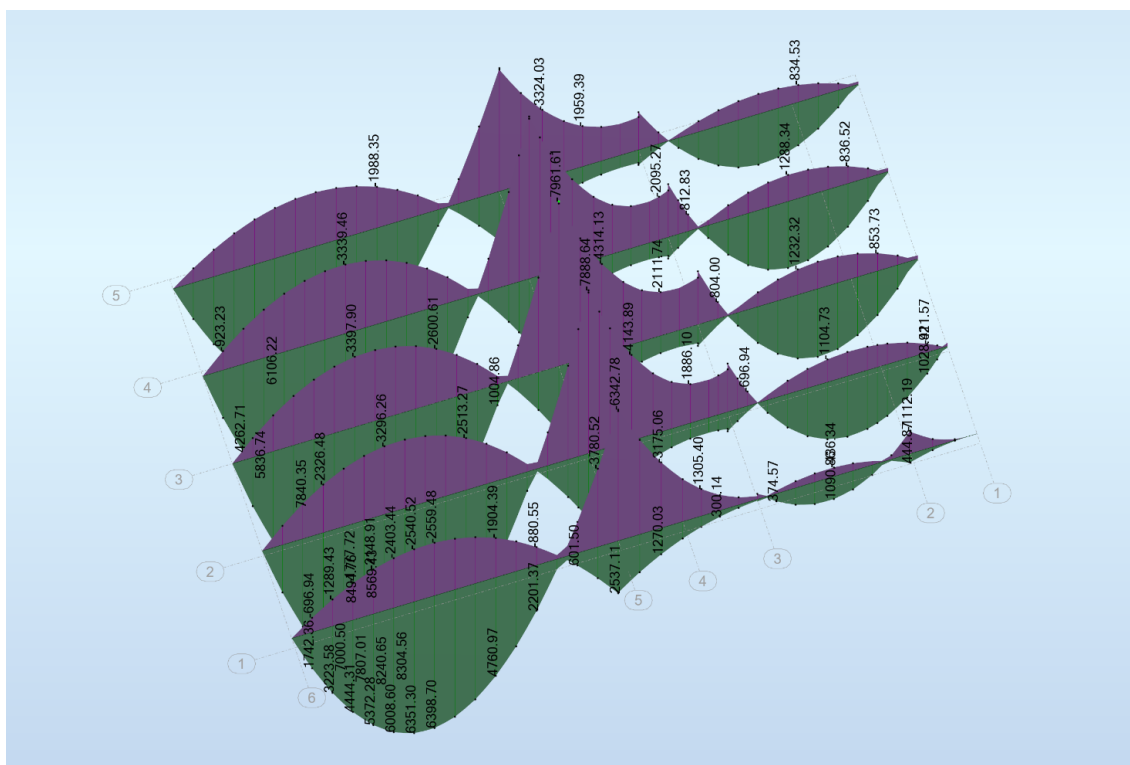
Kuva 17. "Result" tulostyökalu.

5 Rakenteiden voimasuureiden tulokset sovelluksesta

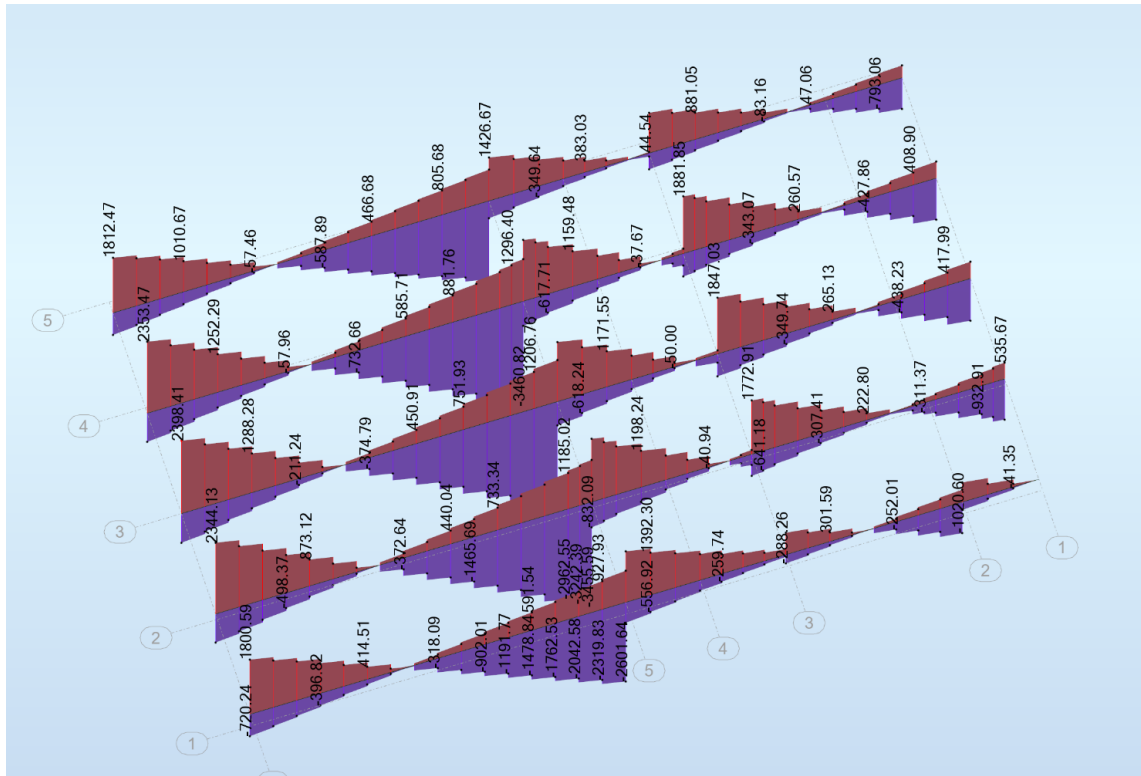
5.1 Palkkien voimasuuret

Savilahden liikunta -ja tapahtumankeksen toimistotilan raudoitettujen palkkien suunnittelua varten on kaikki palkit ensin valittava ja sitten niiden tulokset on tarkistettava ”Result-Diagrams for Bars” toiminnolla. Seuraavaksi palkkien voimasuureet, kuten momentti ja leikkausvoimat, mitkä eri kuormituksen yhdistelmät aiheuttavat, on analysoitava.

Saadakseen palkkien pääraudoitusten tarvittavat tiedot suunnittelua varten, on sauvojen momenttia analysoitava ja samoin palkkien leikkaushakojen raudoitusten suunnittelua varten on leikkausvoimat analysoitava. Sauvojen siirtymän tarkistus käyttörajatilassa, joka tulee tehdä esikoroitetun valutyön suunnittelua varten, löytyy ”Displacement” sovelluksen ”Result-Diagrams for Bars” taulukosta.



Kuva 18. Palkkien momentit.

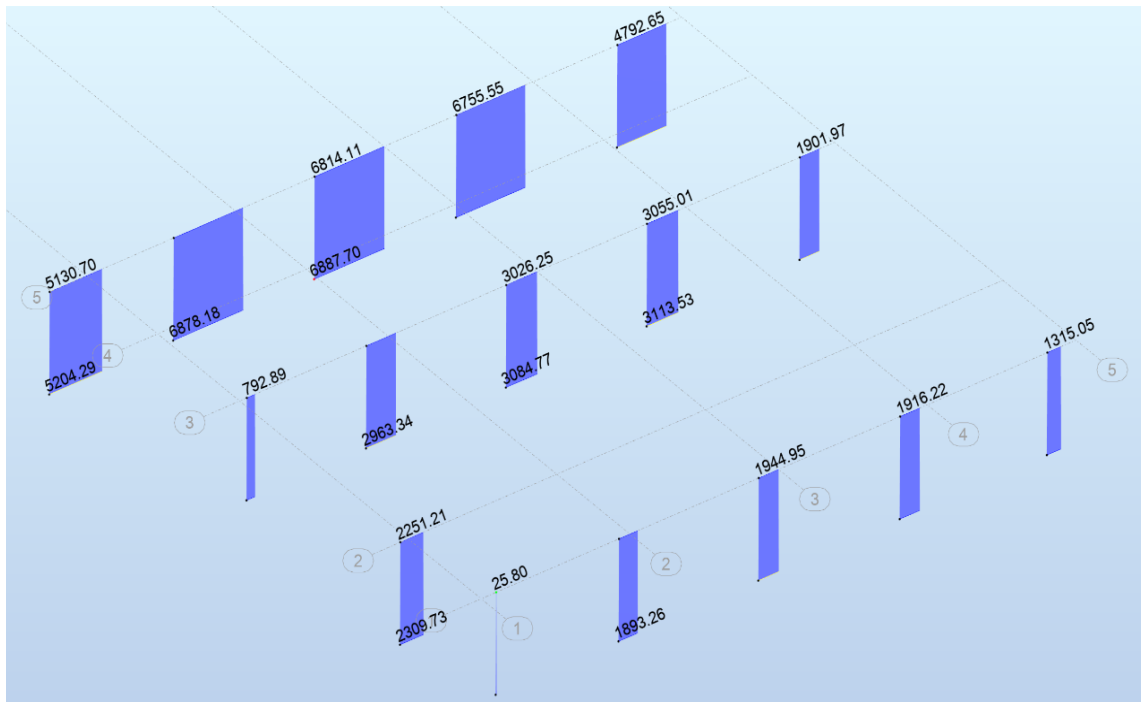


Kuva 19. Palkkien leikkausvoimat.

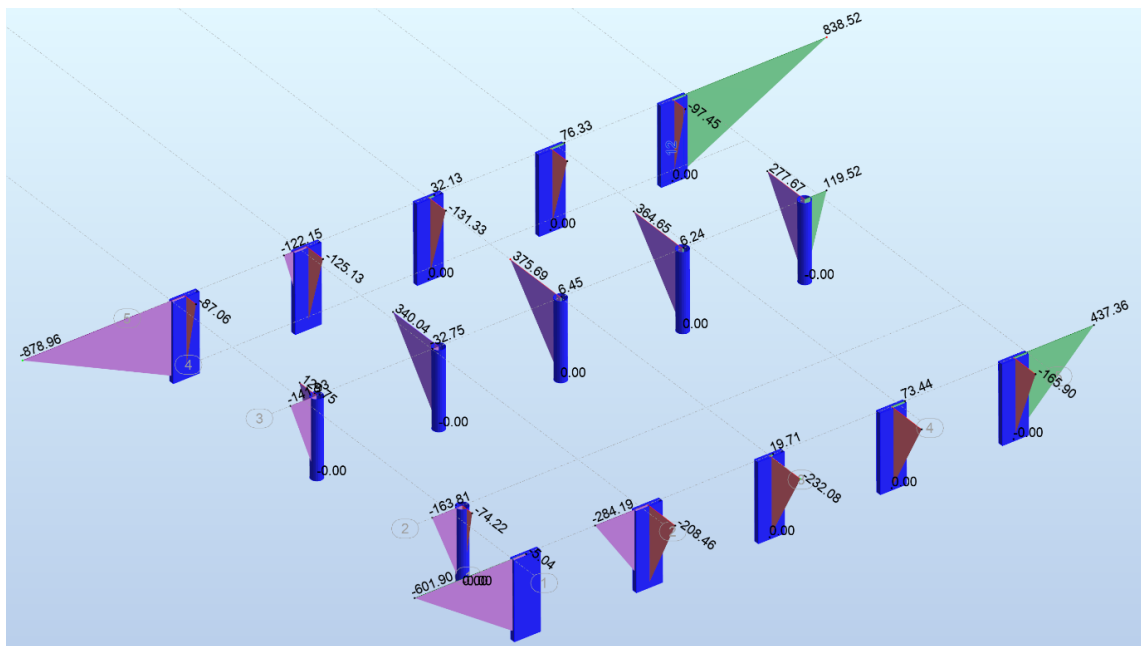
5.2 Pilarien ja anturoiden voimasuuret

Savilahden liikunta -ja tapahtumakeskuksen toimistotilan raudoitettujen pilarien ja anturoiden suunnittelua varten on kaikki palkit ensin valittava ja sitten niiden tulokset on tarkistettava "Result-Diagrams for Bars" toiminnolla. Pilarien anturasuunnittelulle käytetään samaa tietoa kuin pilarin suunnittelussa käytetään. Sen takia pilarien momentit ja normaalivoimat pystysuunnassa, joita kaikki eri kuormituksen yhdistelmät aiheuttavat, on analysoitava.

Saadakseen pilarien ja niiden anturoiden pääraudoitusten tarvittavat tiedot suunnittelua varten on sekä pilarien momentti X-Y -suunnassa että normaalivoima pystysuunnassa analysoitava. Pilarien hakaraidoitus on suunniteltava Eurokoodin mukaisesti pääraudoitukseen.



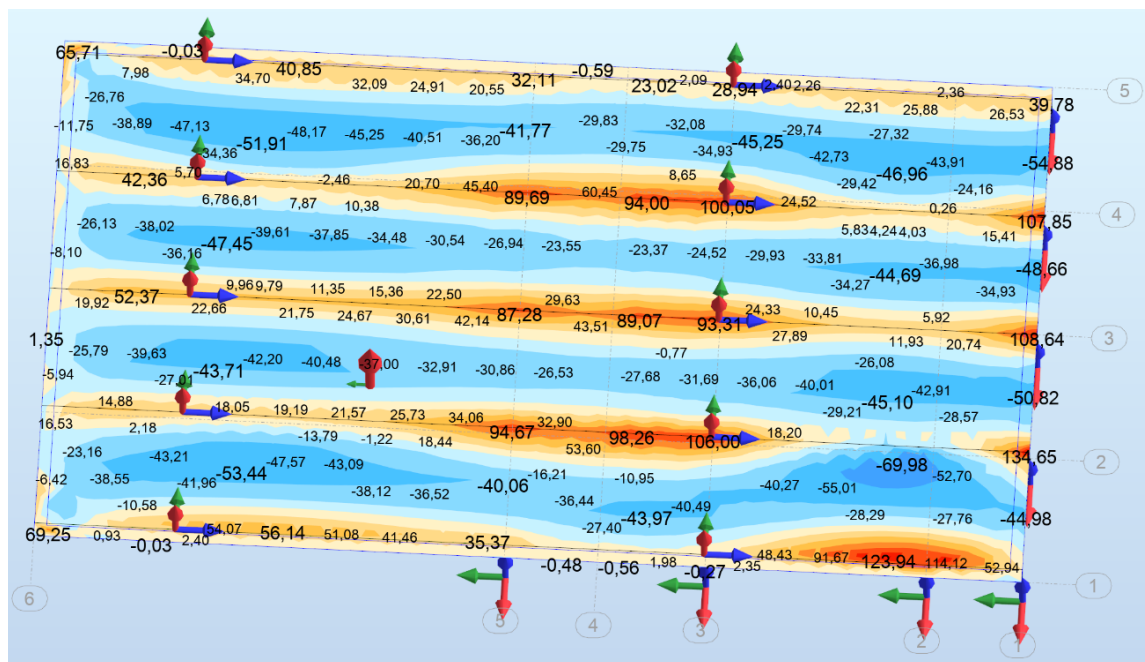
Kuva 20. Pilarien normaalivoimat.



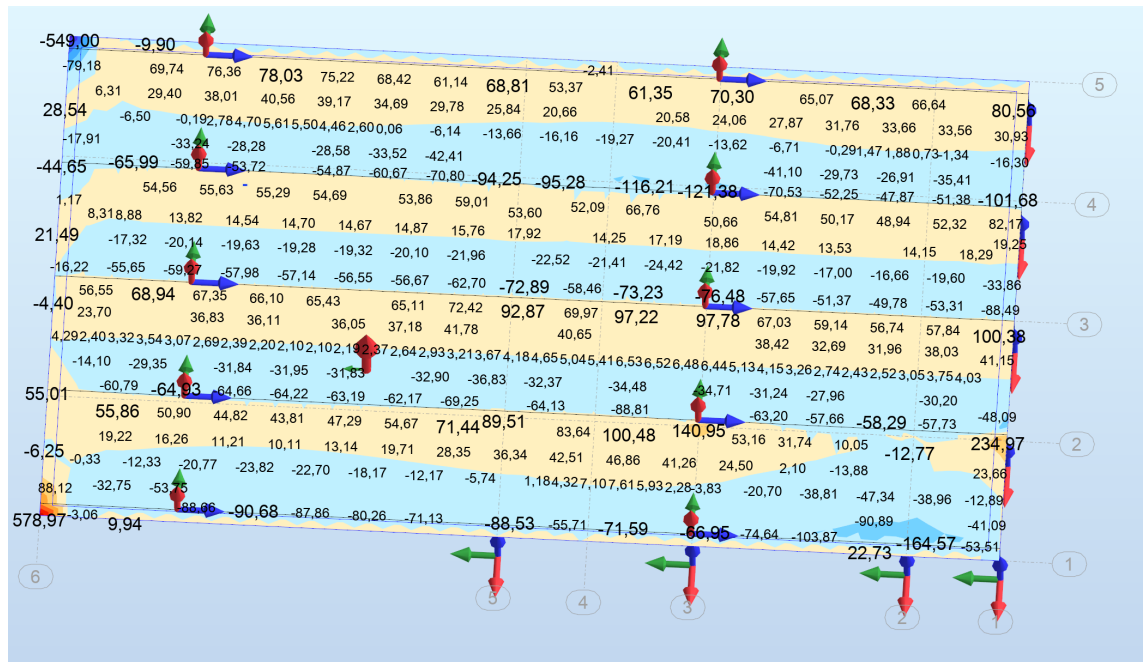
Kuva 21. Pilarien momentit.

5.3 Laatan voimasuuret

Autodesk Robot Structural Professional:n tulostyökalusta ”Result-Maps”, laatan molempien suuntien voimasuureiden kartat löytyvät suoraan. Niiden arvojen mukaan voidaan helposti suunnitella laatan raudoituksia Microsoft Excel:lla laskemalla voimasuureita MBP-menetelmällä (Massiva Betong Plattor), kaistamenetelmällä tai myötöviivateoriolla. Autodesk-sovelluksesta voidaan huomata helposti, että laatta tulee yhteen suuntaan kantavaksi laataksi, kun palkki on lisätty ja kohdistuvat voimat laatalle siirtyvät palkkien yläpäille. Lisäksi, vaikka laatan mitat ovat isoja (noin 15m), palkkien avulla laatan jänneväli merkittävästi pienenee (3m). Sen takia laatan leveydelle vaikuttava momentti kaksikymmentä viisi kertaa pienemmäksi ja laatan leveydelle vaikuttava leikkausvoima pienenee viidesosaan. Seuraavissa kuvissa näytetään laatan momentin pinta ja laatan leikkausvoiman pintaa pituussuunnassa. Leikkaus laatassa on hyvin pieni, joten laatta voidaan suunnitella leikkausraudoittamattomana.



Kuva 22. Laatan momentit X-suunnalla.



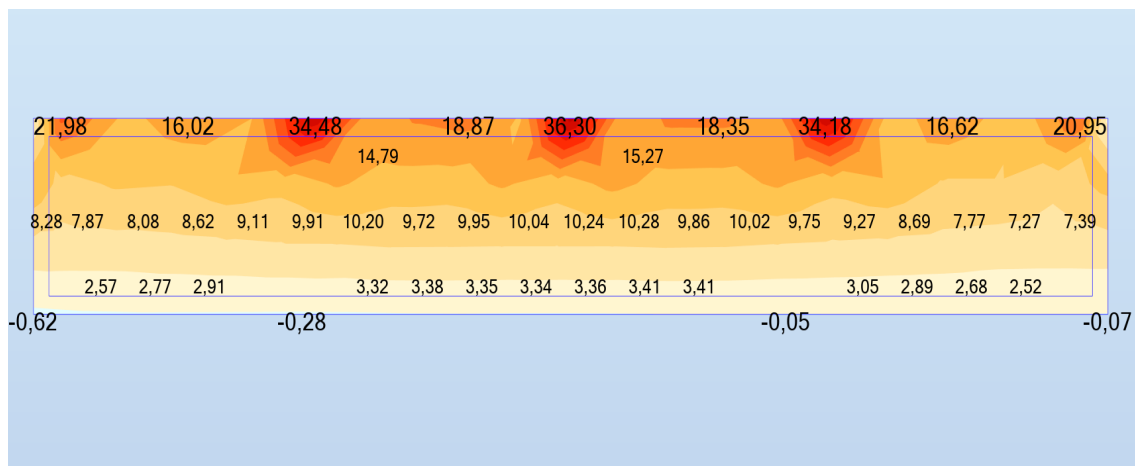
Kuva 23. Laatan leikkausvoimat X-suunnalla.

5.4 Seinien voimasuuret

Seinän voimasuureiden tiedot löytyvät samalta työkalulta "Result-Maps" kuin laatan voimasuureidenkin tiedot. Seinän suunnittelua varten tarvitaan tietoa sen momentista ja normaalivoimasta. Nämä tiedot saadaan Autodesk Robot Structural Professional:n avulla, ja sen jälkeen voidaan edelleen mitoittaa seiniä Microsoft Excel:n pohjalla. Jos rakenne sisältää seinän anturoita, voidaan käyttää seinän voimasuureiden tietoja mitoitettavissa anturoiden raudoituksia ja mittoja. Seinässä voima kohdistuu usein palkkien alla olevalle alueelle. Sen takia usein suunnittelussa palkkien alla oleva seinä lasketaan ja raudoitetaan samalla tavalla kuin pilarit. Turvallisuuden vuoksi suunnittelussa palkkien alla olevalle alueelle ei voida tehdä reikiä tai ovia. Kuten kuvassa, FEM-malli näyttää normaalivoiman seinän pystysuunnassa ja palkkien alla olevan alueen pitää ottaa merkittävästi enemmän voimia kuin muilla alueilla. Seiniä voidaan suunnitella pilarina käyttämällä Excel:n Skol:n pilaripohjaa tai seininä käyttämällä elementtisuunnittelu.fi Excel:n seinäpohjaa selaimen kautta.



Kuva 24. Kantavan seinän normaalivoima pystysuunnassa.



Kuva 25. Kantavan seinän momentit pystysuunnassa.

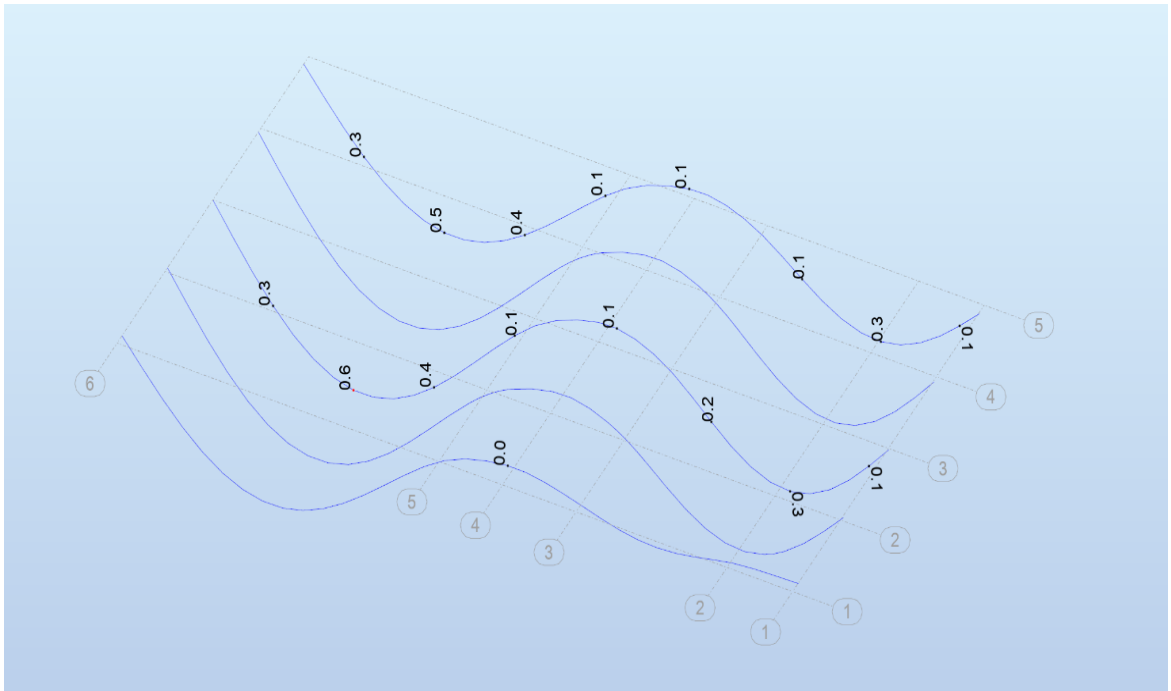
6 Mitoitukset

Sovellusten avulla saatavat mitoitukset ovat erittäin hyödyllisiä sekä tarkkoja ja auttavat suunnittelijoita säästämään paljon aikaa ja välttämään käsin laskennan virheitä. Todellisissa projekteissa rakenteiden mitoituksia ja rakennesuunnittelutöitä tehdään aina laskentasovelluksilla. Esimerkkinä tällaisista sovelluksista mainittakoon Microsoft Excel ja MathCad. Voimasuureiden lähtötiedot selvitetään FEM-ohjelmilla kuten Autodesk Robot Structural Professional, Jigi, SCIA tai RFEM. Monilla yrityksillä ja insinööritoimistoilla voi olla myös omia Excel- ja MathCad laskentapohjia. Tässä opinnäytetyössä käytetään Autodesk Robot Structural Professional:n FEM tuloksia ja Excel:n Eurokoodi-laskentapohjaa Skol, mitoittaessa palkkeja, pilareita ja anturoita. Seiniä mitoitetaan erikseen Microsoft Excel:n ilmaisen elementtiensuunnittelu.fi sivustolla olevan väliseinien laskentapohjalla.

6.1 Palkkien suunnittelu

Palkkien raudoitus riippuu niiden sijainnista. Esimerkiksi keskipalkkien kestävyys pitää olla suurempi kuin reunapalkeilla, koska keskipalkkien kuormitus on suurempi ja palkkiin kohdistuvat momentit ja leikkausvoimat kasvavat sen myötä.

Palkkien taipumat tarkistetaan Autodesk Robot Structural Professional ohjelman ”displacement” toiminnolla, betonin muotin ensikorotuksen vuoksi. Kuvasta 26 ilmenee, miltä palkkien taipumat näyttävät sovelluksessa.

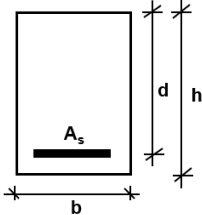
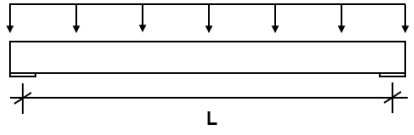
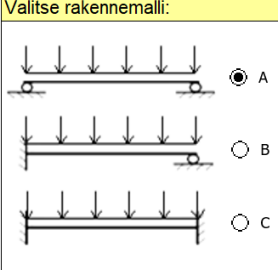


Kuva 26. Palkkien taipuma käytörajatilassa (maksimi 0.6cm tai 6mm).

6.1.1 Palkkien pääraudoitus

Tärähdyskuormien takia toimistotilan kuormituskestävyyden tulee olla jopa kolme kertaa suurempi kuin normaalirakenteisessa kallionväestönsuojassa. Palkkien poikkileikkaukset ovat 1000 mm x 800 mm ja 1000 mm x 1200 mm ja pituudet ovat 15 m ja 16 m. Pääraudoitukset tehdään korkealaatuisella betonilla C50/60 ja halkaisijaltaan 25mm - 32mm terästangoilla, jotta rakenteet kestäisivät mahdollisen onnettomuustilanteen aiheuttaman kuormituksen. Käyttämällä Autodesk Robot Structural Professional ohjelmasta saatuja momenttien arvoja, voidaan lopulliset pääraudoitukset suunnitella SKOL:in Mircosolf Excel laskentapohjalla.

Autodesk Robot Structural Professional ohjelmalla saatujen tulosten mukaan, suurin puristusmomentti 8600 kNm sijaitsee keskipalkin alapinnassa. Alemmassa kuvassa näytetään Mircosolf Excel:n SKOL- laskentapohjan palkkien raudoituksen tiedot käyttämällä Autodesk Robot Structural Professional:n suurimman momentin tietoja keskipalkin alapinnalle.

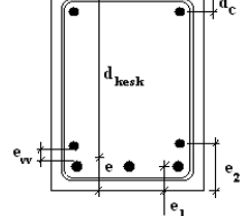
PONTEK oy		Rakennelaskelma	
Solwers Oyj		Tekijä:	Sivu: 1 (3)
Rakennuskohde:		Päiväys:	
Työ nro:		Sisältö:	Sijainti:
B6 Teräsbetonisen suorakaidepoikkileikkauksen mitoitus Versio 1.54			
Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011			
Geometria			
Palkin kokonaispituus	$L_{tot} =$	15000 mm	
Viihteet		15 mm	
Tukipinnan pituus	$t =$	200 mm	
Korkeus	$h =$	1200 mm	
Leveys	$b =$	1000 mm	
Jänneväli	$L =$	14770 mm	
Poikkileikk. pinta-ala	$A_c =$	1200000 mm ²	
Poikkileikkauksen piiri		4400 mm	
		Valitse rakennemalli: 	
HUOM! Palkin rasitusten laskennassa käytetyn rakennemallin tulee vastata yllä valittua rakennemallia.			
Rasitukset			
MRT laskentamomentti	$M_d =$	8600,0 kNm	HUOM! Taivutusmomenttien ja leikkausvoiman arvot tulee määrittää erikseen standardien ja ohjeiden mukaisesti.
MRT laskentaleikkausvoima	$V_{Ed} =$	170,0 kN	
KRT laskentamomentti, om.tai tav.yhdistelmä	$M_{k1} =$	40,0 kNm	
KRT laskentamomentti, pitkäaikaisyhdistelmä	$M_{k2} =$	40,0 kNm	
Onko M_{k2} yhdistelmässä lyhytaikaiskuormia:		eI	
Lyhytaikaiskuorman osuus:		60 %	
Kuormitusyhdistelmän valinta:		Pitkäaikais	
Käyttörajan laskentamomenttien suhde:	$\eta_1 =$	1,00	
Materiaali ja ympäristö			
Rakenneluokka	1	Kiviaineen maksimi raekoko	$d_p =$ 16 mm
Betonin lujuus	C50/60	Ympäristön suhteellinen kosteus	RH = 60 %
Sementtilaji	N	Betonin ikä tarkasteluajankohtana	$t =$ 50000 vrk
Rauditus	A600HW	Betonin ikä kuorman alkaessa	$t_0 =$ 28 vrk
Rasitusluokka	XC1	Sallittu mittapoikkeama	$\Delta c_{dev} =$ 10 mm
Suunnitteluiä	50 vuotta	Betonipeitteen vähimmäisarvo	$c_{min} =$ 32 mm
Haihtumiselle altis piiri $=u=$	4400 mm	Betonipeitteen nimellisarvo	$c_{nom} =$ 42 mm
		Betonipeite haan pintaan	$c =$ 50 mm
$f_{ck} =$ 50,00 MN/m ²	$f_{cm} =$ 58,00 MN/m ²	$f_{cd} =$ 31,5 MN/m ²	
$f_{ctm} =$ 4,07 MN/m ²	$f_{ctk} =$ 2,85 MN/m ²	$f_{ctd} =$ 2,11 MN/m ²	
$f_{ctm,fi} =$ 4,07 MN/m ²	$f_{yd} =$ 545,45 MN/m ²	$\epsilon_{cu2} =$ 3,50 ‰	
$f_{yk} =$ 600,00 MN/m ²	$\lambda =$ 0,80	$\phi(t, t_0) =$ 1,30	
$E_{cm} =$ 37278 MN/m ²	$\eta_2 =$ 1,00	$E_{c,eff} =$ 16201 MN/m ²	
$E_s =$ 200000 MN/m ²		$\epsilon_{sd} =$ 2,73 ‰	

Kuva 27. Palkin lähtötiedot Mircosolf Excel:n SKOL:n laskentapohjalla.

Solwers Oyj		Päiväys:	
Rakennuskohde:	Työ nro:	Sisältö:	Sijainti:

Teräsbetonisen suorakaidepoikkileikkauksen mitoitus	Versio 1.54
--	--------------------

Raudoitus	HUOM! Puristusteräksien määrä tulee asettaa lähtökohtaisesti nollassi.
------------------	---



$$e_w = \max[20; d_g + 3; \Phi_1] =$$

$$e_1 = (c + \Phi_h + (\Phi_1/2)) =$$

$$e_2 = e_1 + (\Phi_1/2) + e_w + (\Phi_2/2) =$$

$$d_c = (c + \Phi_h + (\Phi_c/2)) =$$

Haat

Leikkeiden määrä

Hakojen jakoväli

Φ_h	32 mm
e_1	78 mm
e_2	78 mm
d_c	0 mm

Φ_h	12 mm
n_h	2 kpl
s_h	150 mm

Tarkista paloluokkavaatimusten toteutuminen (e_1)!

Hakojen suuntakulma

 $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$

Leikkausraudoitus

α_h	90 deg
$\cot \theta$	1,0
A_{sw}	226 mm ² /haka
$A_{sw,tot}$	1508 mm ² /m

Taivutuskestävyys

$\omega = (A_s f_{yd}) / (b d \eta_2 f_{cd}) =$	0,248
$\omega_c = (A_{sc} f_{yd}) / (b d \eta_2 f_{cd}) =$	0,000
$\beta_c = \omega - \omega_c =$	0,248
$\beta_b = \lambda \epsilon_{cu2} / (\epsilon_{cu2} + (f_{yk}/E_s)) =$	0,431
$\chi = \beta_c d / \lambda =$	348,4 mm
$\epsilon_{sc} = \epsilon_{cu} (1 - (d_c/\chi)) =$	0,00 ‰
$\epsilon_{sc} / \epsilon_{sd} =$	0,00

$\mu = \omega (1 - d_c/d) - \beta_c (\beta_c/2 - d_c/d)$	$\mu =$ 0,218
$A_{s,min} = (0,26 f_{ctm} d b) / f_{yk} > 0,0013 b d$	$A_{s,min} =$ 1980 mm ²
$M_{pl,Rd} = \mu b d^2 \eta_2 f_{cd} =$	8621,4 kNm

Rakenteessa ei puristusraudoitusta

Taivutuskestävyys, poikkileikkauksen käyttöaste

Minimiraudoitus

Vetomurtumisehto

$M_d/M_{pl,Rd} =$	1,00 OK
$A_s > A_{s,min}$	OK
$\beta_c < \beta_b$	OK

Kuva 28. Palkin raudoitukset ja tulokset Mircosolf Excel:n SKOL:n laskentapohjalla.

Sama prosessi tehdään kaikkiin kohtiin jokaisessa palkissa. Näin saadaan raudoituksen luonnokset kuten kuvasta 28 ilmenee.

6.1.2 Palkkien leikkaushakojen rauditus

Palkkien leikkausvoimakestävyys lasketaan ensi raudoittamattomana Microsoft Excel:n SKOL:n laskentapohjalla. Sen jälkeen leikkaushakojä lisätään kriittisiin kohtiin, joissa leikkausraudoittaman rakenteen kestävyys on pienempi kuin rakenteeseen kohdistuva rasitus. Kuvista xx ja 29 käy ilmi Microsoft Excel:n SKOL:n laskentapohjan palkin raudituksen tiedot. Laskenta on suoritettu käyttämällä Autodesk Robot Structural Professional ohjelman antamaa suurinta palkkiin kohdistuvaa leikkausvoimaa.

LEIKKAUSKESTÄVYYS, LEIKKAUSRAUDOITTAMATON POIKKILEIKKAUS			
$C_{RD,c} = 0,18 / \gamma_c =$		0,133333333	
$k = 1 + \text{SQRT}(200/d) =$		1,422200331	$\leq 2,0$
$A_{sl} = A_s =$		16084,95439	mm ²
$\rho_l = A_{sl} / (b_w d) =$		0,014335966	$\leq 0,02$
$k_1 =$		0,15	
$\sigma_{cp} = N_{ed} / A_c =$		0	ei normaalivoimaa palkissa
$b_w = b =$		1000	mm
$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} =$		0,419753387	
$V_{RD,c} = [C_{RD,c} k (100\rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d =$			883,808205 kN
$V_{RD,c,min} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d =$			470,963301 kN

Kuva 29. Palkinleikkauskestävyys leikkausraudoittamattomana Microsoft Excel SKOL-pohjalla.

Leikkauskestävyys			
$z = 0,9d =$	1010 mm	$V_{Rd,s} = (A_{sw}/s) z f_{yd} (\cot \theta + \cot \alpha_h) \sin \alpha_h$	$V_{Rd,s} =$ 830,6 kN
$v_1 = 0,6 (1 - (f_{ck}/250)) =$	0,48		
$s_{h,max} = 0,75 d (1 + \cot \alpha_h) =$	842 mm	$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} (\cot \theta + \cot \alpha_h) / (1 + \cot^2 \theta)$	$V_{Rd,max} =$ 7629,6 kN
$A_{sw,min} = (0,08 f_{ck}^{0,5} b_w \sin \alpha_h) / f_{yk}$	$A_{sw,min} =$ 943 mm ² /m	$V_{Rd} = \min [V_{Rd,s}; V_{Rd,max}] =$	830,6 kN
		$V_{Rd,c} =$	883,8 kN
		$V_{Rd,c,min} =$	471,0 kN
Leikkauskestävyys	$V_{Ed}/V_{Rd} =$ 0,20		OK
Minimiraudoitus	$A_{sw,tot} > A_{sw,min}$		OK
Hakojen maksimiväli	$s_h < s_{h,max}$		OK

Kuva 30. Palkin leikkauskestävyys leikkausraudoitettuna Microsoft Excel SKOL- pohjalla.

6.2 Pilarien ja anturoiden suunnittelu

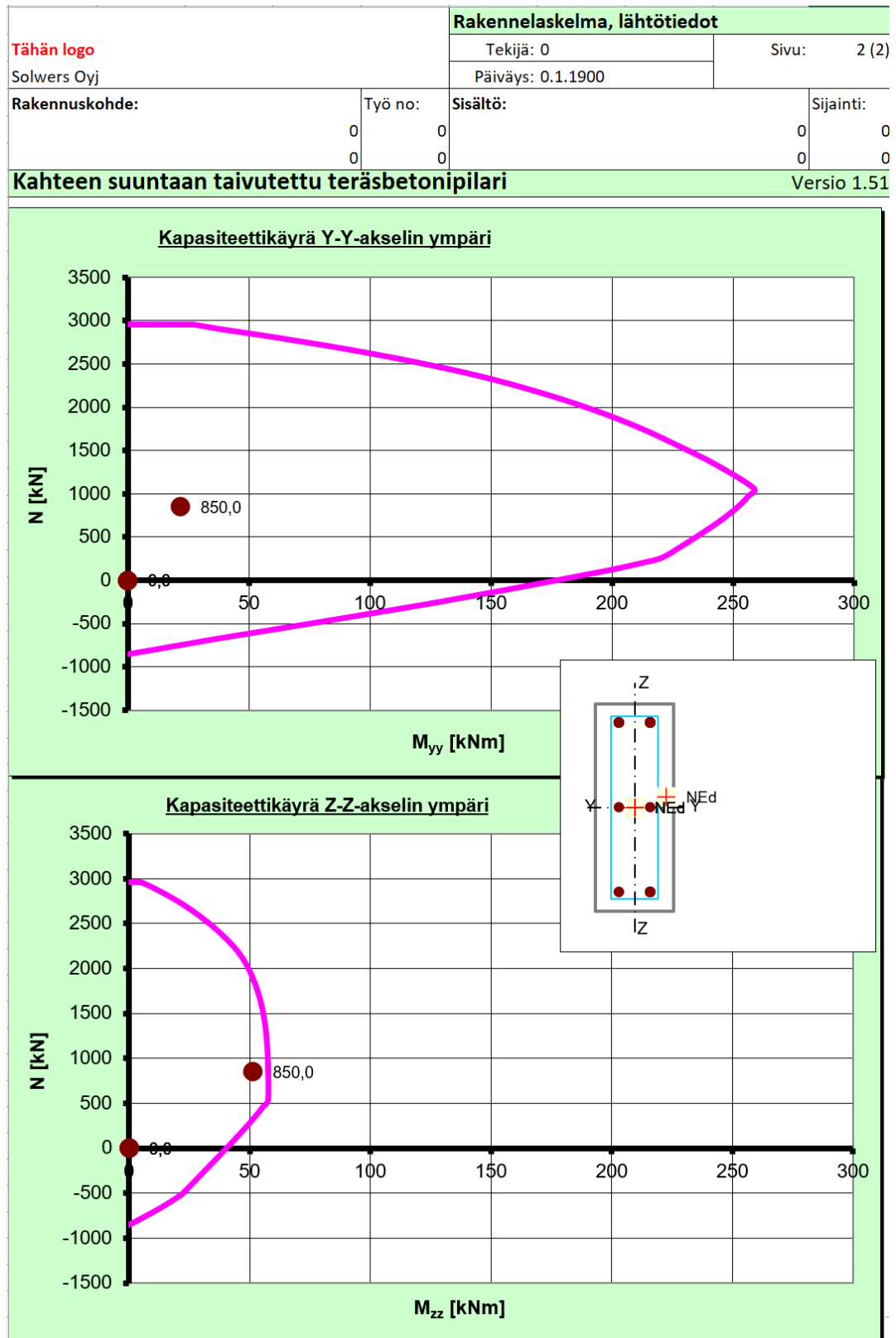
Savilahden toimistotilan 480 mm pyöreälle pilarille käytetään korkealaatuista betonia C50/60 ja se mitoitetaan halkaisijaltaan 32 mm:n terästangoilla. Pilarit, jotka tukevat 1200 mm korkeita palkkeja ovat korkeudeltaan 3,6 m. Vastaavasti 800 mm korkeita palkkeja tukevat pilarit ovat korkeudeltaan 4,0 m. Anturat tehdään louhitulle kalliopinnalle, jonka kantavuus on 3000kN/m². Käytettävän betonin luokka on C30/37 ja raudoitus toteutetaan halkaisijaltaan 10 – 12 mm tangoilla. Sekä pilareiden, että anturoiden mitoituksen lähtötietoina hyödynnetään Autodesk Robot Structural Professional ohjelmasta saatuja voimasuureita.

6.2.1 Pilarien raudoitus

Ohjelmaan lisättävien lähtötietojen pohjalta pystytään ratkaisemaan rakenteen statiikka ja tämän pohjalta suunnitellaan rakenteelle raudoitus, joka on samalla mahdollisimman taloudellinen mutta kuitenkin riittävä rakenteeseen kohdistuville rasituksille. Kuvissa 30 ja 31 näkyy Microsoft Excel SKOL- laskentapohjat pilarin raudoituksesta. Laskennassa on käytetty Autodesk Robot Structural Professional-ohjelman antamaa suurinta momentin ja normaalivoiman arvoa.

PONTEK oy		Rakennelaskelma, lähtötiedot							
Solwers Oyj		Tekijä:	Sivu: 1 (2)						
Rakennuskohde:		Päiväys:							
Työ no:		Sisältö:	Sijainti:						
B3 Kahteen suuntaan taivutettu teräsbetonipilari			Versio 1.51						
SKOL Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011									
Olosuhdetekijät:		Poikkileikkauksen mitat:							
Rasitusluokka =	XC1	Kuiva tai pysyvästi märkä	Korkeus, H = 500 mm						
Suun. käyttöikä =	100 vuotta		Leveys, B = 150 mm						
RH =	40 %	Kuiva ilma							
t ₀ =	28	d							
t =	36500	d							
Materiaalit:		Pilarin pituus ja nurjahduskertoimet:							
Rakenneluokka =	1	Pilarin pituus, L =	3675 mm						
Betoni =	C50/60	μ _{yy} =	1,00 Nurjahduskerroin, Y-Y						
Betoniteräs f _{yk} =	500 MPa	μ _{zz} =	1,00 Nurjahduskerroin, Z-Z						
		Betonipeitteen nimellisarvo ja max. raekoko: Betonipeite, c = 25 mm Δc _{dev} = 10 mm Max raekoko, d _g = 16 mm							
		Raudoitus: Ø _{main} = 20 mm teräsriv. h sivulla = 3 = n _h teräsriv. b sivulla = 2 = n _b Ø _{Haat} = 10 mm s = 150 mm							
Tarkistukset, Tulokset ja Maksimikäyttöasteet:									
A _s =	1885,0 mm ²	Y-Y-akselin ympäri [kNm]		Z-Z-akselin ympäri [kNm]	Vinotaivutus				
A _{s,min} =	187,0 mm ²	M _{Ed,yy}	M _{Rd,yy}	M _{Ed,zz}	M _{Rd,zz}	(Eq 5.39)			
A _{s,max} =	4500,0 mm ²	Tapaus 1	21,7	251,9	51,3	57,4	0,94	OK	
c _{nom} =	20 mm	Tapaus 2	0,0	177,2	0,0	40,3	0,00	OK	
a _{min} =	20 mm	Tapaus 3	0,0	177,2	0,0	40,3	0,00	OK	
Ø _{haka,min} =	6 mm	Tapaus 4	0,0	177,2	0,0	40,3	0,00	OK	
S _{cl,max} =	150 mm								
φ(t, t ₀) =	1,81	i _{yy} =	144,3	λ _{yy} =	25,5	L _{0,yy} =	3675,0 mm		
		i _{zz} =	43,3	λ _{zz} =	84,9	L _{0,zz} =	3675,0 mm		
Ensimmäisen kertaluvun voimaosuudet (sisältää pilarin oman painon):				Rakenne on:					
Voimaosuudet sisältävät 2-kertaluvun vaikutukset: Ei				Sivusiirtymätön Z-Z suunnassa					
Huomioi mittapätarkkuudet: älä huomioi				Sivusiirtymätön Y-Y suunnassa					
Murtorajatilan voimaosuudet pilarin päissä						KRT Pitkäaikaisen ja MRT Momentin suhde		Kokonaiskaarevuuden jakaumasta riippuva kerroin	
Puristus (+)	Yläpää (top)		Alapää (btm)		(M _{0Eqp} /M _{0Ed}) _{yy}	(M _{0Eqp} /M _{0Ed}) _{zz}	c _{yy}	c _{zz}	
Veto (-)	M _{0yy,top}	M _{0zz,top}	M _{0yy,btm}	M _{0zz,btm}					
N _{Ed} [kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]					
Tapaus 1	850	0	0	0	0,70	0,70	9,9	9,9	
Tapaus 2		0	0	0	0,70	0,70	9,9	9,9	
Tapaus 3		0	0	0	0,70	0,70	9,9	9,9	
Tapaus 4		0	0	0	0,70	0,70	9,9	9,9	

Kuva 31. Pilarin lähtötiedot Microsoft Excel SKOL-laskentapohjalla.



Kuva 32. Pilarin mitoituskäyrä Microsoft Excel SKOL-laskentapohjalla.

6.2.2 Anturoiden raudoitus

Anturoiden raudoitus mitoitetaan siihen soveltuvalla Mircosolf Excel SKOL-laskentapohjalla käyttämällä Autodesk Robot Structural Professional ohjelman antamaa suurinta normaalivoimaa. Kuvassa 32 Mircosolf Excel SKOL- laskentapohjan anturan raudoituksen tiedot.

PONTEK oy		Rakennelaskelma, lähtötiedot		PONTEK oy		Rakennelaskelma, lähtötiedot	
Solvers Oyj	Tekijä:	Sivu: 1		Solvers Oyj	Tekijä:	Sivu: 2	
Rakennuskohde:	Päiväys:	Sisältö:	Sijainti:	Rakennuskohde:	Päiväys:	Sisältö:	Sijainti:
B16 Kallionvarainen antura				B16 Kallionvarainen antura			
Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankeessa 2008-2012				Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankeessa 2008-2012			
Versio 1.51				Versio 1.51			
Olosuhteet ja materiaalitiedot: rakenneluokka= 1 betoniliuos= C30/37 (K37) maks raekoko= 16 mm rasitusluokka = XC1 ei pakka ei suola ei kemia käyttöikä= 50 vuotta $c_s = 30$ mm $\Delta c_{ter} = 10$ mm $c = 50$ mm $\Delta c_{per} = 30$ mm maan kantokestävyyys = 3000 kN/m ²				Mittatiedot: anturan pituus L= 1700 mm anturan leveys B= 1700 mm anturan korkeus h= 600 mm pilarin pituus a= 1500 mm pilarin leveys b= 240 mm pilarin epäkeskisyyys $e_x = 0$ mm			
Anturan päällä olevan maan ja seinän kuormat: maan anturan päällä $\gamma_{G,maa} = 18$ kN/m ³ $H_1 = 1500$ mm $H_2 = 1500$ mm kallion tiheys $\gamma_{G,kallio} = 20$ kN/m ³				Raudoitus tiedot, antura: teräs= B500B teräs x-suuntaan $T_{sx,y} = 16$ hyvät teräs y-suuntaan $T_{sy,y} = 25$ terästen ankkurointitapa taivutettu yläpinnan teräset teräs x-suuntaan $T_{sx,x} = 16$ huonot teräs y-suuntaan $T_{sy,y} = 16$ terästen ankkurointitapa taivutettu			
Anturan käyttöaste: käyttöaste maan kantokestävyydelle 0,70 käyttöaste kaatumiselle (ULS) 0,04 anturan käyttöaste liukumiselle (ULS) 0,25 käyttöaste läpleikkautumiselle (ULS) 0,08				Pilarilla tulevat voimasuureet kuormitukset SLS $N_{Ed} = 1500$ kN $M_{y,Ed} = 1050$ kNm $H_{x,Ed} = 10$ kN ULS $N_{Ed} = 5750$ kN $M_{y,Ed} = 100$ kNm $H_{x,Ed} = 100$ kN			
Kallioankkurointi: ei tarvita ankkurointia				Tarkistukset ja tulokset lävistysvoima $V_{ed} = 184$ kN lävistyskapasiteetti $V_{rd} = 2205$ kN maksimi pohjapaine p_d ULS 2096 kN/m ² maksimi pohjapaine p_d SLS 3245 kN/m ²			
viivakuorma y suunnassa $N_{k,seina} = 0$ kN/m $N_{ed,seina} = 0$ kN/m viivakuorma (seinä)				raudoitus x-suuntaan laskettu ap 7 T16 k230 OK valitaan 7 T16 k230 OK laskettu yp 0 T16 k0 OK valitaan 0 T16 k0 OK			
Kalliotartunnat tai kallioankkurit rivi1, r1= 0 250 rivi2, r2= 0 250 teräslaatu B500B käytetty kallioankkurikulma 60,0°				raudoitus y-suuntaan raudoitus y-suuntaan 9 T25 k180 valitaan 11 T25 k145 0 T16 k0 0 T16 k0 epäkeskisyyden ja kuormien jakautuminen, käyttörajatilassa oletuksena lineaarinen ja murtorajatilassa suorakaiteen muotoinen pohjapainejakauma $e_{x,d} = 655$ mm $e_{x,d} = 27$ mm jos epäkeskisyyden on tällä alueella (BjaH/6) niin koko pohja on punnitettuna $x_1 = 1116$ mm $x_2 = 1116$ mm $\sigma_1 = 0$ kN/m ² $\sigma_2 = 3245$ kN/m ² $\sigma_3 = 0$ kN/m ² $\sigma_4 = 3245$ kN/m ² ULS $\sigma_1 = 55$ mm $\sigma_2 = 55$ mm 2096 kN/m ² 2096 kN/m ² 2096 kN/m ² 2096 kN/m ² halkaisuraudoitus voima F_{vd} 0 kN kapasiteetti 0 kN As= 339 mm ² matkalle $h_n = 200$ mm pituus kallioon mm $\Rightarrow 3$ T12 k65			
KALLIOTARTUNNAT VAIN LEIKKAUKSELLE KALLIOANKKURIT VAIN VEDOLLE							

Kuva 33. Microsoft Excel SKOL-laskentapohjan anturan lähtötiedot ja mitoitukset.

6.3 Laatan suunnittelu

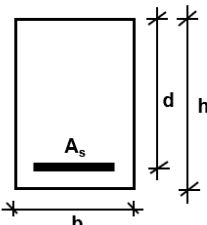
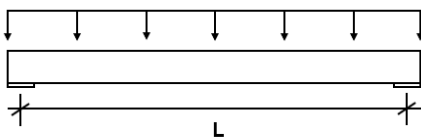
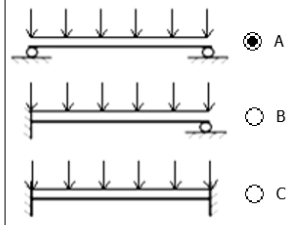
Ensimmäisessä kerroksessa käytetään paikalla valettavaa laattaa, joka toteutetaan betonista C30/37. Laatta on toteutettava 200 mm:n vahvuisena, jotta se kestäisi

onnettomuustilanteen kuormituksen. Laattaa on tuettu viidellä vahvasti raudoitetulla isopalkilla. Laatan pituus on 32 m ja leveys 16 m. Eurokoodin mukaan ($L_y/L_x > 2$) Savilahden toimistotilan 1.krs laatta on määritetty ristiin kantavaksi laataksi ja siksi pääraudoitus on suunniteltava molempiin suuntiin. Laatan raudoitus lasketaan Microsoft Excel SKOL- laskentapohjalla, Autodesk Robot Structural Professional ohjelman antamien voimasuureiden pohjalta. Kuvassa 33 on Microsoft Excel- laskentapohja , josta ilmenee Savilahden toimistotilan laatan lähtötiedot ja sen raudoitusten laskelmat.

LEIKKAUSKESTÄVYYS, LEIKKAUSRAUDOITTAMATON POIKKILEIKKAUS			
$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c =$	0,133333333		
$k = 1 + \text{SQRT}(200/d) =$	2	$\leq 2,0$	
$A_{sl} = A_s =$	2412,743158	mm^2	
$\rho_l = A_{sl} / (b_w d) =$	0,018559563	$\leq 0,02$	
$k_1 =$	0,15		
$\sigma_{cp} = N_{ed} / A_c =$	0	ei normaalivoimaa palkissa	
$b_w = b =$	1000	mm	
$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} =$	0,542217668		
$V_{RD,c} = [C_{RD,c} k (100\rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d =$			132,375745 kN
$V_{RD,c,min} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d =$		70,4882969	kN

Kuva 34. Raudoittamattoman laatan leikkauskestävyyden laskelmat Microsoft Excel SKOL- laskentapohjalla.

Laatta voidaan usein suunnitella leikkausraudoittamattomana valitsemalla laatan paksuus riittävän suureksi ja kestävyys ja kiviaineskoko tarkoitukseen soveltuviksi. Tässä tapauksessa 200 mm laatan paksuutena on riittävä kestävänsä siihen kohdistuvan suurimman leikkausvoiman raudoittamattomana. Taivutuskestävyyden mitoitus ilmenee kuvista 34 ja 35.

PONTEK oy		Rakennelaskelma		
Solwers Oyj		Tekijä:	Sivu: 1 (3)	
Rakennuskohde:	Työ nro:	Päiväys:	Sijainti:	
B6 Teräsbetonisen suorakaidepoikkileikkauksen mitoitus		Versio 1.54		
SKOL Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011				
Geometria				
Palkin kokonaispituus	$L_{tot} =$	11000 mm		
Viisteet		15 mm		
Tukipinnan pituus	$t =$	300 mm		
Korkeus	$h =$	200 mm		
Leveys	$b =$	1000 mm		
Jänneväli	$L =$	10670 mm		
Poikkileikk. pinta-ala	$A_c =$	200000 mm ²		
Poikkileikkauksen piiri		2400 mm		
				Valitse rakennemalli: 
				HUOM! Palkin rasiusten laskennassa käytetyn rakennemallin tulee vastata yllä valittua rakennemallia.
Rasitukset				
MRT laskentamomentti	$M_d =$	70,0 kNm	HUOM! Taivutusmomenttien ja leikkausvoiman arvot tulee määrittää erikseen standardien ja ohjeiden mukaisesti.	
MRT laskentaleikkausvoima	$V_{Ed} =$	170,0 kN		
KRT laskentamomentti, om.tai tav.yhdistelmä	$M_{k1} =$	40,0 kNm		
KRT laskentamomentti, pitkäaikaisyhdistelmä	$M_{k2} =$	40,0 kNm		
Onko M_{k2} yhdistelmässä lyhytaikaiskuormia: Lyhytaikaiskuorman osuus:		ei		
Kuormitusyhdistelmän valinta:		60 %		
Käyttörajan laskentamomenttien suhde:	$\eta_1 =$	1,00	Pitkäaikais	
Materiaali ja ympäristö				
Rakenneluokka	1	Kiviaineen maksimi raekoko	$d_g =$ 16 mm	
Betonin lujuus	C30/37	Ympäristön suhteellinen kosteus	RH = 60 %	
Sementtilaji	N	Betonin ikä tarkasteluajankohtana	$t =$ 50000 vrk	
Rauditus	A500HW	Betonin ikä kuorman alkaessa	$t_0 =$ 28 vrk	
Rasitusluokka	XC1	Sallittu mittapoikkeama	$\Delta c_{dev} =$ 10 mm	
Suunnitteluikä	50 vuotta	Betonipeitteen vähimmäisarvo	$c_{min} =$ 16 mm	
Haihtumiselle altis piiri =u=	2400 mm	Betonipeitteen nimellisarvo	$c_{nom} =$ 26 mm	
		Betonipeite haan pintaan	$c =$ 50 mm	
$f_{ck} =$ 30,00 MN/m ²	$f_{cm} =$ 38,00 MN/m ²	$f_{cd} =$ 18,9 MN/m ²		
$f_{ctm} =$ 2,90 MN/m ²	$f_{ctk} =$ 2,03 MN/m ²	$f_{ctd} =$ 1,50 MN/m ²		
$f_{ctm,fi} =$ 4,06 MN/m ²	$f_{yd} =$ 454,55 MN/m ²	$\epsilon_{cu2} =$ 3,50 ‰		
$f_{yk} =$ 500,00 MN/m ²	$\lambda =$ 0,80	$\varphi(t, t_0) =$ 2,20		
$E_{cm} =$ 32837 MN/m ²	$\eta_2 =$ 1,00	$E_{c,eff} =$ 10256 MN/m ²		
$E_s =$ 200000 MN/m ²		$\epsilon_{sd} =$ 2,27 ‰		

Kuva 35.Laatan lähtötiedot Microsoft Excel SKOL-laskentapohjalla.

Teräsbetonisen suorakaidepoikkileikkauksen mitoitus						Versio 1.54	
Raudoitus		HUOM! Puristusteräksien määrä tulee asettaa lähtökohtaisesti nolllaksi.					
	Puristusteräksät	Φ_c [mm]	n_c [kpl]	A_{sc} [mm ²]	d_c [mm]		
		10	0	0	0		
	Veto- teräksät	Rivi	Φ_1, Φ_2 [mm]	n_1, n_2 [kpl]	A_{s1}, A_{s2} [mm ²]	d_1, d_2 [mm]	
	Yläriivi	2	32	0	0	130	
	Alariivi	1	16	12	2413	130	
				2413	130		
				= A_s	= d_{kesk}		
$e_w = \max[20; d_g+3; \Phi_1] =$		20 mm					
$e_1 = (c+\Phi_h+(\Phi_1/2)) =$		70 mm					
$e_2 = e_1+(\Phi_1/2)+e_w+(\Phi_2/2) =$		70 mm					
$d_c = (c+\Phi_h+(\Phi_c/2)) =$		0 mm					
Haat	$\Phi_h =$	12 mm	Hakojen suuntakulma	$\alpha_h =$	90 deg		
Leikkeiden määrä	$n_h =$	2 kpl	$1 \leq \cot \theta \leq 2,5$	$\cot \theta =$	1,0		
Hakojen jakoväli	$s_h =$	150 mm	Leikkausraudoitus	$A_{sw} =$	226 mm ² /haka		
				$A_{sw,tot} =$	1508 mm ² /m		
Taivutuskestävyys							
$\omega = (A_s f_{yd}) / (b d \eta_2 f_{cd}) =$	0,447	$\mu = \omega (1 - d_c/d) - \beta_c (\beta_c/2 - d_c/d)$					
$\omega_c = (A_{sc} f_{yd}) / (b d \eta_2 f_{cd}) =$	0,000	$\mu =$		0,347			
$\beta_c = \omega - \omega_c =$	0,447	$A_{s,min} = (0,26 f_{ctm} d b) / f_{yk} > 0,0013 b d$					
$\beta_b = \lambda \epsilon_{cu2} / (\epsilon_{cu2} + (f_{yk} / E_s)) =$	0,467	$A_{s,min} =$		196 mm ²			
$x = \beta_c d / \lambda =$	72,6 mm	$M_{pl,Rd} = \mu b d^2 \eta_2 f_{cd} =$		110,7 kNm			
$\epsilon_{sc} = \epsilon_{cu} (1 - (d_c/x)) =$	0,00 ‰						
$\epsilon_{sc} / \epsilon_{sd} =$	0,00	Rakenteessa ei puristusraudoitusta					
	Taivutuskestävyys, poikkileikkauksen käyttöaste	$M_d / M_{pl,Rd} =$		0,63	OK		
	Minimiraudoitus	$A_s > A_{s,min}$			OK		
	Vetomurtumisehto	$\beta_c < \beta_b$			OK		

Kuva 36. Taivutuskestävyyden arvot Microsoft Excel SKOL-laskentapohjalla.

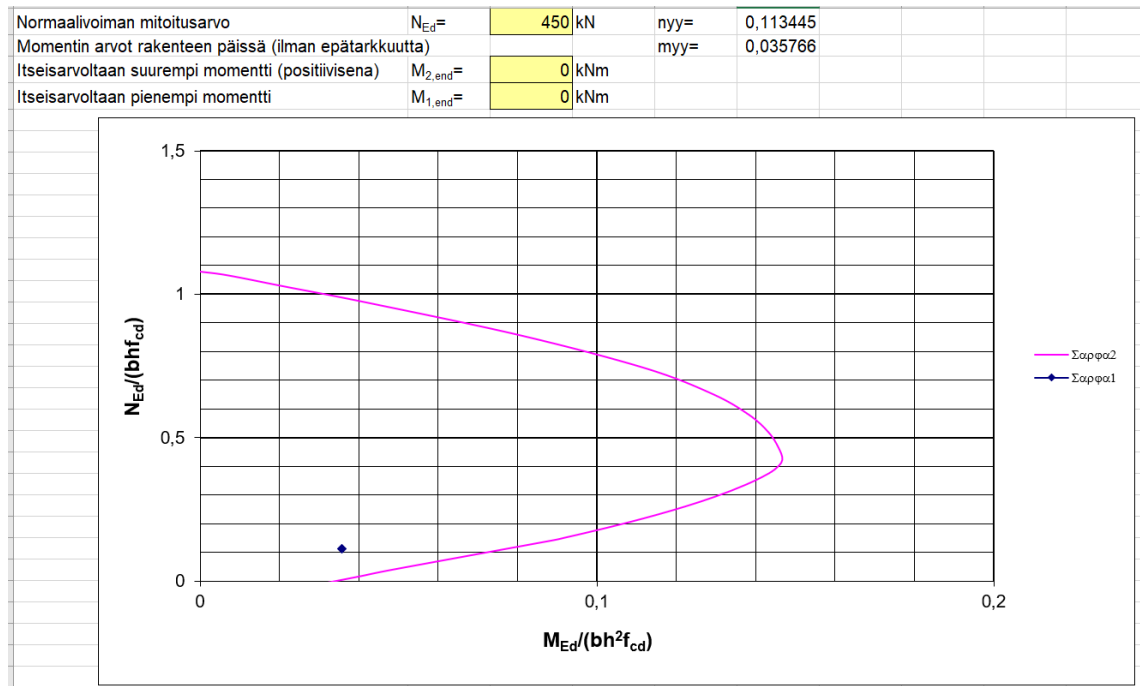
Laskelman mukaan 200 mm paksun laatan leikkauskestävyys on 132 kNm, joka on isompi kuin leikkausvoima laatassa onnettomuustilanteessa. Tämän takia laatta voidaan toteuttaa ilman leikkaushakoja. Suurin momentti laatassa on noin 100 kNm mutta valtaosalle laattaa momentin arvot jäävät huomattavasti tätä arvoa pienemmiksi. Laatan pääraudoitukseksi valitaan T16-k150, joka on riittävä raudoitusmäärä kattamaan vaaditavan raudoitusmäärän jokaisessa laatan kohdassa. Kriittisiin kohtiin, kuten palkkien päihin, tarvitaan lisäraudoitusta, jotta laatan kestävyys täyttää vaatimukset onnettomuusrajatilassa. Autodesk Robot Structural Professional ohjelman ilmoittamia ns. piikkiarvoja nurkissa ei huomioida raudoituksen laskennassa.

6.4 Seinän suunnittelu

Tapauksen seinä mitoitetaan kantavana seinänä. Mitoituksen ja raudoituksen laskelmat tehdään Elementtisuunnittelu.fi sivuston Microsoft Excel-laskentapohjalla, käyttämällä FEM-laskennan voimasuureiden tuloksia. Seinän paksuus on 200 mm ja korkeus 4,0 m, joka on myös seinän laskennallinen nurjahduspituus. Käytettävän betonin luokka on C35/40 ja raudoitukseksi valitaan T10-k200. Kuvista 36 ja 37 ilmenee seinän lähtötiedot, laskemat ja tulokset Excel-laskentapohjalla.

TERÄSBETONISEINÄN MITOITUS							
(lähtöarvot kirjoitetaan keltaisella värjättyihin soluihin, voimasuureet syötetään diagrammilehdeltä)							
LÄHTÖARVOT				LASKETUT			
Mitat				Mitat			
sivu	h	mm	200	Nurjahduspit	Lk _o	m	4,00
sivu	b	mm	1000	joustolisä jäykistetty			1,00
pituus	L	m	4	joustolisä ei jäykistetty			2236,07
jäykistetty (1) tai ei (2)			1	Hoikkuus	λ		69,28
pään 1 joustovakio	k ₁		1000000	Betonin mekaaniset ominaisuudet			
pään 2 joustovakio	k ₂		1000000	osavarmuus	γ _e		1,5
Materiaaliosavarmuusluokka				puristuslujuus	f _{cm}	Mpa	43,0
Toleranssit: normaali=2, tiukennettu=1			2	puristuslujuus	f _{cd}	Mpa	19,8
Betoni				vetolujuus	f _{ctm}	Mpa	3,21
betonin lujuus	f _{ck}	N/mm ²	35	vetolujuus	f _{ctk}	Mpa	2,25
suojabetoni	c	mm	20	vetolujuus	f _{ctd}	Mpa	1,50
Viruma				myötövenymä	ε _e	%	0,20
virumaluku	φ _(oo,t0)		3	murtövenymä	ε _{cu}	%	0,35
Raudoitus				kimmokerroin	E _{cm}	Mpa	34077
Päätangot				kimmokerroin	E _{ck}	Mpa	28398
Myötölujuus	f _{yk}	N/mm ²	500	Raudoituksen mekaaniset omin.			
puristuspuoli paksuus	φ'	mm	10	osavarmuus	γ _s		1,15
puristuspuoli määrä	n'	kpl	5	laskentalujuus	f _{sd}	N/mm ²	434,78
vetopuoli paksuus	φ	mm	10	kimmokerroin	E _s	N/mm ²	200000
vetopuoli määrä	n	kpl	5	Poikkileikkaussuureet			
Haat				Raud et. reunasta p.	d'		35
tankopaksuus	φ	mm	10	Raud et. reunasta v.	(d')		35
hakaväli	s	mm	200	Raud tehol.kork. veto	d		165
Kuormitus				Raud. p-a puristus	A' _s	mm ²	392,7
murotajan laskentakuormat				Raud. p-a veto	A _s	mm ²	392,7
Normaalivoima	N _{Ed}	kN	450	Betoni pl p-a	A _c	mm ²	200000,0
Momentti 1 pienempi	M ₀₁	kNm	4,5	Raud suht p-a purist	ρ'		0,0020
Momentti 2 suurempi	M ₀₂	kNm	4,5	Raud suht p-a veto	ρ		0,0020
käyttöraja tila pitkäaikaisyhdistelmä				Raud. Suhde Σ		%	0,39
KRT pitkäaikaisen momentin suhde	M _{0Eqr} /M _{0E}		0,7	Mek. Raud suhde	ω'		0,043
MRT:n mitoitusmomenttiin				Mek. Rau. suhde	ω		0,043
				Kimmo. suhde	α		5,87
				Ideaali pl. P-a	Ai	mm ²	203824,13
				Pintakeskiön paikka	pp	mm	100,00
				mom. varsi es'		mm	-65,00
				mom. varsi es		mm	65,00
				Jäyhysmomentti	I _c	mm ⁴	6,67E+08
				Jäyhysmomentti	I _s	mm ⁴	3318307

Kuva 37. Seinän mitoituksen lähtötiedot ja laskelmat



Kuva 38. Seinän mitoituksen tulokset.

Elementtisuunnittelu.fi sivuston Excel-pohjan mukaan lähtöarvojen oletusraudoitus T10-k200 on riittävä. Seinä kestää tuolla raudoituksella onnettomuustilanteen kuormat hyvin, maksimi mitoitusnormaalivoiman ollessa noin 450kN FEM-laskennan tulosten pohjalta.

7 Ohjelmien vertailu

7.1 FEM-ohjelmien vertailu

FEM ohjelmana Autodesk Robot Structural Professional on yksi parhaimmista laskenta-sukeltaa ovelluksista ja sitä käytetään isoissa suunnittelutoimistoissa. Ohjelma sisältää melkein kaikki tarvittavat laskennan toiminnot silta- ja rakennesuunnittelulle. Vaikka Autodesk Robot Structural Professional on erittäin hyvä FEM sovellus, sitä on kuitenkin melko vaikea oppia käyttämään ilman asianmukaista käyttäjäkoulutusta. Autodesk Robot Structural Professional ohjelman lisäksi on myös paljon muita FEM-ohjelmia, kuten RFEM, Jigi ja SCIA Engineer ja monet niistä on myös hieman helpompia oppia käyttämään. Onkin suositeltavaa tutustua FEM-laskentaohjelmiin esimerkiksi Jigin avulla ennen kuin lähtee opettelemaan Robot Structural Professional ohjelman käyttöä.

7.2 BIM ohjelmien vertailu

Mallinnusohjelmana ja Suomessa kehitettynä tuotteena, Tekla Structural on erinomainen 3D BIM -sovellus teräs -ja betonisuunnittelulle. Teklan kanssa voidaan mallintaa erittäin nopeasti ja yksityiskohtaisesti kaikkia rakennetekniikan piirustuksia kuten yleispiirustuksia tai detaljipiirustuksia 3D-rakennemallista. Suomessa Teklaa käytetään melkein kaikissa yrityksissä ja suunnittelutoimistoissa. Teklan käyttöä opetetaan myös ammattikorkeakouluissa ja yliopistossa kaikille rakennusinsinööriopiskelijoille ja varsinkin rakennesuunnittelun opiskelijoille. Samanlaisia 3D-BIM sovelluksia kuin Tekla Structural on Autodesk Revit, joka on myös käytetty laajasti monissa paikoissa sekä rakennesuunnitteluun, että arkkitehtisuunnitteluun. Autodesk Revit ohjelmaa käytetään enemmän arkkitehtitoimistoissa kuin suunnittelutoimistossa, vaikka sovelluksessa on kaikki FEM toiminnot, joita tarvitaan mitoituksessa. Kotimainen sovellus Vertex Systems:n BD on myös suosittu ohjelma arkkitehtisuunnitteluun mutta soveltuu samalla myös rakenteiden mitoitukseen.

7.3 CAD ohjelmien vertailu

CAD ohjelma on tietokoneen apuohjelma, joka käytetään useilla teknisillä aloilla piirustusten tekemiseen. Erilaiset tehtävät tarvitsevat erilaisia CAD ohjelmia ja ohjelmat räätälöidään usein alakohtaiset tarpeet huomioiden. CAD ohjelmat ovat monipuolisia, ja niitä käytetään laajasti kaikilla aloilla. Autodesk:n AutoCAD on yksi kuuluisimmista ja vanhimmista CAD ohjelmista rakennusalalla ja sitä käytetään eniten Amerikassa, Euroopassa ja Aasiassa. AutoCAD:n käytön oppii melko nopeasti. Opiskelijoille on saatavissa opiskelijalisenssejä ja näiden lisenssien takaamat ohjelmatoiminnot ovat yleensä kaupallisten versioiden veroisia. AutoCAD on kuulunut jo pitkään kaikkien teknisten oppilaitosten opetusohjelmaan. AutoCAD:n kaltaisia, mutta hieman tuntemattomampia, sovelluksia ovat muun muassa Trimble:n SketchUp, Dassault Systems:n SolidWorks, Autodesk Inventor, Rhinoceros 3D, TurboCad.

8 Tulokset

Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen projektissa tai missä tahansa rakennesuunnittelun projektissa, tietokoneen apuohjelmat, kuten FEM laskentaohjelmat, BIM mallin-
nusohjelmat tai CAD ohjelmat ovat välttämättömiä. Kyseiset ohjelmat säästävät merkittävästi suunnittelijan aikaa ja vähentävät virheiden mahdollisuuksia. FEM ohjelman käyttö vähentää käsin laskennalle tyypillisiä inhimillisiä laskuvirheitä ja lähtötietojen muokkaaminen mahdollistaa vavattoman iteroinnin käsin laskentaan verrattuna. BIM ja CAD ohjelmien avulla piirustuksia voidaan tehdä nopeammin. Tietotekniikka mahdollistaa myös rakennus- ja rakennepiirustuksiin tehtävät muutokset vaivattomasti ja tiedon jakaminen projektin eri osapuolien välillä on nopeaa ja joustavaa. Vaikka rakennesuunnittelussa erilaiset tietotekniset sovellukset valtaavat alaa ja helpottavat suunnittelijan työtä niin silti suunnittelijan tulee hallita käsin laskennan taito. Vaikka ohjelma lähtökoh-
taisesti laskee tarkasti ja oikein, niin suunnittelijan tulee kyetä käsin laskennalla tarkista-
maan ohjelman antamien tulosten oikeellisuus ja mittakaava. Tämän takia mekaniikka ja differentiaalilaskenta tulevat puoltamaan paikkaansa rakennesuunnittelun opinnoissa eikä pelkkä sovellusohjelmien käyttökoulutus voi korvata näitä insinööritaidon peruspila-
reita.

9 Yhteenveto ja pohdinta

Tässä insinööriyössä, Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen toimisto suunniteltiin rakennesuunniteluun tarkoitetuilla sovellusohjelmilla. Autodesk Robot Structural Professional:n FEM sovellusta käytettiin laskemaan toimistotilan betonirakenteiden palkkien, pilareiden, laatan ja seinien leikkausvoimat, taivutusmomentit, normaalivoimat ja käyttörajatilan taipumat. Microsoft Excel SKOL – laskentapohjan makroa käytettiin betonirakenteiden raudoitusten suunnitteluun. Rakennepiirustukset toteutettiin AutoCAD:lla ja Tekla Structure:lla.

Tämä opinnäytetyö oli erittäin hyvä mahdollisuus syventää osaamistaan rakennesuunnittelussa ja ennen kaikkea tilaisuus soveltaa koulussa opittua teoriaa käytännön rakennusprojektiin. Ennen varsinaista mitoitustyötä edelsi laaja tutustuminen rakennesuunnittelua ohjaaviin säädöksiin kuten Eurokoodeihin. Väestösuojiin liittyvien kuormitus- ja mitoitusehtojen selvittäminen tarkasti ennen laskentatoimeen ryhtymistä oli ensiarvoisen tärkeää valmistelevaa työtä. Varsinainen mallinnustyö Teklalla sekä FEM-mallinnus mitoituksineen oli tehtävä erittäin tarkasti tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi. Ilman Pontekin käyttöni tarjoamia ohjelmalisenssejä ja henkilökunnan tarjoamaa opastusta ohjelmien käyttöön ja ongelmatilanteiden ratkaisuihin, ei opinnäytetyöni tekeminen olisi ollut mahdollista.

Toivottavasti, tämä opinnäytetyö edistää omalta osaltaan Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen suunnitteluprojektia, varsinkin toimistotilan osalta. Minulle on ollut suuri kunnia osallistua tähän projektiin ja olen kiitollinen Pontekin henkilökunnalle, jotka tekivät sen mahdolliseksi. Katsoessani tulevaisuudessa Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskusta, tunnen varmasti sydämessäni pientä ylpeyttä koska olen voinut jättää vähäisen kädenjälkeni sen suunnittelutyön mittavaan toteutukseen.

Lähteet

(1) Pontek:n kuvakirjasto

(2) Savilahden liikunta- ja tapahtumakeskuksen projekti Kuopion kaupungista
<[https://www.kuopio.fi/documents/7369547/7483905/Savilahden+liikunta+ja+tapahtu-
makeskus_hankesuunnitelma.pdf/103ce3ed-5945-4dc2-a3e4-7a23ca078104](https://www.kuopio.fi/documents/7369547/7483905/Savilahden+liikunta+ja+tapahtu-
makeskus_hankesuunnitelma.pdf/103ce3ed-5945-4dc2-a3e4-7a23ca078104)>
07.05.2020

(3) Pontek:n arkitehdin IFC malli

(4) Elementtirakenteiden toleranssit noudattaen Betoniteollisuus ry:n julkaisua Betonielementtien toleranssit 2011

(5) Väestönsuojelulaki <<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1958/19580438>> 07.05.2020

(6) Autodesk:n yrityksen tiedot <<https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk>> 07.05.2020

(7) Mitoitusstandardit ja kansalliset liitteet:

SFS-EN 1990 Eurokoodi 0 + NA: Rakenteiden suunnitteluperusteet

SFS-EN 1991-1 Eurokoodi 1 + NA: Rakenteiden kuormat, osat 1 – 7

SFS-EN 1992-1: Eurokoodi 2 + NA: Betonirakenteiden suunnittelu, osat 1 – 2

(8) Betonisuunnittelu:

SFS-EN 13670 Betonirakenteiden toteutus

SFS-EN 5975 Standardin

SFS-EN 13670 käyttö Suomessa

SFS-EN 206-1 + A1 + A2 Betoni. Osa 1: Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus

SFS 7022 Betoni. Standardin

Liitteen otsikko

Ei Liite