



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tomi Juhani Aaltonen

EUROKOODIN MUKAISEN LASKENTA-
POHJAN TESTAUS JA KORJAUS-
EHDOTUS

Tekniikka ja liikenne
2010

ALKUSANAT

Opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulussa rakennustekniikan koulutusohjelmassa keväällä 2010. Työn aihe saatiin Vaasan ammattikorkeakoululta ja työn ohjaajana toimi yliopettaja Tapani Hahtokari.

Haluan kiittää yhteistyöstä opinnäytetyön tekemisessä erityisesti työni ohjaajaa Tapani Hahtokaria sekä suunnittelutoimisto Vahasta, joka oli toteuttanut työssä käsiteltävän laskentapohjan.

Vaasassa 12.5.2010

Tomi Aaltonen

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tomi Aaltonen
Opinnäytetyön nimi	Eurokoodin mukaisen laskentapohjan testaus ja korjausohje dotus
Vuosi	2010
Kieli	suomi
Sivumäärä	60
Ohjaaja	Tapani Hahtokari

Suomessa ollaan siirtymässä vuoden 2011 aikana rakentamismääräyskokoelman mukaisesta mitoituksesta yhteiseurooppalaisten eurokoodien mukaiseen mitoitukseen. Siirtyminen tulee aiheuttamaan paljon haasteita rakennesuunnittelutoimistoille. Näitä haasteita helpottamaan suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto on perustanut Eurocode-laskentapohjien laadintahankkeen.

Työn tarkoituksena oli testata SKOLin hankkeeseen tehdyn teräspalkin I-poikkileikkauksen laskentapohja ja luoda varmennustestiraportti testauksen pohjalta. Työn aikana varmennustestiraportin tekemisestä jouduttiin kuitenkin luopumaan aikataulusta johtuvista syistä. Laskentapohja testattiin hankkeen testausohjeen mukaisesti ja siitä tehtiin korjattu versio, josta muodostui olennainen osa tätä työtä. Korjattu laskentapohja annettiin alkuperäisen pohjan laatineelle suunnittelu-
toimisto Vahaselle.

Työn tuloksena laskentapohjan virheitä saatiin karsittua, ja laskentapohjasta tuli aikaisempaa käyttäjäystävällisempi ja kattavampi, vaikka varmennustestiraporttia ei päästyäkään tekemään. Jatkossa suunnittelutoimisto Vahanen jatkaa kehitystä pohjan parissa tämän opinnäytetyön pohjalta, ja Vaasan ammattikorkeakoulu vastaa varmennustestauksen loppuun suorittamisesta, kunnes laskentapohjasta saadaan virheetön ja kattava.

Asiasanat testaus, teräsrakenteet, rakennesuunnittelu

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Rakennustekniikan koulutusohjelma

ABSTRACT

Author	Tomi Aaltonen
Title	Testing and Correction Proposal of Spreadsheet Template Based on Eurocodes
Year	2010
Language	Finnish
Pages	60
Name of Supervisor	Tapani Hahtokari

There is going to be transition in structural dimensioning building regulations in Finland. During the year of 2011, national building code of Finland is going to be overruled by intereuropean Eurocodes. The transition will cause a lot of challenges to structural engineering offices. The Finnish Association of Consulting Firms SKOL has started a project of Eurocode-spreadsheet templates drafting to ease these challenges.

The purpose of the thesis was to test the steel I-beam cross-section spreadsheet template made for the SKOL project and to create validation testing report based on the testing. During the work, plans for the validation testing report had to be dropped due to schedule. The spreadsheet template was still tested based on testing guide made for this project and the corrected version of the spreadsheet was written. Work on the new version became a major part of this thesis. The corrected version was given to structural engineering office Vahanen who drew up the original version of the spreadsheet template.

Based on the testing results, many of the errors were eliminated and the spreadsheet template was made more user friendly and complete, although the validation testing report could not be written. Structural engineering office Vahanen will continue developing the spreadsheet template based on this thesis and the validation testing will be completed by University of Applied Sciences until the spreadsheet template is correct and complete.

Keywords	Test, steel structures, structural design
----------	---

SISÄLLYS

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
KÄYTETYT LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 EUROKOODIT	8
2.1 Työn ajankohtaisuus	8
2.2 Eurokoodien kehitys	8
2.3 Rakennusmääräyskokoelman B-osan uudistaminen	9
2.4 Työssä käytetyt standardit	10
3 EUROCODE-LASKENTAPOHJIAN LAADINTAHANKE	11
4 LASKENTAPOHJIAN TOIMINTA	13
5 TESTAUKSEN PERIAATTEET	17
6 TESTAUKSEN LUOTETTAVUUS	19
6.1 Luotettavuuden määrittäminen ja todentaminen	19
6.2 Testauksen luotettavuuden todentaminen	20
7 LASKENTAPOHJIAN TESTAUS	22
7.1 Lähtötilanne	22
7.2 Työn luonnetta päätettiin muuttaa	23
7.3 Testauksen yhteydessä tehdyt havainnot	24
8 LASKENTAPOHJIAN KORJATTU VERSIO	34
9 YHTEENVETO	59
LÄHDELUETTELO	60

KÄYTETYT LYHENTEET

SKOL	Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto
CEN	European Committee for Standardization. Julkaisee eurokoodit englannin kielellä.
SFS	Suomen standardisoimisliitto. Edustaa CEN:ää Suomessa ja julkaisee eurokoodit suomeksi.
NA	National Annex eli EN-standardien kansallinen liite.
NAD	National Application documents ovat ENV-esistandardien kansallisia soveltamisasiakirjoja.
NDP	Nationally Determined Parameters ovat kansallisesti määrittäjä parametreja kansallisessa liitteessä.
RakMK	Suomen rakentamismääräyskokoelma
EN-standardi	Ovat vahvistettuja ja käytössä olevia eurokoodeja.
ENV-esistandardi	Ovat eurokoodeja edeltäneet standardit, joiden pohjalta käytössä olevat eurokoodit on tehty.
RIL	Rakennusinsinöörien liitto
EC	Eurocode (suom. eurokoodi).

1 JOHDANTO

Suomessa ollaan siirtymässä vuonna 2011 kantavien rakenteiden suunnittelussa kansallisesta rakentamismääräyskokoelman mukaisesta mitoituksesta yhteiseurooppalaisten eurokoodien mukaiseen mitoitukseen. Uusi standardi tulee luomaan paljon uusia haasteita rakennesuunnittelutoimistoille. Näitä haasteita helpottamaan Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL ry on yhdessä maamme suurimpien suunnittelutoimistojen kanssa pannut alulle Eurocode-laskentapohjien laadintahankkeen. Hankkeen tarkoituksena on luoda eurokoodien mukaiset laskentapohjat kaikista talonrakentamisen suunnittelun tärkeimmistä mitoitusasteista ja näin helpottaa siirtymistä uusien standardien käyttöön.

Opinnäytetyössä keskitytään tähän hankkeeseen tehdyn teräspalkin I-poikkileikkauksen laskentapohjan varmennustestaukseen. Pohjan on toteuttanut suunnittelutoimisto Vahanen Oy ja varmennustestauksen suorittaa Vaasan ammattikorkeakoulu tämän opinnäytetyön pohjalta.

Varmennustestauksen tarkoitus on todentaa laskentapohjan laskennan oikeellisuus ja kattavuus. Työn tavoitteena on tuottaa virheetön ja kattava laskentapohja sekä luoda tarkistuksen tuloksena varsinainen varmennustestiraportti, joka tulee liittää jokaiseen lopulliseen laskentapohjaan. Raportti toimii näin todistuksena siitä, että pohja on perusteellisesti testattu ja todettu paikkansapitäväksi.

2 EUROKOODIT

2.1 Työn ajankohtaisuus

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, jotka on laatinut CEN (European Committee for Standardization) Euroopan komission toimeksianosta. Suomen standardisoimisliitto SFS ry on kääntänyt standardit suomen kielelle ja suurimmalle osalle ympäristöministeriö on julkaissut niiden kansalliset liitteet (National Annex NA). /6/

Eurokoodit ovat korvaamassa Suomessa käytössä olleen rakentamismääräyskoelman B-osan. Eurokoodeja on voinut käyttää Suomessa kantavien rakenteiden suunnittelussa siitä lähtien, kun kyseiselle eurokoodille vahvistettu kansallinen liite on tullut voimaan. /3/

2.2 Eurokoodien kehitys

Vuonna 1975 Euroopan komissio päätti toimenpideohjelmasta, jonka tavoitteena oli poistaa kaupan teknisiä esteitä ja yhtenäistää Euroopassa käytössä olevia suurta määrää teknisiä määräyksiä. Tämän ohjelman pohjalta komissio teki aloitteen valmistella rakennusten rakenteellisen suunnittelun ohjeet, jotka ensi vaiheessa olisivat vaihtoehtona kansallisille ohjeille ja määräyksille ja myöhemmin korvasivat kansalliset ohjeet kokonaan. /1/

Vuonna 1984 komissio julkaisi jäsenmaiden avustamana ensimmäisen sukupolven eurokoodit. Komissio ja jäsenmaat kuitenkin päättivät siirtää eurokoodien valmistuksen ja julkaisun CEN:lle vuonna 1989. /1/

Vuosina 1992 - 1998 CEN julkaisi 62 kappaletta eurokoodien esistandardeja (ENV). Näihin standardeihin jouduttiin jättämään määrittelemättömiä arvoja, jotka määriteltiin erikseen kansallisissa soveltamisasiakirjoissa (National Application documents NAD). Ympäristöministeriö julkaisi 1990-luvulla useille ENV-esistandardeille kansalliset soveltamisasiakirjat. /1/

Vuonna 1998 CEN aloitti työn ENV-esistandardien muuttamiseksi varsinaisiksi standardeiksi (EN-standardeiksi). Nyt CEN on julkaissut kaiken kaikkiaan 58 eurokoodia, jotka kaikki SFS on julkaissut englanninkielisenä ja suurimman osan suomenkielisenä. /1/

Standardien EN-versioissa on kansallisesti määrättäviä parametreja (Nationally Determined Parameters NDP), joille eurokoodeissa on määritetty suositusarvot, mutta jäsenmaat voivat antaa niille omia arvojaan kansallisissa liitteissä. EN-standardien soveltaminen eri maissa vaatii kansallisten liitteiden käyttämistä. /1/ Ympäristöministeriö julkaisee kansallisen liitteen 46 eri eurokoodiin. Ensimmäiset 18 kansallista liitettä se julkaisi 1.11.2007, jolloin alkoi EN-standardien ja rakennusmääräyskokoelman rinnakkaiskäyttökausi. Neljäs erä eurokoodeja otettiin käyttöön 1.10.2009. Tällöin ympäristöministeriö oli julkaissut kansalliset liitteet kaiken kaikkiaan 40 eri eurokoodiin. /8/

2.3 Rakennusmääräyskokoelman B-osan uudistaminen

Ympäristöministeriön tavoitteena oli poistaa RakMK:sta päällekkäiset suunnittelusäännökset ja kumota ENV-esistandardi 31.3.2010 mennessä, jonka jälkeen oli tarkoitus siirtyä kantavien rakenteiden suunnittelussa käyttämään vain EN-standardien mukaista mitoitus. Tähän tavoitteeseen ei kuitenkaan päästy, vaan se siirtyi noin vuodella. RakMK B-osan uudistaminen aloitettiin vuoden 2010 alussa ja uutena tavoitteena on, että uudistetut B-osat voitaisiin ottaa käyttöön vuoden 2011 keväällä. Uudistuksen ja mahdollisen siirtymäkauden jälkeen eurokoodeista tulee kantavien rakenteiden suunnittelussa pääasiallinen suunnittelumenetelmä. /3/

Ympäristöministeriön päätöksellä eurokoodia edeltäneiden ENV-esistandardien käyttö kuitenkin päättyi 31.3.2010. Tämän jälkeen voidaan edelleen käyttää joko RakMK B-osan mitoitus tai eurokoodien sekä niiden kansallisten liitteiden mukaista mitoitus. /3/

2.4 Työssä käytetyt standardit

Teräsrakenteiden eurokoodeille on vahvistettu niiden kansalliset liitteet ja ne ovat sellaisenaan käytettävissä Suomessa. Rakennusinsinöörien liitto RIL ei ole vielä julkaissut teräsrakenteille omaa suunnitteluohjettaan.

Tässä työssä kaikki laskenta pohjautuu teräsrakenteiden suunnittelun EN-standardeihin SFS-EN 1993-1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt ja SFS-EN 1993-1-5: Levyrakenteet. Lisäksi työssä on käytetty hyväksi esistandardia SFS-ENV 1993-1-1, jonka liitteestä F löytyy kriittisen kimmoisen kiepahdusmomentin laskentakaavat. ENV-1993-1-1 on standardia SFS EN-1993-1-1 edeltänyt esistandardi. /8/

3 EUROCODE-LASKENTAPOHJIEN LAADINTAHANKE

Eurocode-laskentapohjien laadintahanke on käynnistetty helmikuussa 2008 SKOL:n rakennetoimikunnassa. Sen tarkoituksena on helpottaa rakennesuunnittelutoimistojen siirtymistä RakMK:n mukaisesta mitoituksesta eurokoodien mukaiseen mitoitukseen. /7/

Hankkeessa on mukana yhteensä 17 suunnittelutoimistoa, yhdeksän oppilaitosta, kolme materiaalijärjestöä sekä Eurokoodi-helpdesk. Vaasan ammattikorkeakoulu on yksi osallistuvista oppilaitoksista. Se osallistuu hankkeeseen suorittamalla laskentapohjien varmennustestausta. /7/

Hankkeen tavoitteena on tuottaa käytännön rakennesuunnitteluun hyvin soveltuvat, riittävän tasokkaat ja toiminnaltaan virheettömät laskentapohjat. Valmiiden virheettömien ja kattavien laskentapohjien laadinta helpottaa huomattavasti suunnittelutoimistojen koulutuksellisia, aikataulullisia, teknisiä ja mahdollisesti myös taloudellisia paineita eurokoodien siirtymävaiheessa. Pohjien luominen ei kuitenkaan poista kokonaan koulutuksen tarvetta. Jokaisen suunnittelijan tulee tuntea eurokoodit hyvin niillä suunniteltaessa. /4/

Ennen hankkeen käynnistämistä toimistoissa käytössä olevat laskentapohjat ovat pääsääntöisesti olleet toimistojen itse omaan käyttöön kehittämiä ja ovat pohjautuneet joko rakennusmääräyskokoelmaan tai ENV-standardeihin. SKOL:n hanke pyrkiikin tekemään valmiin kirjaston, josta löytyy kaikki mitoituksen perustapaukset. Samalla voidaan paremmin kontrolloida käytettävien pohjien oikeellisuutta, kun jokainen pohja järjestelmällisesti testataan. /4/

Hanke on syntynyt myös selkeästä tarpeesta. Kaupallisia laskentaohjelmia on saatavilla hyvin rajallisesti Suomessa, ja ulkomaiset eivät ota huomioon Suomen kansallisia liitteitä.

Tarvittavia laskentapohjia on arvioitu olevan noin 150 kappaletta, joiden kehitystyön pohjaksi on käytössä keskeneräisiä, päivitettäviä tai tarkastusta vaille olevia EN- tai ENV-pohjaisia sovellutuksia noin 120:aan eri mitoitustehtävään. /4/

Periaatteena on, että laskentapohjien laatiminen tapahtuu vastavuoroisuus- ja tasa-puolisuusperiaatteilla laativan tahon resurssit ja tulevat hyödyntämismahdollisuudet huomioiden. Tarkoituksena on, että tässä hankkeessa laaditut pohjat jaetaan kaikille osallistujille ja että rahallisia kompensatioita ei käytetä. Mukana olevat suunnitteluyritykset voivat hyödyntää laskentapohjia omassa liike-, opetus- ja koulutustoiminnassaan, mutta eivät saa luovuttaa niitä kolmansille osapuolille. Materiaalijärjestöjen jäsenet voivat hyödyntää pohjia tuotekehitystoiminnassaan, mutta järjestöt eivät saa hyödyntää tuloksia kaupallisesti. Mukana olevat oppilaitokset voivat hyödyntää pohjia opetustoiminnassa, mutta eivät saa luovuttaa niitä edelleen kaupallisesti hyödynnettäviksi. /4/

Hanke valmistuu portaittain, joista ensimmäinen vaihe valmistui 31.12.2009 ja toisen vaiheen on tarkoitus valmistua 30.6.2010 mennessä. Tässä työssä testattu teräspalkin I-poikkileikkauksen laskentapohja kuuluu hankkeen toiseen vaiheeseen. /7/

4 LASKENTAPOHJAN TOIMINTA

Laskentapohjalla voidaan mitoittaa yksiaukkoinen valssattu tai hitsattu I-poikkileikkauksinen teräspalkki. Laskentapohja on toteutettu Mathcad-laskentaohjelmalla.


Laskentapohjan käyttäminen aloitetaan aina syöttämällä kaikki vaadittavat lähtöarvot laskentapohjan ensimmäiselle sivulle keltaisella merkittyihin kenttiin. Kuvassa 1 on esitetty laskentapohjan lähtöarvosivu.

Mitoitettavalle poikkileikkaukselle voidaan antaa erikokoiset laipat, eli poikkileikkaus voi olla kaksoissymmetrinen tai vain z-akselin suhteen symmetrinen. Profiilin poikkileikkausluokka tulee olla luokissa 1, 2 tai 3. Poikkileikkausluokan 4 profiilit johtavat virheilmoitukseen.

Laskentapohja ei ratkaise palkin statiikkaa millään tavalla, joten kuormien mitoitussarvot ja kuormayhdistelmät on ratkaistava eurokoodin osien EC0 ja EC1 mukaan jollain toisella tavalla ennen tämän pohjan käyttämistä. Mitoittaviksi kuormiksi voidaan antaa taivutusmomentti y- ja z-akselien suhteen, puristava normaali voima, leikkausvoima ja poikittainen pistekuorma tai mikä tahansa näiden yhdistelmistä. RakMK:n mukaisia kuormitustapauksia ei saa käyttää tämän laskentapohjan yhteydessä.

Laskentapohja tarkistaa annettuja lähtöarvoja käyttäen teräspalkin puristus-, taivutus-, leikkaus-, leikkauslommahdus-, kiepahdus-, nurjahdus- ja pistevoimakestävyden. Nurjahduskestävyys tarkistetaan lisäksi y-, ja z-akselien suhteen. Nämä kaikki laskennat tehdään eurokoodi 3:n mukaisesti murtorajatilassa. Laskennassa pohja ei huomioi minkäänlaisia poikittaisia välijäykisteitä eikä pituussuuntaisia jäykisteitä.

Parhaiten laskentapohjan toimintaperiaate käy ilmi sen ohjelmavuokaaviosta. Siinä on esitelty koko laskentapohjan laskenta jäsennehtynä haaraumiksi ja haaraumaehdoiksi. Laskentapohjan ohjelmavuokaavio on esitelty kuvissa 2 ja 3.

		Rakennelaskelma	
		Työ no: -	Sivu 1 (14)
Rakennuskohde:		Työ no: -	Sijainti: -
-		Sisältö: Teräspalkki, I-poikkileikkaus	-

Versio 0.51

Materiaalit

Poikkileikkauksen symmetrisyys

Teräslaatu

Muokkaustapa

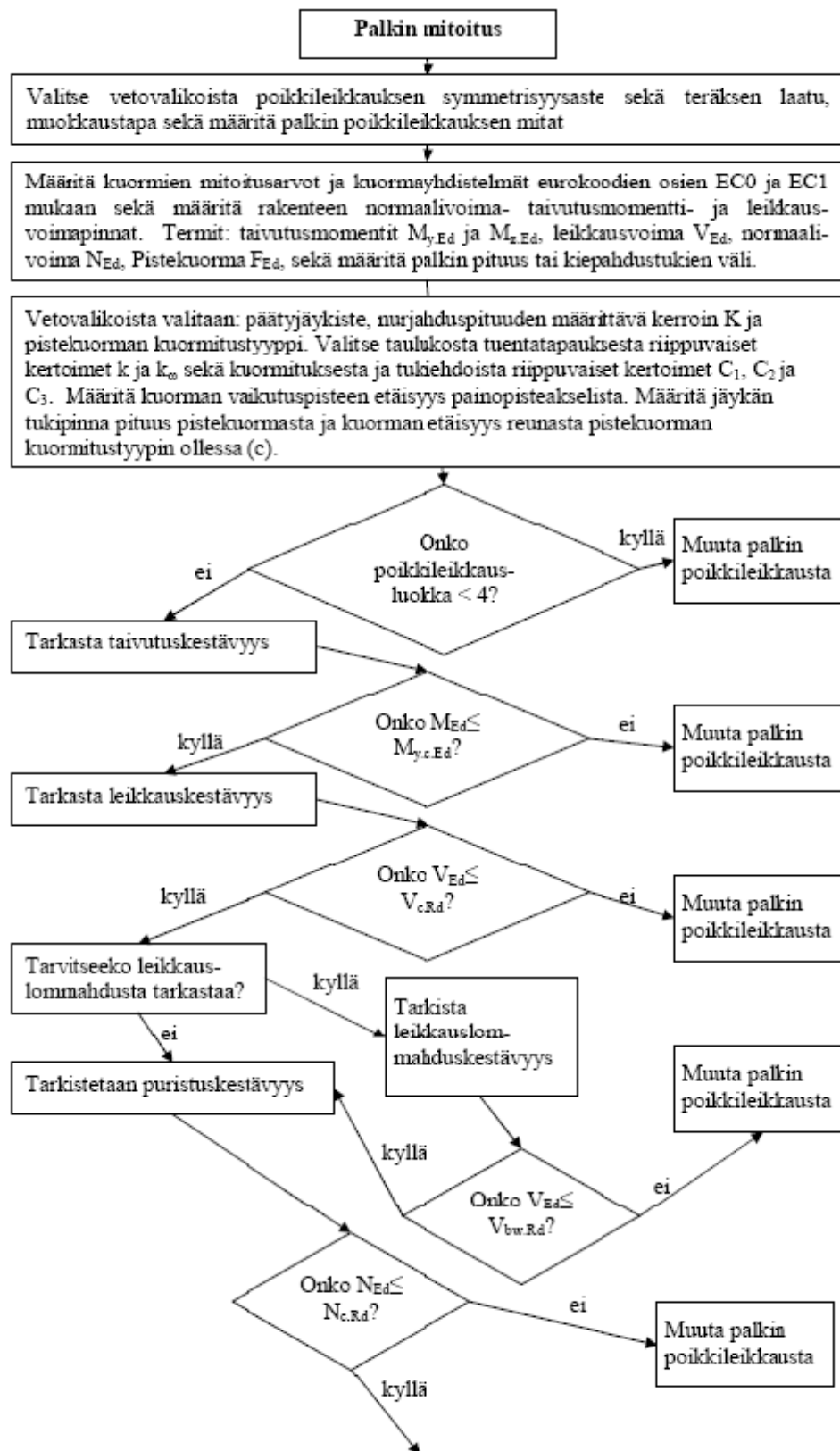
Mitoittavat voimat ja palkin pituus/ kiepahdustukien väli**Palkin poikkileikkauksen mitat**

$h = 400\text{mm}$	poikkileikkauksen kokonaiskorkeus	$M_{y,Ed} = 100\text{ kNm}$	taivutusmomentin mitoitusarvo y-akselin suhteen (itseisarvo)
$b_1 = 200\text{mm}$	ylälaipan leveys	$M_{z,Ed} = 10\text{ kNm}$	taivutusmomentin mitoitusarvo z-akselin suhteen (itseisarvo)
$b_2 = 200\text{mm}$	alalaipan leveys	$V_{Ed} = 50\text{ kN}$	leikkausvoiman mitoitusarvo (itseisarvo)
$t_{f1} = 10\text{mm}$	ylälaipan paksuus	$N_{Ed} = 200\text{ kN}$	normaalivoiman mitoitusarvo (itseisarvo)
$t_{f2} = 10\text{mm}$	alalaipan paksuus	$F_{Ed} = 20\text{ kN}$	pistekuorman mitoitusarvo
$t_w = 8\text{mm}$	uuman paksuus	$L = 2000\text{ mm}$	palkin pituus tai kiepahdustukien välinen etäisyys
$r = 12\text{mm}$	laipan ja uuman välinen pyöristyssäde, jos profiili on hitsattu niin arvoksi 0		
$a = 0\text{ mm}$	laipan ja uuman välisen hitsin leveys, jos profiili on valssattu niin arvoksi 0		

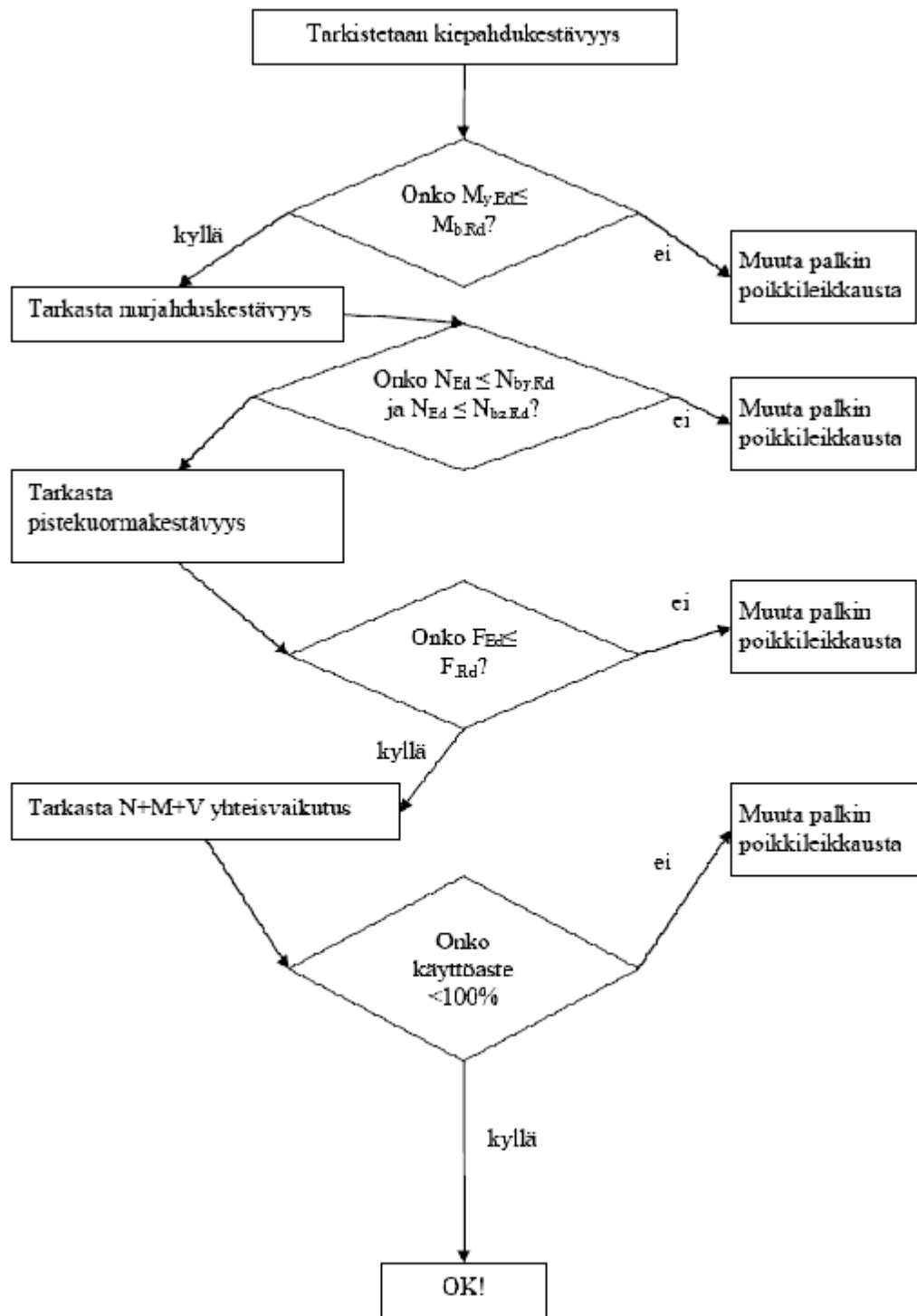
Päätyjäykiste (leikkauslommahdus)

$z_a = 200\text{mm}$	Kuorman vaikutuspisteen koordinaatti painopisteakselista (kiepahdus)
<input type="text" value="1"/>	Tuentatapauksesta riippuva kerroin k (kiepahdus)
<input type="text" value="1"/>	Tuentatapauksesta riippuva kerroin k_w (kiepahdus)
<input type="text" value="1.312"/>	Kuormituksesta ja tukiehdoista riippuva kerroin C_1 (kiepahdus)
<input type="text" value="0.259"/>	Kuormituksesta ja tukiehdoista riippuva kerroin C_2 (kiepahdus)
<input type="text" value="0.525"/>	Kuormituksesta ja tukiehdoista riippuva kerroin C_3 (kiepahdus)
<input type="text" value="1.0"/>	Valitse nurjahduspituuden määrittävä kerroin K (nurjahdus)
<input type="text" value="(a)"/>	Kuormitustyyppi kuvasta 6.1 (nurjahdus)
$S_s = 50\text{ mm}$	Jäykän tukipinnan pituus (pistekuorma)
$c_p = 20\text{ mm}$	Kuormitustyyppissä (c) oleva kuorman etäisyys reunasta (pistekuorma)

Kuva 1. Laskentapohjan lähtöarvosivu.



Kuva 2. Laskentapohjan ohjelmavuokaavion osa 1.



Kuva 3. Laskentapohjan ohjelmavuokaavion osa 2.

5 TESTAUKSEN PERIAATTEET

Laskentapohjien käytön yksi ongelmista on niiden luotettavuus. Jotta pohjasta saataisiin luotettava ja kaikki osapuolet voisivat vakuuttua sen käyttökelpoisesta toiminnasta ja laskennan tulosten oikeellisuudesta, on sen oikeellisuus todennettava tarkasti kattavan testauksen avulla ennen sen käyttämistä. Vasta tämän jälkeen pohjaa voidaan käyttää luotettavasti rakenneosien mitoitukseen. Laskentapohjien testaus tässä hankkeessa perustuu hankkeen testauskoordinaattori Pekka Koposen kirjoittamaan Eurocode-laskentapohjien laadintahankkeen testausohjeeseen. Ohjeessa määritellään tarkasti testauksen kulku ja sen raportointi. /5/

Laskentapohjan testauksen tehtävänä on vakuuttaa, että laskentapohja laskee ja mitoitaa rakenneosan oikein. Tämä on laskentapohjan toiminnan ehdoton vaatimus. Oikein laskeminen ei tarkoita vain lopputuloksen oikeaa arvoa tai arvoja, vaan myös välitulosten ja tarkistustulosten oikeita arvoja. Kaikki testaus suunnitellaan ja suoritetaan white-box testauksena, jossa testaajalla on käytettävissä laskentapohjan laskentafunktiot ja -makrot, eli laskentapohjan lähdekoodi. /5/

Laskentapohjan testaus jakautuu pohjan toiminnantestaukseen ja laskennan oikeellisuuden testaukseen. Laskentapohjan toiminnan testauksen suorittaa laskentapohjan toteuttaja yksikkötestauksen yhteydessä, ja laskennan oikeellisuuden testauksen suorittaa toinen osapuoli kuin toteuttaja. Toteuttaja suorittaa myös laskennan oikeellisuuden testausta, mutta systemaattisen oikeellisuuden testauksen ja dokumentoinnin suorittaa toinen osapuoli, tässä tapauksessa Vaasan ammattikorkeakoulu. Laskennan oikeellisuuden testaukseen sisältyy myös laskentapohjan kattavuuden tarkistus, missä selvitetään, onko laskentapohjalle toteutettu kaikki laskennan perusteiden ja -teorian vaatimukset ja rajoitukset, eli tarkistetaan että kaikki kohdat eurokoodista on huomioitu. Mikäli kattavuuden tarkastuksessa havaitaan puutteita laskentapohjalla, näistä raportoidaan toteuttajalle viipymättä. Oikeellisuustestit suoritetaan vasta, kun laskentapohjan kattavuudessa ei ole aukkoja. /5/

Kun laskennan oikeellisuuden testauksen yhteydessä löytyy vikoja, nämä korjaa aina toteuttaja eikä testaaja. Tällä varmistutaan siitä, että toteuttajalla ja testaajalla on täsmälleen samat versiot laskentapohjasta, ja että laskentapohjaversioiden sisällön eriytymistä ei pääse tapahtumaan. Valmis, paketoitavan ja jakeluun lähtevä laskentapohja täytyy ehdottomasti olla sama, joka testattiin. /5/

Kun kertaalleen testattua laskentapohjan koodia korjataan, muutetaan tai laajennetaan, on riski, että uusi koodi ei ole yhteensopiva vanhan koodin kanssa. Uudella tai korjatulla koodilla voi olla sivuvaikutuksia vanhaan koskemattomaankin koodiin. Tästä voi seurata uusia vikoja myös jo aiemmin toimivaksi ja oikeaksi todettuun vanhaan koodiin. Tästä syystä, jos laskentapohjaa ei yhdellä testikierroksella voida todeta virheettömäksi, toisella testikierroksella pitää suorittaa kaikki testitapaukset uudelleen riippumatta siitä, koskevatko testitapaukset uutta tai vanhaa koodia. Tätä kutsutaan regressiotestaukseksi. /5/

Pääperiaatteena ohjelman tulisi olla käyttäjäystävällinen, ja suunnittelijan tulisi mahdollisimman vähällä perehtymisellä pystyä käyttämään sitä, vaikka ei olisi-kaan koskaan aiemmin sitä käyttänyt. Ohjelman tulisi olla riittävän yleispätevä, että se toimisi mahdollisimman monille erityyppisille tapauksille. Suppea ohjelma rajoittaa sen käyttöä. Laskentapohjien käytön päätarkoitus on mitoittaa rakenneosa mahdollisimman tehokkaasti, laskennan oikeellisuudesta ja täydellisyydestä tinkimättä. /5/

6 TESTAUKSEN LUOTETTAVUUS

6.1 Luotettavuuden määrittäminen ja todentaminen

Luotettavuudella ja käyttövarmuudella tarkoitetaan yleisesti teknillisen laitteen tai järjestelmän kykyä toimia halutulla tavalla ilman häiriötä ja käyttökeskeytyksiä. Käyttövarmuus on tuotteen laadun tärkeä osatekijä, ja sillä on tärkeä merkitys laitteiden taloudellisuudelle ja turvallisuudelle. Laitteiden virhetoiminnot saattavat aiheuttaa vaaratilanteita ja onnettomuuksia. Tähän liittyvä riski riippuu laitteiden käyttövarmuudesta. Laskentapohjalla suunnitellun liian heikon rakenteen turvallisuus on riskitekijä, joka voi johtaa rakennuksen romahtamiseen, ja sitä kautta seurauksena voi olla jopa ihmishenkien menetyksiä. /2/

Usein luotettavuustekniikassa tarkasteltavan järjestelmän piiriin kuuluu teknisen laitteiston lisäksi myös ihminen laitteiston käyttäjänä. Tämän vuoksi järjestelmän kokonaisvaltaisessa luotettavuustarkastelussa joudutaan tutkimaan myös ihmisen toiminnallista luotettavuutta. /2/ Laskentapohjan käyttäjänä toimii aina ihminen. Ihminen myös syöttää aina lähtöarvot laskentapohjaan. Ihmistä voidaan kuitenkin ohjata syöttämään oikeita arvoja tai laskentapohja voidaan asettaa syöttämään virheilmoituksen, kun mahdottomia tai virheellisiä arvoja on syötetty. Lisäksi laskentapohjan käyttöliittymästä voidaan pyrkiä tekemään mahdollisimman käyttäjäystävällinen ja selkeä, jotta väärinymmärryksiä ja tiedostamattomia virheitä ei pääsisi tapahtumaan. Hankkeen toiminta-, käyttöliittymä- ja dokumentointiohje pyrkii ohjaamaan pohjan tekijää oikeaan suuntaan ja pakottamaan yksinkertaiseen ja selkeään toteutukseen.

Toisaalta tehtävän menestyksellinen suorittaminen ei välttämättä edellytä virheetöntä toimintaa. Virheitä saa esiintyä, kunhan niillä ei ole merkittävää vaikutusta tehtävän suorittamiseen, tai ne voidaan korjata ennen kuin peruuttamattomia vaikeuksia on aiheutunut. Toisin sanoen, jos pohjaan syötetään virheellisiä tuloksia, laskentapohja voi silti antaa hyväksytyt tulokset, kunhan se on ilmoitus virheellisestä lähtöarvosta tai tulos on joka tapauksessa varmallalla puolella. Laskentapohjas-

sa on pyritty poistamaan ihmisen tekemät virheet rajaamalla lähtöarvot siten, että mahdollisimman vähän virheellisiä lähtöarvoja voidaan syöttää pohjaan. /2/

Laskentapohjan luotettavan toteuttamisen todennäköisyys pienenee aina laskentavaiheiden määrän kasvaessa. Ennen kuin laskentapohjaa on lähdetty toteuttamaan, on pohjasta tehty prototyyppi, jonka avulla on tarkasteltu laskentapohjan laajuutta. Liian laajaa laskentapohjaa on vaikea toteuttaa riittävän luotettavasti. /2/

6.2 Testauksen luotettavuuden todentaminen

Luotettavuustesteillä pyritään kokeellisesti määrittämään ohjelman luotettavuusominaisuudet määriteltyjä olosuhteita varten tai selvittämään, onko luotettavuus asetettuihin vaatimuksiin nähden riittävä. Tässä tapauksessa varmennustestauksella pyritään parantamaan laskentapohjan luotettavuutta. Testauksen luotettavuus on huomioitu laatimalla erillinen testausohje ja vaatimalla sen noudattamista. Testausohje huomioi suurimman osan laskentapohjan luotettavuuteen ja käyttövarmuuteen liittyvistä ongelmista ja kun ohjeita noudatetaan tarkoin päästään jo hyvään lopputulokseen. /2/

Luotettavuustesteihin liittyy kuitenkin aina tietty epävarmuus, minkä vuoksi ai-neistoa on käsiteltävä tilastollisin menetelmin. Koskaan ei voida olla täysin varmoja siitä, että laskentapohja laskee oikein. Tästä syystä ohjelmalle tehdäänkin aina tietty tilastollinen riski tehtäessä johtopäätöstä havaintojen perusteella siitä, hyväksytäänkö vai hylätäänkö laskentapohja. Epävarmuus voi johtua siitä, että testeissä on mukana rajoitettu joukko yksilöitä tai johtopäätökset perustuvat kokonaisuudesta otettuun näytteeseen. Hankkeen testausohje vaatii, että jokainen lähtöarvo testataan erikseen, ja että testauksessa käytetty testijoukko kattaa kaikki mahdolliset jokaisen lähtöarvon arvovälillä olevat tapaukset. Tätä testausta kutsutaan raja-arvoanalyysiksi. Raja-arvoanalyysin lisäksi testausohje vaatii kombinaatiotestausta. Kombinaatiotestauksessa testataan monta eri lähtöarvoa samanaikaisesti. /2/

Hankkeessa on pyritty kasvattamaan henkilöiden lukumäärää, jotka osallistuvat pohjan tekoprosessiin sen suunnittelusta lopulliseen hyväksymiseen asti. Mitä

useampi ihminen on ollut toteuttamassa, testaamassa ja hyväksymässä laskentapohjaa, sitä varmemmalla todennäköisyydellä laskentapohja on kattava ja sen laskennallinen oikeellisuus on perusteltu. Luotettavuustestejä pyritään parantamaan myös lisäämällä laskentapohjan toteutukseen ja testaukseen osallistuvien henkilöiden ja tahojen lukumäärää. Laskentapohjan testaajan tulee olla eri henkilö kuin sen toteuttaja. Lisäksi testaajan on oltava eri organisaatiosta kuin toteuttajan, koska usein saman yhteisön sisällä on samantapaiset toimintatavat. Viimeiseksi testauksen tueksi vaaditaan vielä useampia eri ulkopuolisia lähteitä samoista laskentatapauksista, joita laskentapohja käsittelee. Tämä varmistaa, että samat laskentatapaukset on jokin muukin tulkinnut samoin, jolloin täten testauksen luotettavuus paranee. /2/

7 LASKENTAPOHJAN TESTAUS

7.1 Lähtötilanne

Pohja käytiin kertaalleen läpi perusteellisesti ennen kuin ruvettiin tekemään varsinaista varmennustestausta, jotta pohjasta voitaisiin karsia karkeimpia virheitä pois jo mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Lisäksi, kun on perehdytty perusteellisesti pohjan toimintaan, on helpompi lähteä laatimaan testitapauksia varmennustestiraporttia varten. Samalla tehtiin pohjaan kattavuustestausta. Jos pohja ei toteuta kaikkia EC3:ssa esitettyjä vaiheita, ei varmennustestausta voida suorittaa ennen kuin virheet on korjattu.

Ensimmäisessä tarkistuskierroksessa tarkasteltiin laskentapohjan versiota 0.51. Testaus suoritettiin laskemalla käsin kaikki laskentapohjan tulokset ja välivaiheet soveltaen EC3:n ja sen kansallisen liitteen mukaista mitoitus- ja tarkastusmenetelmää. Näitä tuloksia vertailtiin tämän jälkeen pohjan antamiin tuloksiin. Tässä vaiheessa laskut laskettiin käyttäen vain yksiä lähtöarvoja.

Ensimmäisessä testikierroksessa lähtöarvoina käytettiin laskuesimerkkiä, jossa profiilina on IPE360 ja sitä kuormittaa 50 kN/m tasainen kuorma. Kaikki ensimmäisessä kierroksessa käytetyt lähtöarvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Ensimmäisessä kierroksessa käytetyt lähtöarvot.

Poikkileikkauksen symmetrisyys	Kaksoissymmetrinen
Teräslaatu	S355
Muokkaustapa	valssattu
Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus	360 mm
Ylälaipan leveys	170 mm
Alalaipan leveys	170 mm
Ylälaipan paksuus	12,7 mm
Alalaipan paksuus	12,7 mm
Uuman paksuus	8,0 mm
Taivutusmomentin mitoitusarvo y-akselin suhteen	156 kNm
Taivutusmomentin mitoitusarvo z-akselin suhteen	25 kNm
Leikkausvoiman mitoitusarvo	125 kN
Normaalivoiman mitoitusarvo	500 kN
Pistekuorman mitoitusarvo	100 kN
Palkin pituus tai kiepahdustukien välinen etäisyys	5000 mm
Laipan ja uuman välinen pyörityssäde	18 mm
Laipan ja uuman välisen hitsin leveys	0 mm
Päätyjäykiste	Jäykkäpäätyjäykiste
Kuorman vaikutuspisteen koordinaatti painopisteakselista	180 mm
Tuentatapauksesta riippuva kerroin k	1
Tuentatapauksesta riippuva kerroin k_w	1
Kuormituksesta ja tukiehoista riippuva kerroin C_1	1,312
Kuormituksesta ja tukiehoista riippuva kerroin C_2	0,459
Kuormituksesta ja tukiehoista riippuva kerroin C_3	0,525
Nurjahduspituuden määrittävä kerroin K	1
Kuormitustyyppi	(a)
Jäykän tukipinnan pituus	54,5 mm
Kuormitustyyppissä (c) oleva kuorman etäisyys reunasta	20 mm

7.2 Työn luonnetta päätettiin muuttaa

Käsin laskennan yhteydessä huomattiin nopeasti, että pohjassa oli vielä virheitä. Pohjasta ei siis vielä sellaisenaan voitu lähteä tekemään varmennustestiraporttia. Työtä jatkettiin pohjan parissa, ja tarkoituksena oli yrittää löytää kaikki virheet laskennassa ja pyytää Vahasta korjaamaan nämä.

Ongelmaksi työn tarkistuksessa ja lopullisen varmennustestiraportin tekemisessä opinnäytetyön yhteydessä muodostuivat projektien aikataulut. Opinnäytetyön valmistumiselle oli asetettu takarajaksi 30.4.2010, ja koska pohjassa oli vielä niin paljon virheitä, sen korjaamisesta muodostui odotettua suurempi urakka, eikä korjattua versiota saatu Vahaselta takaisin riittävän nopeasti. Aikataulusta johtuen sitä ei voitu myöskään jäädä odottamaan.

Koska pohjan korjattua versiota ei saatu käyttöön ja varmennustestiraporttia ei päästy tekemään, päätettiin työn luonnetta muuttaa yhteismielin opinnäytetyön ohjaajan kanssa siten, että toisen testikierroksen sijaan lähdettiin tekemään ehdotettuja korjauksia pohjaan, jotka oli tarkistuksen yhteydessä havaittu. Tavoitteena oli lähettää muokattu ja korjattu laskentapohjan uusi versio Vahaselle ja näin nopeuttaa projektin etenemistä. Hankkeen toisen vaiheen ja tässä työssä käsitellyn laskentapohjan on määrä valmistua 30.6.2010 mennessä.

Koska pohjasta päätettiin tehdä korjattu versio ja tässä tapauksessa varmennustestaaja lähti muokkaamaan laskentapohjaa, on hyvä huomioida, että testauksen periaatteita kunnioitetaan, joten varmennustestauksen tulee suorittamaan loppuun jokin toinen henkilö.

7.3 Testauksen yhteydessä tehdyt havainnot

Seuraavassa on esitelty testauksen yhteydessä tehdyt havainnot ja niiden toteutetut korjaukset:

1. Lähtöarvojen syöttämiseen olisi hyvä kiinnittää enemmän huomiota. Pohjaan on mahdollista syöttää paljon virheellisiä lähtöarvoja, joita käyttämällä laskentapohja antaa virheellisiä tuloksia.

Profiilin mittoja syötettäessä kaikki yleisimmin käytössä olevat valssatut profiilit tulisi pystyä valitsemaan alasettovalikosta. Tämä ominaisuus helpottaisi pohjan käytettävyyttä huomattavasti ja vähentäisi käyttäjän syötettäviä virheellisiä lähtöarvoja.

Korjausehdotuksessa valssatuille profiileille haetaan mitat ja poikkileikkausarvot profiilitaulukosta. Hitsatuille profiileille käytetään edelleen pohjan laskemia arvoja. Kuvassa 4 on esitetty profiilitaulukko sellaisena kuin se korjatussa pohjassa esiintyy.

Profiilitaulukko:

	0	1	2	3	4
0	"Profiili"	"h"	"b"	"t,w"	"t,f"
1	"IPE80"	80	46	3.8	5.2
2	"IPE100"	100	55	4.1	5.7
3	"IPE120"	120	64	4.4	6.3
4	"IPE140"	140	73	4.7	6.9
5	"IPE160"	160	82	5	7.4
6	"IPE180"	180	91	5.3	8
7	"IPE200"	200	100	5.6	8.5
8	"IPE220"	220	110	5.9	9.2
9	"IPE240"	240	120	6.2	...

Kuva 4. Profiilien mitat ja suuret haetaan taulukosta.

Myös mitoittavien kuormien syöttämistä pystyttäisiin helpottamaan, jos niiden syöttämisessä käytettäisiin kuvan 5 mukaista tekstikenttää. Lisäksi syötetystä luvusta olisi hyvä ottaa itseisarvo huolimatta siitä, mitä käyttäjä kenttään syöttää. Näin saadaan estettyä paremmin käyttäjän syöttämiä virheellisiä lähtöarvoja.

taivutusmomentin mitoitusarvo
y-akselin suhteen (itseisarvo) kNm

$$M_{y.Ed} := |M_{y.Ed} \cdot \text{kNm}| \quad M_{y.Ed} = 156.3 \cdot \text{kNm}$$

Kuva 5. Ehdotus lähtöarvojen syöttämiselle.

Kertoimien k ja k_w syöttämiselle olisi hyvä käyttää myös alavetovalikkoa. Edelleen tämä poistaisi mahdollisuuden syöttää virheellisiä lähtöarvoja.

Sama toistuu kertoimien C_1 , C_2 ja C_3 valitsemiselle. Niille voitaisiin käyttää valintanappeja (engl. radio button), joiden avulla valittaisiin kuormitus-tapaus ja tukiehdot.

2. Poikkileikkauksen poikkipinta-alaa laskettaessa laskentapohja ei huomioi poikkileikkauksen pyöristyssädettä lainkaan, eikä sitä oltu hyödynnetty poikkileikkaussuureita laskettaessa. Alan kirjallisuudesta löytyy paljon valmiiksi laskettuja arvoja varsinkin kaikille yleisimmille valssatuille profiileille, ja ne ovat pääsääntöisesti hieman suurempia kuin mitä pohjan laskennassa saadut suuret ovat. Teräsrakenneyhdistys esimerkiksi tarjoaa valmiita taulukoita yleisimmin käytetyille teräsprofiileille. Kaavassa 1 on esitetty poikkileikkauksen pinta-alan laskemiselle korjattu versio. Kaavassa tarkistetaan onko poikkileikkaus hitsattu vai valssattu, ja käytetään siitä riippuen joko apusuureita käyttäen laskettua tai profiilitaulukosta haettua arvoa.

$$A := \begin{cases} t_{f1} \cdot b_1 + h_w \cdot t_w + t_{f2} \cdot b_2 & \text{if profiili} = \text{"hitsattu"} \\ \left[(\text{taulukko}_{\text{profiili, 6}}) \cdot \text{mm}^2 \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

3. Laskentapohjan ohjeessa tulisi mainita, että pohja ei huomioi poikittaisia välilykisteitä eikä pituusjäykisteitä tai pohjassa pitäisi olla mahdollisuus määrittää välilykisteiden määrä ja sijainti.
4. Jäyhyysmomentin kaavassa z-akselin suhteen oli laskettu uuman osuudeksi uuman korkeus kertaa ylälaipan paksuus kolmanteen potenssiin. Sen tulisi olla uuman korkeus kertaa uuman paksuus kolmanteen. Kaavassa 2 on esitetty jäyhyysmomentin kaavan korjattu versio.

$$I_z := \begin{cases} \frac{t_{f1} \cdot b_1^3 + h_w \cdot t_w^3 + t_{f2} \cdot b_2^3}{12} & \text{if profiili} = \text{"hitsattu"} \\ \left[(\text{taulukko}_{\text{profiili, 11}}) \cdot 10^4 \text{mm}^4 \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

5. Plastinen taivutusvastus oli laskettu käyttäen poikkileikkauksen painopistettä neutraaliakselina, vaikka neutraaliakselin paikka tulisi määrittää siten, että poikkileikkauksen poikkipinta-alat ovat yhtä suuret neutraaliakselin kummallakin puolella. Korjatussa versiossa määritelty neutraaliakselin paikka poikkileikkauksen yläreunan suhteen on esitetty kaavassa 3.

$$y_{ylar} := \left(\frac{A_{f2} - A_{f1} + h_w \cdot t_w}{2 \cdot t_w} \right) + t_{f1} \quad (3)$$

Kun neutraaliakselin paikka on saatu määriteltyä, voidaan sitä hyväksi käyttäen määrittää plastinen taivutusvastus.

6. Materiaalin lujuuksia määritettäessä ohjelma ei huomioi eurokoodissa määriteltyjä alennettuja materiaalilujuuksia, kun taso-osan paksuus on yli 40 mm. Lisäksi materiaalinormi EN 10025-2 määrittelee käytettäväksi alennettuja materiaalilujuuksia, kun taso-osan paksuus ylittää 16 mm. Suomessa ei ole määrätty kumpaa raja-arvoa tulisi käyttää, mutta koska esimerkiksi Ruotsissa tulee noudattaa materiaalinormin mukaista tiukempaa rajaa, päädytään käyttämään tätä rajaa pohjassakin. Kaavassa 4 on esitetty materiaalilujuuksien valintaan korjattu ohjelma.

$$\begin{aligned}
 f_y := & \text{if } 0\text{mm} < t_{\text{osa}} \leq 16\text{mm} \\
 & \left| \begin{array}{l}
 \text{return } 275 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ if } \text{teräslaatu} = \text{"S275"} \\
 \text{return } 355 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ if } \text{teräslaatu} = \text{"S355"} \\
 \text{return } 420 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ if } \text{teräslaatu} = \text{"S420"} \\
 \text{return } 460 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ if } \text{teräslaatu} = \text{"S460"}
 \end{array} \right. \\
 & \text{if } 16\text{mm} < t_{\text{osa}} \leq 40\text{mm} \\
 & \left| \begin{array}{l}
 \text{return } 255 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ if } \text{teräslaatu} = \text{"S275"} \\
 \text{return } 335 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ if } \text{teräslaatu} = \text{"S355"} \\
 \text{return } 390 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ if } \text{teräslaatu} = \text{"S420"} \\
 \text{return } 430 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ if } \text{teräslaatu} = \text{"S460"}
 \end{array} \right. \\
 & 0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ if } 0\text{mm} \geq t_{\text{osa}} > 40\text{mm}
 \end{aligned} \tag{4}$$

7. Poikkileikkausluokkaa määriteltäessä laskennassa ei huomioitu tapausta, jossa poikkileikkaus on puristettu tai puristettu ja taivutettu. Lähtöarvoissa on kuitenkin mahdollista antaa sellaiset kuormitusyhdistelmät, jossa poikkileikkaus tulee puristetuksi, taivutetuksi tai puristetuksi ja taivutetuksi.

Korjatussa pohjassa tarkistetaan ensiksi, miten uumaa ja laippaa on rasitettu. Tämän jälkeen verrataan taso-osien hoikkuuksia EC3:ssa esitettyihin raja-arvoihin. Kaavassa 5 esitetään ohjelma uuman rasituksien tarkistuksesta ja kaavassa 6 katsotaan mihin poikkileikkausluokkaan uuma kuuluu.

$$T_U := \begin{cases} \text{"Taivutettu"} & \text{if } \psi_U = -1 \\ \text{"Puristettu"} & \text{if } \psi_U = 1 \\ \text{"Taivutettu ja puristettu"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$PL_{uuma} := \begin{cases} 1 & \text{if } T_U = \text{"Taivutettu"} \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq 72 \cdot \varepsilon \\ 2 & \text{if } T_U = \text{"Taivutettu"} \wedge 72 \cdot \varepsilon < \frac{c_U}{t_U} \leq 83 \cdot \varepsilon \\ 3 & \text{if } T_U = \text{"Taivutettu"} \wedge 83 \cdot \varepsilon < \frac{c_U}{t_U} \leq 124 \cdot \varepsilon \\ 1 & \text{if } T_U = \text{"Puristettu"} \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq 33 \cdot \varepsilon \\ 2 & \text{if } T_U = \text{"Puristettu"} \wedge 33 \cdot \varepsilon < \frac{c_U}{t_U} \leq 38 \cdot \varepsilon \\ 3 & \text{if } T_U = \text{"Puristettu"} \wedge 38 \cdot \varepsilon < \frac{c_U}{t_U} \leq 42 \cdot \varepsilon \\ 1 & \text{if } T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \alpha > 0.5 \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \\ 1 & \text{if } T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \alpha \leq 0.5 \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha} \\ 2 & \text{if } T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \alpha > 0.5 \wedge \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} < \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \\ 2 & \text{if } T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \alpha \leq 0.5 \wedge \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha} < \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{41.5 \cdot \varepsilon}{\alpha} \\ 3 & \text{if } T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \psi_U > -1 \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{42 \cdot \varepsilon}{0.67 + 0.33 \cdot \psi_U} \\ 3 & \text{if } T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \psi_U \leq -1 \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi_U) \cdot \sqrt{(-\psi_U)} \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

8. Leikkauskestävyystarkastelussa staattisen momentin kaavassa oli virhe. Korjatussa versiossa käytetään hyväksi plastista taivutusvastusta varten

laskettuja pinta-aloja ja taso-osien painopisteiden etäisyyksiä. Korjattu staattisen momentin laskentakaava on esitetty kaavassa 7.

$$S := A_{tf1} \cdot e_{tf1} + A_{tf11} \cdot e_{tf11} + A_{w11} \cdot e_{w1} \quad (7)$$

9. Leikkauslommahdustarkastelussa laskennassa ei huomioitu laipan osuutta kestävyysasteeseen. Laipan osuus kestävyysasteeseen on kuitenkin hyvin pieni ilman poikittaisjäykisteitä, joten korjattuun versioon päädyttiin lisäämään vain huomautus: ”Laipan osuus leikkauslommahduskestävyyteen jää pieneksi ilman poikittaisjäykisteitä, joten sitä ei huomioida laskennassa. Laskenta jää kuitenkin täten varmalle puolelle”.

10. Leikkauslommahduskestävyyden arvoa laskettaessa pohja ei huomioida EC3:ssa esitettyä rajaehdotusta, jota leikkauslommahduskestävyyden arvo ei saa milloinkaan ylittää.

Tarkistus lisättiin pohjan korjattuun versioon. Kaavassa 8 valitaan kahdesta arvosta pienempi ja käytetään sitä leikkauskestävyyden määrittävänä arvona.

$$V_{bw,Rd} := \min \left(\frac{\chi_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}, \frac{\eta \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \right) \quad (8)$$

11. Kiepahdustarkastelussa vääntökeskiön paikkaa laskettaessa kaavassa oli virhe. Korjatussa versiossa kaava on johdettu yhtälöstä 9 ratkaisemalla siitä D_1 . Kaavassa D_1 on vääntökeskiön etäisyys poikkileikkauksen reunasta ja I_{f1} on ylälaipan neliömomentti. Vastaavasti D_2 on etäisyys poikkileikkauksen alareunasta ja I_{f2} on alalaipan neliömomentti.

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{I_{f1}}{I_{f2}} \quad (9)$$

Kaavassa 10 on esitetty vääntökeskiön paikan laskennalle sen lopullinen muoto.

$$z_s := e - h \cdot \frac{t_{f1} \cdot b_1^3}{t_{f1} \cdot b_1^3 + t_{f2} \cdot b_2^3} \quad (10)$$

12. Kriittistä kimmoista kiepahdusmomenttia laskettaessa laippojen jäyhyysmomentit oli laskettu väärän pääjäyhyysakselin suhteen. Korjatussa versiossa ohjelma tarkistaa kumpi akseli on heikompi ja laskee jäyhyysmomentin sen suhteen. Kaavassa 11 on esitetty kaavan korjattu versio.

$$I_{fc} := \begin{cases} \frac{b_1 \cdot t_{f1}^3}{12} & \text{if heikompi= "y"} \\ \frac{t_{f1} \cdot b_1^3}{12} & \text{if heikompi= "z"} \end{cases} \quad (11)$$

13. Laskettaessa kiepahduskestävyyttä vääntöneliömomentinkaavaan tulisi lisätä korotuskerroin c_v , joka on välillä 1,1-1,3. Ilman kerrointa kaava antaa liian pienen arvon. Kertoimen arvo pohjautuu Arvo Ylisen kirjoittamaan kirjaan Kimmo- ja lujuusoppi. Siinä käsitellään vääntöjäyhyiden laskenta yksityiskohtaisesti. Kaavassa 12 on esitetty vääntöneliömomentin korjattu laskentakaava.

$$I_v := \begin{cases} c_v \cdot \frac{b_1 \cdot t_{f1}^3 + b_2 \cdot t_{f2}^3 + h_w \cdot t_w^3}{3} & \text{if profiili= "hitsattu"} \\ \left[(\text{taulukko}_{\text{profiili, 16}}) \cdot 10^4 \text{mm}^4 \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

14. Kiepahduksen pienennyskerrointa laskettaessa kerroin β oli korotettu virheellisesti toiseen potenssiin, mikä johtaa väärään tulokseen. Korjatussa pohjassa potenssiin korotus on korjattu.

15. Kiepahduksen pienennyskerrointa määritettäessä ohjelmassa oli virhe. Korjatussa kaavassa 13 käytetään AND-lausetta OR-lauseen sijaan.

$$\Phi_{LT2} > 0 \wedge \frac{1}{\left(\Phi_{LT2} + \sqrt{\Phi_{LT2}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}\right)} < \left(1 \wedge \frac{1}{\lambda_{LT}^2}\right) \quad (13)$$

16. Pistevoimakestävyyttä laskettaessa termin K_f ohjelmaan lisätään tapaus, jossa määritetään K_f :n arvoksi tasan 6, kun yhtälön arvo ylittää ehto lauseen jälkeisen kaavan arvon. Kaavassa 14 on esitetty korjattu K_f termin laskennan ohjelma.

$$K_f := \begin{cases} 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a_p}\right)^2 & \text{if } \mathbf{kt} = \text{"(a)"} \\ 3.5 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a_p}\right)^2 & \text{if } \mathbf{kt} = \text{"(b)"} \\ 2 + 6 \cdot \left[\frac{(S_s + c_p)}{h_w}\right] & \text{if } 2 + 6 \cdot \left[\frac{(S_s + c_p)}{h_w}\right] \leq 6 \wedge \mathbf{kt} = \text{"(c)"} \\ 6 & \text{if } 2 + 6 \cdot \left[\frac{(S_s + c_p)}{h_w}\right] > 6 \wedge \mathbf{kt} = \text{"(c)"} \end{cases} \quad (14)$$

17. Normaalivoiman, leikkausvoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusta tarkasteltaessa pohjan laskenta ei huomioi EC3:n liitteessä B määriteltyjä yhteisvaikutustekijöitä. Yhteisvaikutustekijän käyttö voi pienentää tai kasvattaa palkin kestävyyttä. Ne on siis tärkeää myös ottaa huomioon laskennassa. Korjatussa versiossa määritellyt yhteisvaikutustekijät on esitetty kaavassa 15. Ehdot, jotka poikkileikkauksen tulee täyttää, on esitetty kaavoissa 16 ja 17.

$$k_{yy} := \begin{cases} \text{if } PL \leq 2 \\ \left| \begin{array}{l} 1 + (\lambda_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \quad \text{if } 1 + (\lambda_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \leq 1 + 0.8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \\ 1 + 0.8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \quad \text{if } 1 + (\lambda_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} > 1 + 0.8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \end{array} \right. \\ \text{if } PL = 3 \\ \left| \begin{array}{l} 1 + 0.6\lambda_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \quad \text{if } 1 + 0.6\lambda_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \leq 1 + 0.6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \\ 1 + 0.6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \quad \text{if } 1 + 0.6\lambda_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} > 1 + 0.6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} \end{array} \right. \end{cases} \quad (15)$$

$$Ehto_1 := \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y.c.Rd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.c.Rd}} \quad (16)$$

$$Ehto_2 := \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c.Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y.c.Rd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.c.Rd}} \quad (17)$$

Löydettyjen korjauksien määrästä voidaan sanoa, että pohja on vielä kaukana valmiista kattavasta ja luotettavasta laskentapohjasta, mihin tässä hankkeessa pyritään. Työtä on vielä jatkettava pohjan parissa ja testaus suoritetaan loppuun, kun kaikki havaitut virheet pohjasta on poistettu. Tätä opinnäytetyötä voidaan käyttää hyväksi lopullista varmennustestausta tehtäessä.

8 LASKENTAPOHJAN KORJATTU VERSIO

Seuraavassa on käyty läpi kaikki laskentapohjan laskennan vaiheet. Ne on selitetty ensin sanoin ja sen jälkeen on näytetty kuvin, miltä kyseinen kohta laskennassa näyttää korjatussa laskentapohjassa.

Laskentapohjan käyttäminen tulee aloittaa syöttämällä siihen lähtöarvot. Ensin valitaan teräksen laatu, käytettävä profiili ja palkin pituus tai kiepahdustukien välinen etäisyys. Seuraavaksi tulee syöttää kaikki mitoittavat voimasuureet, koska laskentapohja ei ratkaise palkin statiikkaa millään tapaa. Lisäksi jos profiiliksi on valittu hitsattu profiili, tulee myös sen taso-osien mitat syöttää niille kuuluviin kenttiin. Kuvassa 6 on esitetty miltä profiilin valinta ja mitoittavien voimasuureiden syöttäminen laskentapohjassa näyttää.

LÄHTÖARVOT

Teräslaatu	<input type="text" value="S355"/>	EN 10025-2
Profiili	<input type="text" value="IPE360"/>	
Palkin pituus tai kiepahdustukien välinen etäisyys	<input type="text" value="5000"/>	mm

Mitoittavat voimasuureet	Hitsatun profiilin mitat
Taivutusmomentin mitoitusarvo y-akselin suhteen (itseisarvo)	Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus
<input type="text" value="156"/> kNm	<input type="text"/> mm
Taivutusmomentin mitoitusarvo z-akselin suhteen (itseisarvo)	Ylälaipan leveys
<input type="text" value="25"/> kNm	<input type="text"/> mm
Leikkauvoiman mitoitusarvo (itseisarvo)	Alalaipan leveys
<input type="text" value="125"/> kN	<input type="text"/> mm
Normaalivoiman mitoitusarvo (itseisarvo)	Uuman paksuus
<input type="text" value="500"/> kN	<input type="text"/> mm
Pistekuorman mitoitusarvo (itseisarvo)	Ylälaipan paksuus
<input type="text" value="100"/> kN	<input type="text"/> mm
	Alalaipan paksuus
	<input type="text"/> mm
	Hitsin a-mitta
	<input type="text"/> mm

Kuva 6. Lähtöarvot.

Jotta pohja osaisi laskea kaikki eri kuormitustapaukset oikein, on syötettävä myös eri murtorajatiljoja varten yksilölliset lähtöarvot. Seuraavaksi valitaan poikkileikkauksen päätyjäykiste, nurjahduspituus, pistekuorman kuormitustyyppi, jäykän

tukipinnan pituus ja kuormitustyyppissä (c) oleva kuorman etäisyys reunasta. Kuvassa 7 on esitetty kyseisten lähtöarvojen valinta.

Leikkauslommahdus

Päätyjäykiste

Nurjahdus

Nurjahdupituuden määrittävä kerroin K

Pistekuorma

Kuormitustyyppi kuvasta 6.1

Jäykän tukipinnan pituus S_S mm

Kuormitustyyppissä (c) oleva kuorman etäisyys reunasta mm

Kuva 7. Eri murtorajatiloja varten syötettävät lähtöarvot.

Näiden jälkeen tulee vielä valita kiepahduslaskentaa varten tuentatapaukset sauvan päissä, kuorman vaikutuspisteen koordinaatti painopisteakselista ja kuormitustapaus ja tukiehdot. Kuvassa 8 on esitetty kiepahduslaskentaa varten vaadittavat lähtöarvot.

Kiepahdus

Valitse tuentatapaukset sauvan päissä

Kiertymä vapaa molemmissa päissä

Poikkipinta voi käyristyä molemmissa päissä

Kuorman vaikutuspisteen koordinaatti painopisteakselista mm

Valitse kuormitustapaus ja tukiehdot

Kuormitus ja tukiehdot		Taivutusmomenttipinnan muoto
Tasainen kuorma, nivelellinen tuki	Tapaus 1 <input checked="" type="radio"/>	
Tasainen kuorma, jäykkä tuki	Tapaus 2 <input type="radio"/>	
Pistekuorma, nivelellinen tuki	Tapaus 3 <input type="radio"/>	
Pistekuorma, jäykkä tuki	Tapaus 4 <input type="radio"/>	
Kaksi pistekuormaa sauvan neljännespisteissä, nivelellinen tuki	Tapaus 5 <input type="radio"/>	

Syötän omat arvot Tapaus 6, syötetyt arvot C_1

Arvot oltava välillä 0 - 5 C_2

C_3

Kuva 8. Lähtöarvot kiepahduslaskentaa varten.

Lähtöarvojen jälkeen pohjassa lasketaan kaikki tarvittavat apusuureet ja tarkistetaan poikkileikkausluokka ennen varsinaisia poikkileikkauksen kestävyys tarkistuksia. Kuvissa 9, 10 ja 11 on esitetty kaikkien laskentapohjassa tarvittavien apusuureiden laskenta.

Apusuureiden laskenta

$$\text{symmetria} := \begin{cases} \text{"kaksoissymmetrinen"} & \text{if } (t_{f1} = t_{f2} \wedge b_1 = b_2) \\ \text{"z-akselin suhteen symmetrinen"} & \text{if } (t_{f1} \neq t_{f2} \vee b_1 \neq b_2) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Poikkileikkauksen} \\ \text{symmetrisyys} \end{array}$$

$$h_w := \begin{cases} h - t_{f1} - t_{f2} & \text{if } h > t_{f1} + t_{f2} \\ \text{"EI MAHDOLLISTA"} & \text{if } h \leq t_{f1} + t_{f2} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Uuman korkeus} \end{array}$$

$$b := \begin{cases} b_1 & \text{if } b_1 \geq b_2 \\ b_2 & \text{if } b_2 > b_1 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Poikkileikkauksen kokonaisleveys} \end{array}$$

$$A := \begin{cases} t_{f1} \cdot b_1 + h_w \cdot t_w + t_{f2} \cdot b_2 & \text{if profiili = "hitsattu"} \\ \left[(\text{taulukko}_{\text{profiili}, 6}) \cdot \text{mm}^2 \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Poikkileikkauksen pinta-ala} \end{array}$$

$$A_{f1} := t_{f1} \cdot b_1 \quad \begin{array}{l} \text{Ylälaipan pinta-ala} \end{array}$$

$$A_{w1} := h_w \cdot t_w \quad \begin{array}{l} \text{Uuman pinta-ala} \end{array}$$

$$A_{f2} := t_{f2} \cdot b_2 \quad \begin{array}{l} \text{Alalaipan pinta-ala} \end{array}$$

$$z_{f1} := h - \frac{t_{f1}}{2} \quad \begin{array}{l} \text{Ylälaipan painopisteen etäisyys alareunasta} \end{array}$$

$$z_{w1} := t_{f2} + \frac{h_w}{2} \quad \begin{array}{l} \text{Uuman painopisteen etäisyys alareunasta} \end{array}$$

$$z_{f2} := \frac{t_{f2}}{2} \quad \begin{array}{l} \text{Alalaipan painopisteen etäisyys alareunasta} \end{array}$$

$$A_{f1} + t_w \cdot y = A_{f2} + t_w \cdot (h_w - y) \quad \begin{array}{l} \text{Neutraaliakselin paikka ratkaistaan kaavasta} \end{array}$$

$$y_{ylar} := \left(\frac{A_{f2} - A_{f1} + h_w \cdot t_w}{2 \cdot t_w} \right) + t_{f1} \quad \begin{array}{l} \text{Neutraaliakselin etäisyys yläreunasta y-akselin suhteen} \end{array}$$

$$y_{alar} := h - y_{ylar} \quad \begin{array}{l} \text{Neutraaliakselin etäisyys alareunasta y-akselin suhteen} \end{array}$$

$$e_{y.alar} := \frac{A_{f1} \cdot z_{f1} + A_{w1} \cdot z_{w1} + A_{f2} \cdot z_{f2}}{A_{f1} + A_{w1} + A_{f2}} \quad \begin{array}{l} \text{Painopisteen etäisyys alareunasta y-akselin suhteen} \end{array}$$

$$z_1 := z_{f1} - e_{y.alar} \quad \begin{array}{l} \text{Ylälaipan painopisteen etäisyys neutraaliakselista} \end{array}$$

$$z_2 := \begin{cases} z_{w1} - e_{y.alar} & \text{if } z_{w1} \geq e_{y.alar} \\ e_{y.alar} - z_{w1} & \text{if } z_{w1} < e_{y.alar} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Uuman painopisteen etäisyys neutraaliakselista} \end{array}$$

$$z_3 := e_{y.alar} - z_{f2} \quad \begin{array}{l} \text{Alalaipan painopisteen etäisyys neutraaliakselista} \end{array}$$

Kuva 9. Apusuureiden laskentaa.

$$e_z := \begin{cases} \frac{b_1}{2} & \text{if } b_1 \geq b_2 \\ \frac{b_2}{2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Painopisteen etäisyys alareunasta z-akselin suhteen}$$

$$e := \begin{cases} e_{y.alar} & \text{if } e_{y.alar} \geq \frac{h}{2} \\ h - e_{y.alar} & \text{if } e_{y.alar} < \frac{h}{2} \end{cases} \quad \text{Lyhyempi etäisyys poikkileikkauksen reunasta sen painopisteeseen}$$

Jähyysmomentti y-akselin suuntaan

$$I_y := \begin{cases} \frac{b_1 \cdot t_{f1}^3 + t_w \cdot h_w^3 + b_2 \cdot t_{f2}^3}{12} + A_{f1} \cdot z_1^2 + A_{w1} \cdot z_2^2 + A_{f2} \cdot z_3^2 & \text{if profiili = "hitsattu"} \\ \left[(\text{taulukko}_{\text{profiili}, 7}) \cdot 10^4 \text{mm}^4 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Jähyysmomentti z-akselin suuntaan

$$I_z := \begin{cases} \frac{t_{f1} \cdot b_1^3 + h_w \cdot t_w^3 + t_{f2} \cdot b_2^3}{12} & \text{if profiili = "hitsattu"} \\ \left[(\text{taulukko}_{\text{profiili}, 11}) \cdot 10^4 \text{mm}^4 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Jähyyssäde

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad i_z := \sqrt{\frac{I_z}{A}}$$

Kimmoisen taivutusvastus

$$W_{el.y} := \frac{I_y}{e} \quad W_{el.z} := \frac{I_z}{e_z}$$

$$W_{el.y.ylar} := \frac{I_y}{h - e_{y.alar}} \quad W_{el.y.alar} := \frac{I_y}{e_{y.alar}}$$

$$\sigma_{yla.r} := -\frac{N_{Ed}}{A} - \frac{M_{y.Ed}}{W_{el.y.ylar}} \quad \sigma_{o.r} := -\frac{N_{Ed}}{A} - \frac{M_{z.Ed}}{W_{el.z}} - \frac{M_{y.Ed}}{W_{el.y.alar}}$$

$$\sigma_{ala.r} := -\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y.Ed}}{W_{el.y.alar}} \quad \sigma_{v.r} := -\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{z.Ed}}{W_{el.z}} - \frac{M_{y.Ed}}{W_{el.y.alar}}$$

Jännitykset poikkileikkauksen ylä- ja alareunassa ja ylälaipan oikeassa ja vasemmassa reunassa

Puristus on negatiivinen

Plastinen taivutusvastus

$$W_{pl.y} := \begin{cases} A_{tf1} \cdot e_{tf1} + A_{tf11} \cdot e_{tf11} + A_{w11} \cdot e_{w1} + A_{w12} \cdot e_{w2} + A_{tf2} \cdot e_{tf2} + A_{tf21} \cdot e_{tf21} & \text{if profiili = "hitsattu"} \\ \left[(\text{taulukko}_{\text{profiili}, 9}) \cdot 10^3 \text{mm}^3 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$W_{pl.z} := \begin{cases} 2 \cdot A_{tf1.z} \cdot e_{tf1.z} + 2 \cdot A_{w.z} \cdot e_{w.z} + 2 \cdot A_{tf2.z} \cdot e_{tf2.z} & \text{if profiili = "hitsattu"} \\ \left[(\text{taulukko}_{\text{profiili}, 13}) \cdot 10^3 \text{mm}^3 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Kuva 10. Apusuureiden laskentaa.

$$\text{heikompi} := \begin{cases} \text{"y"} & \text{if } l_y \geq l_z \\ \text{"z"} & \text{if } l_z > l_y \end{cases} \quad \text{Heikompi pääjäyhysakseli}$$

$$\text{mt} := \begin{cases} \text{"hitsattu"} & \text{if profiili} = \text{"hitsattu"} \\ \text{"valssattu"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Muokkaustapa}$$

$$t_{\text{osa}} := \min(t_w, t_{f1}, t_{f2}) \quad \text{Pienimmän taso-osan paksuus}$$

$$f_y := \begin{cases} \text{if } 0\text{mm} < t_{\text{osa}} \leq 16\text{mm} \\ \quad \text{return } 275 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} & \text{if teräslaatu} = \text{"S275"} \\ \quad \text{return } 355 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} & \text{if teräslaatu} = \text{"S355"} \\ \quad \text{return } 420 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} & \text{if teräslaatu} = \text{"S420"} \\ \quad \text{return } 460 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} & \text{if teräslaatu} = \text{"S460"} \\ \text{if } 16\text{mm} < t_{\text{osa}} \leq 40\text{mm} \\ \quad \text{return } 255 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} & \text{if teräslaatu} = \text{"S275"} \\ \quad \text{return } 335 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} & \text{if teräslaatu} = \text{"S355"} \\ \quad \text{return } 390 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} & \text{if teräslaatu} = \text{"S420"} \\ \quad \text{return } 430 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} & \text{if teräslaatu} = \text{"S460"} \\ 0 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} & \text{if } 0\text{mm} \geq t_{\text{osa}} > 40\text{mm} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Materiaalilujuudet} \\ \text{EN3-1-1 Taulukko 3.1} \\ \text{EN 10025-2} \end{array}$$

$$E := 2.1 \cdot 10^5 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{Kimmokerroin} \quad f_y = 355 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{Materiaalin lujuus}$$

$$\nu := 0.3 \quad \text{Poissonin vakio} \quad G := \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Liukkerroin}$$

Osavarmuusluvut

$$\gamma_{M0} := 1.0 \quad \gamma_{M1} := 1.0 \quad \text{Poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3} \quad \text{EN3-1-1 6.1}$$

Kuva 11. Apusuureiden laskentaa.

Seuraavana pohjassa tarkistetaan, mihin poikkileikkausluokkaan lähtöarvoissa syötetty profiili kuuluu. Laipan osalta poikkileikkausluokan tarkastelu pohjaa teh-

täessä aiheutti hankaluuksia. Tapauksessa, jossa palkkia kuormittaa taivutusmomentti z-akselin ympäri ja puristava normaalivoima, ylälaipasta tulee puristettu ja taivutettu. Tässä erityisesti puristetun pinnan osuuden laskenta laipasta plastisessa tilassa osoittautui hyvin vaikeaksi. Laskennan yksinkertaistamiseksi päätettiin tarkistaa laipan poikkileikkausluokka vain kimmoisessa tilassa, kun laippa on puristettu ja taivutettu. Kun toimitaan näin, ollaan aina laskennan varmalla puolella eikä mitään virhettä tapahdu. Lisäksi standardissa EN3-1-1 kohdassa 6.3.3(5) huomautuksessa 3 kerrotaan, että yksinkertaisuuden vuoksi tarkistaminen voidaan tehdä vain kimmoisella alueella. Muu osuus poikkileikkausluokan tarkistuksesta etenee aivan eurokoodin mukaisesti. Kuvassa 12 esitetään laipan poikkileikkausluokan määrittäminen, ja kuvassa 13 ja 14 on esitetty uuman poikkileikkausluokan määrittäminen. Tarkistuksen lopuksi tulostetaan vielä, mihin poikkileikkausluokkaan koko profiili kuuluu ja ilmoitetaan poikkileikkausluokan tarkistuksen onnistumisesta, jos profiili ei kuulu poikkileikkausluokkaan 4.

Poikkileikkausluokan määrittäminen

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{f_y}} \quad \text{Myötöraja } f_y \text{ riippuva tekijä}$$

Laipan tarkastelu

$$c_1 := \frac{b_1 - t_w}{2} - r \quad t_1 := t_{f1} \quad \frac{c_1}{t_1} = 4.961$$

$$\psi_1 := \frac{\sigma_{0,r}}{\sigma_{v,r}} = 1$$

$$T_1 := \begin{cases} \text{"Puristettu"} & \text{if } \psi_1 = 1 \\ \text{"Taivutettu ja puristettu"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad T_1 = \text{"Puristettu"}$$

$$k_{\sigma} := \begin{cases} 0.43 & \text{if } \psi_1 = 1 \\ \frac{0.578}{\psi_1 + 0.34} & \text{if } 1 > \psi_1 > 0 \\ 1.70 & \text{if } \psi_1 = 0 \\ 1.7 - 5\psi_1 + 17.1\psi_1^2 & \text{if } 0 > \psi_1 > -1 \\ 23.8 & \text{if } \psi_1 = -1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Yksinkertaisuuden vuoksi taivutetulle ja puristetulle laipalle tarkistus tehdään vain kimmoisella alueella. EN3-1-1 6.3.3 (5) Huom. 3

$$PL_{\text{laippa}} := \begin{cases} 1 & \text{if } T_1 = \text{"Puristettu"} \wedge \frac{c_1}{t_1} \leq 9 \cdot \varepsilon \\ 2 & \text{if } T_1 = \text{"Puristettu"} \wedge 9 \cdot \varepsilon < \frac{c_1}{t_1} \leq 10 \cdot \varepsilon \\ 3 & \text{if } T_1 = \text{"Puristettu"} \wedge 10 \cdot \varepsilon < \frac{c_1}{t_1} \leq 14 \cdot \varepsilon \\ 3 & \text{if } T_1 = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \frac{c_1}{t_1} \leq 21 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}} \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{EN 1993-1-1} \\ \text{taulukko 5.2 (Osa 2)} \end{array}$$

$$PL_{\text{laippa}} = 1$$

Kuva 12. Laipan poikkileikkausluokan määrittäminen.

Uuman tarkastelu

$$c_u := h - t_{f1} - t_{f2} - 2r \quad t_u := t_w \quad \frac{c_u}{t_u} = 37.325$$

$$\alpha := \begin{cases} \frac{|\sigma_{yla.r}|}{|\sigma_{ala.r}| + |\sigma_{yla.r}|} \\ 0 \text{ if } \sigma_{yla.r} \geq 0 \end{cases}$$

$$\psi_u := \frac{\sigma_{yla.r}}{\sigma_{ala.r}} \quad \psi_u = -1$$

$$T_u := \begin{cases} \text{"Taivutettu"} & \text{if } \psi_u = -1 \\ \text{"Punistettu"} & \text{if } \psi_u = 1 \\ \text{"Taivutettu ja punistettu"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad T_u = \text{"Taivutettu"}$$

Kuva 13. Uuman poikkileikkausluokan määrittäminen.

$PL_{uuma} =$	<ol style="list-style-type: none"> 1 if $T_U = \text{"Taivutettu"} \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq 72 \cdot \epsilon$ 2 if $T_U = \text{"Taivutettu"} \wedge 72 \cdot \epsilon < \frac{c_U}{t_U} \leq 83 \cdot \epsilon$ 3 if $T_U = \text{"Taivutettu"} \wedge 83 \cdot \epsilon < \frac{c_U}{t_U} \leq 124 \cdot \epsilon$ 1 if $T_U = \text{"Puristettu"} \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq 33 \cdot \epsilon$ 2 if $T_U = \text{"Puristettu"} \wedge 33 \cdot \epsilon < \frac{c_U}{t_U} \leq 38 \cdot \epsilon$ 3 if $T_U = \text{"Puristettu"} \wedge 38 \cdot \epsilon < \frac{c_U}{t_U} \leq 42 \cdot \epsilon$ 1 if $T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \alpha > 0.5 \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{396 \cdot \epsilon}{13 \cdot \alpha - 1}$ 1 if $T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \alpha \leq 0.5 \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{36 \cdot \epsilon}{\alpha}$ 2 if $T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \alpha > 0.5 \wedge \frac{396 \cdot \epsilon}{13 \cdot \alpha - 1} < \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{456 \cdot \epsilon}{13 \cdot \alpha - 1}$ 2 if $T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \alpha \leq 0.5 \wedge \frac{36 \cdot \epsilon}{\alpha} < \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{41.5 \cdot \epsilon}{\alpha}$ 3 if $T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \psi_U > -1 \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq \frac{42 \cdot \epsilon}{0.67 + 0.33 \cdot \psi_U}$ 3 if $T_U = \text{"Taivutettu ja puristettu"} \wedge \psi_U \leq -1 \wedge \frac{c_U}{t_U} \leq 62 \cdot \epsilon \cdot (1 - \psi_U) \cdot \sqrt{(-\psi_U)}$ 4 otherwise 	<p>EN 1993-1-1 Taulukko 5.2 (Osa 1)</p>
---------------	---	---

$$PL_{uuma} = 1$$

Näin ollen koko poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan:

$$PL := \max(PL_{uuma}, PL_{laippa}) \quad PL = 1$$

Poikkileikkausluokka OK.

Kuva 14. Uuman poikkileikkausluokan määrittäminen.

Kestävyksien laskenta etenee pohjassa aina tiettyä kaavaa noudattaen. Ensin lasketaan kaikki tarvittavat apusuureet ja kaavat eurokoodia noudattaen. Tämän jälkeen tulostetaan kyseisen tapauksen kestävyys kilonewtoneina ja sen osuus kuorimituksesta, eli niin kutsuttu käyttöaste. Jokaisen tarkistuksen päätteeksi tulostetaan vielä ilmoitus siitä, onko tarkistus onnistunut vai epäonnistunut. Tarkistus katsotaan onnistuneeksi, jos sen käyttöaste jää alle sadan prosentin tai on tasan sata prosenttia ja epäonnistuneeksi, jos käyttöaste ylittää sata prosenttia. Korjatun version laskentapohjan ohjelmavuokaavio pysyy ennallaan eikä siihen tehdä muutoksia.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys on ensimmäinen tarkistettava murtorajatila. Siinä lasketaan kimmoinen ja plastinen taivutuskestävyys EN3-1-1:n kohdan 6.2.5 mukaisesti. Taivutuskestävyyksien laskennan jälkeen tarkistetaan, mihin poikkileikkausluokkaan profiili kuului ja valitaan käytettäväksi sen mukaan plastista tai kimmoista taivutuskestävyyden arvoa. Tarkistuksen jälkeen tulostetaan taivutuskestävyyden arvo kilonewtonmetreinä sekä poikkileikkauksen käyttöaste prosentteina, ja ilmoitetaan onko tarkistus onnistunut vai epäonnistunut. Taivutuskestävyys tarkistetaan ensin y-akselin suhteen ja tämän jälkeen z-akselin suhteen. Kuvassa 15 on esitetty laskentapohjan kohta, jossa taivutuskestävyys tarkastetaan.

Taivutuskestävyys

$$M_{pl.y.Rd} := \frac{W_{pl.y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.13)$$

$$M_{el.y.Rd} := \frac{W_{el.y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.14) \quad \text{EN3 1-1} \\ 6.2.5$$

$$M_{y.c.Rd} := \begin{cases} M_{pl.y.Rd} & \text{if } PL \leq 2 \\ M_{el.y.Rd} & \text{if } 2 < PL < 4 \end{cases} \quad M_{y.c.Rd} = 320.8 \cdot \text{kNm}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{taivutus.y}} := \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.c.Rd}} \quad \text{Käyttöaste}_{\text{taivutus.y}} = 48.63\%$$

Taivutuskestävyys y-y akselin suhteen OK.

$$M_{pl.z.Rd} := \frac{W_{pl.z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.13)$$

$$M_{el.z.Rd} := \frac{W_{el.z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.14) \quad \text{EN3 1-1} \\ 6.2.5$$

$$M_{z.c.Rd} := \begin{cases} M_{pl.z.Rd} & \text{if } PL \leq 2 \\ M_{el.z.Rd} & \text{if } 2 < PL < 4 \end{cases} \quad M_{z.c.Rd} = 43.56 \cdot \text{kNm}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{taivutus.z}} := \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.c.Rd}} \quad \text{Käyttöaste}_{\text{taivutus.z}} = 57.39\%$$

Taivutuskestävyys z-z akselin suhteen OK.

Kuva 15. Taivutuskestävyyden tarkastus.

Seuraavana pohjassa tarkistetaan poikkileikkauksen puristuskestävyys EN3-1-1:n kohdan 6.2.4 mukaan. Puristuskestävyydestä tulostetaan myös sen puristuskestävyyden arvo, käyttöaste ja ilmoitus tarkistuksen onnistumisesta. Kuvassa 15 on esitetty puristuskestävyydenlaskenta pohjassa.

Puristuskestävyys

$$N_{c.Rd} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.10)$$

EN3 1-1
6.2.4

$$\text{Käyttöaste}_{\text{puristus}} := \frac{N_{Ed}}{N_{c.Rd}} \quad \text{Käyttöaste}_{\text{puristus}} = 19.37\%$$

Puristusehto OK.

Kuva 15. Puristuskestävyyden laskenta.

Leikkauskestävyyden laskenta etenee hyvin samalla tavalla kuin taivutus ja puristuskestävyyksien laskenta. Laskenta suoritetaan EN3-1-1:n kohdan 6.2.6 mukaan kuvassa 16 esitetyllä tavalla, koska eurokoodi ei tarkkaan määrittele, milloin tulee käyttää plastisuusteorian mukaista mitoitusta ja milloin kimmoteorian mukaista mitoitusta. Laskentapohjassa lasketaan molempien arvot ja käytetään niistä suurempaa mitoittavana leikkauskestävyyden arvona. Tämän jälkeen tulostetaan saman kaavan mukaan leikkauskestävyyden arvo, käyttöaste ja ilmoitus tarkistuksen onnistumisesta.

Leikkauskestävyys

Suosittelun arvo on 1,2. Lujemmille teräslaaduille kuin S460 suositellaan arvoa 1,0. (EN3 1-5 5.1)

EN3 1-1
6.2.6

$$\eta := 1.2$$

Plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyyden mitoitusarvo

$$A_V := \begin{cases} \max[A - b_1 \cdot t_{f1} - b_2 \cdot t_{f2} + 0.5 \cdot (t_w + 2r) \cdot t_{f1} + 0.5 \cdot (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_{f2}, \eta \cdot h_w \cdot t_w] & \text{if } mt = \text{"valssattu"} \\ \eta \cdot h_w \cdot t_w & \text{if } mt = \text{"hitsattu"} \end{cases}$$

$$V_{pl,Rd} := \frac{A_V \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} \quad (6.18) \quad V_{pl,Rd} = 720.19 \cdot \text{kN}$$

Kimmoteorian mukainen leikkauskestävyyden mitoitusarvo

Lasketaan puolikkaan poikkileikkauksen staattinenmomentti koko poikkileikkauksen painopisteakselin suhteen

$$S := A_{tf1} \cdot e_{tf1} + A_{tf11} \cdot e_{tf11} + A_{w11} \cdot e_{w1}$$

$$V_{el,Rd} := \frac{f_y \cdot I_y \cdot t_w}{S \cdot \sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (\text{johdettu kaavoista 6.19 ja 6.20})$$

$$V_{el,Rd} = 547.81 \cdot \text{kN}$$

Eurokoodeissa ei kerrota milloin tulisi käyttää plastisuusteorian mukaista mitoitusta ja milloin kimmoteorian mukaista. Lasketaan molemmat ja valitaan pienempi niin ollaan varmallia puolella.

$$V_{c,Rd} := \min(V_{pl,Rd}, V_{el,Rd}) \quad V_{c,Rd} = 547.81 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{leikkaus}} := \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \quad \text{Käyttöaste}_{\text{leikkaus}} = 22.82 \cdot \%$$

Leikkausehto OK.

Kuva 16. Leikkauskestävyyden laskenta.

Leikkauslommahduskestävyyden laskenta etenee kuvassa 17 esitetyllä tavalla standardin EN3-1-5 luvun 5 mukaista mitoitusta noudattaen. Laskenta etenee samaa kaavaa seuraten kuin kaikki muutkin murtorajatilatarkastelut.

Leikkauslommahduskestävyys

Uuman osuus

$$\lambda_w := \frac{h_w}{86.4 \cdot t_w \cdot \epsilon}$$

$$\chi_w := \begin{cases} \eta_1 & \text{if } \lambda_w < \frac{0.83}{\eta_1} \\ \frac{0.83}{\lambda_w} & \text{if } \frac{0.83}{\eta_1} \leq \lambda_w < 1.08 \\ \frac{0.83}{\lambda_w} & \text{if } \lambda_w \geq 1.08 \wedge \text{jäykiste} = \text{"Ei jäykkä päätyjäykiste"} \\ \frac{1.37}{(0.7 + \lambda_w)} & \text{if } \lambda_w \geq 1.08 \wedge \text{jäykiste} = \text{"Jäykkä päätyjäykiste"} \end{cases}$$

$$V_{bw.Rd} := \min \left(\frac{\chi_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}, \frac{\eta \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \right) \quad \text{Käyttöaste}_{\text{leikkauslommahdus}} := \frac{V_{Ed}}{V_{bw.Rd}}$$

$$V_{bw.Rd} = 658.36 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{leikkauslommahdus}} = 18.99\%$$

Leikkauslommahdusehto OK.

(Laipan osuus jää pieneksi ilman poikkitaajajäykisteitä, joten sitä ei huomioida laskennassa. Laskenta jää kuitenkin täten varmalle puolelle.)

Kuva 17. Leikkauslommahduskestävyyden laskenta.

Profiilin poikkileikkauskestävyys tarkistetaan standardin EN3-1-1 kohdan 6.2.1 mukaan. Laskenta etenee kuvassa 18 esitetyllä tavalla.

Poikkileikkauskestävyys

$$\sigma_{xNed} := \frac{N_{Ed}}{A} \quad \sigma_{xMyed} := \frac{M_{y.Ed}}{W_{el.y}} \quad \sigma_{xMzed} := \frac{M_{z.Ed}}{W_{el.z}}$$

$$\text{Plkestävyys} := \begin{cases} 1 & \text{if } \sigma_{xNed} + \sigma_{xMyed} + \sigma_{xMzed} < f_y \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{poikkileikkauskestävyys}} := \frac{\sigma_{xNed} + \sigma_{xMyed} + \sigma_{xMzed}}{f_y}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{poikkileikkauskestävyys}} = 31.17\%$$

Poikkileikkauskestävyys OK.

Kuva 18. Poikkileikkauskestävyyden laskenta.

Kiepahduskestävyyden laskenta suoritetaan standardin EN3-1-1 kohdan 6.3.2.1 mukaan. Kiepahduskestävyyden kaavassa oleva kriittinen kimmainen kiepahduskestävyys lasketaan standardin ENV3-1-1 liitteen F mukaista mitoituskaavaa käyttäen. Liitteestä käytetään kimmoisen kiepahdusmomentin laskennassa yleistä kaavaa poikkileikkauksille, jotka ovat symmetrisiä heikomman akselin suhteen. Kuvassa 19 on esitetty kimmoista kiepahdusmomenttia varten lasketut apusuureet, ja kuvassa 20 on laskettu varsinainen kimmainen kiepahdusmomentti. Kriittisen kimmoisen kiepahdusmomentin jälkeen lasketaan kiepahduskäyrät ja kiepahduksen pienennystekijät EN3-1-1 kohtien 6.3.2.2 ja 6.3.2.3 mukaan. Niiden laskenta on esitetty kuvissa 20 ja 21.

Kiepahduskestävyys

$$h_f := h - \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} \quad \text{Laippojen leikkauspisteiden välinen etäisyys}$$

$$e_1 := e - \frac{t_{f1}}{2} \quad \text{Ylälaipan painopisteen etäisyys neutraaliakselista}$$

$$z_s := e - h \cdot \frac{t_{f1} \cdot b_1^3}{t_{f1} \cdot b_1^3 + t_{f2} \cdot b_2^3} \quad \text{Painopisteen ja vääntökeskiön välinen matka } z_s$$

Vakio poikkileikkauksiset yhden akselin suhteen symmetriset palkit, joissa laipat ovat eri suuret (ENV F.1.4)

$$I_{fc} := \begin{cases} \frac{b_1 \cdot t_{f1}^3}{12} & \text{if heikompi = "y"} \\ \frac{t_{f1} \cdot b_1^3}{12} & \text{if heikompi = "z"} \end{cases} \quad \text{Puristetun laipan jäyhyysmomentti poikkileikkauksen heikomman pääjäyhyysakselin suhteen}$$

$$I_{ft} := \begin{cases} \frac{b_2 \cdot t_{f2}^3}{12} & \text{if heikompi = "y"} \\ \frac{t_{f2} \cdot b_2^3}{12} & \text{if heikompi = "z"} \end{cases} \quad \text{Vedetyn laipan jäyhyysmomentti poikkileikkauksen heikomman pääjäyhyysakselin suhteen}$$

$$\beta_f := \frac{I_{fc}}{I_{fc} + I_{ft}}$$

$$I_w := \beta_f \cdot (1 - \beta_f) \cdot I_z \cdot h_f^2$$

$c_v := 1.2$ I-poikkileikkaukselle määriteltä vääntöneliömomentin korotuskerroin

$$I_v := \begin{cases} c_v \cdot \frac{b_1 \cdot t_{f1}^3 + b_2 \cdot t_{f2}^3 + h_w \cdot t_w^3}{3} & \text{if profiili = "hitsattu"} \\ \left[(\text{taulukko} \text{profiili}, 16) \cdot 10^4 \text{mm}^4 \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Vääntöneliömomentti}$$

$$z_j := \begin{cases} \frac{0.8 \cdot (2 \cdot \beta_f - 1) \cdot h_f}{2} & \text{if } \beta_f \geq 0.5 \\ \frac{1.0 \cdot (2 \cdot \beta_f - 1) \cdot h_f}{2} & \text{if } \beta_f < 0.5 \end{cases} \quad \begin{array}{l} z_j \text{:lle voidaan käyttää seuraavia} \\ \text{likimääräisyyksiä (ENV 1-1 F.1.4)} \end{array}$$

$$z_g := z_a - z_s \quad \text{Kuorman vaikutuspisteen etäisyys vääntökeskiöstä}$$

Kuva 19. Kiepahduskestävyyden laskenta.

Yleinen kaava poikkileikkauksille, jotka ovat symmetrisiä heikomman akselin suhteen (ENV 1-1 F.1.2)

$$M_{cr} := C_1 \cdot \frac{(\pi^2 \cdot E \cdot I_z)}{(k \cdot L)^2} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{k}{k_\omega} \right)^2 \cdot \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_y}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2 - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) \right]}$$

$M_{cr} = 16672.52 \cdot \text{kNm}$ kriittinen momentti kiepahduksessa

Vakiopoikkileikkauksisten taivutettujen sauvojen muunnettu hoikkuus

$$M_{cr} = 1.667 \times 10^7 \text{ J}$$

$$W_y := \begin{cases} W_{pl,y} & \text{if } PL \leq 2 \\ W_{el,y} & \text{if } 2 < PL < 4 \end{cases}$$

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

Tapaus 1: Muunnettu hoikkuutta vastaava pienennystekijä (EN3 1-1 6.3.2.2)

kiepahduskäyrä₁ = "b.k"

$$\alpha_{LT1} := \begin{cases} 0.21 & \text{if kiepahduskäyrä}_1 = \text{"a.k"} \\ 0.34 & \text{if kiepahduskäyrä}_1 = \text{"b.k"} \\ 0.49 & \text{if kiepahduskäyrä}_1 = \text{"c.k"} \\ 0.76 & \text{if kiepahduskäyrä}_1 = \text{"d.k"} \end{cases} \quad \text{EN3 1-1 Taulukko 6.4}$$

$$\Phi_{LT1} := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT1} \cdot (\lambda_{LT} - 0.2) + \lambda_{LT}^2 \right]$$

$$\chi_{LT1} := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{1}{\left(\Phi_{LT1} + \sqrt{\Phi_{LT1}^2 - \lambda_{LT}^2} \right)} \geq 1 \\ \frac{1}{\left(\Phi_{LT1} + \sqrt{\Phi_{LT1}^2 - \lambda_{LT}^2} \right)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Kiepahduksen pienennyskerroin } \chi_{LT} \\ \text{EN3 1-1 6.56} \end{array}$$

Tapaus 2: Muunnettu hoikkuutta vastaava pienennystekijä (EN3 1-1 6.3.2.3)

kiepahduskäyrä₂ = "c.k"

$$\alpha_{LT2} := \begin{cases} 0.34 & \text{if kiepahduskäyrä}_2 = \text{"b.k"} \\ 0.49 & \text{if kiepahduskäyrä}_2 = \text{"c.k"} \\ 0.76 & \text{if kiepahduskäyrä}_2 = \text{"d.k"} \\ 0 & \text{if kiepahduskäyrä}_2 = \text{"Ei mahdollinen"} \end{cases} \quad \text{EN3 1-1 Taulukko 6.4}$$

Kuva 20. Kiepahdukestävyyden laskenta.

$$\lambda_{LT,0} := \begin{cases} 0.2 & \text{if } mt = \text{"hitsattu"} \wedge \text{symmetria} = \text{"kaksoissymmetrinen"} \\ 0.4 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\beta := \begin{cases} 1 & \text{if } mt = \text{"hitsattu"} \wedge \text{symmetria} = \text{"kaksoissymmetrinen"} \\ 0.75 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Phi_{LT2} := \begin{cases} 0.5 \cdot [1 + \alpha_{LT2} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2] & \text{if } \alpha_{LT2} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Kiepahduksen pienennyskerroin χ_{LT}

$$\chi_{LT2} := \begin{cases} 1 & \text{if } \Phi_{LT2} > 0 \wedge \frac{1}{\left(\Phi_{LT2} + \sqrt{\Phi_{LT2}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}\right)} \geq 1 \\ \frac{1}{\lambda_{LT}^2} & \text{if } \Phi_{LT2} > 0 \wedge \frac{1}{\left(\Phi_{LT2} + \sqrt{\Phi_{LT2}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}\right)} \geq \frac{1}{\lambda_{LT}^2} \\ \frac{1}{\left(\Phi_{LT2} + \sqrt{\Phi_{LT2}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}\right)} & \text{if } \Phi_{LT2} > 0 \wedge \frac{1}{\left(\Phi_{LT2} + \sqrt{\Phi_{LT2}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}\right)} < \left(1 \wedge \frac{1}{\lambda_{LT}^2}\right) \\ 0 & \text{if } \Phi_{LT2} = 0 \end{cases}$$

$$\chi_{LT} := \begin{cases} \chi_{LT1} & \text{if } \chi_{LT1} \leq \chi_{LT2} > 0 \\ \chi_{LT1} & \text{if } \chi_{LT2} = 0 \\ \chi_{LT2} & \text{if } \chi_{LT2} \leq \chi_{LT1} \wedge \chi_{LT2} \neq 0 \end{cases}$$

Kiepahdukestävyyden mitoitusarvo

$$M_{b,Rd} := \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{b,Rd} = 320.8 \cdot \text{kNm}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{kiepahdus}} := \frac{M_y \cdot Ed}{M_{b,Rd}}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{kiepahdus}} = 48.63 \cdot \%$$

Kiepahdukestävyys OK.

Kuva 21. Kiepahdukestävyyden laskenta.

Nurjahdukestävyys lasketaan standardin EN3-1-1 kohdan 6.3.1.1 mukaan kuvas-
sa 22 esitetyllä tavalla. Nurjahdus tarkistetaan sekä y-akselin että z-akselin suh-
teen.

Nurjahdus

$$L_{cr} := K \cdot L$$

$$N_{cxy} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2}$$

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cxy}}}$$

$$\text{nurjahduskäyrä}_y = \text{"a.n"}$$

$$N_{cxz} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2}$$

$$\lambda_z := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cxz}}}$$

$$\text{nurjahduskäyrä}_z = \text{"b.n"}$$

EN3 1-1 Taulukko 6.1

$$\alpha_y := \begin{cases} 0.13 & \text{if nurjahduskäyrä}_y = \text{"a.o.n"} \\ 0.21 & \text{if nurjahduskäyrä}_y = \text{"a.n"} \\ 0.34 & \text{if nurjahduskäyrä}_y = \text{"b.n"} \\ 0.49 & \text{if nurjahduskäyrä}_y = \text{"c.n"} \\ 0.76 & \text{if nurjahduskäyrä}_y = \text{"d.n"} \end{cases}$$

$$\alpha_z := \begin{cases} 0.13 & \text{if nurjahduskäyrä}_z = \text{"a.o.n"} \\ 0.21 & \text{if nurjahduskäyrä}_z = \text{"a.n"} \\ 0.34 & \text{if nurjahduskäyrä}_z = \text{"b.n"} \\ 0.49 & \text{if nurjahduskäyrä}_z = \text{"c.n"} \\ 0.76 & \text{if nurjahduskäyrä}_z = \text{"d.n"} \end{cases}$$

$$\Phi_y := 0.5 \cdot [1 + \alpha_y \cdot (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2]$$

$$\Phi_z := 0.5 \cdot [1 + \alpha_z \cdot (\lambda_z - 0.2) + \lambda_z^2]$$

$$\chi_y := \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \lambda_y^2}}$$

$$\chi_z := \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \lambda_z^2}}$$

$$N_{by.Rd} := \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{bz.Rd} := \frac{\chi_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{nurjahdus.y}} := \frac{N_{Ed}}{N_{by.Rd}} = 20.54\%$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{nurjahdus.z}} := \frac{N_{Ed}}{N_{bz.Rd}} = 71.61\%$$

Nurjahduskestävyys y-y akselin suhteen OK.

Nurjahduskestävyys z-z akselin suhteen OK.

Kuva 22. Nurjahduskestävyyden laskenta.

Pistekuormakestävyys on laskentapohjassa laskettu standardin EN3-1-1 luvun 6 mukaan. Laskenta etenee kuvissa 23 ja 24 esitetyllä tavalla.

Pistekuormakestävyys

EN3 1-5 Luku 6

$$a_p := L$$

$$K_f := \begin{cases} 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a_p}\right)^2 & \text{if } kt = \text{"(a)"} \\ 3.5 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a_p}\right)^2 & \text{if } kt = \text{"(b)"} \\ 2 + 6 \cdot \left[\frac{(S_s + c_p)}{h_w}\right] & \text{if } 2 + 6 \cdot \left[\frac{(S_s + c_p)}{h_w}\right] \leq 6 \wedge kt = \text{"(c)"} \\ 6 & \text{if } 2 + 6 \cdot \left[\frac{(S_s + c_p)}{h_w}\right] > 6 \wedge kt = \text{"(c)"} \end{cases}$$

$$m_1 := \frac{b_1}{t_w} \quad m_{21} := 0.02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_{f1}}\right)^2$$

$$l_e := \begin{cases} \frac{K_f \cdot E \cdot t_w^2}{2 \cdot f_y \cdot h_w} & \text{if } \frac{K_f \cdot E \cdot t_w^2}{2 \cdot f_y \cdot h_w} \leq S_s + c_p \\ S_s + c_p & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$l_{y1} := \begin{cases} S_s + (t_{f1} + t_{f2}) \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_{21}}) & \text{if } kt = \text{"(a)"} \vee kt = \text{"(b)"} \\ \min \left[l_e + t_{f1} \cdot \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_{f1}}\right)^2} + m_{21} \cdot l_e + t_{f1} \cdot \sqrt{m_1 + m_{21}}, \frac{K_f \cdot E \cdot t_w^2}{2 \cdot f_y \cdot h_w}, S_s + c_p \right] & \text{if } kt = \text{"(c)"} \end{cases}$$

$$F_{cr} := 0.9 \cdot K_f \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$\lambda_{F1} := \sqrt{\frac{l_{y1} \cdot t_w \cdot f_y}{F_{cr}}}$$

$$m_{22} := 0$$

$$l_{y2} := \begin{cases} S_s + (t_{f1} + t_{f2}) \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_{22}}) & \text{if } kt = \text{"(a)"} \vee kt = \text{"(b)"} \\ \min \left[l_e + t_{f1} \cdot \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_{f1}}\right)^2} + m_{22} \cdot l_e + t_{f1} \cdot \sqrt{m_1 + m_{22}}, \frac{K_f \cdot E \cdot t_w^2}{2 \cdot f_y \cdot h_w}, S_s + c_p \right] & \text{if } kt = \text{"(c)"} \end{cases}$$

Kuva 23. Pistekuormakestävyuden laskenta.

$$\lambda_{F2} := \sqrt{\frac{l_{y2} \cdot t_w \cdot f_y}{F_{cr}}}$$

$$\lambda_F := \begin{cases} \lambda_{F1} & \text{if } \lambda_{F1} > 0.5 \\ \lambda_{F2} & \text{if } \lambda_{F1} \leq 0.5 \end{cases}$$

$$\chi_F := \begin{cases} \frac{0.5}{\lambda_F} & \text{if } \frac{0.5}{\lambda_F} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$l_y := \begin{cases} l_{y1} & \text{if } \lambda_{F1} > 0.5 \\ l_{y2} & \text{if } \lambda_{F1} \leq 0.5 \end{cases}$$

$$L_{\text{eff}} := \chi_F \cdot l_y$$

$$F_{Rd} := \frac{f_y \cdot L_{\text{eff}} \cdot t_w}{\gamma_{M1}}$$

$$F_{Rd} = 533.24 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{pistekuorma}} := \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{pistekuorma}} = 18.75\%$$

Pistekuormakestävyys OK.

Kuva. 24. Pistekuormakestävyuden laskenta.

Viimeisenä laskentapohjassa tarkistetaan profiilin kuormitusten yhteisvaikutukset. Laskennassa tarkistetaan standardin EN3-1-1 kohdan 6.3.3(4) kaksi kaavaa. Näitä varten lasketaan ensin yhteisvaikutustekijät k_{yy} , k_{zz} , k_{yz} ja k_{zy} standardin EN3-1-1 liitteen B mukaan. Näitä ja kiepahduskestävyyttä ja nurjahduskestävyyttä varten laskettuja pienennystekijöitä hyödyntämällä saadaan määritettyä koko poikkileikkauksen yhteisvaikutusten käyttöaste. Kuvassa 25 on laskettu yhteisvaikutustekijät, ja kuvassa 26 on tarkastettu EN3:ssa olevat kaksi ehtoa. Lopuksi tulostetaan ilmoitus yhteisvaikutustarkastelun onnistumisesta tai epäonnistumisesta.

Yhteisvaikutuskestävyys N+M+V

Menetelmä 2

Ekvivalentin momentin kertoimet C_{my} ja C_{mz} ovat määritetty vakiomomenttipinnalle.

$$k_{yy} := \begin{cases} \text{if } PL \leq 2 \\ \left| \begin{array}{l} 1 + (\lambda_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \quad \text{if } 1 + (\lambda_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \leq 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \\ 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \quad \text{if } 1 + (\lambda_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} > 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \end{array} \right. \\ \text{if } PL = 3 \\ \left| \begin{array}{l} 1 + 0.6 \cdot \lambda_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \quad \text{if } 1 + 0.6 \cdot \lambda_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \leq 1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \\ 1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \quad \text{if } 1 + 0.6 \cdot \lambda_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} > 1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \end{array} \right. \end{cases}$$

$$k_{zz} := \begin{cases} \text{if } PL \leq 2 \\ \left| \begin{array}{l} 1 + (2\lambda_z - 0.6) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \quad \text{if } 1 + (2\lambda_z - 0.6) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \leq 1 + 1.4 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \\ 1 + 1.4 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \quad \text{if } 1 + (2\lambda_z - 0.6) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} > 1 + 1.4 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \end{array} \right. \\ \text{if } PL = 3 \\ \left| \begin{array}{l} 1 + 0.6 \cdot \lambda_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \quad \text{if } 1 + 0.6 \cdot \lambda_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \leq 1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \\ 1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \quad \text{if } 1 + 0.6 \cdot \lambda_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} > 1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \end{array} \right. \end{cases}$$

$$k_{yz} := \begin{cases} 0.6k_{zz} & \text{if } PL \leq 2 \\ k_{zz} & \text{if } PL = 3 \end{cases}$$

$$k_{zy} := \begin{cases} 0.6k_{yy} & \text{if } PL \leq 2 \\ 0.8k_{yy} & \text{if } PL = 3 \end{cases}$$

Kuva 25. Yhteisvaikutustekijöiden laskenta yhteisvaikutusehtoja varten.

$$Ehto_1 := \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c.Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y.c.Rd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.c.Rd}}$$

$$Ehto_2 := \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{c.Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y.c.Rd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.c.Rd}}$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{yhteisvaikutus}} := \max(Ehto_1, Ehto_2)$$

$$\text{Käyttöaste}_{\text{yhteisvaikutus}} = 27.64\%$$

N+M+V yhteisvaikutuskestävyys OK.

Kuva 26. Yhteisvaikutusehtojen tarkistus.

Laskentapohjan viimeisellä sivulla esitetään vielä kootusti kaikki tarkistetut käyttöasteet ja ilmoitus tarkistuksien onnistumisista. Kuvassa 27 on esitetty laskentapohjan viimeinen sivu.

Käyttöasteet

Puristuskestävyys OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{puristus}} = 0\%$$

Taivutuskestävyys y-y akselin suhteen OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{taivutus.y}} = 27.64\%$$

Taivutuskestävyys z-z akselin suhteen OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{taivutus.z}} = 0\%$$

Poikkileikkauskestävyys OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{poikkileikkauskestävyys}} = 31.17\%$$

Leikkauskestävyys OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{leikkaus}} = 0\%$$

Leikkauslommahdusehto OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{leikkauslommahdus}} = 0\%$$

Kiepahduskestävyys OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{kiepahdus}} = 27.64\%$$

Nurjahduskestävyys y-y akselin suhteen OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{nurjahdus.y}} = 0\%$$

Nurjahduskestävyys z-z akselin suhteen OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{nurjahdus.z}} = 0\%$$

Pistekuormakestävyys OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{pistekuorma}} = 0\%$$

N+M+V yhteisvaikutuskestävyys OK.

$$\text{Käyttöaste}_{\text{yhteisvaikutus}} = 27.64\%$$

Kuva 27. Kaikki käyttöasteet listattuna laskentapohjan lopussa.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tekeminen aloitettiin puhtaasti varmennustestausmielessä, mutta työn edetessä testaajasta tulikin toteuttaja. Työn tuloksena toivottua varmennustestiraporttia ei päästy tekemään, mutta prosessia kyseisen laskentapohjan hyväksymiseksi autettiin huomattavasti, ja laskentapohjan virheitä saatiin karsittua. Lisäksi saatiin tuotettua aikaisempaa käyttäjäystävällisempi ja kattavampi laskentapohja.

Laskentapohjan korjattu versio ei ole vielä sellaisenaan käyttökelpoinen ennen kuin se on perusteellisesti testattu hankkeen testausohjeen mukaisesti. Jatkossa suunnittelutoimisto Vahanen jatkaa kehitystä pohjan parissa tämän opinnäytetyön pohjalta ja varmennustestaus suoritetaan loppuun Vaasan ammattikorkeakoulussa, kunnes laskentapohjasta saadaan virheetön ja kattava, jollaiseen tässä hankkeessa pyritään.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Eurokoodi helpdesk - Historiaa [online]. [viitattu 8.4.2010]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:<http://www.eurocodes.fi/Historiaa/contentstausta.htm/>>.
- /2/ Ervamaa, Juhani; Mankamo, Tuomas; Suokas, Jouko ja Insinööritieto Oy 1979. Luotettavuustekniikka. Helsinki. Insinööritieto Oy.
- /3/ Kantavia rakenteita koskevien rakentamismääräysten uudistaminen jatkuu. Ympäristöministeriön tiedoite. [online]. Julkaistu 29.1.2010 [viitattu 12.4.2010]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=350390&lan=fi&clan=fi>>
- /4/ Koponen, Pekka. SKOL Eurocode-laskentapohjien laadintahanke. 0 Hankkeen yleisohje. Dokumentin versio 1.2. Päiväys 2.9.2008.
- /5/ Koponen, Pekka. SKOL Eurocode-laskentapohjien laadintahanke, 4 Testausohje. Dokumentin versio 1.1. Päiväys 17.-18.12.2008.
- /6/ SFS - Eurokoodit [online]. [viitattu 12.4.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.sfs.fi/julkaisut/eurokoodit/>>.
- /7/ SKOL Eurocode-laskentapohjien laadintahanke. Seminaari esitys [online]. Julkaistu 2009 [viitattu 12.4.2010]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:<http://www.eurocodes.fi/Koulutus%20ja%20tapahtumat/2009%20seminaari/10%20Tinkanen.pdf>>
- /8/ Yhteenveto eurokoodien tilanteesta suomessa [online]. Päivitetty 5.3.2010 [viitattu 15.4.2010]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:<http://www.eurocodes.fi/Eurokoodien%20tilanne%20nyt/TilanneSuomi100305.pdf>>.
- /9/ Ylinen, Arvo 1970. Kimmo- ja lujuusoppi 2. 2 p. Porvoo. WS.