

**Scia Engineer -ohjelman soveltuvuus
alumiinirakenteiden mallinnuksessa ja
eurokoodimitoituksessa**

Sampsa Tommola

Opinnäytetyö
Marraskuu 2013
Rakennustekniikka
Talorakennustekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talorakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

SAMPSA TOMMOLA

Scia Engineer -ohjelman soveltuvuus alumiinirakenteiden mallinnuksessa ja eurokoodimitoituksessa

Ohjaaja: Olli Saarinen

Opinnäytetyö 56 sivua
Marraskuu 2013

Tämä insinöörityö tehtiin A-insinöörit Suunnittelu OY:lle. Opinnäytetyön tarkoitus on tutkia Scia Engineer -ohjelman käyttöä yleisesti ja selvittää, kuinka sillä onnistuu alumiinin mitoitus eurokoodien mukaisesti.

Opinnäytetyössä käydään läpi alumiinin käyttöä rakennusmateriaalina ja ominaisuuksia, joiden ansiosta se on yleisesti käytössä oleva rakennusmateriaali.

Opinnäytetyössä käydään läpi Scia Engineer -ohjelman avulla yksinkertaisen alumiinisen palkin mallinnus- ja mitoitusprosessi alusta loppuun asti. Työssä myös selvitetään ohjelman käytössä ilmeneviä mahdollisia ongelmakohtia. Ohjelmaa läpikäytessä testataan myös, kuinka luodaan uusia profiilien poikkileikkauksia ja osaako ohjelma laskea poikkileikkausarvot automaattisesti.

Työssä mallinnetaan ja mitoitetaan alumiinisia rakenneosia eurokoodi 9 mukaisesti. Mitoitettavia rakenneosia ovat I-profiili palkki ja alumiininen lipputanko.

Johtopäätöksiä tehdään alumiinin mallintamis- ja mitoittamisprosessista sekä yleisesti ohjelman käytöstä.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering
Option of Structural Engineering

SAMPSA TOMMOLA

Suitability of Scia Engineer software in aluminium modeling and structure dimensioning according to eurocodes

Instructor: Olli Saarinen

Bachelor's thesis 56 pages
November 2013

This engineering assignment was made for A- insinöörit Suunnittelu Oy. Purpose of this study was to examine the Scia Engineer program usage in general, and also if it can be used to design aluminum according to the Eurocodes.

This study will look at use of aluminum as building material and its features that make it a common building material.

This thesis will go over how to model and design a simple aluminum beam from start to finish using Scia Engineer program. Possible problems that arise while using the program will also be covered. Creation of new cross-section will be included and test if Scia Engineer is able to calculate cross-section values automatically.

Modeling and sizing of aluminum structure parts was done according to Eurocode 9. Sized parts were I-profile beam and aluminum flagpole.

Conclusions are made of aluminum modeling, sizing and general use of program.

Keywords: Scia Engineer, aluminum, euro code, design

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	ALUMIINIRAKENTEET.....	7
	2.1 Alumiini materiaalina.....	7
	2.2 Alumiinin valmistus.....	8
	2.3 Alumiinin ominaisuudet.....	8
	2.4 Alumiinin käyttökohteet.....	10
	2.5 Alumiinin nimikejärjestelmä.....	11
3	ALUMIINIRAKENTEIDEN EUROKOODI 9.....	13
	3.1 EN1999-1-1: Eurokoodi 9.....	13
	3.2 EN1999-1-2: Eurokoodi 9.....	13
	3.3 EN1999-1-3: Eurokoodi 9.....	13
	3.4 EN1999-1-4: Eurokoodi 9.....	13
	3.5 EN1999-1-5: Eurokoodi 9.....	13
4	SCIA ENGINEER.....	14
	4.1 Nemetschek Scia.....	14
	4.2 Ohjelmasta yleisesti.....	14
	4.3 Ohjelman versio.....	14
	4.4 Ohjelman ulkoasu.....	15
5	ALUMIINIRAKENTEIDEN MALLINTAMINEN JA MITOITUS SCIALLA.....	17
	5.1 Ohjelman käyttö mallintamisessa ja mitoittamisessa.....	17
	5.2 Aloitus.....	18
	5.3 Profiilikirjasto.....	22
	5.4 Rakenneosan mallintaminen.....	24
	5.5 Tukien määrittäminen.....	26
	5.6 Kuormitukset ja kuormitusyhdistelmät.....	28
	5.7 Laskenta.....	32
	5.8 Laskennan tarkastelu.....	34
	5.9 Alumiinin mitoitus.....	36
	5.10 Tulosten dokumentointi.....	40
6	PROFIILIEIEN POIKKILEIKKAUKSET.....	42
	6.1 Poikkileikkauseditori.....	42
	6.2 Profiilin poikkileikkausarvot.....	44
	6.3 Scian poikkileikkausarvot.....	46
7	ALUMIINISTEN RAKENTEIDEN LASKENTA.....	48
	7.1 I-profiili palkki.....	48
	7.2 Alumiininen lipputanko.....	51

8	JOHTOPÄÄTÖKSET	54
9	LÄHTEET	55

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on kertoa lukijalle alumiinin ominaisuuksista ja käytöstä rakennusteollisuudessa, sekä neuvoa lukijaa käyttämään Scia Engineer -ohjelmaa alumiinin mallintamisessa ja mitoituksessa.

Opinnäytetyössä käydään läpi alumiinin valmistaminen, ominaisuudet ja sen käyttö rakennusmateriaalina. Työssä käydään läpi ohjeenomaisesti alumiinisen palkin mallinnus- ja mitoitusprojekti alusta loppuun saakka. Tässä opinnäytetyössä mitoitetaan Scia Engineer -ohjelmalla alumiinisia rakenteita, joita ovat I-profiili palkki ja alumiininen lipputanko. Työssä testataan ohjelman soveltuvuutta alumiinin mallinnuksessa ja mitoituksessa, sekä puututaan mahdollisiin ongelma-kohtiin.

Tavoitteena on, että lukija oppii perustaidot Scia Engineer- ohjelman käytöstä ja osaa tämän opinnäytetyön perusteella mallintaa ja mitoittaa ohjelmaa käyttäen yksinkertaisia alumiinisia rakenteita. Tärkeää on myös, että lukija saa käsityksen alumiinin valmistuksesta, ominaisuuksista ja käytöstä rakennusteollisuudessa.

Työssä käytetään Scia Engineer -ohjelman opiskelijaversiota 12.0.1094.

2 ALUMIINIRAKENTEET

2.1 Alumiini materiaalina

Maan kuorella alumiinia on 8 % ja se onkin maankuoren kolmanneksi yleisin alkuaine. Sillä on useita käyttökohteita ja sitä käytetään laajalti ympäri maailmaa monissa eri sovelluksissa ja rakenteissa. Esimerkiksi autot, lentokoneet, juomatölkit ja polkupyörät voidaan tehdä alumiinista. Alumiini onkin maankuoren yleisin metalli.

Alumiinin kierrätys on helppoa ja kustannustehokasta. Kierrätettävän alumiinin energian käyttö on vain 5 % alumiinin valmistuksen vaativasta energiasta. Alumiinia ei esiinny puhtaana luonnossa, vaan se on sitoutunut yhdisteisiin. Eniten alumiinia on sitoutunut bauksiittiin, josta alumiinia valmistetaan. Bauksiittia louhitaan avolouhoksista esimerkiksi Unkarissa, Latinalaisessa Amerikassa, Brasiliassa, Balkanissa, Aasiassa sekä Australiassa. Kiina on maailman suurin alumiinin valmistaja. Alla oleva (kuva1) on alumiinia sisältävä louhittu bauksiittipalanen. Bauksiitin alumiinipitoisuus on noin 25 % riippuen bauksiittilaadusta.



KUVA 1. Louhittu bauksiittimineraali

Alumiini on teräkseen verrattuna kevyt materiaali. Alumiinin paino on vain noin kolmasosa teräksen painosta. Alumiinin sulamispiste on noin 650 celsius astetta. Keveyden ja hyvän sähkönjohtokyvyn ansiosta alumiinia käytetään johdinmateriaalina esimerkiksi sähkönsiirtolinjoissa.

2.2 Alumiinin valmistus

Alumiinia valmistetaan bauksiitista elektrolyysin avulla. Elektrolyysi on sähkövirran avulla saatu kemiallinen reaktio, jossa aine käy läpi hapetus-pelkistysreaktion. Alumiinia alettiin valmistaa 1800-luvulla, kun elektrolyysimenetelmä mahdollisti alumiinin tehokkaan valmistamisen.

Itse valmistusprosessi on monimuotoinen ja vaatii paljon energiaa. Yhden alumiinitonnin tuottamiseen kuluu energiaa noin 16 000 kWh. Alumiini valmistetaan bauksiitista Bayerin menetelmällä. Aluksi louhittu bauksiitti murskataan ja liuotetaan väkevään suolahappoon. Suolahappoon liuenneesta alumiinista valmistetaan alumiinihydroksidia lisäämällä vettä suolahappoliuokseen. Tämän jälkeen liuos kuumennetaan, jonka seurauksena syntyy alumiinioksidia. Alumiinioksidi pelkistetään elektrolyysillä, jonka lopputuloksena syntyy sulaa alumiinia. Lopuksi alumiini valetaan jatkokäsittelyä varten aihioiksi.

Alumiiniaihioista on mahdollista valmistaa monia eri tuotteita. Siitä voidaan esimerkiksi pursottaa muotin läpi alumiiniprofiilia. Alumiinista voidaan myös valssata levyjä. Valutekniikalla sulasta alumiinista saadaan helposti valettua muotin mallinen.

2.3 Alumiinin ominaisuudet

Alumiinilla on paljon hyviä ominaisuuksia, joiden takia se on erityisen hyvä rakennusmateriaali moniin eri rakennusteollisuuden sovelluksiin ja käyttökohteisiin.

Alumiinin paino on vain 2700 kg/m^3 , mikä on noin kolmanneksen teräksen painosta 7800 kg/m^3 . Alumiinilla on hyvä lujuus/paino-suhde, joten alumiinia käyttämällä teräksen sijasta saadaan kevennettyä kuormituksia huomattavasti.

Alumiini on materiaalina sitkeää ja hyvin muovattavaa. Tämä mahdollistaa sille monia käyttötarkoituksia: sitä voidaan valssata hyvin ohutta foliota, sekä pursottaa erilaisiksi profiileiksi, takoa, valaa ja puristaa.

Hapettuessaan alumiinin pintaan muodostuu oksidikerros, joka suojaa alumiinia korroosiolta. Oksidikerroksen paksuus on noin 0,001-0,003 μm . Se on luja, tiivis ja itsestään korjaantuva kerros alumiinin pinnassa. Oksidikerros suojaa alumiinia esimerkiksi korroosiolta, kulumiselta, sekä erilaisilta hapoilta.

Alumiinin sähkön- ja lämmönjohtamiskyky on erittäin hyvä. Taulukkokirjasta saadaan alumiinin lämmönjohtavuudeksi $237 \frac{W}{mK}$. Se myös laajenee lämpötilan vaikutuksesta voimakkaasti, mikä täytyy huomioida rakenteita suunniteltaessa. Alumiinin lämpölaajenemiskerroin on $24 * 10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$. Alumiini on yleisimmin käytetty johdinmateriaali sähkönjohtimissa. Sen sähkönjohtavuus painoonsa suhteutettuna on kaksinkertainen kupariin nähden.

Kosteassa meri-ilmassa kloridit, sekä suuri kosteuspitoisuus rasittavat alumiinia paljon ja voivat aiheuttaa korroosiota. Samoin teollisuusalueiden ilmassa oleva rikkioksidi lisää alumiinin syöpymistä. Maakosketuksessa oleva alumiini altistuu kosteudelle, happipitoiselle maalle, sekä alkalisille aineille (emäksille). Hiiltä ja tuhkaa sisältävät maa-ainekset ovat erityisen syövyttäviä alumiinille. Seuraavassa kuvassa (kuva 2) on kerrottu tarkemmin alumiinin korroosion kestävydestä.

Taulukko 28. Alumiinin galvaaninen korroosio [7].

Alumiinin kanssa kosketuksissa oleva metalli	Olosuhteet	Materiaaliparin korroosionkestävyys
Sinkki Kromi	Kaikki olosuhteet Kaikki olosuhteet	Sinkki syöpyy Hyvä
Ruostumaton teräs Ruostumaton teräs	Ilma ja makeavesi Merivesi	Hyvä Alumiini syöpyy
Titaani Titaani	Ilma ja makeavesi Merivesi	Hyvä Alumiini syöpyy
Hiiliteräs Hiiliteräs	Puhdas ilma Meri- tai teollisuusilmasto	Hiiliteräs syöpyy Hiiliteräs syöpyy
Lyijy Lyijy	Puhdas ilma Meri- tai teollisuusilmasto	Alumiini syöpyy vain vähän Alumiini syöpyy
Kupari Nikkeli	Kaikki olosuhteet Kaikki olosuhteet	Alumiini syöpyy Alumiini syöpyy

KUVA 2. Alumiiniseosten korroosionkestävyys

Kimmokerroin eli kimmomoduuli kuvaa kappaleen venymistä voiman vaikutuksesta. Alumiinin kimmomoduuli E on 70 000 Mpa, joka on noin 1/3 teräksen kimmomoduulista 210 000 Mpa:sta. Näin ollen muodonmuutokset vakiovoimalla ovat noin kolminkertaiset teräkseen verrattuna.

2.4 Alumiinin käyttökohteet

Alumiini on lujaa, kevyttä, korroosionkestävää, helposti muotoiltavaa, ympäristöystävällistä, sekä helposti kierrätettävää. Näiden ominaisuuksien ansioista sillä on useita käyttömahdollisuuksia. Helppokäyttöisyyden takia alumiinia käytetään laajalti teollisuudessa, pientalorakentamisessa sekä infrarakentamisessa. Alumiinin käyttökohteita ovat esimerkiksi lentokoneet, laivat, veneet, autot, pyörät, elektroniikka, kodinkoneet, työkalut, valaisimet, pakkaukset sekä liikenneopasteet.

Alumiinista kehitetään jatkuvasti uusia sovelluksia ja sen käyttö lisääntyy vuodessa noin 2,5 %. Vuodessa alumiinia valmistetaan noin 45 miljoonaa tonnia ja sitä kierrätetään noin seitsemän miljoonaa tonnia.

Alumiini soveltuu sekä sisä- että ulkorakentamiseen. Muotoiltavuus ja pintakäsittelyvyys ovat tärkeitä ominaisuuksia alumiinin valinnassa. Alumiinin käyttö yleistyy koko ajan kantavissa rakenteissa. Kantavana rakenteena sitä käytetään esimerkiksi kasvihuoneissa, sekä kevytrakenteisissa halleissa ja tilapäissuojissa.

Julkisivuissa alumiinia käytetään levyverhouksissa, listoissa, kiskoissa, kannakkeissa, räystäskouruissa, ovissa, syöksytörmäissä, tikkaissa, lumiesteissä, katoissa, sekä ikkunapuitteissa ja -karmeissa. Alumiini on helppokäyttöinen sen muotoiltavuuden sekä keveyden takia. Se sopii hyvin myös pintamateriaaliksi korroosion kestävyytensä ansiosta. Esimerkiksi julkisivupaneelien asennus on helppoa asettamalla ja kiinnittämällä paneelit valmiiksi suunniteltuihin alumiinikiskoihin ja liitoksiin.

Rakennustyömaalla alumiini on todella laajalti käytössä. Sitä käytetään esimerkiksi rakennustelineissä, katoissa, seinissä, ovissa, ikkunoissa, työtasoissa, korokkeissa, suoja-aidoissa, työkaluissa, kylteissä, muoteissa, huputuksien ja suojaauksien rungoissa, sekä monissa taloteknisissä sovelluksissa. Alumiinia käytetään paljon elintarvikkeiden ja lääkkeiden pakkausmateriaalina, koska se on myrkytöntä ja helppokäyttöistä.

2.5 Alumiinin nimikejärjestelmä

Alumiinin laadun nimikkeet vaihtelevat sen koostumuksen ja mekaanisten ominaisuuksien mukaan. Alla olevassa (kuvassa 3) on yleisimmät alumiinilaadut ja tietoa eri alumiinilaatujen seoksista.

Muokattavat alumiiniseokset

Karkenemattomat	1000-sarja	3000-sarja	4000-sarja	5000-sarja	8000-sarja	Lujuus kasvaa seosainelisyksen kasvaessa. sekä kylmämuokkauksella
Karkenenvat	2000-sarja	6000-sarja	7000-sarja			Lujuus kasvaa erkautuskarkaisulla

Yleisimpien alumiinilaatujen kemiallinen koostumus ja mekaanisia ominaisuuksia

Tunnus EN 573-3	Kemiallinen max. koostumus % EN 573-3	Esimerkkejä mekaanisista ominaisuuksista EN 485-2											
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Tila	R _{p0.2} min	R _m min	R _m max
1050A	Al 99.5	0.25	0.4	0.05	0.05	0.05	-	0.07	0.05	H22	55	85	125
2017A	AlCu4MgSi	0.20-0.8	0.7	3.5-4.5	0.40-1.0	0.40-1.0	0.1	0.25	-	T4	245	390	-
2024	AlCu4Mg1	0.5	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.1	0.25	0.15	T4	290	425	-
3103	AlMn1	0.5	0.7	0.1	0.9-1.5	0.3	0.1	0.2	-	H22	75	115	155
4017	AlSiMnMgCu	0.6-1.6	0.7	0.10-0.50	0.6-1.2	0.10-0.50	-	0.2	-				
5005	AlMg1	0.3	0.7	0.2	0.2	0.5-1.1	0.1	0.25	-	H22/H32	80	125	165
5026	AlMg4.5MnSiFe	0.55-1.4	0.20-1.0	0.10-0.30	0.6-1.8	3.9-4.9	0.3	1	0.2	H24 a	220	300	340
5083	AlMg4.5Mn0.7	0.4	0.4	0.1	0.40-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0.25	0.15	H22/H32	215	305	380
5754	AlMg3	0.4	0.4	0.1	0.5	2.6-3.6	0.3	0.15	0.15	H22/H32	130	220	270
6063	AlMg0.7Si	0.2-0.6	0.35	0.1	0.1	0.45-0.9	0.1	0.1	0.1	T4	65	130	-
6082	AlSi1MgMn	0.7-1.3	0.5	0.1	0.40-1.0	0.6-1.2	0.25	0.2	0.1	T4	110	205	-
7075	AlZn5.5MgCu	0.4	0.5	1.2-2.0	0.3	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1	0.2	T6	460	540	-

Yleisimmät EN-standardit alumiineille

EN 485-1	Alumiini ja alumiiniseokset. Levyt ja nauhat. Osa 1: Yleiset tekniset toimitusehdot
EN 485-2	Alumiini ja alumiiniseokset. Levyt ja nauhat. Osa 2: Mekaaniset ominaisuudet
EN 485-3	Alumiini ja alumiiniseokset. Levyt ja nauhat. Osa 3: Kuumavalssattujen tuotteiden mitta- ja muototoleranssit
EN 485-4	Alumiini ja alumiiniseokset. Levyt ja nauhat. Osa 4: Kylmävalssattujen tuotteiden mitta- ja muototoleranssit
EN 515	Alumiini ja alumiiniseokset. Muokatut tuotteet. Tilojen tunnuksot
EN 573-1	Alumiini ja alumiiniseokset. Muokattujen tuotteiden kemiallinen koostumus ja tuotemuodot. Osa 1: Numeerinen nimikejärjestelmä
EN 573-2	Alumiini ja alumiiniseokset. Muokattujen tuotteiden kemiallinen koostumus ja tuotemuodot. Osa 2: Kemialliseen koostumukseen perustuva nimikejärjestelmä
EN 573-3	Alumiini ja alumiiniseokset. Muokattujen tuotteiden kemiallinen koostumus ja tuotemuodot. Osa 3: Kemiallinen koostumus ja tuotemuodot

KUVA 3. Alumiiniseosten nimikejärjestelmä Ruukin nettisivuilta

Alumiinin nimikejärjestelmä koostuu kirjainosasta sekä numero-osasta seuraavan esimerkin mukaisesti:

Esimerkiksi alumiinilaatu **EN AW-5083**

- Etuliite **EN** tarkoittaa EN-standardia
- Kirjain **A** tarkoittaa alumiinia
- Kirjain **W** tarkoittaa muokattua tuotetta
- Väliviiva – erottaa numerosarjan kirjaimista
- Neljä numeroa **5083** tarkoittaa kemiallista koostumusta

Alumiinia voidaan seostaa monilla eri metalleilla, jotta sille saadaan parhaat mahdolliset ominaisuudet käyttötarkoituksen ja -kohteen mukaan. Eri seostuksilla vaikutetaan alumiinin lujuuteen, korroosion kestävyys, muokattavuuteen ja sitkeyteen. Alumiinin yleisimpiä seosaineita ovat sinkki (Zn), kupari (Cu), mangaani (Mn), magnesium (Mg), sekä pii (Si).

3 ALUMIINIRAKENTEIDEN EUROKOODI 9

Alumiinirakenteiden Eurokoodi 9 sisältää seuraavat osiot:

3.1 EN1999-1-1: Eurokoodi 9

EN1999-1-1: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt. Tämä osio sisältää alumiiniseosten rakenteiden suunnittelua koskevia perussääntöjä ja ohjeita. Se sisältää aiheita esimerkiksi suunnittelun perusteista, materiaaleista, kestävydestä, rakenteellisesta analyysistä ja tietoa liitoksien suunnittelusta.

3.2 EN1999-1-2: Eurokoodi 9

EN1999-1-2: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteiden palomitoitus. Tämä osio sisältää sääntöjä alumiinisten rakenteiden palomitoitukseen. Niillä ehkäistään palon aiheuttaman rakenteiden ennenaikainen sortuminen ja palon leviäminen.

3.3 EN1999-1-3: Eurokoodi 9

EN1999-1-3: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Väsymiselle alttiit rakenteet. Tässä osiossa on ohjeita alumiinirakenteille, jotka ovat alttiita väsymisreaktiolle.

3.4 EN1999-1-4: Eurokoodi 9

EN1999-1-4: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-4: Kylmämuovattut kantavat muotolevyt. Tämä osio sisältää suunnitteluvaatimukset kylmämuovatuille alumiinilevyille.

3.5 EN1999-1-5: Eurokoodi 9

EN1999-1-5: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Kuorirakenteet. Tässä osiossa on sääntöjä jäykistettyjen ja jäykistämättömien alumiinisten kuorirakenteiden suunnitteluun.

4 SCIA ENGINEER

4.1 Nemetschek Scia

Nemetschek Scia on vuonna 1974 perustettu ohjelmistoyritys, jonka päämaja sijaitsee Belgiassa. Yritys kehittää, markkinoi ja tukee rakennesuunnittelu-, laskenta- ja analysointiohjelmistoja. Scia lyhenne tulee sanoista ”*Scientific applications*”. Yritys toimii 15:ssä maassa ja sillä on 120 työntekijää. Nemetschek Scia on maailman johtavimman arkkitehtuuri-, suunnittelu- ja rakentamisenohjelmistojen kehittäjän Nemetschek yrityksen tytäryhtiö.

4.2 Ohjelmasta yleisesti

Scia Engineer on Nemetschek Scian tekemä ohjelma rakenteiden mallinnukseen ja mitoitukseen. Ohjelmalla voidaan mallintaa ja mitoittaa yksinkertaisista pilari- ja palkki rakenneosista laajoihin ja mittaviin rakennekokonaisuuksiin kuten isot rakennuskokonaisuuudet ja sillat. Scia Engineer -ohjelmalla voidaan mitoittaa yleisimpiä rakennusmateriaaleja: puuta, terästä, teräsbetonia ja alumiinia. Ohjelmalla on mahdollista mallintaa rakenteita 2D- sekä 3D- käyttötiloissa.

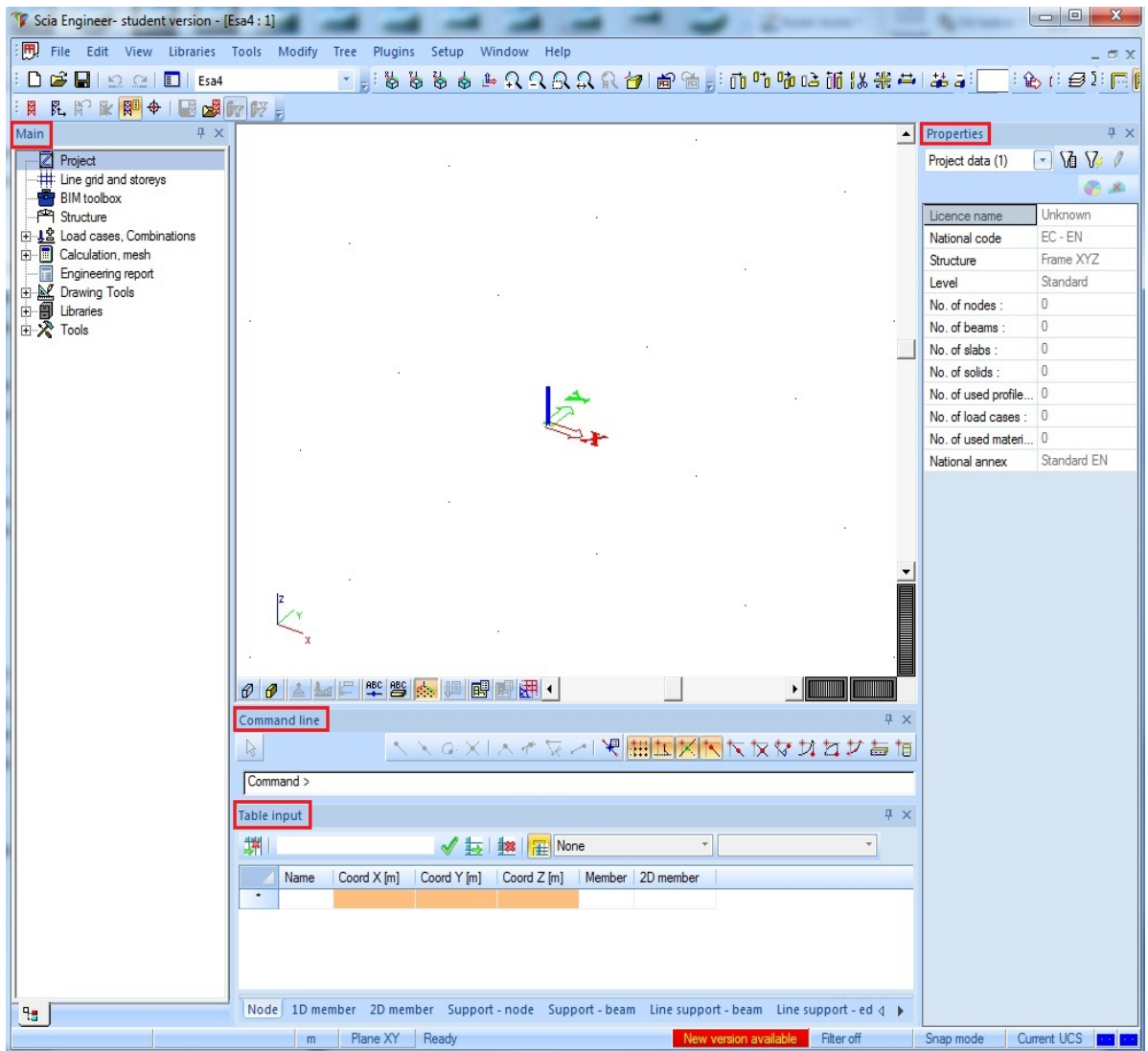
Ohjelma käyttää elementtimenetelmäpohjaista laskentaa rakenteiden rasitusten selvittämiseksi. Ohjelmassa on useita työkaluja mallintamiseen, mitoitukseen ja ominaisuuksien käyttöön. Tästä eteenpäin ohjelmasta puhuttaessa käytetään nimeä Scia.

4.3 Ohjelman versio

Scian uusin versio on v.13.0.1036 ja se on ladattavissa ilmaiseksi. Opiskelija saa Scian käyttöönsä rekisteröitymällä *nemetschek-scia.com* verkkosivulla käyttäjäksi. Opiskelijaversio on sama kuin ammattilaisversio, mutta tulostettuun työhön tulee vesileima ”*Student versions*”, sekä opiskelijaversioiden projektit eivät ole avattavissa muissa kuin opiskelijaversiossa. Tässä opinnäytetyön alumiinin mitoituksessa käytetään Scian opiskelijaversiota 12.0.1094

4.4 Ohjelman ulkoasu

Scia näkymä koostuu (kuvan 4) mukaisista ikkunoista ja valikoista.



KUVA 4. Scia Engineer ohjelman ikkunat

Main-ikkuna on näytön vasemmalla reunalla oleva päävalikko. Päävalikosta pääsee muokkaamaan projektin tietoja, sekä se on nopea oikotie monien eri ominaisuuksien käyttöön. Esimerkiksi pääikkunasta löytyvästä structures-kohdasta pääsee valitsemaan mallinnettavia rakenneosia. Päävalikon alareunassa on välilehden tapainen valikko, jolla pääsee liikkumaan päävalikon ja valittujen valikoiden välillä.

Command line on komentorivi, johon voidaan syöttää esimerkiksi sijoitettavan rakenneosan alkupisteen koordinaatit. Sitä kautta voidaan myös käyttää monia pikakomentoja.

Table input on keskellä alareunassa oleva taulukkomuodossa oleva syöttöalue, jossa voidaan muuttaa esimerkiksi solmukohtien sijaintia koordinaatistossa.

Properties eli ominaisuudet valikko löytyy oikeasta reunasta. Properties-valikossa voidaan muuttaa ja määrittää yksittäisten rakenneosien ja solmujen ominaisuuksia. Valikon kautta voidaan määrittää nopeasti ja helposti yksittäisten rakenneosien tasoja, materiaaleja, pituuksia ja poikkileikkauksia.

Mallinusikkuna on näytön keskellä oleva tila, mikä koostuu koordinaatistosta, koordinaatistoon tuoduista rakenneosista ja solmukohdista. Mallinusikkuna on yksi mallinsohjelman tärkein apuväline havainnollistamiseen ja mallinnettujen rakennusosien valitsemiseen. Siitä näkee rakenteen kokonaisuutena. Mallinusikkunassa liikkuminen tapahtuu helpoiten painamalla hiiren rulla pohjaan ja liikuttamalla hiirtä, jolloin liikutaan kohteesta kohtisuoraan katsottuna sivuille sekä ylä- ja alasuuntiin. Mallin pyörittäminen tapahtuu helpoiten painamalla yhtä aikaa ctrl-näppäin ja hiiren oikea painike pohjaan, jolloin hiirtä liikuttamalla mallinnettu rakenne pyörii.

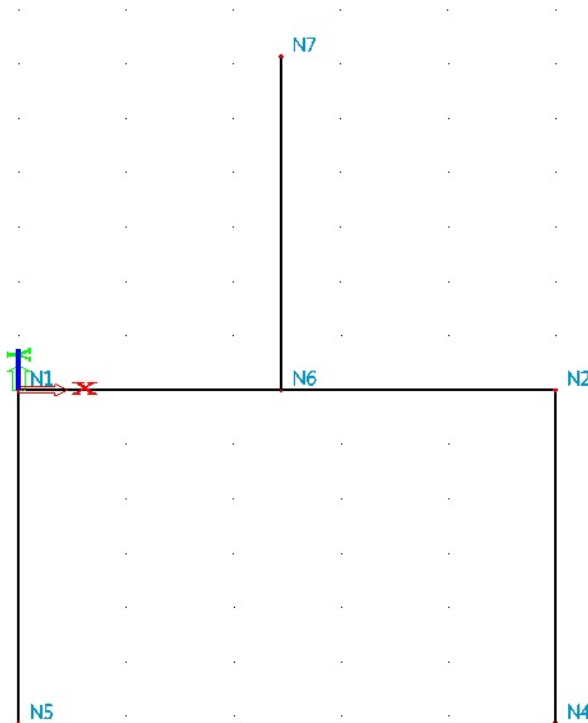
Ylävalikko on pikanäppäimiä täynnä oleva valikko eri komentojen ja työkalujen nopeaan löytymiseen. Ylävalikkoon voidaan helposti valita eniten tarvitsemansa työkalut ja piilottaa vähemmän käytetyt. Ylävalikon valinnoista löytyvät lähes kaikki Sciassa olevat ominaisuudet ja toiminnot.

5 ALUMIINIRAKENTEIDEN MALLINTAMINEN JA MITOITUS SCIALLA

5.1 Ohjelman käyttö mallintamisessa ja mitoittamisessa

Scialla on mahdollista mallintaa ja mitoittaa teräs-, puu-, alumiini-, betoni- ja teräsbetonirakenteita. Ohjelma kykenee mitoittamaan rakennemalleja, joissa on käytetty useita eri materiaaleja. Tässä opinnäytetyössä käytetään ohjelmaa vain alumiinirakenteiden mitoituksessa eurokoodien mukaisesti. Alumiinisten rakenneosien mallinnusprosessi on lähes samanlainen teräsrakenteiden mallinnuksen kanssa.

Mallintaminen tapahtuu rakenneosien ja niiden välisten solmukohtien sijoittamisella ja näiden parametrien muuttamisella haluttuihin arvoihin. Parametrien muuttaminen tarkoittaa esimerkiksi palkin materiaalin, pituuden ja poikkileikkauksen muuttamista haluttunlaiseksi. Solmukohdissa määritellään tukien toiminta ja vapausasteet. Solmukohdat ovat aina rakenneosien päissä (kuvan 5) osoittamalla tavalla. (Kuvassa 5) on kolmen pilarin ja yhden palkin muodostama rakenne jotka ovat toisissaan kiinni solmukohdilla (N1-N7)

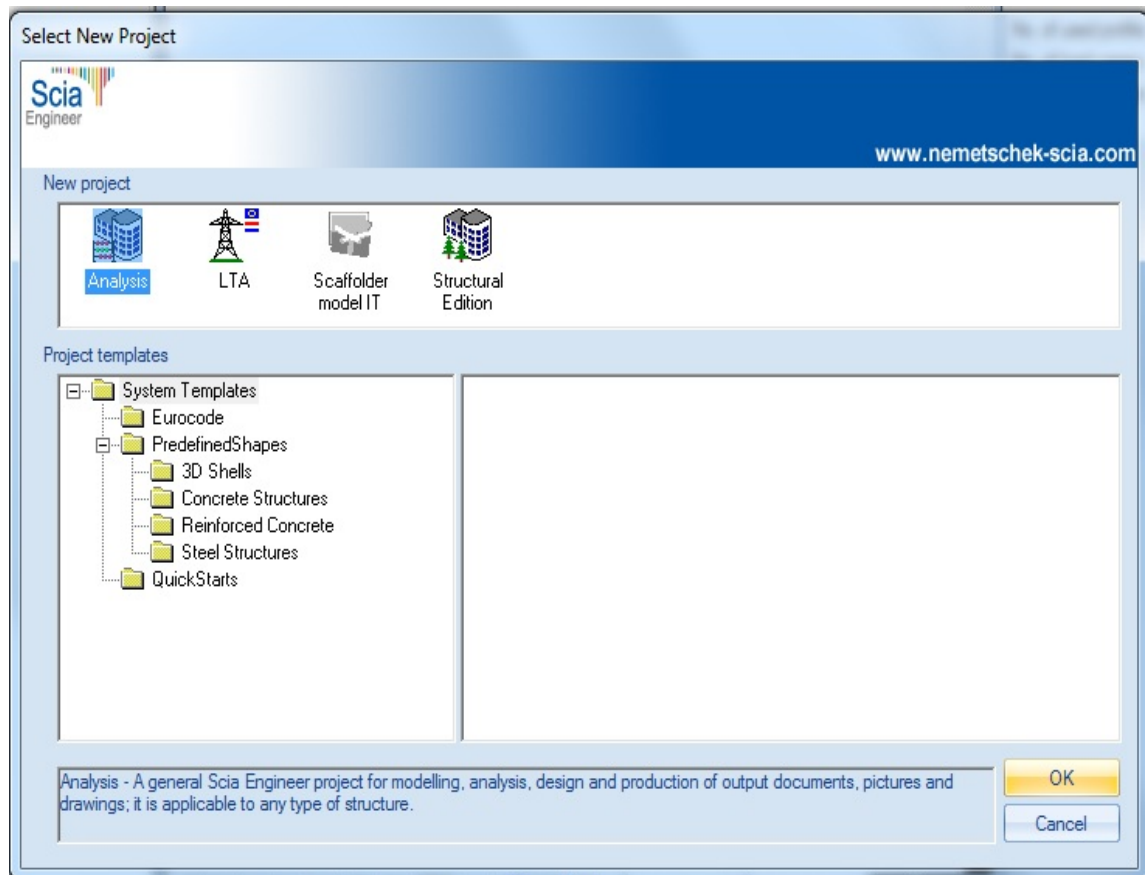


KUVA 5. Solmukohdat N1-N7

5.2 Aloitus

Seuraavaksi käydään läpi Scialla yksinkertaisen rakenneosan mallintaminen ja sen mitoitus.

Scia –ohjelman käynnistyttyä tulee alla olevan (kuvan 6) mukainen *Select New Project*-ikkuna. Valitaan *Analysis* ja painetaan ok, jonka jälkeen avautuu projektin dataikkuna.

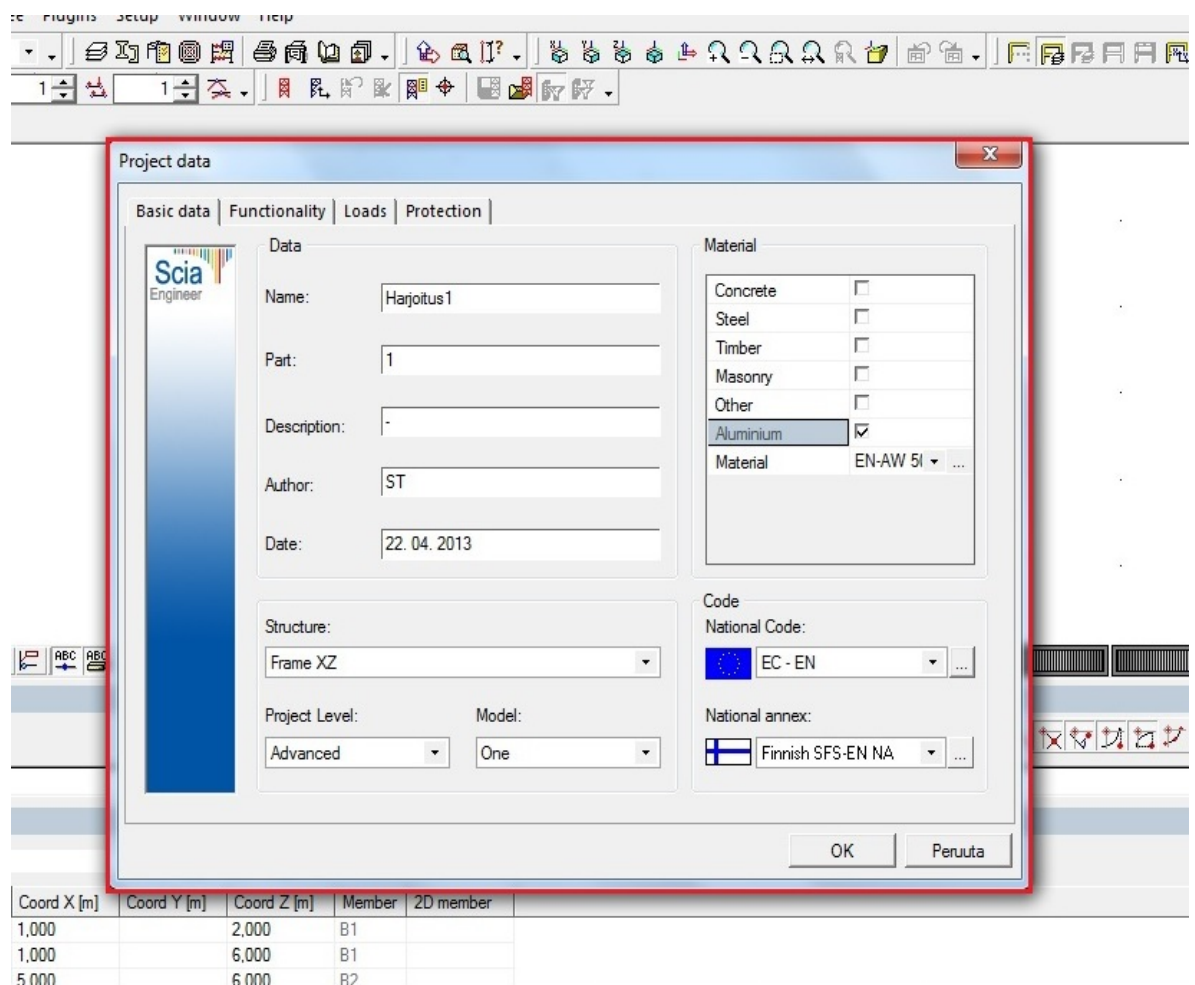


KUVA 6. Projektin valintaikkuna

Rakenteiden mallintaminen lähtee liikenteeseen syöttämällä alla olevaan (kuvan 7) *Project data*-ikkunaan tarvittavat perustiedot: projektinimi, osa, selostus, tekijä ja päivämäärä. Tämän jälkeen valitaan materiaali sekä sen laatu. Seuraavaksi valitaan eurokoodi ja kansallinen koodi mitoitettavan rakennuskohteen mukaan. Kohdasta *Structure* valitaan millaista koordinaatistoa käytetään.

Project Level-valikosta valitaan joko *Standard* tai *Advanced*. Valitsemalla *Advanced* saadaan enemmän ominaisuuksia ja vaihtoehtoja käyttöön rakenteen mallintamisessa.

Kohdasta *Model* valitaan mallinnetaanko yksittäinen kohde vai rakennusvaiheita.

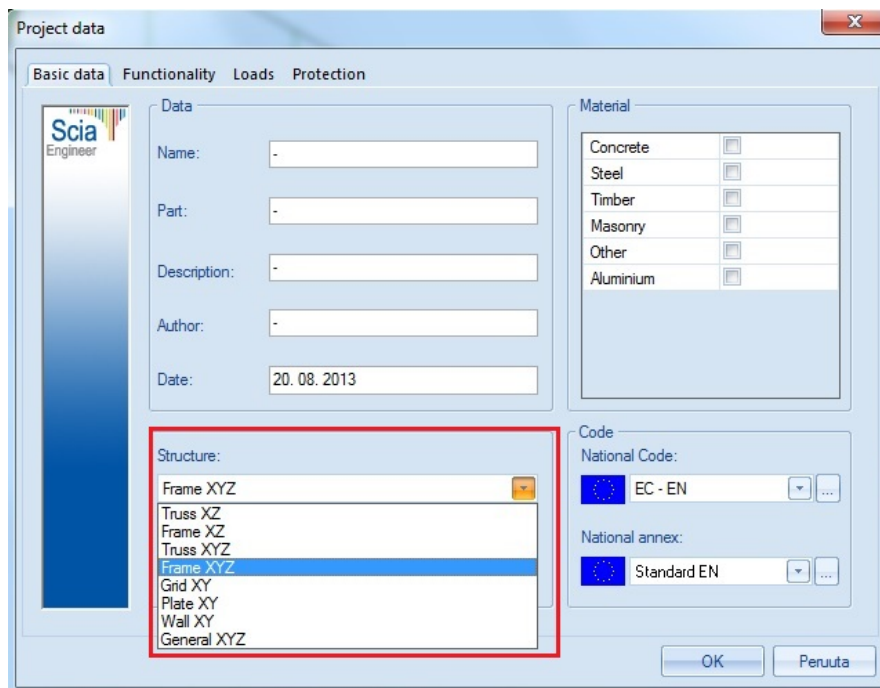


KUVA 7. Project dataikkuna

Project data-ikkunaan voidaan palata myöhemmin, jos on tarvetta lisätä uusia materiaaleja tai muokata projektin tietoja.

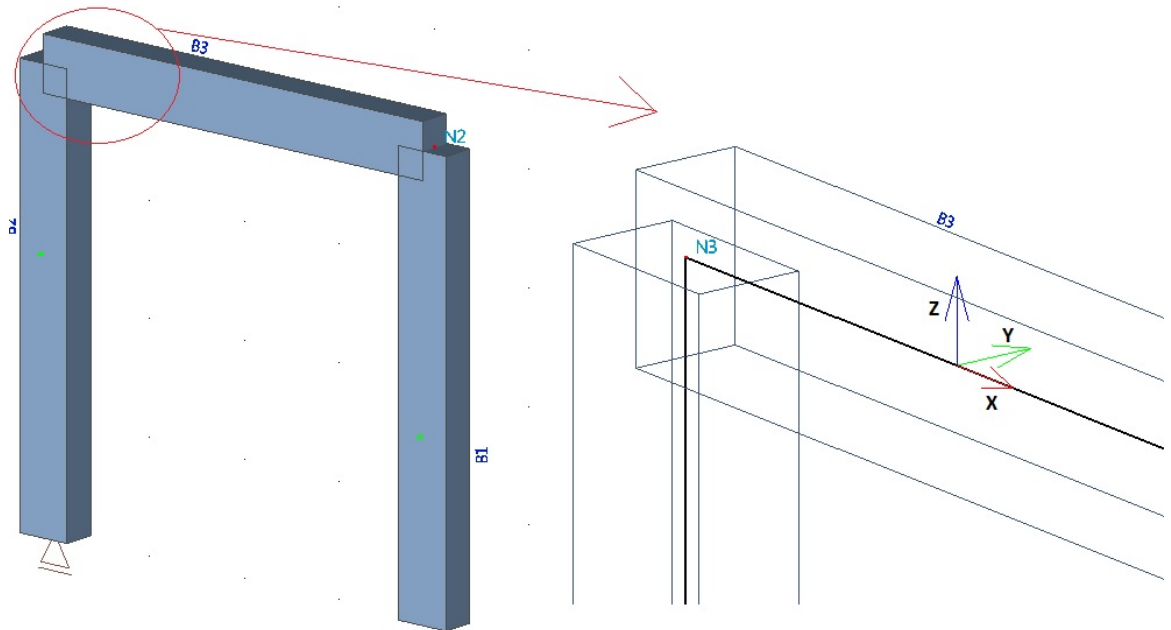
Koordinaatiston valinta (kuva 8) kannattaa valita mitoitettavan kohteen tai rakennusosan mukaan. Jos mitoitetaan vain yksinkertainen 2D-näkymässä oleva palkki, niin riittää kun valitaan *Frame XZ*-koordinaatisto kohdasta *Structure*. Jos mitoitettava kohde vaatii 3D-mallinnusta, niin valitaan *Frame XYZ*-koordinaatisto.

Esimerkiksi yhden palkin ja sen tukien mallintamiseen riittää, kun valitaan *Frame XZ*-koordinaatisto. Jos mallinnetaan kohdetta syvyys suunnassa Y, niin täytyy valita *Frame XYZ*.



KUVA 8. Structure-kohdasta valitaan käytettävä koordinaatisto

Seuraavassa (kuvassa 9) havainnollistetaan kuinka koordinaatisto on valmiissa mallissa. Se menee seuraavan (kuvan 9) mukaisella tavalla. X on rakenteen leveys, Y on syvyys ja Z on korkeus.

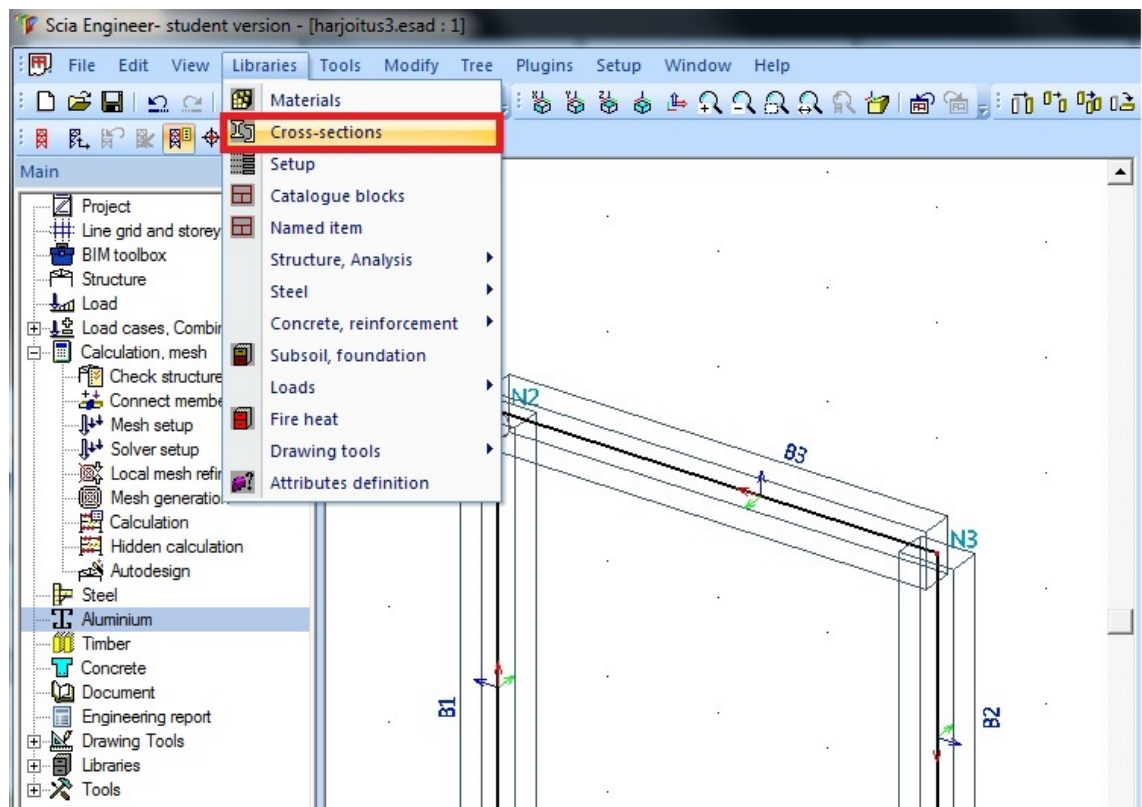


KUVA 9. Koordinaatisto XYZ

5.3 Profiilikirjasto

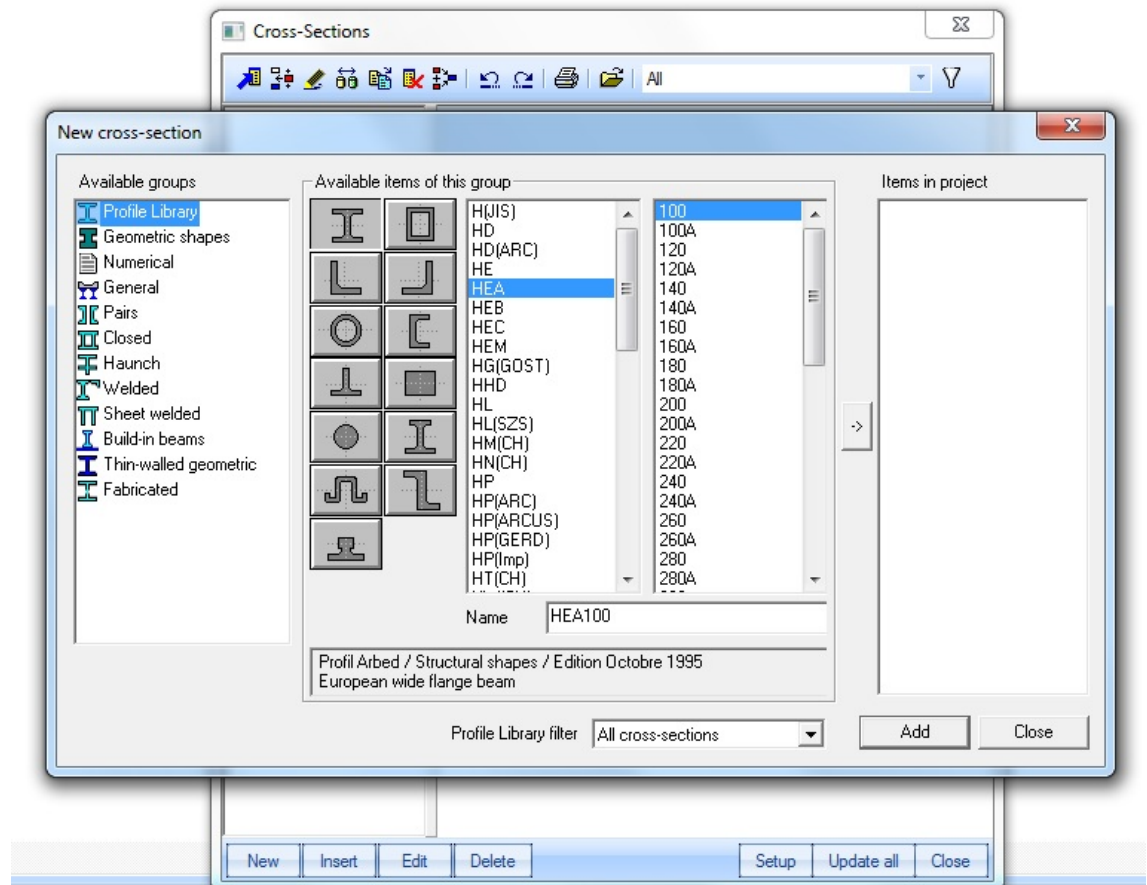
Scian profiilikirjastossa on kattavasti erilaisia poikkileikkauksien profiilimalleja. Poikkileikkauksivalikossa voidaan vapaasti muuttaa mallin poikkileikkauksen parametreja. Esimerkiksi korkeutta, leveyttä, paksuutta, materiaalia, muotoa, sädettä sekä kulmia voidaan muuttaa. Jokaiselle mallinnettavalle rakenneosalle täytyy ensin määrittää poikkileikkaus, jonka jälkeen se voidaan sijoittaa mallinnusikkunaan.

Profiilikirjasto löytyy alla olevan (kuvan 10) osoittamasta paikasta ylävalikosta *Libraries*-lehden alta kohdasta *Cross-sections*.



KUVA 10. Poikkileikkauksien profiilikirjasto

Profiilikirjasto on alla olevan (kuvan 11) näköinen. Ensin haluamaansa profiilia kannattaa etsiä ryhmästä *Profile Library*, josta löytyy kaikki olemassa olevat yleisimmät profiilityypit ja mallit. Tarvittaessa poikkileikkausta kannattaa etsiä kohdasta *Geometric shapes*. Ryhmän *Geometric shapes* mallien mittoja voi vapaasti muuttaa saadakseen sopivan poikkileikkauksen. Muista poikkileikkauksien ryhmistä löytyy erikoisempia malleja, joita harvemmin tulee vastaan.



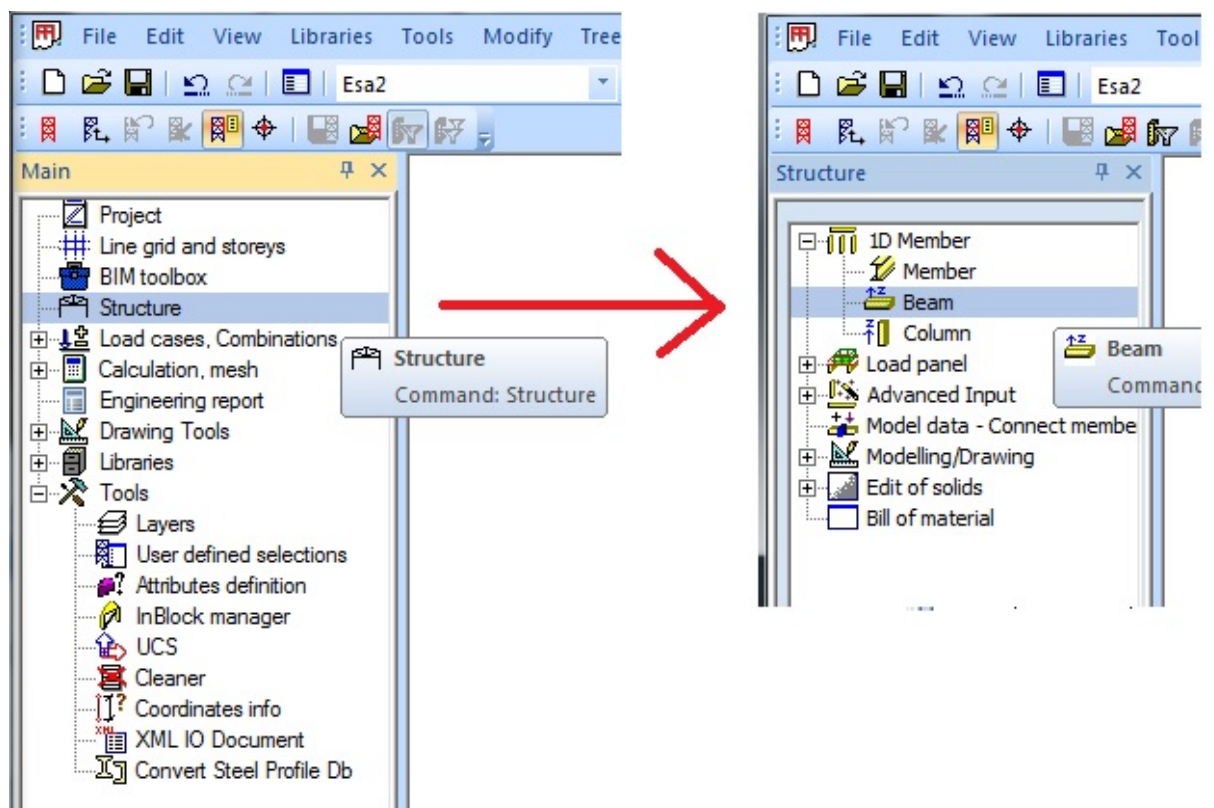
KUVA 11. Poikkileikkauskirjaston profiilien malleja

Ohjelmalla voidaan myös halutessaan itse luoda uusia poikkileikkauksia. Scia osaa laskea uusille luoduille profiileille poikkileikkausarvot huomioiden poikkileikkauksen muodon ja materiaalin. Uusien poikkileikkausprofiilien luonti käydään läpi kohdassa (6) Profiilien poikkileikkaukset.

5.4 Rakenneosan mallintaminen

Kuten kaikissa mitoitusohjelmissä, ensin täytyy luoda rakennemalli, jonka jälkeen se voidaan mitoittaa. Rakenne koostuu yksittäisistä osista eli komponenteista, jotka liitetään toisiinsa solmukohtien avulla. Niissä määritellään tukien toiminta ja vapausasteet.

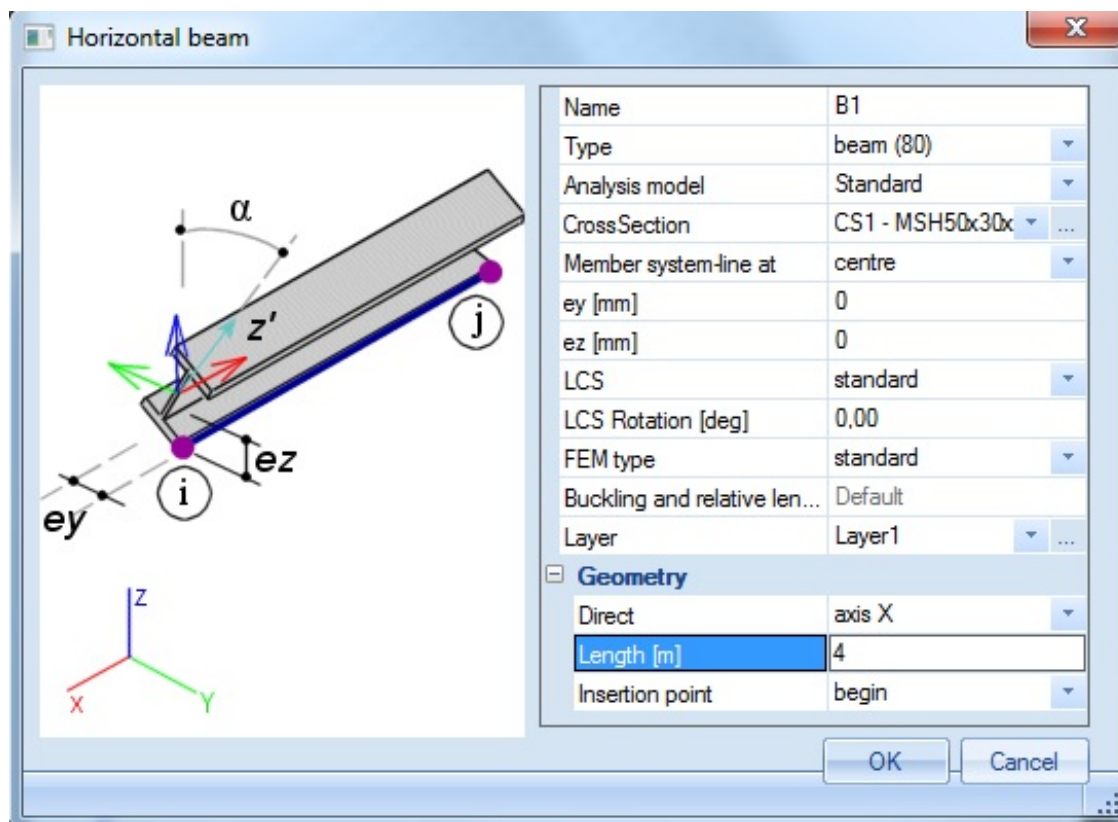
Ensimmäiseksi valitaan vasemmalta päävalikosta kohta *Structure*, jonka jälkeen valitaan rakenneosa, joka halutaan mallintaa. Halutessa voidaan valita esimerkiksi alla olevan (kuvan 12) mukaisesti *beam* eli palkki.



KUVA 12. Structure valikosta palkin valitseminen

Kun palkki on valittu, päästään profiilin poikkileikkauksen valintaikkunaan. Valitaan palkille sopiva poikkileikkaus profiilikirjastosta, jonka jälkeen määritetään sen ominaisuudet *Horizontal beam*-ikkunassa.

Horizontal beam-ikkunassa (kuva 13) määritetään palkille nimi, tyyppi, poikkileikkaus, taso, pituus, syöttöpiste, suunta ja y- ja z-suuntaiset poikkeamat.



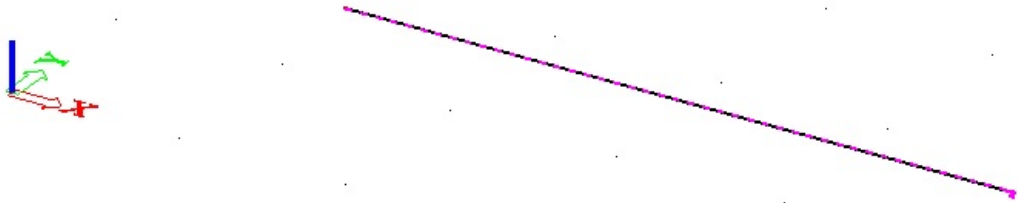
KUVA 13. Palkin ominaisuuksien määrittäminen

Kun palkille on asetettu halutut arvot, seuraavaksi palkki asetetaan mallinusikkunan koordinaatistoon. Rakenneseosan asettamiseen mallinusikkunaan on muutamia eri tapoja.

Voidaan esimerkiksi syöttää komentoriville *Command line* koordinaatit muodossa (XYZ), joka kirjoitetaan näin: (2;0;1). Tällöin valittu rakenneseosan alkupiste sijoittuu koordinaatistossa pisteeseen $X=2$, $Y=0$, $Z=1$. Nyt meillä on mallinnettu palkki, joka alkaa pisteestä (2,0,1) Toinen tapa on osoittaa hiirellä mallinusikkunan koordinaatistoon palkin alkamiskohta ja painaa hiiren vasenta näppäintä.

Palkin ominaisuuksia voidaan vielä muokata valitsemalla palkki aktiiviseksi mallinusikkunasta. Kun palkki on aktiivisena, voidaan sen ominaisuuksia muuttaa *Properties*-valikosta.

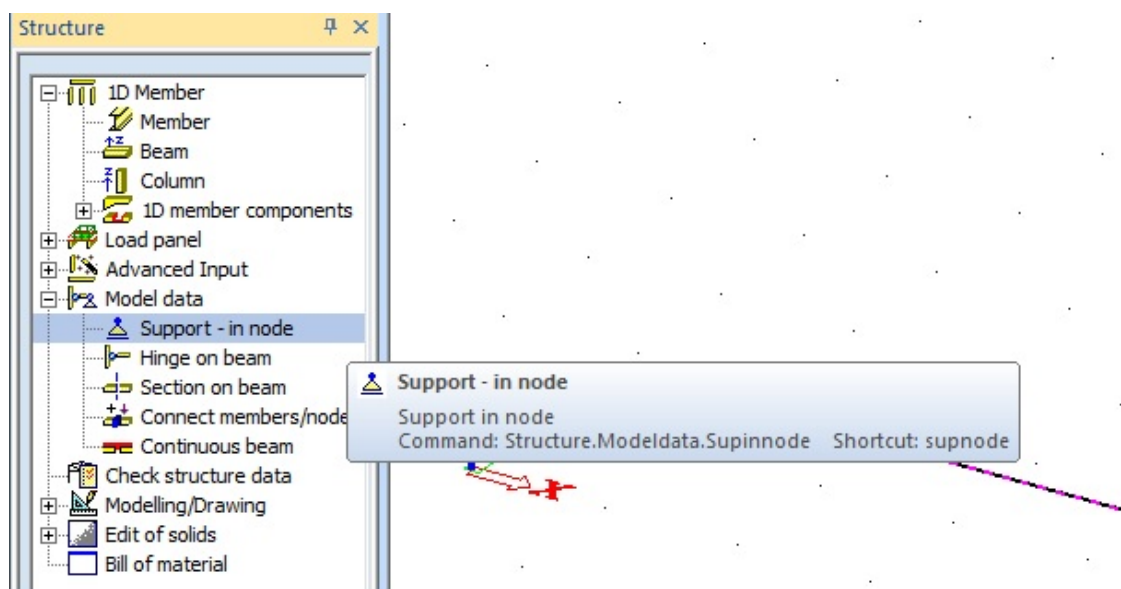
Alhaalla on esimerkki (kuvan 14) mukaisesta palkista ja sen molemmissa päissä on solmut. Seuraavaksi on vuorossa tukien laittaminen paikoilleen.



KUVA 14. Palkki jonka päissä solmut

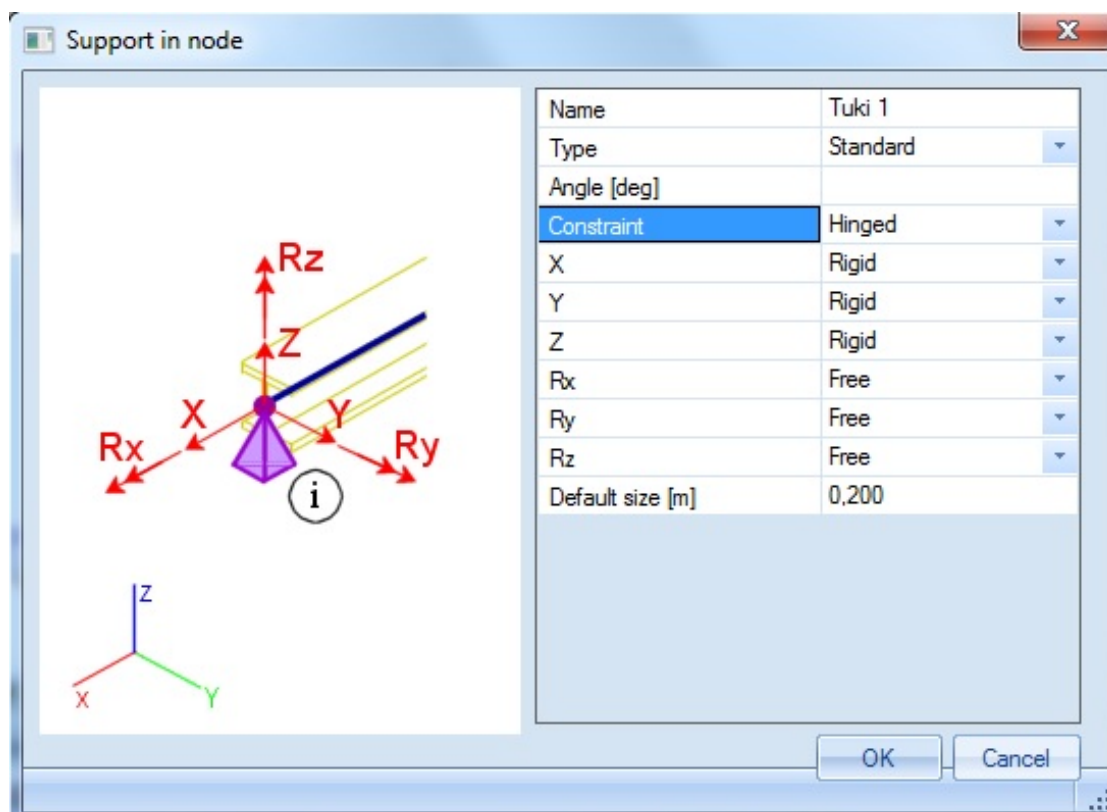
5.5 Tukien määrittäminen

Seuraavaksi määritellään tuet palkin päihin eli solmukohtiin. Valitaan vasemmalta pääikkunasta *Structure* ja alla olevan (kuvan 15) mukaisesti *Model data*-kohdasta *Support - in node* eli tuki solmukohdassa.



KUVA 15. Tuki solmukodassa valinta

Tästä aukeaa alla olevan (kuvan 16) mukainen *Support in node*-ikkuna, josta määritetään tuen ominaisuudet. Tuella voidaan määrittää nimi, tyyppi, kulma, koko ja vapausasteet eli mihin suuntaan sillä on mahdollista liikkua ja mihin suuntaan se on jäykkä.



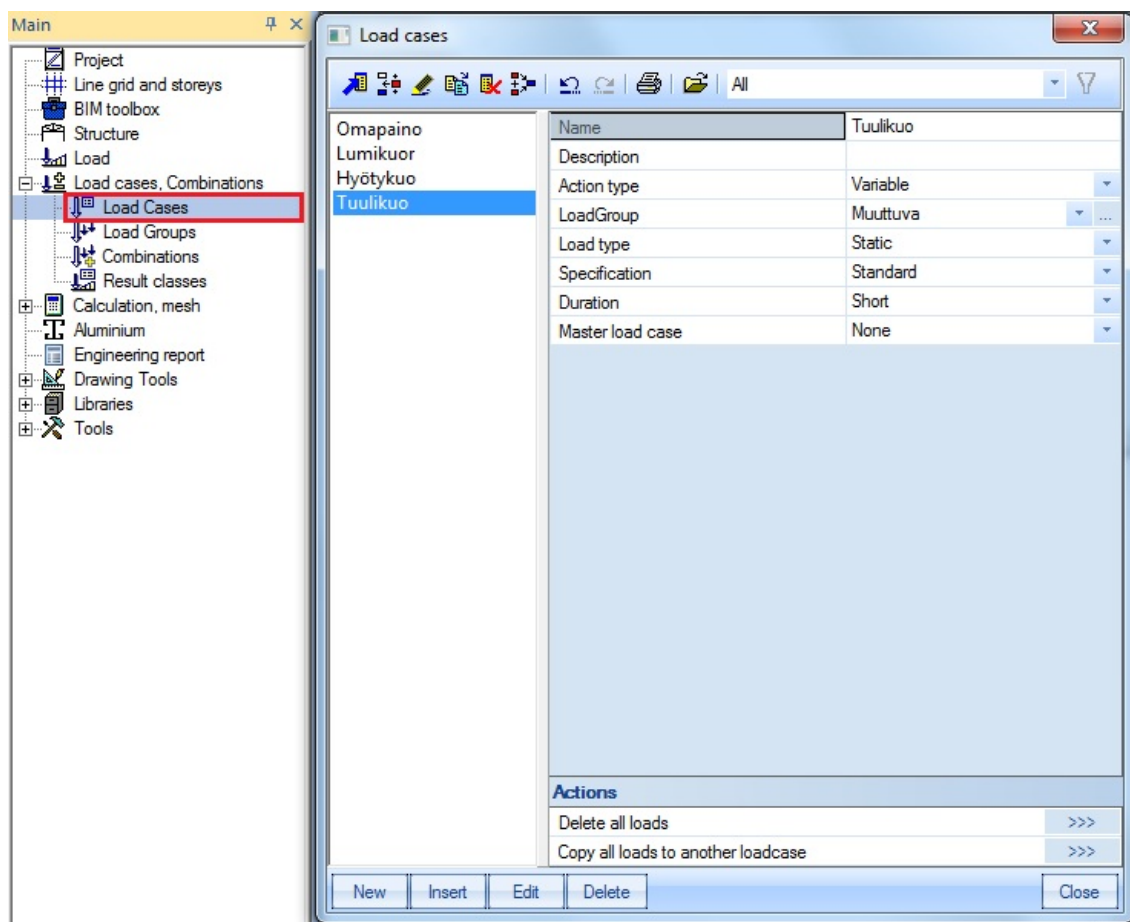
KUVA 16. Tuen vapausasteiden määrittäminen

Tämän jälkeen painetaan hiiren vasemmalla painikkeella solmukohtia, joihin halutaan edellä määritelty tuki. Kun tarvittavat tuet on määritelty malliin, on seuraavaksi vuorossa kuormitusten asettaminen.

5.6 Kuormitukset ja kuormitusyhdistelmät

Kun rakennemalli ja tuet on saatu tehtyä, niin seuraavaksi täytyy määrittellä kuormat ja kuormitusyhdistelmät. Niissä käytetään eurokoodin mukaisia varmuuskertoimia.

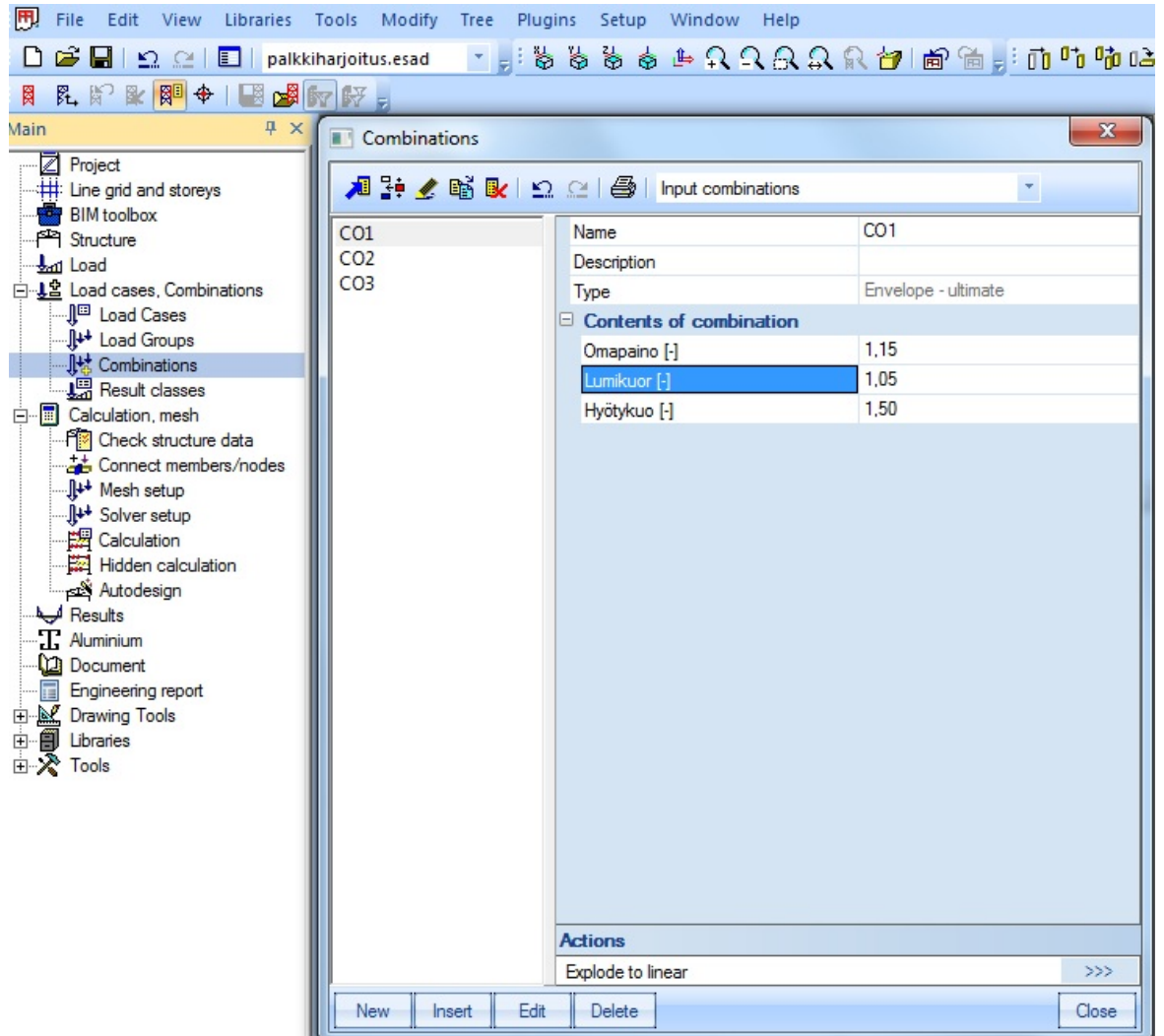
Ensin meidän täytyy määrittää kuormitustapaukset kohdasta *Load Cases*. Kuormitustapaukset löytyvät pääikkunan valikosta (kuvan 17) osoittamasta kohdasta *Load cases, Combinations* alta. Tästä aukeaa (kuvan 17) mukainen kuormitustapausten määrittämissivu.



KUVA 17. Kuormitustapaukset määritellään Load cases ikkunasta

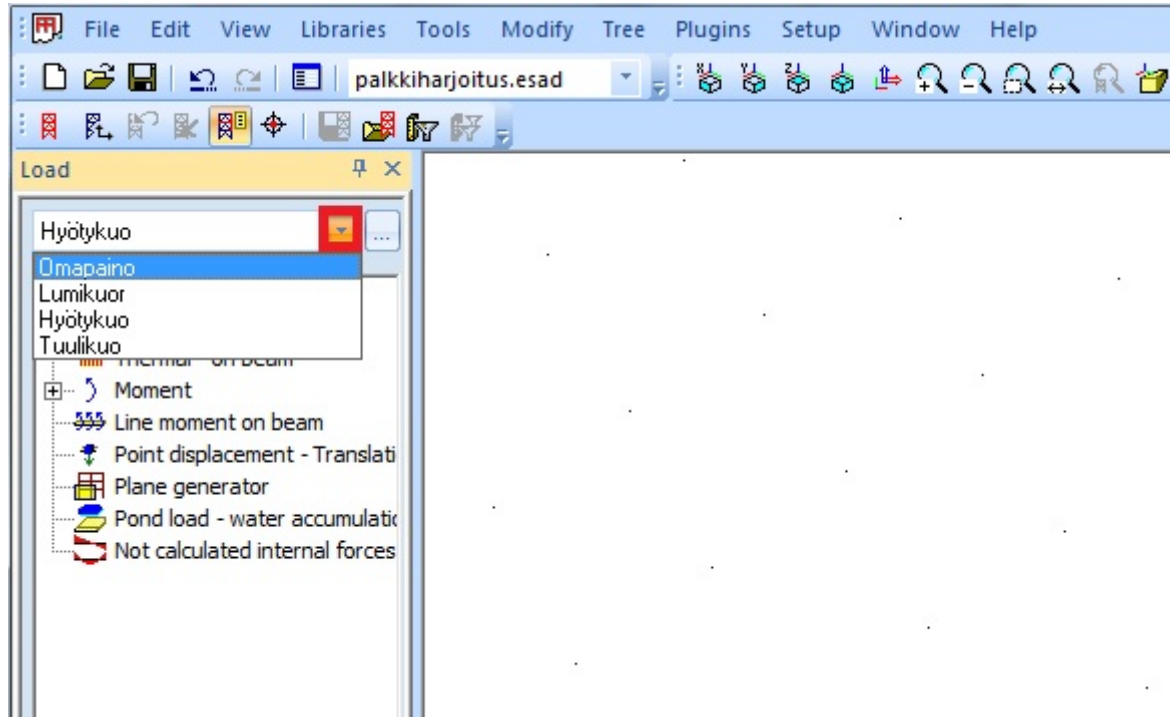
Kuormitustapausten määrittämissivulla määritellään kaikki malliin tulevat kuormitukset kuten esimerkiksi: omapaino, lumikuorma, hyötykuorma, tuulikuorma yms. Tässä kyseisessä ikkunassa täytyy valita kuormituksen tyyppiä pysyvä tai muuttuva, sekä kuormituksen kesto. Rakenteen omapaino kuormitustyyppinä täytyy määrittää valitsemalla kuormitustyyppiä *Self weight* ja suunnaksi – Z eli alaspäin.

Seuraavaksi avataan päävalikosta *Combinations*-ikkuna ja määritellään eri kuormista aiheutuvat kuormitusyhdistelmät. Kuormitusyhdistelmä-ikkuna näyttää alla olevan (kuvan 18) mukaiselta ja siinä muodostetaan murto- ja käyttörajatila kuormitusyhdistelmät aiemmin määritellyistä kuormista, sekä määritetään kuormille eurokoodien mukaiset varmuuskertoimet.



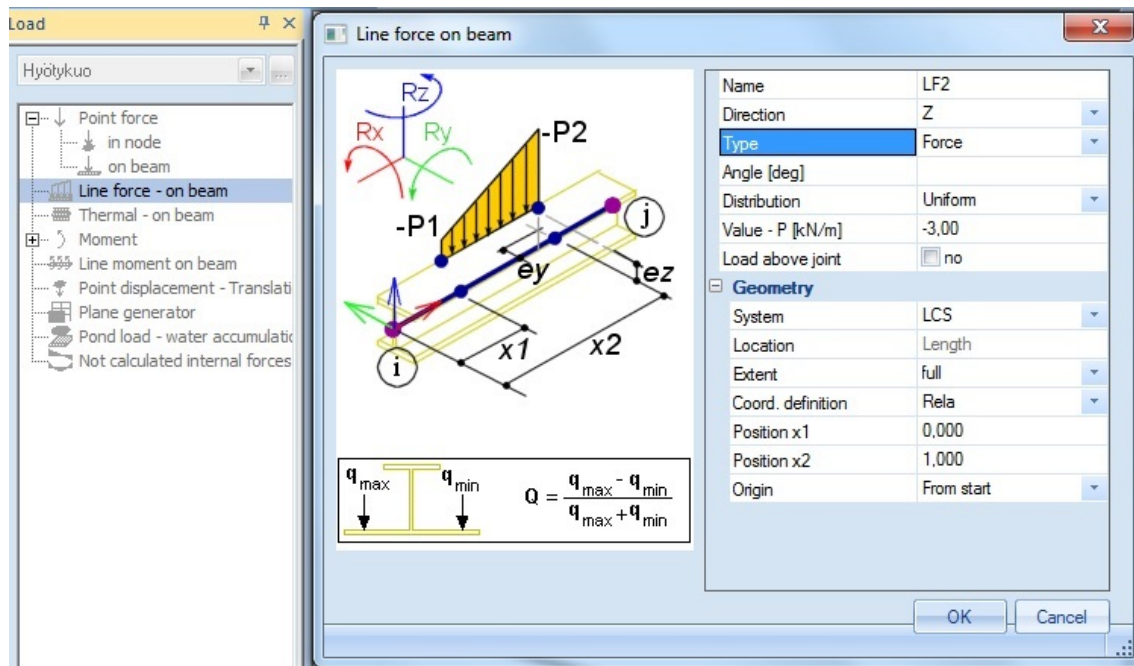
KUVA 18. Kuormitusyhdistelmien määrittäminen

Kuormitusyhdistelmien määrittämisen jälkeen asetetaan kuormat rakennemalliin. Ensimmäinen valitaan päävalikosta kohta *Load* eli kuormat. Tämän jälkeen painetaan päävalikon yläreunassa olevasta nuolesta, josta aukeaa (kuvan 19) mukainen kuormatapausten valittamisvalikko. Siitä valitaan se kuormitustapaus, joka ensimmäinen halutaan rakennemalliin määrittää.



KUVA 19. Kuormatyyppin valitseminen

Seuraavaksi määritetään onko kuorma pistekuorma, viivakuorma vai jokin muu. Valitseminen tapahtuu päävalikosta. Valitsemalla viivakuorman *Line force on beam*, ilmestyy alla olevan (kuvan 20) mukainen ikkuna.



KUVA 20. Viivakuorman määrittäminen

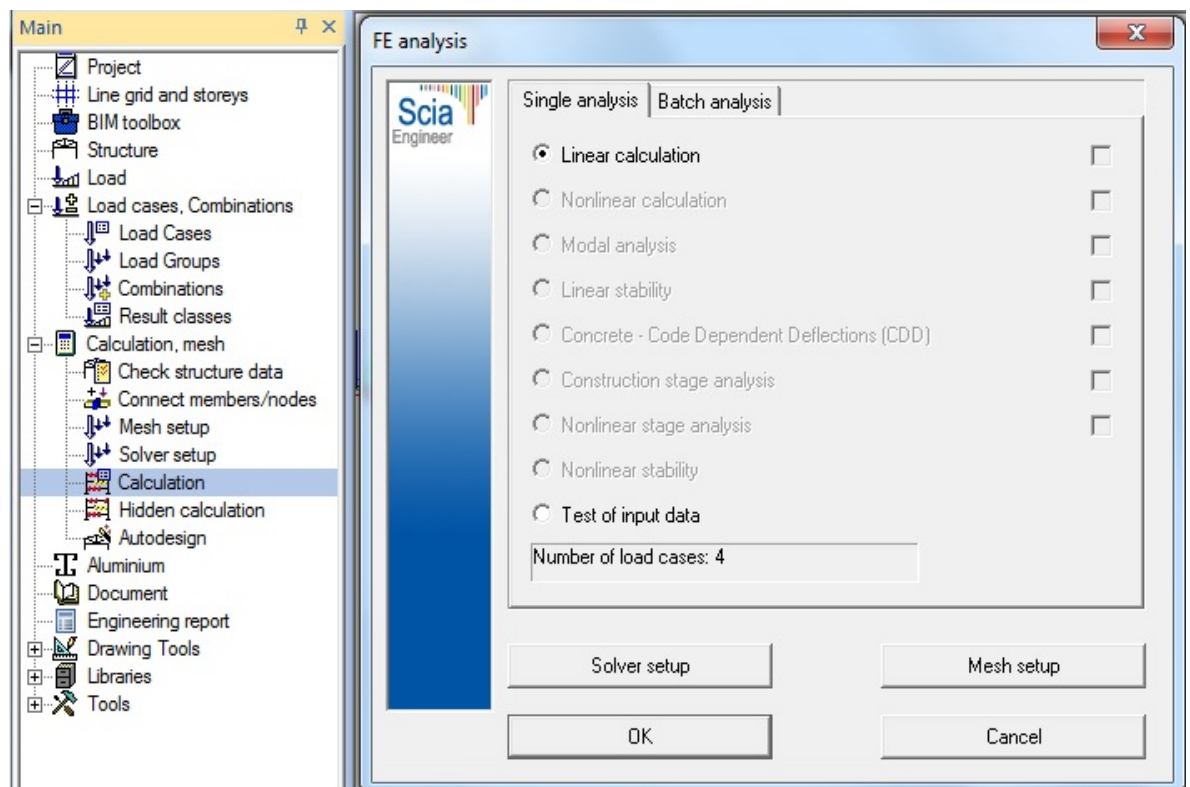
Tässä *Line force on beam*-ikkunassa valitaan kuorman nimi, alkamis- ja loppumispiste, voiman suuruus ja suunta. Valinnassa täytyy huomioida, että Z-akseli on pystysuunnassa ja positiivinen suunta ylöspäin. Kun määritetään voima alaspäin, niin täytyy kirjoittaa sen eteen miinusmerkki, jolloin kuormitus kohdistuu alaspäin.

Point force-kohdasta voidaan määrittää pistekuormat solmukohtiin sekä palkille. *Moment*-kohdasta taas määritellään palkille momentti, sekä solmukohtien siirtymät.

Scia laskee automaattisesti rakenteen oman painon profiilin poikkileikkauksen, materiaalin ja rakenteen pituuden mukaan. Sitä ei kuormitustyyppien valikosta voida määrittää rakennemalliin muiden kuormien tapaan. Se täytyy ainoastaan lisätä *Load cases*-valikossa ja valita se kuormitusyhdistelmiin mukaan *Combinations*-valikossa.

5.7 Laskenta

Kun rakennemalli on valmis sekä kuormitukset määritelty ja lisätty malliin, on laskennan vuoro. Laskennassa ohjelma laskee mallinnettuun rakenteeseen kohdistuvat voimat ja muodonmuutokset annettujen kuormien ja kuormitustapauksien perusteella. Laskenta lähtee käyntiin avaamalla päävalikosta kohta *Calculations, mesh*. Seuraavaksi painetaan *Calculation* eli laskelma ja tästä aukeaa alla olevan (kuvan 21) mukainen ikkuna *FE analysis*.



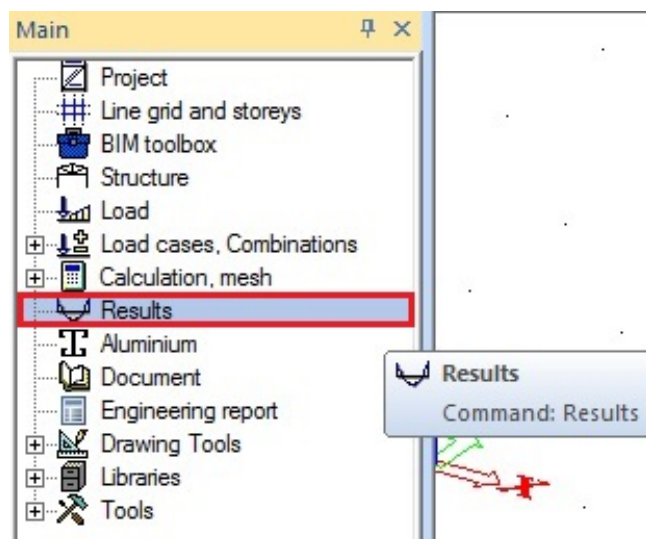
KUVA 21. FE analysis ikkuna

FE analysis tulee sanoista *Finite element analysis*, joka tarkoittaa elementtimenetelmäpohjaista analyysiä. Tässä ratkaisumenetelmässä lasketaan rakenne pieninä alueina eli elementteinä. Ne ovat yhteydessä toisiinsa solmukohtien avulla ja muodostavat elementtiverkon. Elementtilaskentamenetelmä on likimääräinen numeerinen ratkaisumenetelmä ja ohjelma käyttää matriisilaskentaa ratkaistakseen tuntemattomat voimasuureet. Mitä pienempiin osiin eli elementteihin rakenne jaetaan, sitä tarkempaa ohjelma pystytään laskemaan.

FE analysis-ikkunassa valitaan *Linear Calculation* eli lineaarinen laskentatapa. Siinä materiaalin oletetaan käyttäytyvän kimmoisesti, sekä kuormituksista syntyvien jännitysten ja muodonmuutoksien yhteyden oletetaan olevan lineaarinen.

Mesh setup eli elementtiverkon asetukset-valikossa voidaan valita elementtilaskentaan vaikuttavia asioita. Tärkeimpänä on valita elementtiruutujen koko sellaiseksi, että saadaan riittävän tarkkoja tuloksia. Mitä monimutkaisempi rakenne on ja mitä pienemmät elementtiverkot ovat, sitä kauemmin koneella kestää suorittaa laskut.

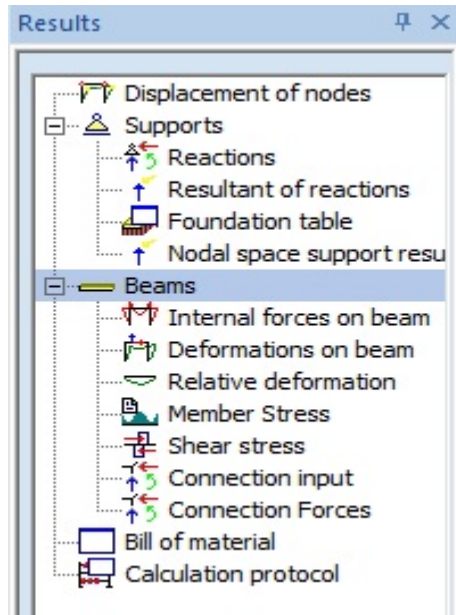
Kun asetukset on määritetty, painetaan ok. Ohjelma laskee jonkin aikaa riippuen koneen tehosta, rakennemallista ja laskettavista asioista muutamasta sekunnista muutama minuutteihin. Kun laskut on laskettu, ilmestyy uusi ikkuna joka ilmoittaa onnistuiko laskenta vai tuliko jotain ongelmia. Tämän jälkeen päävalikkoon ilmestyy uusi (kuvan 22) mukainen valikko *Results* tulokset.



KUVA 22. Result-valikko

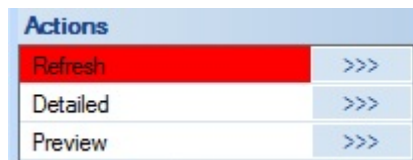
5.8 Laskennan tarkastelu

Tulosten tarkasteluun päästään päävalikosta kohdasta *Results*. Tulosten tarkasteluvalikossa (kuva 23) on kolme eri pääkohtaa: tukien siirtymät, tukipisteiden reaktiot ja palkin jännityskuvaajat.



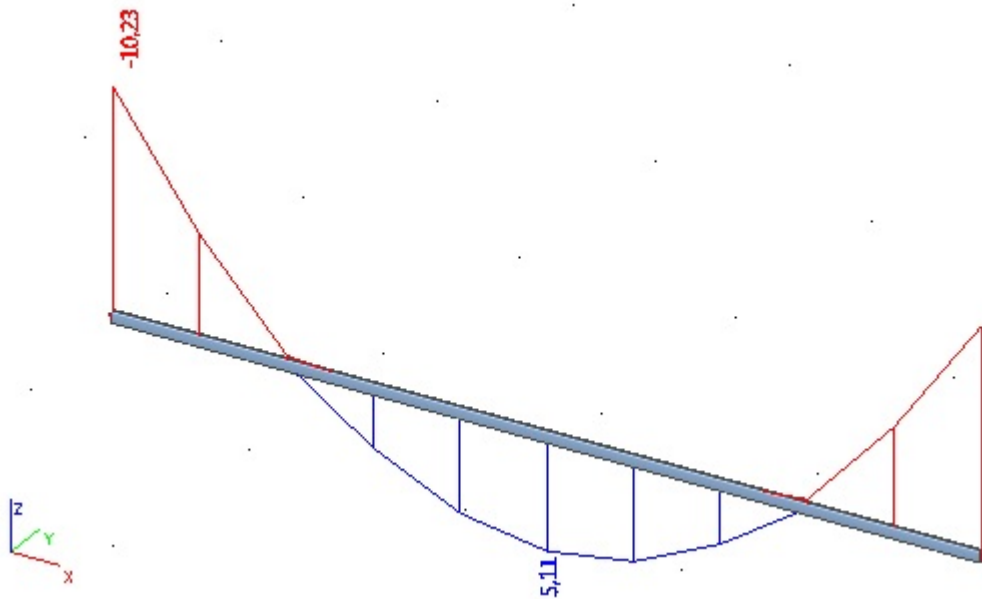
KUVA 23. Tulosten tarkasteluvalikko

Tulos piirtyy mallinuskunaan, kun ensin valitaan päävalikosta mitä halutaan tutkia ja sen jälkeen painetaan oikeasta alakulmasta *refresh* nappulaa (kuva 24). Tällöin mallinuskunan näkymä päivittyy ja laskennan tulos piirtyy. Voidaan esimerkiksi valita *Internal forces on beam* eli palkin sisäiset voimat ja painetaan päivitä.



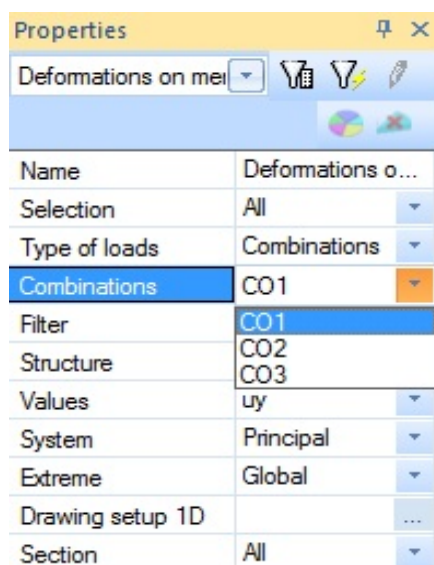
KUVA 24. Päivitys nappula

Päivityksen jälkeen mallinnusikkunaan piirtyy tulokset (kuvan 25) osoittamalla tavalla.



KUVA 25. Palkin sisäiset voimat

Eri kuormitusyhdistelmiä voidaan vaihtaa oikealla olevasta ominaisuudet ikkunasta (kuva 26). Valitsemalla kuorman tyyppiä *Type of loads* kombinaatiot ja tämän jälkeen *Combinations*-kohdasta valitaan aiemmin määritellyjä kuormitusyhdistelmiä. Kun etsitään esimerkiksi suurinta momenttia palkissa, niin käydään läpi kaikki eri kuormitusyhdistelmät. Selvitetään niiden aiheuttamat momentit ja katsotaan mikä tuottaa suurimman momentin rakenteelle.



KUVA 26. Kombinaatioiden valinta

Uuden kuormitusyhdistelmän valitsemisen jälkeen täytyy klikata *Refresh* nappulaa. Solmukohtien siirtymää pääsee tutkimaan kohdasta *Displacement of nodes*. Se kertoo kuinka paljon mikäkin solmukohta on siirtynyt asetettujen kuormitusten vaikutuksesta. *Supports* eli tuet-valikon kautta päästään näkemään tuissa tapahtuneita reaktioita, kuten tukiin kohdistuvia voimia ja momentteja. *Beam* eli palkit-kohdassa nähdään palkin eri kohtiin kohdistuvia voimia, momenttia ja muodonmuutoksia.

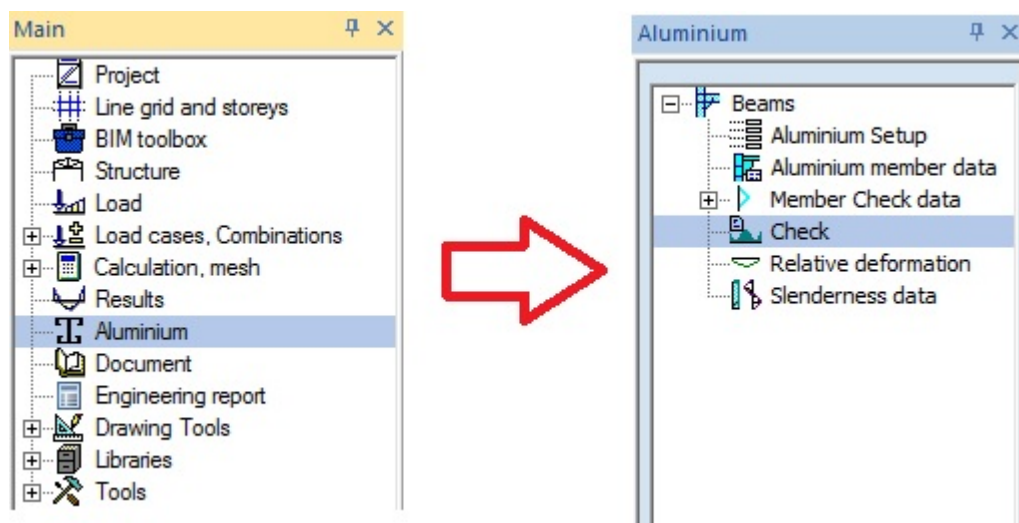
Komentorivistä (kuva 27) pääsee vaihtamaan nopeasti tuloksia normaalivoiman, momentin, leikkausvoiman ja muodonmuutosten välillä.



KUVA 27. Tulosten pikavalinnat

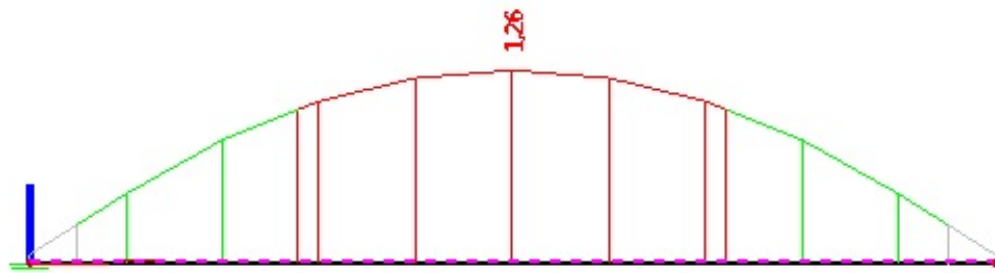
5.9 Alumiinin mitoitus

Laskennan jälkeen tarkastetaan ohjelmalla kestääkö mallinnetut rakenteet kuormista aiheutuvia jännityksiä vai pitääkö rakenteita muuttaa kestävämmiksi. Sciassa on *Aluminium check*-työkalu, jolla suoritetaan kestävyystarkastelut eurokoodien mukaisesti. Työkalu löytyy (kuvan 28) mukaisesti päävalikosta kohdasta *Aluminium* ja tämän jälkeen valitaan *Check*.



KUVA 28. Alumiinin mitoituksen valikko

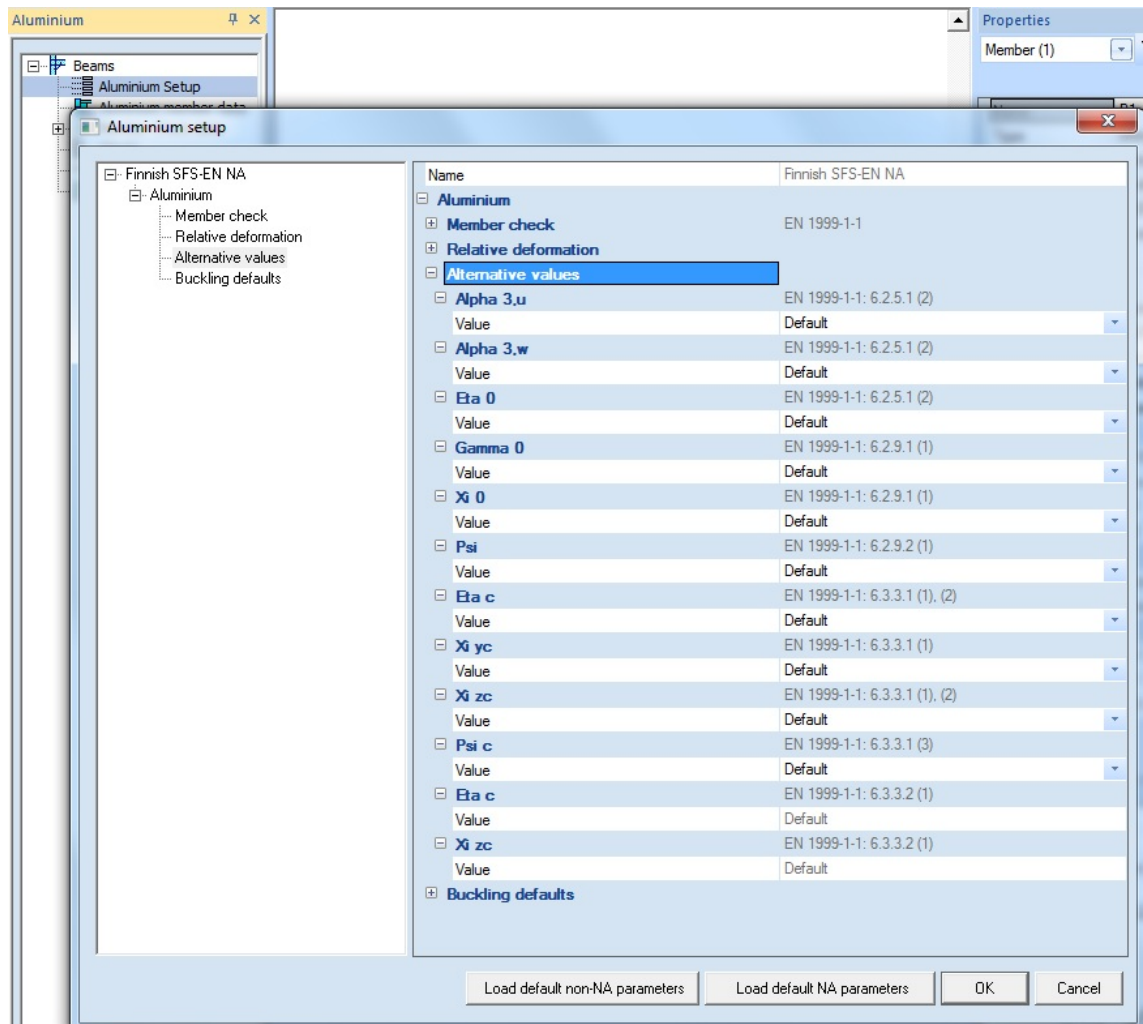
Seuraavaksi käydään läpi kaikki kuormitustapaukset ja selvitetään kestäkö rakenne. Tämä tapahtuu siten, että valitaan *Properties*-ikkunasta ensimmäinen kuormitusyhdistelmä ja painetaan oikeasta alakulmasta nappulaa *Refresh*. Mallinusikkunaan ilmestyy nyt rakenneosan yläpuolelle rasiuskuvio, joka kertoo rakenteen käyttöasteen asteikolla 0-1. Käyttöastetta 100 % vastaa luku yksi. Jos lukema on enemmän kuin yksi, niin kuvaajasta piirtyy punainen siltä osin miltä rakenne ei kestä (kuva 29). Vihreällä alueella rakenne kestäää.



KUVA 29. Käyttöastetta esittävä kuvaaja

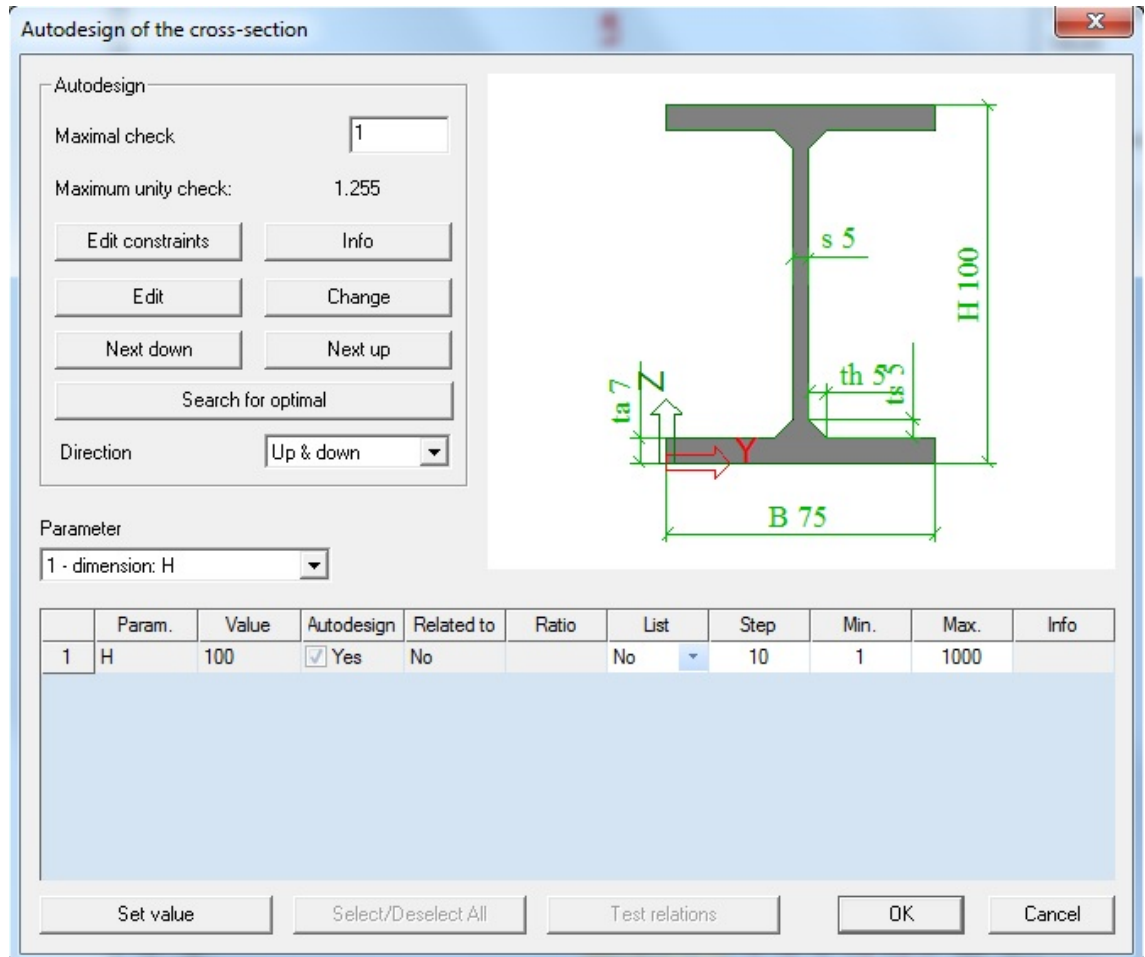
Näin käydään läpi kaikki kuormitusyhdistelmät ja selvitetään tarvetta rakenneosan uudelleen suunnittelulle. *Properties* ikkunasta voidaan valita tarkasteltavaksi myös stabiili-teettia.

Päävalikon *Aluminium setup* kohdasta aukeaa ikkuna (kuva 30), josta voidaan tarkastaa mistä eurokoodien mukaiset kertoimet, yksiköt ja vakiot tulevat. Yksiköiden arvoja on mahdollista muuttaa käsin, jos jostain syystä Scian ottamat arvot eurokoodista eivät tietyissä tilanteissa pidä paikkansa. Sciaan on integroitu eurokoodin mukaiset laskenta-kaavat, ja se laskee näiden arvojen ja kaavojen perusteella kestävyudet ja muodonmuutokset.



KUVA 30. Alumiinin yksiköiden arvot tulevat eurokoodista

Sciassa on myös mahdollisuus käyttää automaattista mitoitus toimintoa, jolla voidaan etsiä esimerkiksi pienin tarvittava profiilikoko, jotta se kestäisi kuormista aiheutuvat rasitukset. Automaattinen mitoitus toiminto löytyy oikeasta alakulmasta *Autodesign*. Sitä klikkaamalla päästään (kuvan 31) mukaiseen ikkunaan.



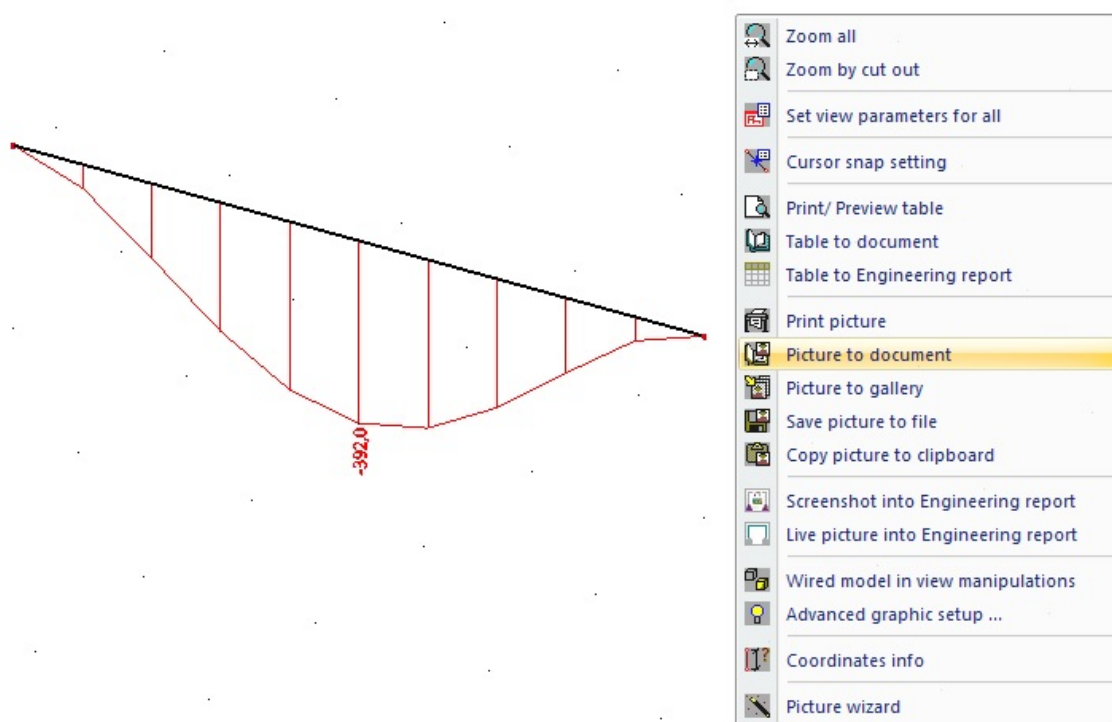
KUVA 31. Automaattinen mitoitus poikkileikkaukselle

Painamalla *Search for optimal*, ohjelma etsii optimaalisen eli mahdollisimman pienen profiilikoon, jolla rakenne kestänee annetut kuormat. Optimoinnilla saa suuruusluokan kuntoon, mutta uusi profiilikoko ei välttämättä ole järkevä. Automaattisella mitoituksella on tietyt raja-arvot, joiden mukaan se toimii. Tästä johtuen se ei kaikissa tapauksissa optimoi parasta mahdollista tai edes toimivaa poikkileikkausta. Esimerkiksi se voi luoda kestävyydeltään kunnossa olevan, mutta epästabiiilin poikkileikkauksen.

5.10 Tulosten dokumentointi

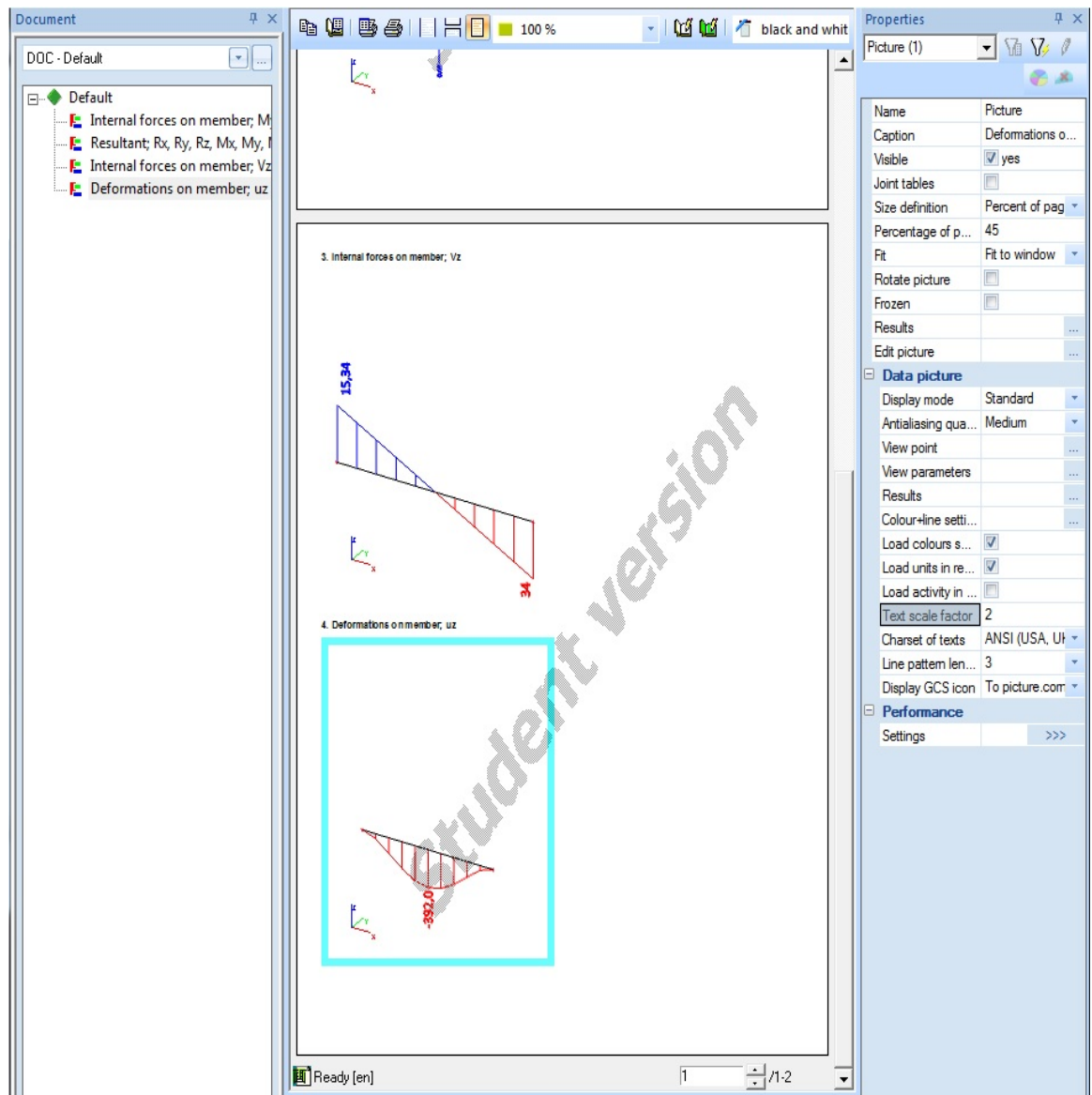
Sciassa tulosten dokumentointiin on tehty työkalu, joka sijaitsee päävalikon kohdassa *Document*. Dokumentointityökalu on käytännössä tulostusvalmis lehtiö sivu, johon kerätään haluttuja tietoja rakenteista, kuvia mallinnusikkunasta ja laskennasta saatuja tuloksia. Lehtiöön kerättyjä kuvia ja tietoja voidaan järjestellä, kokoja muunnella ja tyylejä vaihdella

Mallinnusikkunasta kuvien ja tulosten tuonti tapahtuu (kuvan 32) mukaisesti klikkaamalla mallinnusikkunaa hiiren oikealla näppäimellä ja valitsemalla kohta *Picture to document* eli kuva dokumenttiin.



KUVA 32. Kuvan vieminen mallinnusikkunasta dokumenttiin

Dokumentti-ikkuna näyttää (kuvan 33) mukaiselta. Vasemmalla päävalikossa on asiat mitkä on tuotu dokumenttiin. Oikealla ominaisuudet-valikossa voidaan muuttella kuvien asettelua, näkymiä ja kokoa sekä fonttien tyyliä ja kokoa.



KUVA 33. Dokumentti-ikkuna

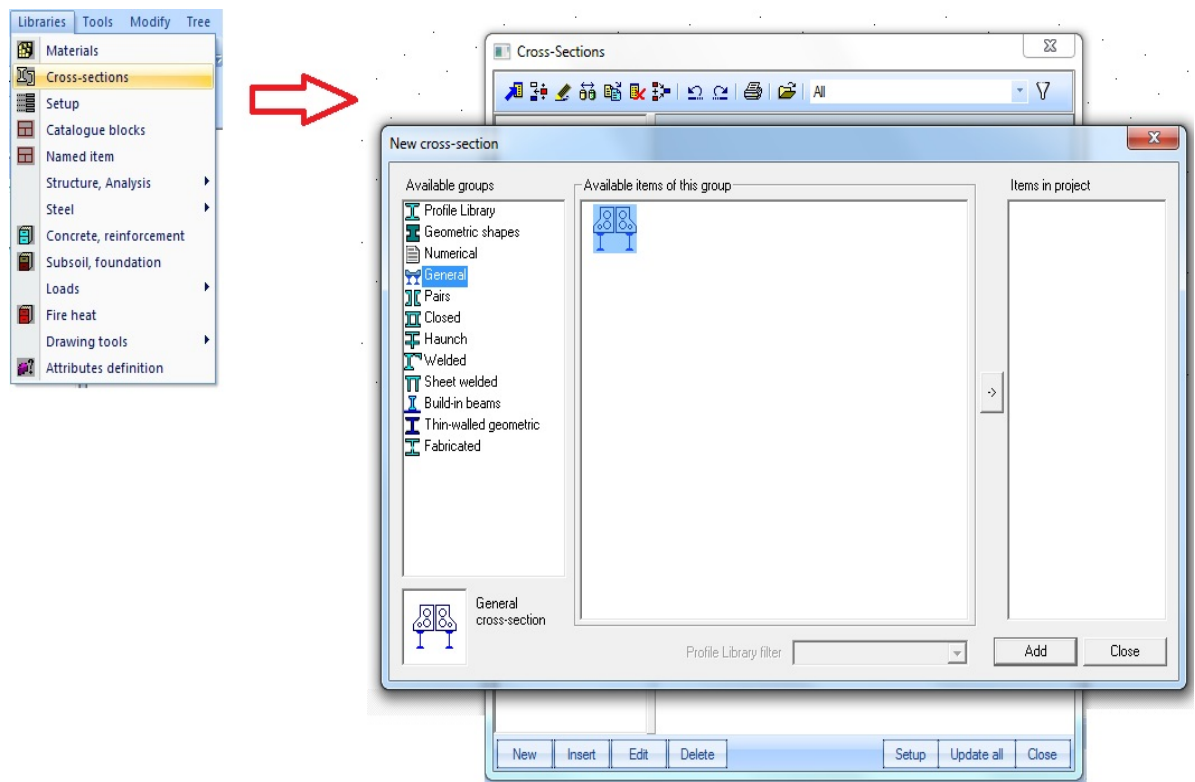
Kun dokumentti-ikkunan lehtiöön on saatu halutut asiat ja tiedot niin klikataan tulosta. Tuloste tulee täsmälleen samanlaisena millaisena se on lehtiön sivulla.

6 PROFILIIEN POIKKILEIKKAUKSET

6.1 Poikkileikkauseditori

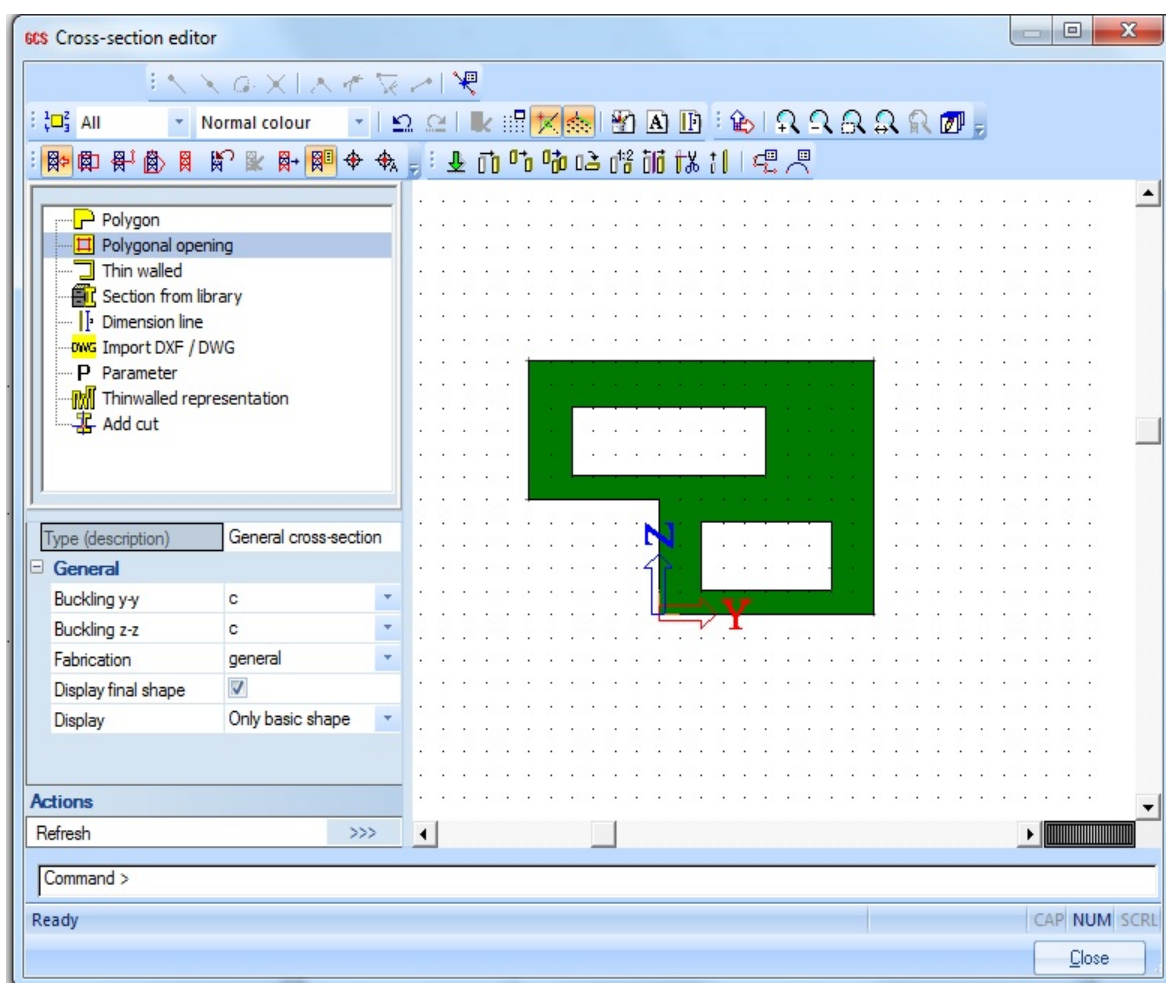
Ohjelmassa on työkalu, jolla voidaan luoda uusia poikkileikkauksia alumiinille. Poikkileikkaustyökalu on 2-uloitteinen mallinnustila, johon luodaan valmiiden välineiden avulla tarvittava poikkileikkaus. Poikkileikkaus on myös mahdollista tuoda DWF- ja DWG-tiedostomuodoissa.

Uuden profiilin luomiseksi täytyy saada auki poikkileikkausten editointityökalu. Valitaan ylävalikosta *Libraries* kohdasta *Cross-sections*. Tämän jälkeen aukeaa (kuvan 34) mukainen *New cross-section* ikkuna, josta valitaan kohta *General* ja painetaan *Add*.



KUVA 34. Poikkeikkausten luomisvalikko

Poikkileikkauksen editointityökalu on alla olevan (kuvan 35) kaltainen.



KUVA 35. Cross-section editor

Editointityökalulla on mahdollista tehdä monikulmioita, aukkoja, leikkauksia, ohuita seinämiä sekä linjoja, viivoja ja kaaria, joiden mukaan poikkileikkaus mallinnetaan. Editorissa on käytössä millimetrikoordinaatisto.

Editorilla pystytään mallintamaan tarkasti erilaisia alumiinisia profiileja. Eri profiilimallien kestävyksiä voidaan testata Scian mitoituksella ja valita sopivin profiilimalli.

6.2 Profiilin poikkileikkausarvot

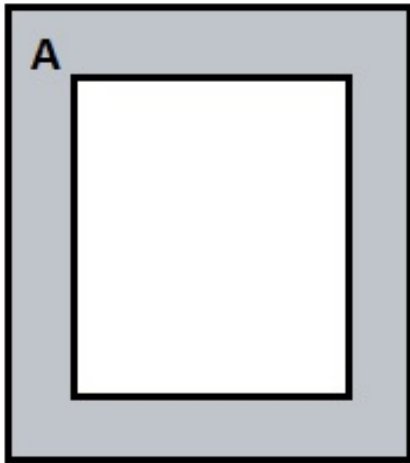
M = paino [N]

Rakenteen paino saadaan laskemalla poikkileikkauksen pinta-ala A ja se kerrotaan rakenteen pituudella l , jolloin saadaan tilavuus. Tilavuus kerrotaan aineen tiheydellä ρ ja gravitaatiovakiolla g .

$$M = A * l * \rho * g$$

A = Poikkileikkaus-ala [m²]

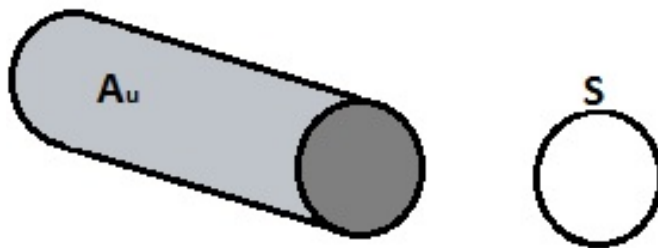
Poikkileikkauksen-ala on poikkileikatun osan näkyvän osan ala (kuva 36). Alla olevan kuvan mukaisesti poikkileikkaus-ala on harmaan alueen ala A .



KUVA 36. Poikkileikkauksen ala harmaalla

A_u = Ulkopinta-ala [m²]

Ulkopinta-ala on rakenteen poikkileikkauksen ulkopinnan piiri s kerrottuna rakenteen pituudella l . Alla olevassa (kuvassa 37) A_u on rakenteen ulkopinta-ala ja s on poikkileikkauksen piiri.



KUVA 37. Ulkopinta-ala A_u

I = Jäyhyysmomentti [m^4]

Jäyhyysmomentti kuvaa kappaleen kykyä vastustaa taipumaa poikkileikkaustason tietyn akselin suuntaan. Yleisimmille poikkileikkauksille on jäyhyysmomentin laskentaan olemassa valmiita kaavoja. Esimerkiksi kappale, joka on poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoinen, ja jonka jäyhyysmomentin akseli kulkee painopisteen kautta, voidaan laskea kaavalla

$$I = \frac{bh^3}{12}.$$

b = suorakaiteen leveys

h = suorakaiteen korkeus

Jos jäyhyysmomentin akseli ei kulje painopisteen kautta, joudutaan jäyhyysmomentti laskemaan Steinerin säännöllä.

W = Taivutusvastus [mm^3]

Taivutusvastus on kappaleen ominaisuus vastustaa kappaleen taipumaa.

Taivutusvastus saadaan laskettua kaavalla $W = \frac{M}{\sigma}$.

M = Taivutusmomentti

σ = Taivutusjännitys

i = Poikkileikkauksen jäyhyyssäde [m]

Poikkileikkauksen jäyhyysräde lasketaan kaavalla $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$

I = Jäyhyysmomentti

A = Poikkileikkaus-ala

 W_{pl} = Plastinen taivutusvastus [mm^3]

Plastinen taivutusvastus lasketaan staattisesti määritettyjen momenttien avulla poikkileikkauksen plastisen neutraaliakselin suhteen.

Suorakaiteen muotoisille poikkileikkauksille plastinen taivutusvastus voidaan laskea

kaavalla $W_{pl} = \frac{bh^2}{4}$.

b = Suorakaiteen leveys

h = Suorakaiteen korkeus

6.3 Scian poikkileikkausarvot

Testataan osaako Scia laskea eri profiileille poikkileikkausarvot. Valitaan ensin jokin profiili ja otetaan poikkileikkausarvot muistiin. Tämän jälkeen muutetaan kyseisen profiilin mittoja ja katsotaan osaako Scia laskea uudelle poikkileikkaukselle arvot.

Valitaan (kuvan 38) mukaiset I-profiilit 1 ja 2.

Name	CS1
Type	I ng
Detailed	300; 150; 150; 50; 50; 16
Shape type	Thick-walled
Parameters	
Material	EN-AW 6063 (DT) ...
H [mm]	300
Bh [mm]	150
Bs [mm]	150
ts [mm]	50
th [mm]	50
s [mm]	16
General	
Draw colour	Normal colour
Colour	
AutoDesign constraints	...
Fabrication	general
Buckling curves	
Buckling editable	<input checked="" type="checkbox"/>
Buckling y-y	b
Buckling z-z	b

Name	CS2
Type	I ng
Detailed	350; 130; 130; 40; 40; 16
Shape type	Thick-walled
Parameters	
Material	EN-AW 6063 (DT) ...
H [mm]	350
Bh [mm]	130
Bs [mm]	130
ts [mm]	40
th [mm]	40
s [mm]	16
General	
Draw colour	Normal colour
Colour	
AutoDesign constraints	...
Fabrication	general
Buckling curves	
Buckling editable	<input checked="" type="checkbox"/>
Buckling y-y	b
Buckling z-z	b

KUVA 38 I-profiili 1 ja 2

(Kuvan 38) I-profiili 1 on mallinnettu oletus mitoilla ja I-profiili 2 on muutettu hoi-
kemmaksi ja korkeammaksi. Seuraavassa (kuvassa 39) nähdään mitkä poikkileik-
kausarvot ovat muuttuneet.

Name	CS1	Name	CS2
Type	I ng	Type	I ng
Detailed	300; 150; 150; 50; 50; 16	Detailed	350; 130; 130; 40; 40; 16
Shape type	Thick-walled	Shape type	Thick-walled
⊕ Parameters ⊕ General ⊕ Buckling curves ⊕ Fibres and Parts ⊕ 2D FEM analysis ⊕ Property Modifications		⊕ Parameters ⊕ General ⊕ Buckling curves ⊕ Fibres and Parts ⊕ 2D FEM analysis ⊕ Property Modifications	
1		2	
⊖ Property A [m ²] Ay [m ²] Az [m ²] AL [m ² /m] AD [m ² /m] cYUCS [mm] cZUCS [mm] α [deg] Iy [m ⁴] Iz [m ⁴] Iy [mm] Iz [mm] Wely [m ³] Welz [m ³] Wply [m ³] Wplz [m ³] Mply+ [Nm] Mply- [Nm] Mplz+ [Nm] Mplz- [Nm] dy [mm] dz [mm] It [m ⁴] Iw [m ⁶] β y [mm] β z [mm]		⊖ Property A [m ²] Ay [m ²] Az [m ²] AL [m ² /m] AD [m ² /m] cYUCS [mm] cZUCS [mm] α [deg] Iy [m ⁴] Iz [m ⁴] Iy [mm] Iz [mm] Wely [m ³] Welz [m ³] Wply [m ³] Wplz [m ³] Mply+ [Nm] Mply- [Nm] Mplz+ [Nm] Mplz- [Nm] dy [mm] dz [mm] It [m ⁴] Iw [m ⁶] β y [mm] β z [mm]	
A [m ²]	1,8200e-02	A [m ²]	1,4720e-02
Ay [m ²]	1,4278e-02	Ay [m ²]	1,0522e-02
Az [m ²]	4,9291e-03	Az [m ²]	5,5237e-03
AL [m ² /m]	1,1680e+00	AL [m ² /m]	1,1880e+00
AD [m ² /m]	1,1680e+00	AD [m ² /m]	1,1880e+00
cYUCS [mm]	75	cYUCS [mm]	65
cZUCS [mm]	150	cZUCS [mm]	175
α [deg]	0,00	α [deg]	0,00
Iy [m ⁴]	2,4817e-04	Iy [m ⁴]	2,7749e-04
Iz [m ⁴]	2,8193e-05	Iz [m ⁴]	1,4739e-05
Iy [mm]	117	Iy [mm]	137
Iz [mm]	39	Iz [mm]	32
Wely [m ³]	1,6544e-03	Wely [m ³]	1,5857e-03
Welz [m ³]	3,7591e-04	Welz [m ³]	2,2675e-04
Wply [m ³]	2,0350e-03	Wply [m ³]	1,9036e-03
Wplz [m ³]	5,7530e-04	Wplz [m ³]	3,5528e-04
Mply+ [Nm]	3,87e+05	Mply+ [Nm]	2,38e+05
Mply- [Nm]	3,87e+05	Mply- [Nm]	2,38e+05
Mplz+ [Nm]	1,09e+05	Mplz+ [Nm]	4,44e+04
Mplz- [Nm]	1,09e+05	Mplz- [Nm]	4,44e+04
dy [mm]	0	dy [mm]	0
dz [mm]	0	dz [mm]	0
It [m ⁴]	1,0112e-05	It [m ⁴]	4,7177e-06
Iw [m ⁶]	4,3792e-07	Iw [m ⁶]	3,4880e-07
β y [mm]	0	β y [mm]	0
β z [mm]	0	β z [mm]	0

KUVA 39 Profiilien 1 ja 2 poikkileikkausarvot

Muutamia profiileja näin tarkastellessa huomataan, että Scia laskee automaattisesti poikkileikkausarvot. Selvitetään kuinka lähellä ne ovat muista lähteistä selvitettyjä arvoja.

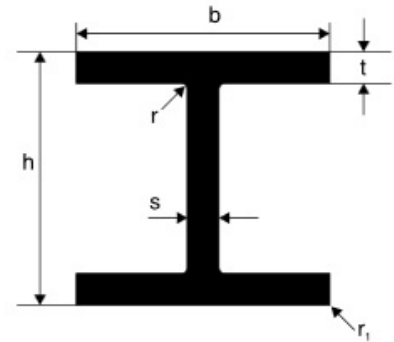
En löytänyt valmiin alumiinisen profiilin poikkileikkaus-arvoja, joten käytin seuraavassa testissä teräsprofiilia. Mallinsin teräksisen U-profiilin, jonka poikkileikkausarvot sain Ruukin Internet-sivulta. Tämän jälkeen vertasin Scian laskemia arvoja Ruukin antamiin poikkileikkausarvoihin. Tulokset olivat yhdenkaltaiset. Pieniä eroavaisuuksia oli, mutta ne eivät ole merkityksellisen suuria. Eroavaisuudet johtuivat siitä, että Scian malleissa ei ole pyöristettyjä kulmia.

7 ALUMIINISTEN RAKENTEIDEN LASKENTA

7.1 I-profiili palkki

Mallinnetaan Scialla I-profiili palkki, jonka kuormitukseksi laitetaan viivakuorma koko palkin matkalle. Valitaan sellainen I-profiili palkki, joka on yleisesti käytössä. Purson verkkosivulla vakioprofiililuettelosta valitaan seuraavanlainen (kuva 40) I-profiili palkki.

I-profiilit
I-profiles

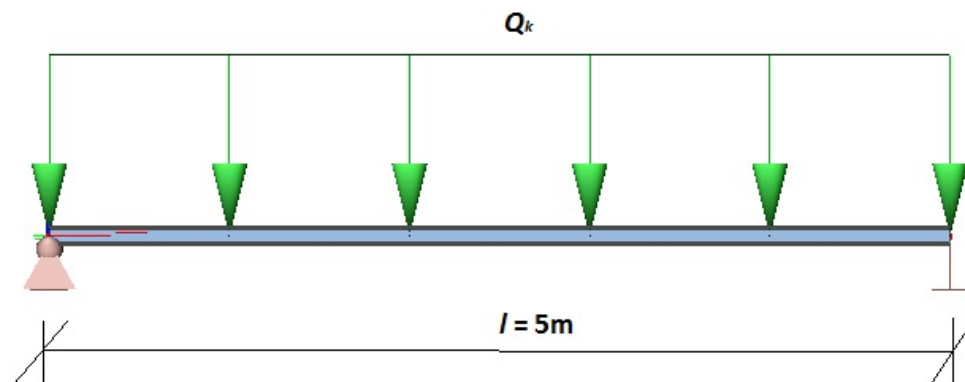


Merkintätapa: I-profiili $h \times b \times s \times t$. Marking: I-profile $h \times b \times s \times t$.

h mm	b mm	s mm	t mm	r mm	r ₁ mm	kg/m	numero number
11	15	1,5	3	0,5	0,5	0,26	2952
33	25	11	1	0,5	0,5	1,51	3827
45	30	3,5	3	—	—	0,85	564
55	22	2	3	2,5	—	0,63	454
62	25	2,5	2,5	2,0	0,5	0,73	4956
80	120	2	2	2,0	0,5	1,71	3557
100	50	4,5	4,5	0,5	0,5	2,33	1066
100	75	5	7	5,0	1,0	4,05	2923
100	80	6	6,5	8,0	0,5	4,36	2362
165	100	5	10	2,5	2,5	7,36	240
175	100	6	6	2,0	2,0	5,873	13965

KUVA 40. Purson vakioprofiili luettelon I-profiilit

Havainnekuva rakenteesta (kuva 41).



KUVA 41. I-profiili palkki

Lähtötiedot

Palkin pituus $l = 5 \text{ m}$

Alumiinilaatu EN-AW 6063 T6

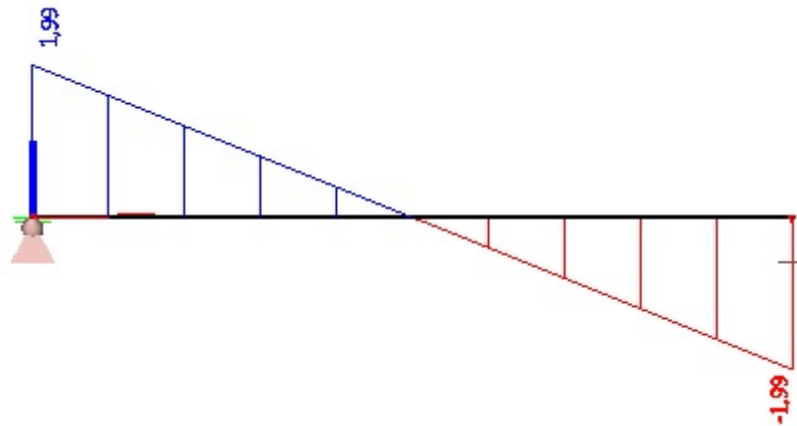
Pysyvä kuorma:

Oma paino $G_k = 0,2 \text{ kN}$

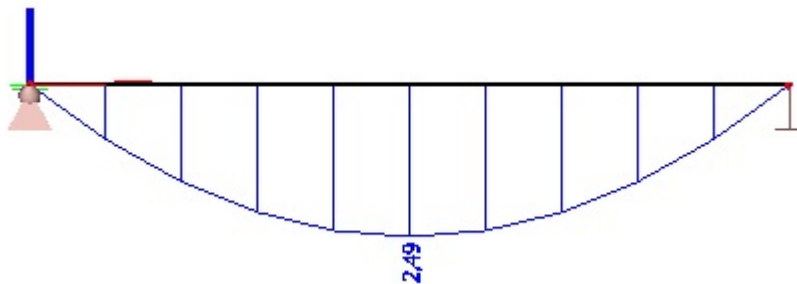
Muuttuva kuorma:

hyötykuorma $Q_k = 0,5 \text{ kN/m}$

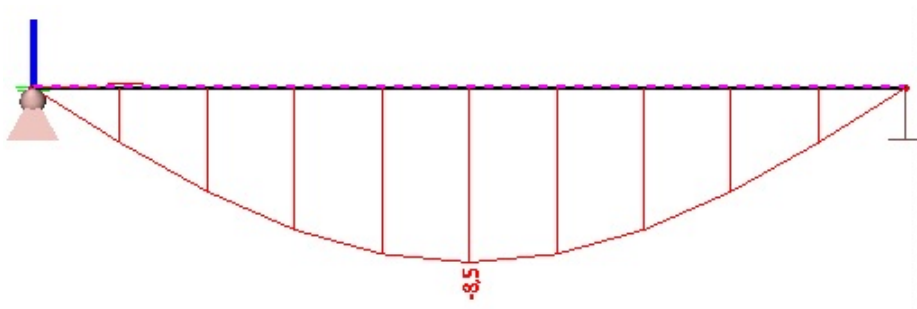
Laskennasta saadaan (kuvien 42,43 ja 44) mukaiset tulokset



Kuva 42. Leikkausvoimakuvio [kN]



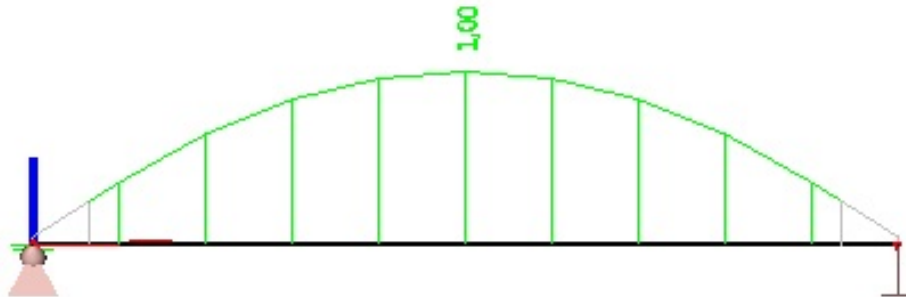
Kuva 43. Momenttikuvio [kNm]



Kuva 44. Käyttörajatilan mukainen taipuma

Mitoituksesta saadut tulokset

Scia antaa kyseiselle rakenteelle käyttöasteeksi tasan yksi (kuva 45). Käyttöasteen täytyy olla alle yhden, jotta rakenne varmasti kestää. Rakenne ei välttämättä kestä 0,5 kN/m hyötykuormaa, koska käyttöaste on tasan yksi.



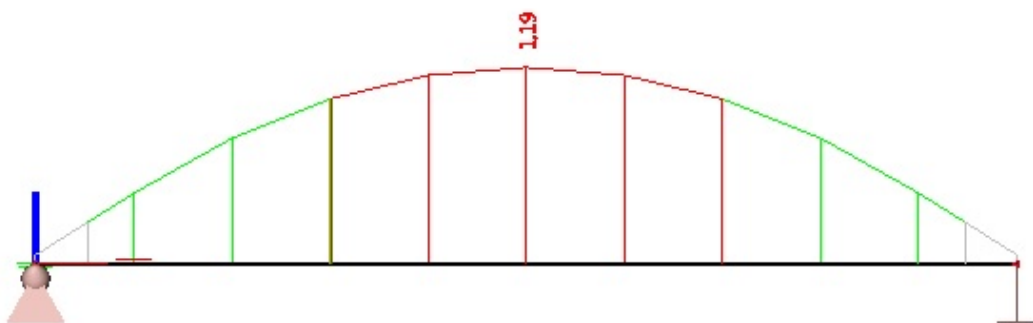
KUVA 45. Rakenteen käyttöaste on yksi

Rakenteeseen sallitaan $\frac{l}{100}$ taipuma. Rakenne taipuu 8,5 mm.

8,5mm < 50 mm, joten taipuma on sallituissa rajoissa.

Kokeillaan kasvattaa kuormaa ja testataan ilmoittaako Scia, että rakenne ei kestä.

Kuormaa kasvattamalla hyötykuorman arvoon 0,6 kN/m, rakenne ei enää kestänyt ja saatiin seuraavan (kuvan 46) mukainen tulos. Rakenne ei kestä 0,6 kN/m kuormitusta.



Kuva 46. Rakenteen käyttöaste on yli yhden

7.2 Alumiininen lipputanko

Mitoitetaan alumiininen lipputanko.

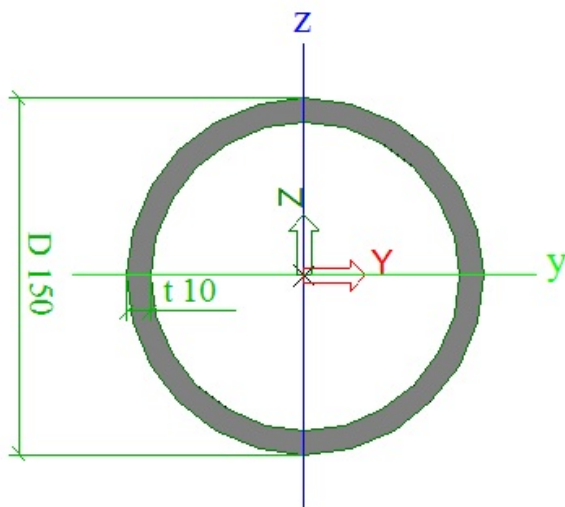
$h = 10 \text{ m}$ korkeus

$s = 10 \text{ mm}$ seinämän paksuus

$d = 150 \text{ mm}$ halkaisija

Alumiinilaatu EN-AW 6063 T6.

Alla on (kuva 47) lipputangon alumiiniputken poikkileikkauksesta.



KUVA 47. Lipputangon poikkileikkaus

Kuormituksena on tuulen lippuun aiheuttama tuulikuorma.

Lipun koko $1650 * 2690$

$A = 4,44 \text{ m}^2$

Tehdään puhdas arvaus tuulikuormasta, koska lippuun ei tuule kohtisuorasti vaan lipun suuntaisesti. Arvioidaan tuulikuorman aiheuttavan 2 kN pistevoima lipputangon yläpäähän. Lipputangon alapäässä on jäykkä tuenta.

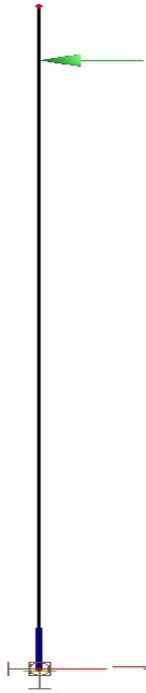
Muuttuva kuorma:

Tuulikuorma $Q_k = 2 \text{ kN}$

Pysyvä kuorma:

Lipputangon omapaino $G_k = 1,16 \text{ kN}$ (Scian laskema).

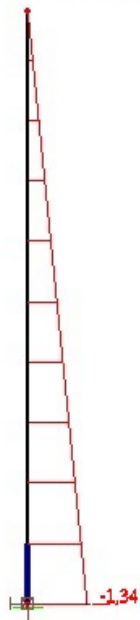
Alla oleva (kuva 48) on havaintokuva lipputangosta.



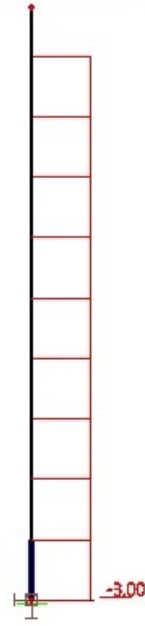
KUVA 48. Lipputanko

Laskennasta saadaan (kuvan 49) mukaiset tulokset.

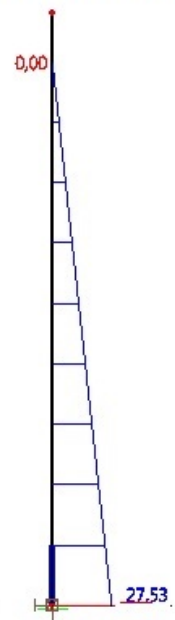
Normaalivoima [kN]



Leikkausvoima [kN]



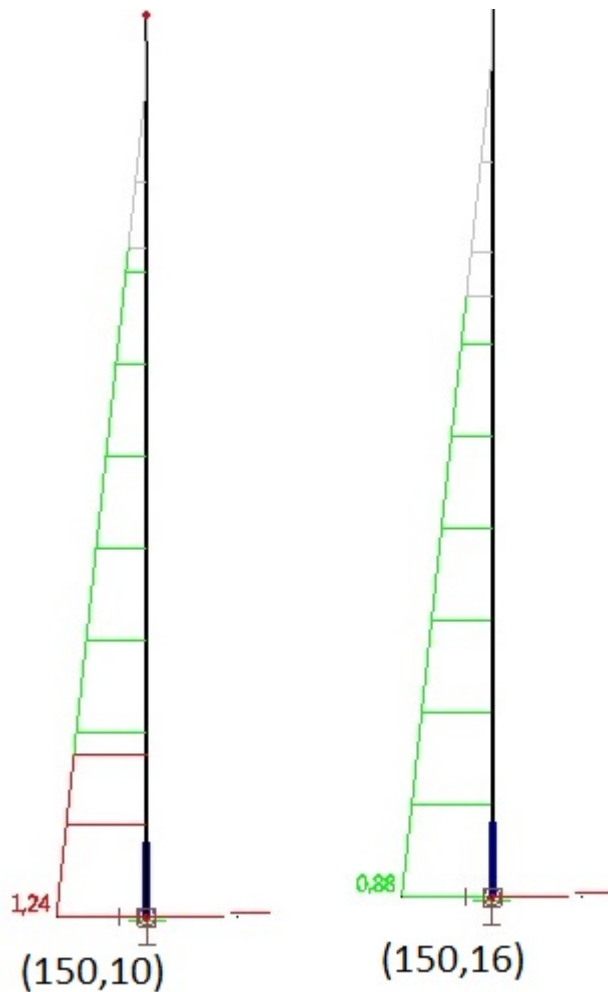
Momentti [kNm]



KUVA 49. Voimakuviot

Mitoituksessa saadaan (kuvan 50) mukaisesti käyttöasteeksi 1,2. Rakenne ei kestä, kun sen käyttöaste on 1,2.

Seuraavaksi käytetään Scian *Auto design*-toimintoa oikean kokoisen poikkileikkauksen selvittämiseksi. Ensin *Auto design* antaa poikkileikkaukseksi (150,20) ja tällä käyttöaste on vain 0,76. Määritetään poikkileikkaus uudestaan siten, että päästään lähemmäksi käyttöastetta yksi. Nyt *Auto design* antaa poikkileikkaukseksi (150,16), ja tällä saadaan seuraavan (kuvan 50) mukaisesti käyttöasteeksi 0,88.



Kuva 50. Lipputangon käyttöasteet eri profiili poikkileikkauksilla

Rakenne kestää kun,

$s = 16 \text{ mm}$ seinämän paksuus

$d = 150 \text{ mm}$ halkaisija

Profiilikoolla (150,16) Scia laskee lipputangon pään taipumaksi 544 mm.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoite oli antaa lukijalle käsitystä Scian käytöstä ja toiminnasta yleisesti, sekä osoittaa miten alumiinin mallinnus- ja mitoitusprosessi etenee. Kun lukija on perehtynyt opinnäytetyöhön, niin hän saa kuvan kuinka ohjelmalla saadaan mallinnettua ja mitoitettua yksinkertaisia alumiinirakenteita. Lukija kykenee myös mallintamaan ohjeen mukaisesti yksinkertaisia rakenneosia.

Isoin tehtävä opinnäytetyössä oli Scian käytön ja sen toimintaperiaatteiden opettelu. Scia on haastava ja monipuolinen ohjelma ja sillä on hyvät mahdollisuudet mitoittaa laajempiakin kokonaisuuksia. Täyden hyödyn saadakseen täytyy olla laajempaa ymmärrystä rakenteiden toiminnasta, eurokoodien laskentamenetelmistä ja mallinnusohjelman käytöstä. Parhaiten Sciaa oppi käyttämään mallintamalla yksinkertaisia rakenteita ja testaamalla niillä tukien, voimien, kuormien ja ominaisuuksien toimintaa.

Pidän dokumentointityökalua kömpelönä ja vaikeana, koska siinä on rajoitettu paljon käyttäjän mahdollisuuksia suunnitella haluamansa tulostesivu. Yleensä täytyy mennä valmiiden tyylien pohjalta ja valita niistä sopivin. Itse pidän kätevämpänä dokumentoida tulokset ja kuvat jollain muulla tapaa, kuten esimerkiksi ottamalla print screen kuvia ja kokoamalla niistä oma tulostesivu.

Scia vaikuttaa laajalta ja monimuotoiselta mallintamisohjelmalta. Ohjelmassa on paljon asioita ja ominaisuuksia, joita en ymmärrä tai osaa käyttää. Yksinkertaisten alumiinisten rakenteiden perusmallintaminen ei ole kovin vaikeaa, jos on aiempaa kokemusta samantyyllisistä mallintamisohjelmista. Laajimpien kokonaisuuksien mallintaminen ja isojen rakennusten rakenneosien yhteensovittaminen vaatii paljon ymmärrystä ja perehtymistä.

Scia tarjoaa kokeneemmille rakennesuunnittelijoille erinomaiset työkalut haastavimpien kohteiden suunnitteluun. Ohjelmaa käytetään yleensä vaativimpien rakennekokonaisuuksien mallintamisessa ja mitoituksessa.

9 LÄHTEET

Eurokoodi9. 2013. Luettu 30.4.2013

<http://www.eurokoodi9.fi>

Alumiini materiaalina. 2013. Luettu 30.4.2013

<http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/ryhmat-ja-yhdistykset/alumiini-materiaalina.html>

Vertailutaulukko alumiineille. 2013. Luettu 7.7.2013

<http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Ruostumaton-teras-ja-alumiini/Vertailutaulukot-alumiineille>

RIL 87-1998 Alumiinirakenteiden suunnitteluohje. 1998. Luettu 10.5.2013

Kuva bauksiitti mineraalista. 22.4.2013

(<http://www.mobilecrusher5.com/solutions/ore-material-crushing/bauxite-crusher.html>)

Hongisto T. 2012. Scia Engineer –ohjelman soveltuvuus teräsbetonirakenteiden eurokoodimitoituksessa. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Import of a general cross section. 2013. Luettu 20.10.2013

http://help.nemetschek-scia.com/html/Import_of_a_general_cross_section.htm

Alumiini – hyvä tietää. 2013. Luettu 29.4.2013.

<http://www.purso.fi/fi/yritys/alumiini-info.html>

Alumiinin käyttökohteet. 2013 Luettu 30.4.2013.

<http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/ryhmat-ja-yhdistykset/alumiinin-kytt-kohteet.html>

Alumiinin kimmokerroin.2011. Luettu 30.4.2013.

<http://www.ammattilehti.fi/uutiset.html?a100=3262>

EUROKOODI HELP DESK. 2013. Luettu 4.8.2013

<http://www.eurocodes.fi/1999/Contents1999.htm>

EN1999-1-1: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt. 2007. Luettu 5.8.2013

<http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/ProductServlet?action=productInfo&productID=187103>

EN1999-1-2: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteiden palomitoitus. 2007. Luettu 5.8.2013

<http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/ProductServlet?action=productInfo&productID=187081>

EN1999-1-3: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Väsymiselle alttiit rakenteet. 2010. Luettu 5.8.2013

<http://www.eurocodes.fi/1999/1999-1-3/NA%20SFS-EN1999-1-3-YM.pdf>

EN1999-1-4: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa1-4: Kylmämuovatut kantavat muotolevyt. 2012. Luettu 5.8.2013

<http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/ProductServlet?action=productInfo&productID=250420>

EN1999-1-5: Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Kuorirakenteet. 2007. Luettu 5.8.2013

<http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/ProductServlet?action=productInfo&productID=250457>

Timo Kinos, Tommi Hyypiä, Erkki Ahola. Alumiini rakennemateriaalina, Osa 1: Alumiini ja sen seokset. 1998.

About Nemetschek Scia. 2013. Luettu 10.6.2013

<http://nemetschek-scia.com/en/about-nemetschek-scia>

The Nemetschek Group. 2013. Luettu 10.6.2013

http://www.nemetschek.com/en/home/the_company.html

Scia Engineer. 2013. Luettu 11.6.2013

<http://nemetschek-scia.com/en/software/product-selection/scia-engineer>

Toivoniemi J. 2013. Teräsrakenteiden käyttö pientaloissa. Seinäjoen Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/61762/Toivoniemi_Jani.pdf?sequence=1

Rautaruukki Oyj. U-profiilit OPTIM 700. 2013. Luettu 26.9.2013.

<http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kylmamuoivat-terasprofiilit/U-profiilit-Optim-700>

Purso Oy. Vakioprofiilit-luettelo. 2010. Luettu 5.10.213

http://www.purso.fi/fi/tuotteet_ja_palvelut/vakioprofiilit.html

Kortelainen Petri. Scia Engineer-ohjelman koulutus. Tampere 21.3.