



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Liaunų atramų įtaka surenkamų kiaurymėtu plokščių stiprumui

Baigiamasis magistro studijų projektas

Lukas Antanavičius
Projekto autorius

lekt. dr. Tadas Zingaila
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Liaunų atramų įtaka surenkamų kiaurymėtųjų plokščių stiprumui

Baigiamasis magistro studijų projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Lukas Antanavičius
Projekto autorius

lekt. dr. Tadas Zingaila
Vadovas

doc. dr. Mindaugas Augonis
Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lukas Antanavičius

Liaunų atramų įtaka surenkamų kiaurymėtu plokščių stiprumui

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Luko Antanavičiaus, baigiamasis projektas tema „Liaunų atramų įtaka surenkamų kiaurymėtu plokščių stiprumui“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Antanavičius Lukas. Liaunų atramų įtaka surenkamų kiaurymėtu plokščių stiprumui. Magistro baigiamasis projektas / vadovas /lekt. dr. Tadas Zingaila; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: kiaurymėtos perdangos plokštės; liauna atrama; šlyties įtempiai.

Kaunas, 2020. 110 p.

Santrauka

Baigiamajame Magistro darbe nagrinėjamas kiaurymėtu perdangos plokščių stiprumas atraminėje dalyje. Kokią įtaką plokštėms turi konstrukcija ant kurios jos remiamos, koks stiprumas kai konstrukcija yra standi (pvz. siena) ir nesideformuojanti arba mažai besideformuojanti ir kai atrama yra liauna ir besideformuojanti (pvz. sija). Šio darbo pagrindinis tikslas išanalizuoti Lietuvos rinkoje naudojamas kiaurymėtas perdangos plokštes ir naudojamus populiariausius jų skerspjūvius įvertinti jų laikomąją galią atraminėje dalyje ir įstrižajame pjūvyje. Pagrindinis darbo tyrimo objektas: plokštės atremtos ant liaunos atramos. Šioje situacijoje nagrinėjamas šlyties srautas atsirandantis išilgai sijos. Šis srautas gali sukelti įtempius, kurie viršija betono tempiamuosius įtempius ir tai gali sukelti didesnes problemas, tokias kaip plyšių, įtrūkimų atsiradimą elementuose. Šiame darbe buvo atlikta literatūros analizė, kurioje pristatoma problema, jau atlikti tyrimai ir iš jų gauti rezultatai, taip pat kaip kitose Europos šalyse vertinama ši problema ir kokie jos sprendimo būdai naudojami. Skaičiavimų skyrius susideda iš dviejų dalių. Pirmoje dalyje buvo nagrinėjami Lietuvoje gaminamų plokščių skerspjūviai, baigtinių elementų programoje pritaikant skirtingas skaičiuojamąsias schemas, ir stebima, kaip vyksta įtempių pasiskirstymas, kur jie koncentruojasi skerspjūvyje, kokią įtaką turi kiaurymės forma. Antroje skaičiavimų dalyje buvo analizuojamos realios situacijos ir taikant suomių standarto „Code card No.18“ metodiką nustatinėjama, kada atsiradę šlyties įtempiai gali sukelti kritinę jėgą, kuri betone sukels įtempius didesnius už betono tempimo įtempius. Abiejose dalyse buvo lyginamos dviejų skirtingų gamintojų kiaurymėtos perdangos plokštės.

Antanavičius Lukas. Influence of Flexible Supports on Resistance of Precast Hollow Core Slabs. Master's Final Degree Project / supervisor lekt. PhD Tadas Zingaila; Civil engineering and architecture faculty, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering, Civil Engineering (E05).

Keywords: hollow core slabs; flexible supports; non-rigid supports; shear flow.

Kaunas, 2020. 110 pages.

Summary

These Master's theses called „Influence of Flexible Supports on Resistance of Precast Hollow Core Slabs“ analyse a resistance of precast hollow core slabs on support part. The main idea of this project is to show how capacity of diagonal section is changing when the support is different. For example, when support is rigid like walls and when support is flexible, like beams that gets deflection after loading. The deflection creates a shear flow in longitudinal direction of the beam. The shear flow can cause a hollow core slabs web failure because web of slab is thin concrete part and bigger stress can be intolerant. In this thesis, a literature analysis was carried out presenting the problem, the research already done, and the results obtained from it, as well as how the problem is evaluated in other European countries and what methods are used to solve it. The calculation section consists of two parts. The first part deals with cross-sections of slabs produced in Lithuania using finite element software using different numerical schemes and observes stress distribution, where they are concentrated in cross-section, what influence shape of the hole has. In the second part of the calculations, real-life situations are analysed and the Finnish standard Code card No.18 is used to determine when the shear stresses that occur can cause a critical force that will cause stresses greater than the tensile stresses in the concrete. Both parts compared hollow core slabs from two different manufacturers.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
1. Įvadas.....	9
1.1. Temos aktualumas	9
1.2. Darbo tikslas ir uždaviniai.....	9
1.3. Mokslinis naujumas.....	10
1.4. Praktinė vertė.....	10
2. Literatūros analizė ir metodologija	11
2.1. Bendra literatūros apžvalga	11
2.2. Projektavimo metodika pagal Pajari- Leskelä.....	14
2.3. Projektavimo metodika pagal Roggendrof.....	18
2.4. Literatūros analizės ir metodologijos išvada	19
2.5. Problemos sprendimo būdai	20
3. Skaičiavimai	22
3.1. Pirma dalis	22
3.2. Antra dalis	29
Išvados	52
Literatūros sąrašas	53
Priedai.....	54
1 priedas. Plokščių skerspjūvių principinių įtempių diagramos	54
2 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (1 situacija).	81
3 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (2 situacija)	85
4 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (3 situacija)	89
5 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (4 situacija)	93
6 priedas. Kiaurymėtos plokštės h=400 skaičiavimo ataskaita. (1 gamintojas).....	97
7 priedas. Kiaurymėtos plokštės h=400 skaičiavimo ataskaita. (2 gamintojas).....	104

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Gamintojo 1 svarbiausiųjų įtempių rezultatų suvestinė.....	23
2 lentelė. Gamintojo 2 svarbiausiųjų įtempių rezultatų suvestinė.....	24
3 lentelė. Naudojamos apkrovos. (1 situacija)	30
4 lentelė. Metalinės sijos duomenys.....	31
5 lentelė. Kiaurymėtų plokštės duomenys.....	32
6 lentelė. <i>b_{eff}</i> nustatymas.	36
7 lentelė. Kiaurymėtų plokščių HCS 400 charakteristikos ir rezultatai.....	40
8 lentelė. Naudojamos apkrovos (2 situacija)	42
9 lentelė. Metalinės HSQ sijos duomenys. (2 situacija).	42
10 lentelė. Kiaurymėtų plokščių HCS 200 charakteristikos ir rezultatai.....	42
11 lentelė. Naudojamos apkrovos (3 situacija)	44
12 lentelė. Metalinės HSQ sijos duomenys. (3 situacija).	45
13 lentelė. Kiaurymėtų plokščių HCS 270 charakteristikos ir rezultatai.....	45
14 lentelė. Naudojamos apkrovos (4 situacija)	47
15 lentelė. Metalinės HSQ sijos duomenys. (4 situacija).	48
16 lentelė. Kiaurymėtų plokščių HCS 320 charakteristikos ir rezultatai.....	48
17 lentelė. Kiaurymėtų plokščių įstrižojo pjūvio laikomoji galia.....	50
18 lentelė. Koeficientas <i>β_f</i>	51
19 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant pirmąją skaičiuojamąją schemą.....	54
20 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant antrąją skaičiuojamąją schemą.....	57
21 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant trečiąją skaičiuojamąją schemą.....	60
22 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant pirmąją skaičiuojamąją schemą (viena užpildyta kiauryme).....	63
23 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant antrąją skaičiuojamąją schemą (viena užpildyta kiauryme).....	66
24 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant trečiąją skaičiuojamąją schemą (viena užpildyta kiauryme).....	69
25 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant pirmąją skaičiuojamąją schemą (dviem užpildytomis kiaurymėmis).....	72
26 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant antrąją skaičiuojamąją schemą (dviem užpildytomis kiaurymėmis).....	75
27 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant trečiąją skaičiuojamąją schemą (dviem užpildytomis kiaurymėmis).....	78

Paveikslų sąrašas

1 pav. Gelžbetoninės kiaurymėtos perdangos plokštės skerspjūvis.....	9
2 pav. Gelžbetoninės kiaurymėtos perdangos plokštės suirimas ties atrama dėl šlyties įtempių. (M.Pajari, 2006).....	10
3 pav. E. Jonssono kiaurymėtą perdangos plokščių šlyties įtempių nustatymo tyrimai. (Jonsson,1980)	11
4 pav. Jutikliai, kuriais stebimos plokštės skerspjūvio deformacijos. (Pajari,2016).....	12
5 pav. Paruošto bandymo modelis. (Pajari, 2016)	12
6 pav. Kiaurymėtų perdangos plokščių skerspjūvių įvairovė. (El-Arab, 2017).....	13
7 pav. Bendras surenkamų konstrukcijų darbas ir šlyties atsiradimai kiaurymėtose perdangos plokštėse. (Derkowski,Surma, 2013).....	13
8 pav. Išilginių plyšių atsiradimas plokštėje dėl plokštės atramos patekimo į tempimo zoną.....	14
9 pav. Šlyties deformacijų lokalizacija perdangos konstrukcijoje. (Pajari, 2010).....	14
10 pav. Įtempiai kiaurymėtoje plokštėje atremtoje ant nesideformuojančio atramos. (Composite structure, 2017).....	15
11 pav. Kompozitinės sijos modelis. (Composite structure, 2017).....	15
12 pav. Pagrindiniai įtempiai kiaurymėtosios plokštės sienutėje. (Composite structure, 2017).	16
13 pav. Detalė kairėje:su nearmuotu išlyginamuoju sluoksniu; dešinėje-armuotas išlyginamas sluoksnis, sija su plieninėmis jungėmis.	17
14 pav. Santvaros modelis kiaurymėtosios perdangos plokštės skerspjūviui. (Surma, 2013).....	18
15 pav. Įrašų susidarymas labiausiai nutolusiame plokštės tinklelio elemente. (Surma, 2013)	19
16 pav. Kiaurymėta plokštė pagaminta iš betono su polypropileno fibromis.....	20
17 pav. Anglies pluošto polimerinės juostos panaudojimas konstrukcijų stiprinimui.....	20
18 pav. Plokštės atraminės dalies kiaurymių užbetonavimas. (El-Arab, 2017).....	21
19 pav. Skaičiuojamosios schemas.	22
20 pav. Situacija 1. (HSQ metalinė sija 10m. ir HCS 400 kiaurymėta plokštė 12m.).....	29
21 pav. Nagrinėjama detalė.....	30
22 pav. Sijos skaičiuojamoji schema.	30
23 pav Plokštės skaičiuojamoji schema.	30
24 pav Metalinės HSQ tipo sijos skerspjūvis.....	31
25 pav Plokštės skerspjūvis.....	31
26 pav Redukuotas plokštės skerspjūvis.	31
27 pav Redukuotas tėjinis plokštės skerspjūvis.	33
28 pav Kompozitinis skerspjūvis.....	36
29 pav Konvertuotas kompozitinis skerspjūvis į metalinį.	37
30 pav Dydis <i>hct</i>	38
31 pav. Situacija 2. (HSQ metalinė sija 5m. ir HCS 200 kiaurymėta plokštė 6m.).....	41
32 pav Metalinės HSQ tipo sijos skerspjūvis. (2 situacija).....	42
33 pav. Situacija 3. (HSQ metalinė sija 6m. ir HCS 270 kiaurymėta plokštė 8m.).....	44
34 pav Metalinės HSQ tipo sijos skerspjūvis. (3 situacija).....	45
35 pav. Situacija 4. (HSQ metalinė sija 8m. ir HCS 320 kiaurymėta plokštė 10m.).....	47
36 pav Metalinės HSQ tipo sijos skerspjūvis. (4 situacija).....	48

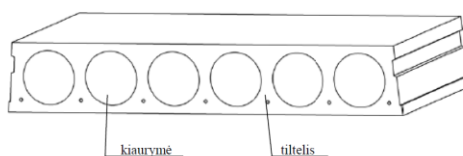
1. Įvadas

1.1. Temos aktualumas

Šio darbo tema – kiaurymėtųjų plokščių atremtų ant liaunų atramų projektavimas. Surenkamų perdangos plokščių naudojimas vis labiau populiarėja dėl savo paprastos ir greitos gamybos bei montavimo technologijos. Panaudojant surenkamas plokštes statybvietėje, galima sutaupyti daugiau laiko, lyginant su kitomis perdangų gaminimo technologijomis, pavyzdžiui monolitinėmis perdangomis. Kuomet daroma monolitinė perdanga, jai sunaudojama žymiai daugiau laiko ir medžiagų, išauga statybvietėje dirbančių darbininkų kiekis ir kaštai dėl ilgesnio technologinio proceso ir atsiradusių prastovų. Tačiau pagrindinis veiksnys, kuris lemia pasirinkimą yra kaina. Dažniausiai kaina turi didžiausią įtaką ne tik Lietuvos bet ir užsienio rinkoje, renkamasi sprendimai, kurie yra pigiausi. Lietuvos rinkoje monolitinės perdangos dažnai būna pigesnės, tačiau įvertinus papildomus darbus, tokius kaip klojinių pastatymas ir nuėmimas, kainų skirtumas tampa ne toks didelis, todėl panaudojimas surenkamų plokščių gali būti ir nežymiai brangiau, tačiau laiko sąnaudos gali būti ženkliai sutaupytos.

Kitas didelis kiaurymėtųjų plokščių privalumas tai kad jomis gali būti perdengiami dideli tarpatramiai, tai ypatingai aktualu gamybinės ir pramoninės paskirties pastatuose, kur reikalingi dideli plotai įvairioms gamybos technologijos linijoms ar kitiems procesams .

Problema ta, kad nors ir surenkamų perdangos plokščių populiarumas didelis ir jų panaudojimas statyboje didėja, tačiau dar nėra ištirti visi mazgai ir dar nėra išsiaiškinti, kaip konstrukcijos elgiasi eksploataavimo metu. Atlikti eksperimentai ir tyrimai parodė, jog atramos tipas gali turėti įtakos kiaurymėtųjų plokščių stiprumui. Suprojektavus kiaurymėtą perdangos plokštę, jog ji remiama ant standžios atramos ne visada galime gauti pakankamą laikomąją galią, kai ji remiama ant liaunos atramos. Kaip liaunas atramas galima būtų priimti visas sijas, rėmsijas, kurių aukštis esant dideliems tarpatramiams gali būti mažesnis nei perdangos plokštės skerspjūvio aukštis. Dėl veikiamų apkrovų konstrukciniai elementai įlinksta. Dažniausiai, kuomet perdangos plokštės atremiamos ant liaunų atramų, atrėmimo mazgas yra monolitinamas panaudojant ir papildomus armatūros strypus, taip suformuojamas standus diskas. Tokiu atveju gauname, jog plokščių atrėmime elementai įtvirtinti standžiai. Kuomet konstrukcijos įlinksta standžiame mazge, plokštės sienutėse atsiranda šlyties įtempiai, kurie dėl iš dalies plono plokštės narmuoto betono tiltelio gali sukelti suirimus įstrižajame pjūvyje.



1 pav. Gelžbetoninės kiaurymėtos perdangos plokštės skerspjūvis

Tiek EN tiek ir Lietuvos statybos techniniuose reglamentuose nėra įtraukta jokių skaičiavimų patikrinti ar perdangos plokštės atsparumas šlyties įtempiams yra pakankamas. Kadangi surenkamos konstrukcijos vis tampa populiarnės, gamybos procesuose sparčiai tobulinami elementų gamybos metodai, todėl ir projektavimo dalyje turi būti ieškoma didesnių galimybių nustatant įvairius galimus suirimus ir deformacijas, ir kaip užtikrinti konstrukcijų ilgaamžiškumą, šiuo atveju, nustatyti šlyties įtempius ir kaip juos įvertinti, kada jie būtų nepavojingi, o kada jau būtų pasiekti įtempiai, kurie sukeltų deformacijas, plyšių atsiradimą ar suirimus.

1.2. Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas - išanalizuoti pasirinktų konkrečių gamintojų kiaurymėtųjų perdangos plokščių stiprumą šlyties įtempiams; patikrinti, kokią įtaką turi kiaurymių formos įtempimų pasiskirstymui plokštės

skerspjuvyje. Taip pat, patikrinti, nuo ko priklauso šlyties įtempiai plokštėse, kai jų aukštis skirtingas. Siekiant išanalizuoti šią konstrukciją, reikia atlikti šiuos uždavinius:

1. Analizuojant literatūros šaltinius pritaikyti tinkamą skaičiuojamąjį modelį šiam uždaviniui.
2. Sumodeliuoti įvairių parametų skaičiuojamųjų modelių (skirtingi plokščių aukščiai, ilgiai) ir išanalizuoti jų įtempius atraminėje dalyje.
3. Gautus rezultatus išanalizuoti taikant mokslinių tyrimų metodologijos principus bei metodus, ir tiksliai nustatyti, kada plokštėje atsiranda kritiniai įtempiai.
4. Pateikti rekomendacijas, kad šalia tų žingsnių, kurie dabar atliekami projektuojant kiaurymėtas plokštes, būtų atliekamas patikrinimas, kokią įtaką kiaurymėtai plokštei turės šios įlinkis ir dėl jo sukeliamas šlyties srautas.

1.3. Mokslinis naujumas

Ankstesni mokslininkų tyrimai parodė, kad plokštės gali suirti nuo šlyties įtempių, kurie atsiranda dėl atramos įlinkio. Pagal analizuotą literatūrą matoma, kad mokslininkai yra analizavę panašias sistemas, dauguma analizuotų modelių yra vieno gamintojo kiaurymėtos plokštės, todėl negalima teigti, kad atlikti bandymai yra iki galo išanalizuoti ir nėra nustatytos bendros skaičiavimo sistemos, kuri būtų įtraukta į EN normas. Taigi, svarbu dar papildomai panagrinėti šlyties įtempius, kaip ir kada jie atsiranda kiaurymėtų plokščių atraminėje dalyje.

1.4. Praktinė vertė

Šio darbo praktinė vertė yra galimybė apskaičiuoti perdangos plokštės elementus, juos vertinti ne tik jų pagrindinėje veikimo plokštumoje, bet ir iš plokštumos. Kadangi nenaudojant baigtinių elementų programų šie mazgai apskaičiuojami sudėtingais būdais, o naudojamos programos yra brangios, todėl reikalinga išvada, ar skaičiavimo algoritmai, kurie galėtų būti įtraukti į standartus pagal kuriuos būtų apibrėžiama ši situacija ir jos sprendimo būdai. Taip pat veikiančiu skaičiavimo algoritmu būtų galima pasitikrinti suprojektuotą mazgą. Kadangi projektavimas yra atsakinga specialybė, tai būtų galimybė apsidrausti, jeigu kokiame projekte būtų dėl šlyties įtempių atsirastų įtrūkimų, plyšių ar plokštė atramoje suirtų. Turint atliktus skaičiavimus būtų galima apsidrausti projektuotojams ir problemų ieškoti kitose vietose.



2 pav. Gelžbetoninės kiaurymėtos perdangos plokštės suirimas ties atrama dėl šlyties įtempių. (M.Pajari, 2006)

2. Literatūros analizė ir metodologija

2.1. Bendra literatūros apžvalga

Vieni pirmųjų dar 1980m. atradę šlyties įtempių įtaką perdangų plokštėms buvo Norvegijos mokslininkai. Mokslininkas E. Jonssonas atliko dar iki tol nedarytus tyrimus, kuriais nustatė šlyties įtempių atsiradimą kiaurymėtose perdangos plokštėse. Mokslininkas nustatė koks gali būti mažiausias skaičiuotinis šlyties atsparumas, be skersinio armavimo, kuris yra:

$$V_d = f_v(bd + 75A_s) \quad (1)$$

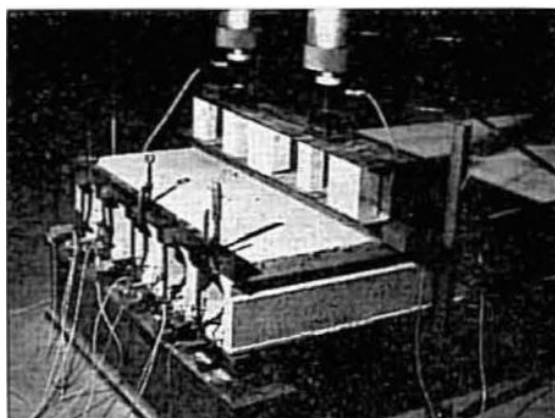
čia:

f_v - skaičiuotiniai šlyties įtempiai (N/mm²);

b - plotis (mm);

A_s - visas pagrindinės, darbinės armatūros skerspjūvio plotas (mm²);

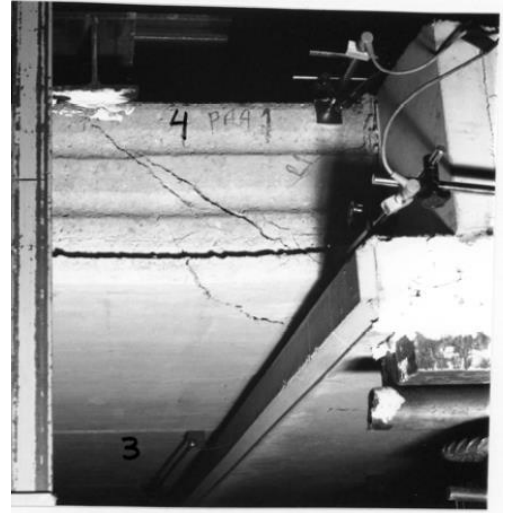
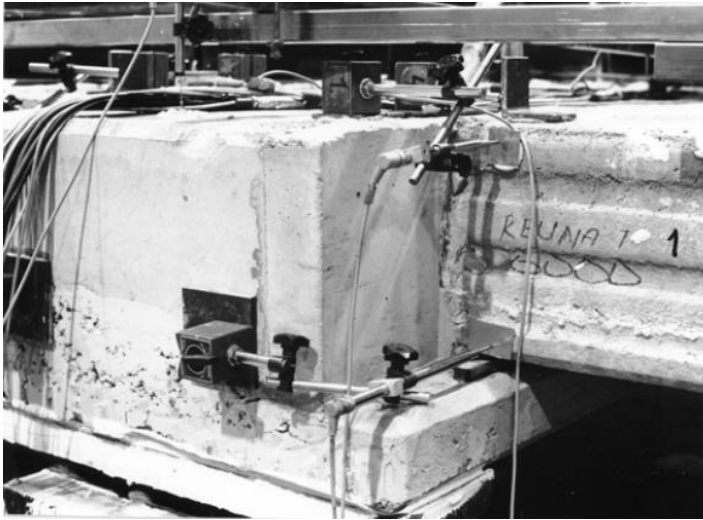
Tačiau, atlikus bandymus, buvo gauta didelis duomenų išsibarstymas ir sklaida. Buvo nuspręsta, jog gamybos metu ties armatūra būna skirtingi plokštės įtempiai, todėl nustatyti tikslų įtempių būvį skerspjūvyje buvo sudėtinga. Nepaisant to, atliktų tyrimų skaičius buvo pakankamas paruošti rekomendacijas, kurios leistų saugiai įvertinti šlyties įtempius. Tačiau nustatytas šlyties įtempių atsparumas nėra vienodas visiems kiaurymėtų perdangų plokščių tipams. Kaip tik dėl šios priežasties reikalingi tikslesni įtempių įvertinimo principai.



3 pav. E. Jonssonio kiaurymėtų perdangos plokščių šlyties įtempių nustatymo tyrimai. (Jonsson,1980)

Kitas mokslininkas, kuris vykdė detalesnius šios temos tyrimus yra suomis M. Pajari. Šis mokslininkas daugiausiai įdėjęs darbo į plokščių ir sijos mazgo tyrinėjimą ir šlyties įtempių nustatymą standžiame mazge. Šis mokslininkas savo tyrimus pradėjo dar 1990m. Buvo sukurtas realus sijos ir perdangų plokščių modelis, kuriame buvo sukurtas standus diskas įtvirtinime. Pasinaudojant įvairiais jutikliais pagal buvo stebima bendra konstrukcijos elgsena:

- stebimas sijos (liaunos atramos) įlinkis;
- stebimos deformacijos plokštės skerspjūvyje;
- stebimi kiaurymėtų plokščių įlinkiai;



4 pav. Jutikliai, kuriais stebimos plokštės skerspjūvio deformacijos. (Pajari, 2016)

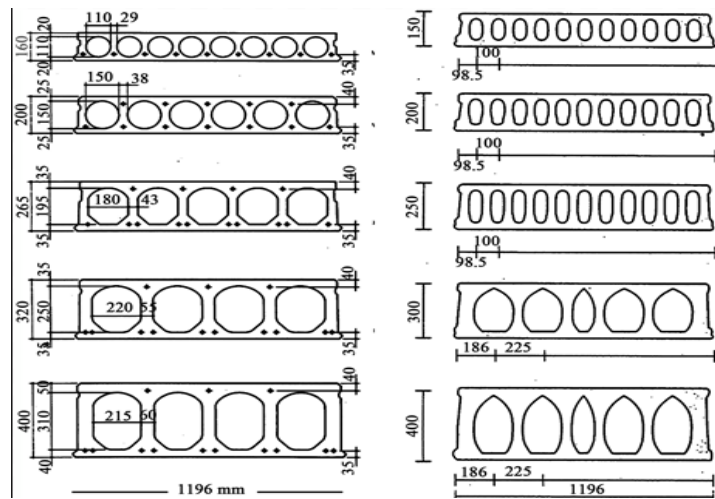
Paruošus visą tyrimo modelį, apkrovus sistemą, buvo stebima jos elgsena eksploataavimo metu.



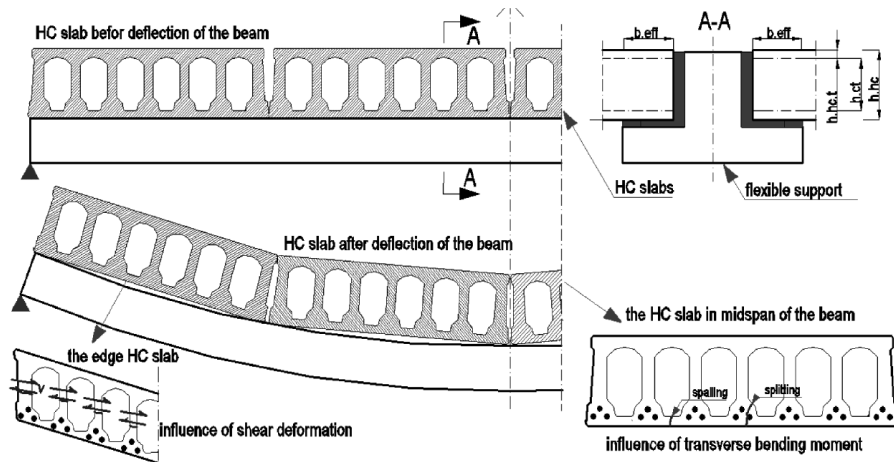
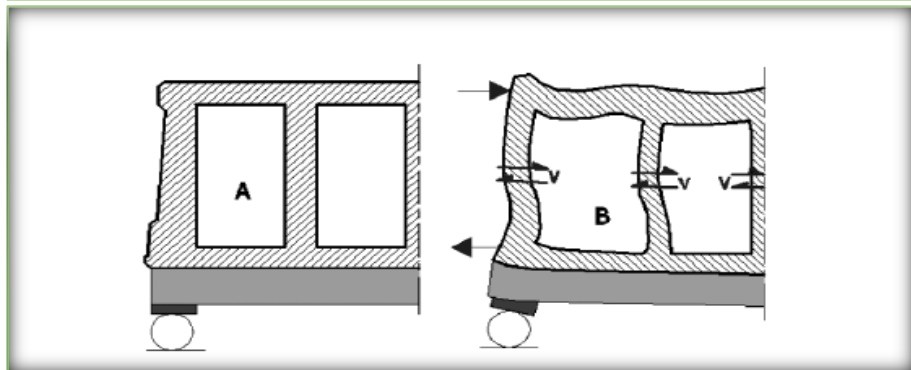
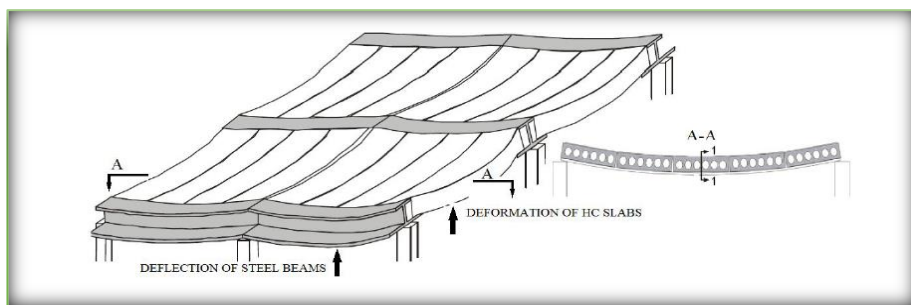
5 pav. Paruošto bandymo modelis. (Pajari, 2016)

Tokiu principu mokslininkas M. Pajari dirbo apie 16 metų. Bandė įvairius apkrovimo būdus, naudojo skirtingo aukščio perdangos plokštes, keitė sijų skerspjūvius. Tačiau bandymams buvo naudojamos to pačio gamintojo kiaurymėtos plokštės. Taigi nors ir bandymams buvo skirta darbo ir laiko tačiau vieningo būdo kaip sukurti skaičiavimo algoritmą, kuris tiktų įvairių tipų plokštėms nepavyko.

Šis mokslininkas yra padaręs didelę pažangą šios problemos sprendimo būdui rasti. Iki tikslaus problemos sprendimo reiktų atlikti bandymus su skirtingomis liaunomis atramomis, taip pat ir su skirtingais perdangos plokščių tipais, patikrinti, kokia būna sistemos elgsena, kai plokštės kiaurymės būna apvalios, ovalios ir kitų formų.



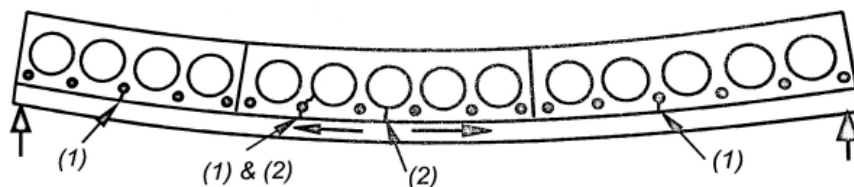
6 pav. Kiaurymėtų perdangos plokščių skerspjūvių įvairovė. (El-Arab, 2017)



7 pav. Bendras surenkamų konstrukcijų darbas ir šlyties atsiradimai kiaurymėtose perdangos plokštėse. (Derkowski, Surma, 2013)

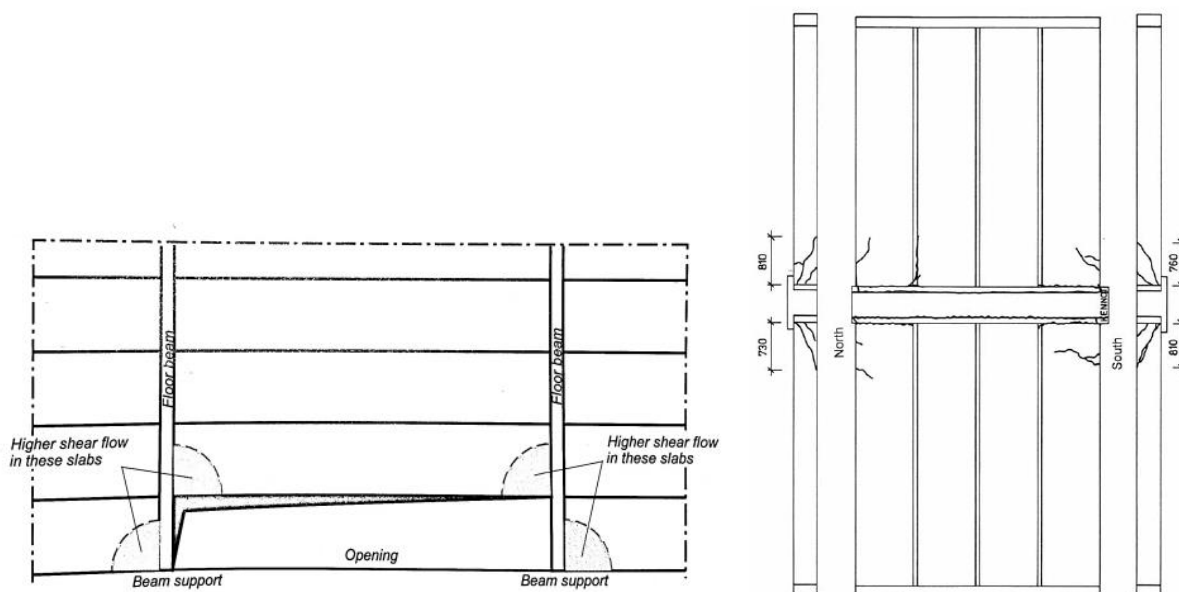
Kai, plokštės atremtos ant nestandžios atramos gali kilti šios problemos:

1. atsirasti išilginiai plyšiai ties plokštės lynais;
2. jungčių įtrūkimai;
3. skerspjūvio šlyties deformacijos;
4. plokščių prasislinkimas išilgai sijos;



8 pav. Išilginių plyšių atsiradimas plokštėje dėl plokštės atramos patekimo į tempimo zoną.

Jeigu įtempiai viršytų charakteristinę betono tempiamojo stiprio galią pirmiausia plyšiai ar įtrūkimai, kaip buvo nustatyta eksperimentų metu, atsirastų ties arčiau sijos atramos esančioje plokštėje.



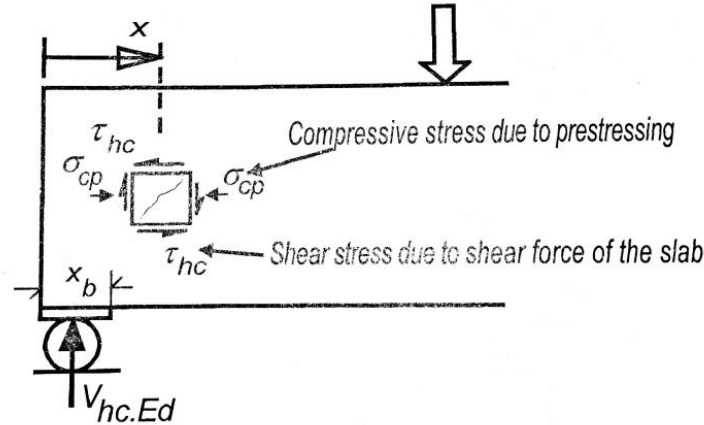
9 pav. Šlyties deformacijų lokalizacija perdangos konstrukcijoje. (Pajari, 2010).

2.2. Projektavimo metodika pagal Pajari- Leskelä

Atlikus perdangų bandymus nustatyta, jog atramų tipas – lankstus ar standus – turi įtakos kiaurymėjų tuščiavidurių elementų vertikaliajam šlyties atsparumui. Nustatyta jog kiaurymėtos plokštės atremtos ant sienų turi didžiausią šlyties atsparumą, bet dažnu atveju plokštės remiamos ant sijų ir dėl jose atsiradusių įlinkių plokštės šlyties atsparumas sumažėja. Šis atsparumo sumažėjimas atsiranda dėl to jog sijai įlinkus kiaurymėtu elementų sienutėje atsiranda papildomi įtempiai. Kadangi dažniausiai kiaurymėjų plokščių mazgas būna užmonolitinamas (užstandinamas)- tai sukelia papildomą kontaktą su sija ir įlinkimo metu sukeliama papildomi šlyties įtempiai atraminiame mazge, kurie yra pavojingi kiaurymėjų plokščių sienutei. Dėl šių įtempių atsiradimo kiaurymėtu plokščių sienutė gali greitai suirti dėl to, kad sienutė yra gana plona (apie 55-60 mm), neartuota elemento dalis dėl to viršijus betono tempimo įtempiams galimas staigus sienutės suirimas.

Kiaurymėtos plokštės, kurios yra atremtos ant sienos, šlyties atsparumas yra didesnis dėl to kad ją veikia du pagrindiniai įtempių komponentai σ_{cp} ir τ_{hc} :

- σ_{cp} – įtempiai atsirandantys nuo išankstinio plokštės lynų įtempimo (plokštės apgniuždymo);
- τ_{hc} - šlyties įtempiai dėl plokštę veikiančios skersinės jėgos;

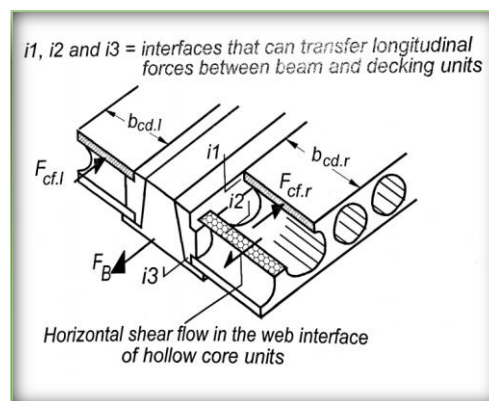


10 pav. Įtempiai kiaurymėtoje plokštėje atremtoje ant nesideformuojančio atramos. (Composite structure, 2017)

Taigi, pagrindiniai plokščių projektavimo veiksniai: atsparumas lenkimui ir vertikalios (skersinės) jėgos atsparumas. Lenkimo momentas turi didelės įtakos ilgoms plokštėms, o trumpoms plokštėms kritiniu veiksniu gali tapti skersinės jėgos veikimas atramoje. Tačiau, pradėjus labiau tyrinėti visos perdangos konstrukcijos veikimo principą nustatyta, jog ne tik lenkimo momentas ir skersinių jėgų veikimas gali turėti įtakos kiaurymėtųjų plokščių stiprumui.

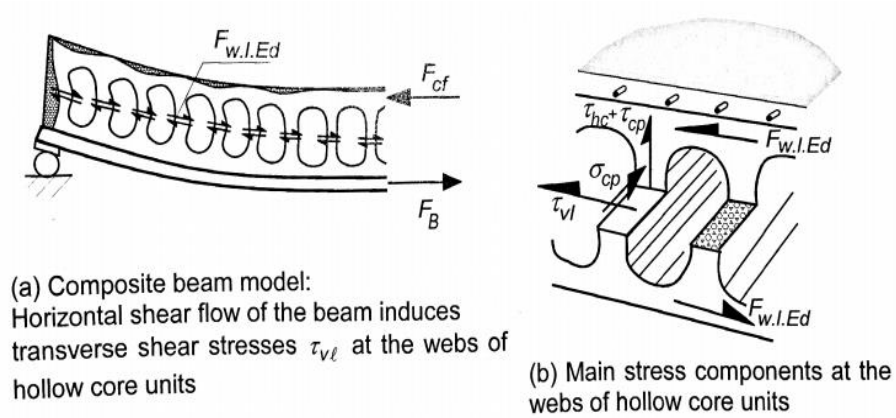
Atsiradus išilginei jėgai tarp kiaurymėtosios plokštės ir liaunos atramos (sijos), dėl jos įlinkio, įtempiai pasiskirsto trijuose paviršiuose.

- i1- užmonolitinto ruožo kontaktas su viršutine kiaurymėtosios plokštės dalimi
- i2 -plokštės sienutės paviršius
- i3-užmonolitinto ruožo kontaktas su apatine kiaurymėtosios plokštės dalimi



11 pav. Kompozitinės sijos modelis. (Composite structure, 2017).

Pavojingiausias paviršius yra plokštės sienutė, ir suirimas pirmiausiai atsiras joje, nes šlyties įtempiai sukels plyšių atsiradimą sienutėje, o tai gali lemti staigų suirimą.



12 pav. Pagrindiniai įtempiai kiaurymėtosios plokštės sienutėje. (Composite structure, 2017).

Šlyties įtempiai gali būti išreikšti kaip principiniai tempimo įtempiai:

$$\sigma_1 \approx \frac{\sigma_{cp}}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_{cp}^2}{4} + (\tau_{hc} + \tau_{cp})^2 + \tau_{vl}^2} \leq f_{ctd,hc} \quad (2)$$

kur:

τ_{hc} – šlyties įtempiai nuo atraminių reakcijų;

τ_{vl} – šlyties įtempiai atsiradę sienutėje nuo išilginės jėgos atsiradusios dėl įlinkio;

σ_{cp} ir τ_{cp} – įtempiai atsirandantys dėl plokštės lynų atleidimo;

$f_{ctd,hc}$ – skaičiuotinis betono tempiamasis stipris;

Kritinė jėga veikianti plokštės galuos gali būti apskaičiuota:

$$F_{fail} = \left(\frac{\tau_{hc} + \tau_{cp}}{f_{ctd,hc}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{vl}}{f_{ctd,hc}} \right)^2 - \frac{|\sigma_{cp}|}{f_{ctd,hc}} \leq 1 \quad (3)$$

Pirmas ir paskutinis formulės komponentas naudojamas rasti kritinę jėgą visų tipų plokštėms, o vidurinis- tik plokštėms atremtoms ant sijų.

Įtempių τ_{vl} išraiška:

$$\tau_{vl} = \frac{1,5 \cdot F_{W,l.Ed}}{A_{we.1}} \quad (4)$$

$$\frac{F_{W,l.Ed}}{A_{we.1}} = \frac{v_{lw} \cdot b_{hc}}{(h_{hc} - h_{ct}) \sum b_{w,i}} = \frac{v_{lw}}{a_{vl}} \quad (5)$$

kur:

$F_{W,l.Ed}$ – skersinė jėga veikianti skerspjūvį;

v_{lw} – šlyties srautas veikiantis plokštės galuose;

b_{hc} -plokštės plotis;

h_{hc} -plokštės aukštis;

$\sum b_{w,i}$ - suminis sienučių plotis;

h_{ct} - kiaurymės aukštis;

a_{vl} - skerspjūvio parametras įvertinantis kiaurymėtosios plokštės geometriją (įvertina skerspjūvio jautrumą horizontaliems šlyties įtempiams. Pagal Suomijos standartą (Code Card No 18);

Šlyties srautas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$v_{lw} = \frac{(EA)_{cf.d} e_f V_{B.Ed}}{(EI)_{com.d}} \quad (6)$$

čia:

$(EA)_{cf.d}$ - kompozitinio skerspjūvio gniuždomųjų flanšų standumas

e_f - atstumas nuo neutraliosios skerspjūvio ašies iki gniuždomųjų juostų vidurio.

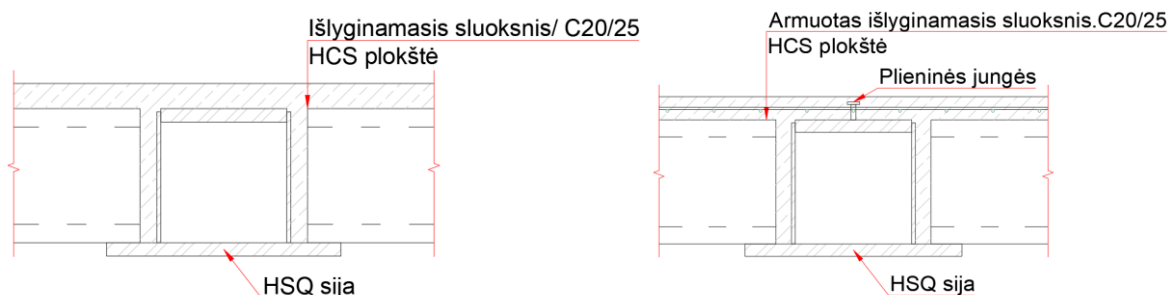
$V_{B.Ed}$ -sijos skersinė jėga nuo apkrovų be savojo konstrukcijų svorio. (Jeigu konstrukcijos ramstomos priimti visą pilną apkrovą)

$(EI)_{com.d}$ - viso kompozitinio skerspjūvio standumas.

Ši šlyties srauto formulė naudojama, jeigu išlyginamojo betono sluoksnio ant konstrukcijų nėra arba jis atskirtas termoizoliaciniu sluoksniu. Jeigu grindų detalė yra tokia, kad išlyginamasis sluoksnis liejamas po siūlių užpylimo šlyties srauto formulė atrodys taip:

$$v_{lw} = \frac{(EA)_{cf.d} e_f V_{B.Ed}}{(EI)_{com.d}} + \frac{(EA)_{top} e_f V_{top}}{(EI)_{top}} \quad (7)$$

Įvertinus išlyginamąjį sluoksnį būtų gaunamas didesnis šlyties srautas, dėl to įtempiai τ_{vl} būtų gaunami dar didesni. Tačiau, jeigu išlyginamajame sluoksnyje naudojamas armavimas, o ant plieninių sijų būtų įrengiamos papildomos jungtys, tuomet, galime priimti, jog sija ir išlyginamasis sluoksnis sukurs didesnę kompozitinę skerspjūvį ir plokštėms teks mažesnis šlyties srautas, o šlyties įtempiai bus mažesni.

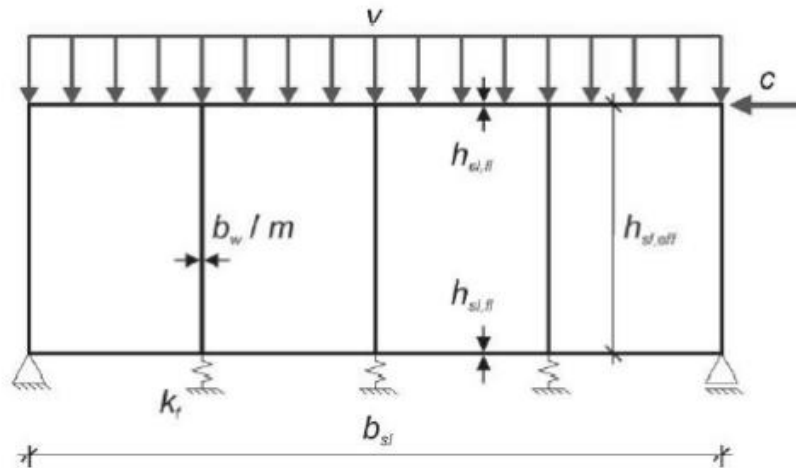


13 pav. Detalė kairėje:su nearmuotu išlyginamuoju sluoksniu; dešinėje-armuotas išlyginamas sluoksnis, sija su plieninėmis jungėmis.

2.3. Projektavimo metodika pagal Roggendrof

Šis projektavimo modelis panašus į Pajari-Leskelä modelį ir yra pagrįstas standžia atrama remiantis tais pačiais suirimo kriterijais. Tačiau skirtingai nei Pajari-Leskelä modelyje yra įvertinami plyšiai susidarantys sąsajoje tarp sijos ir perdangos plokštės, taip pat tarp perdangos plokštės ir monolitinio ruožo. Abudu šie defektai ryškėja didėjant sijos įlinkiui. Monolitiniame ruože esančių plyšių pločio padidėjimas įtakoja horizontalios gniuždymo jėgos c susidarymą gretimais esančių plokščių viršutinėse dalyse, skersine kryptimi. Tai sukelia perdangos plokščių judėjimą išilgine sijos kryptimi, dėl to susidaro šlyties įtempiai dėl atsiradusios trinties tarp perdangos plokščių bei sijos. Horizontali gniuždymo jėga c priklauso nuo trinties tarp sijos ir perdangos plokštės (įvertinama trinties koeficientu) bei normalinių įtempių σ_z . Skaičiuojant labiausiai nutolusi plokštės tinklelio elementą įvertinama skersinė jėga V_{comp} , kuri susidaro įrengus monolitinių ruožų plokščių jungtys ($c = \mu V_{comp}$). Trinties koeficientas μ yra pagrindinis šio modelio parametras, jis priklauso nuo paviršių charakteristikos ir yra nustatomas empyriškai.

Siekiant nustatyti skersinius šlyties įtempimus τ_{xz} ir τ_{zy} kiaurymėtosios perdangos plokštės skerspjūvis sumodeliuojamas kaip lygiagrečių juostų santvara (žr. pav. 12). Modelis apkraunamas horizontalia gniuždymo jėga c ir tolygiai išskirstyta apkrova - dėl įlinkio efekto. Taip nustatomos įrašos perdangos plokštės tinklelyje.

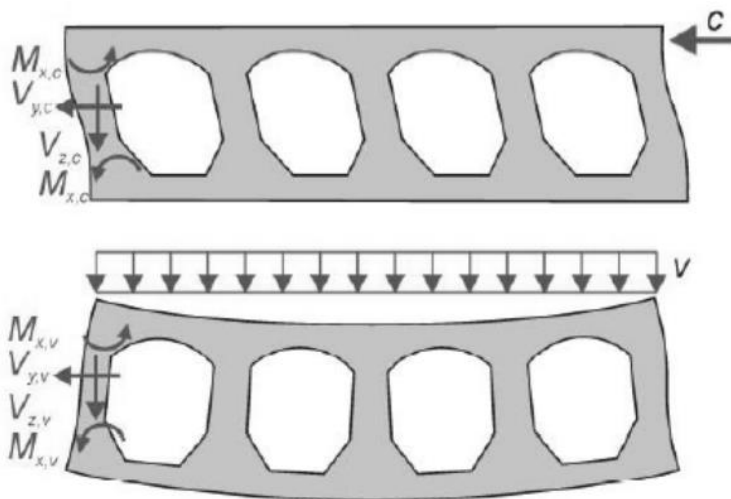


14 pav. Santvaros modelis kiaurymėtosios perdangos plokštės skerspjūviui. (Surma, 2013)

Apskaičiuojamos skersinės jėgos atsirandančios dėl gniuždymo jėgos c , labiausiai nutolusiame perdangos plokštės tinklelio elemente (žr. pav. 14):

$$V_{z,c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_{sl,eff}}{b_{sl}} \cdot c \quad (8)$$

$$V_{y,c} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3 \cdot b_{sl} \cdot b_{w,j}^3 + 2n \cdot h_{sl,eff}^3}{n(2b_{sl} \cdot b_{w,j}^3 + n \cdot h_{sl,eff} \cdot h_{sl,fl}^3)} \cdot c \quad (9)$$



15 pav. Įrašų susidarymas labiausiai nutolusiame plokštės tinklelio elemente. (Surma, 2013)

Remiantis (8), (9) formulėmis gautais atsakymais nustatomi skersiniai šlyties įtempiai $\tau_{xz.c}$ ir $\tau_{zy.c}$

$$\tau_{xz.c} = \beta_f \cdot k_{xz.c} \cdot m \cdot \mu \cdot \frac{V_{com} \cdot S_y}{I_y \cdot b_w} \quad (10)$$

$$\tau_{zy.c} = \frac{3}{2} \cdot \beta_f \cdot k_{zy.c} \cdot m \cdot \mu \cdot \frac{V_{com}}{l_x \cdot b_w} \quad (11)$$

Kur koeficientai $k_{xz.c}$ ir $k_{zy.c}$, priklauso nuo perdangos plokštės geometrijos ir nuo tinklelio elementų skaičiaus – m . Dėl kiaurymių formos sunku nustatyti tikslų elemento standumą bei laikomąsias savybes, dėl to lenkimo įtaka įvertinama per empyrinį koeficientą. Remiantis baigtinių elementų metodu ir eksperimentiniais bandymais, nustatyta, kad lenkimo efektas priklauso nuo sijos ir kiaurymėtosios perdangos plokštės standumo. Kuo didesnis plokštės standumas lyginant su sija, tuo labiau sija išlinksta, todėl didėja ir įtempių koncentracija atramoje. Empyrinis sijos standumo ir plokštės standumo skersine

kryptimi išreiškiamas dydžiu $\alpha = \frac{\left(\frac{EI_b}{L_b^3}\right)}{\left(\frac{EI_{sl,q}}{b_{sl}^3}\right)}$.

Tada faktorius k_v :

$$k_v = 1 + \beta \cdot \frac{L_b^3 \cdot EI_{sl,q}}{EI_b \cdot b_{sl}^3} \quad (12)$$

Tada kiaurymėtosios perdangos plokštės atsparis šlyties įtempiams gali būti suskaičiuotas remiantis [EN 1168:2005+A3:2011 (4.3.3.2.2.1)] pratęsus standartinę formulę ir įvertinus plyšių susidarymą jungiamuosiuose mazguose.

$$V_{Rd.ct.bw} = f \cdot \frac{I_y \cdot b_w}{S_y \cdot (1 \cdot \alpha_{comp} \cdot b_f \cdot k_{xz.c} \cdot m \cdot \mu)} \cdot \left(\sqrt{f_{ctd}^2 - \alpha_1 \cdot \sigma_{cd} \cdot f_{ctd}} - \sqrt{1 - \frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{cd}}{f_{ctd}} \cdot k_v \cdot \tau_{zy.c}} \right)^2 - \alpha_p \cdot \tau_{cpd} \quad (13)$$

2.4. Literatūros analizės ir metodologijos išvada

Pajari-Leskelä ir Roggendorf skaičiavimo modeliai užpildo projektavimo standartų spragą ir suteikia naudingos informacijos apie kiaurymėtųjų plokščių projektavimą, kuomet jos atremtos ant lanksčios atramos (flexible support). Šie du skaičiavimo metodai neprieštarauja vienas kitam, kaip tik, vienas kitą

papildo, nes jie buvo grindžiami tais pačiais bandymais. Tačiau skirtumas tarp šių dviejų metodų toks, jog Pajari-Laskela modelyje nevertinami plyšiai jungtyje, į ką atsižvelgta Roggendorf modelyje.

2.5. Problemos sprendimo būdai

Yra keletas šios problemos sprendimo būdų, kaip būtų galima sustiprinti kiaurymėtos plokštės sienutę. Vienas iš jų- kiaurymėtu plokščių gamyboje panaudoti polipropileno ir politeleno fibras. Fibrų panaudojimas padidintų betono, ne tik glemžimo, tempimo įtempių atsparumą, atsparumą betono susitraukimo sukeliams plyšiams, bet ir padidintų elementų atsparumą cheminėms medžiagoms, šalčiui ir ugniai. Taigi visi šie veiksniai prailgina betono ilgalaikiškumą. Kadangi naudojant fibras padidėja betono tempiamasis stipris, gausime ir didesnę kiaurymėtosios plokštės sienutės atsparumą šlyties įtempiams.



16 pav. Kiaurymėta plokštė pagaminta iš betono su polypropileno fibromis.

Kitas sprendimo būdas, kuris dar nėra labai daug žinomas ir plačiai naudojamas, tai – konstrukcijų stiprinimas naudojant anglies pluošto polimerines juostas. Anglies pluošto polimerinės juostos tai tarsi konstrukcijų sutvirtinimas lipnia juostele arba kitaip tariant išorinio paviršiaus suarmavimas. Kadangi ši juosta yra polimerinė medžiaga, tai jau suteikia ypatingai didelį tempimo stiprį. Šios medžiagos panaudojimas gali tiktį visų tipo konstrukcijoms :

- sijoms;
- kolonomis;
- sienoms;
- laiptatakams;
- perdengimo plokštėms;

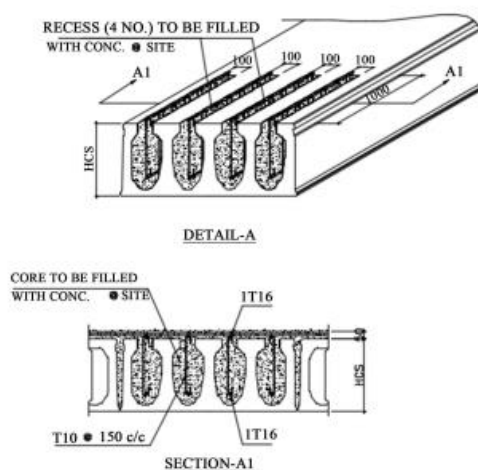


17 pav. Anglies pluošto polimerinės juostos panaudojimas konstrukcijų stiprinimui.

Taigi, jeigu turėtume jau pagamintą elementą ir dėl kokių nors priežasčių pasikeitus projektinėms apkrovoms ir sąlygoms, būtų nustatyta jog elementas netenkina kurios nors stipruminės sąlygos, anglies pluošto polimerinės juostos panaudojimas būtų geras ir greitas elemento sustiprinimo būdas.

Trečias būdas - tai seniai žinomas kiaurymėtujų plokščių stiprinimo būdas. Jeigu suprojektuotos plokštės skerspjūvis yra pakankamas dėl veikiančio momento, tačiau veikiančios didelės skersinės jėgos yra per didelės plokštės atraminiai daliai tai vienas iš būdų, kaip tą pačią plokštę būtų galima panaudoti monolitinant plokštės kiaurymes. Taip padidinamas skerspjūvio plotas atramoje ir to pakanka, jog būtų perimtos skersinės jėgos atramoje. Taip pat tai vienas iš būdų, kaip apsaugoti nuo šlyties įtempių veikiančių plokštės sienutes. Tai užtikrintų, jog plokštės sienutės dėl šlyties įtempių nesuirs. Kuomet plokštės projektuojamos, iš anksto paliekamos išėmos plokštės viršutinėje dalyje, kad kiaurymes būtų galima užpildyti. Aukštesnio skerspjūvio plokštėse ($h > 300\text{mm}$) dažnai dar naudojamas papildomas atraminės dalies armavimas. Per paliktą išimą į kiaurymę įdedamas armatūros karkasas, tuomet kiaurymė monolitinama. Paprastai žemesnio skerspjūvio plokštėms užtenka ir monolitinimo be armatūros. Tačiau šis būdas nėra toks patogus, nes tai naudoja papildomas medžiagas ir laiką, kurio dažniausiai statybos aikštelėje trūksta.

Tai pat, svarbu paminėti, jog teigiamą įtaką plokštės skerspjūviui turi kamščiai, naudojami uždengti kiaurymėtu plokščių angas. Šie kamščiai suteikia stiprumo ir standumo plokštės sienutei ir veikia tarsi ryšys.



18 pav. Plokštės atraminės dalies kiaurymių užbetonavimas. (El-Arab, 2017)

Sijų ar plokščių išramstymas, taip pat naudingas ne tik sijoms, bet ir plokštėms. Kuomet, elementai yra išramstomi montavimo stadijoje nevertinamas savasis konstrukcijų svoris ir tai apsaugo nuo pirminių elementų deformacijų (pvz. sijų pasisukimo). Taip pat išramstymas leidžia užtikrinti, kad pastato elementai po jungčių užpylimo dirbs kartu. Kiaurymėtoms plokštėms naudinga tai, jog kai elementai sumontuojami ant išramstytų sijų, savasis svoris nesuteikia deformacijų, įlinkių. O kai po nustatyto laiko išramstymas nuimamas ir siūlių betonai yra įgavęs reikiamą stiprį, taip užtikrinama, jog konstrukcijos dirba kartu, kaip kompozitinis elementas, o ne kiekvienas elementas atskirai.

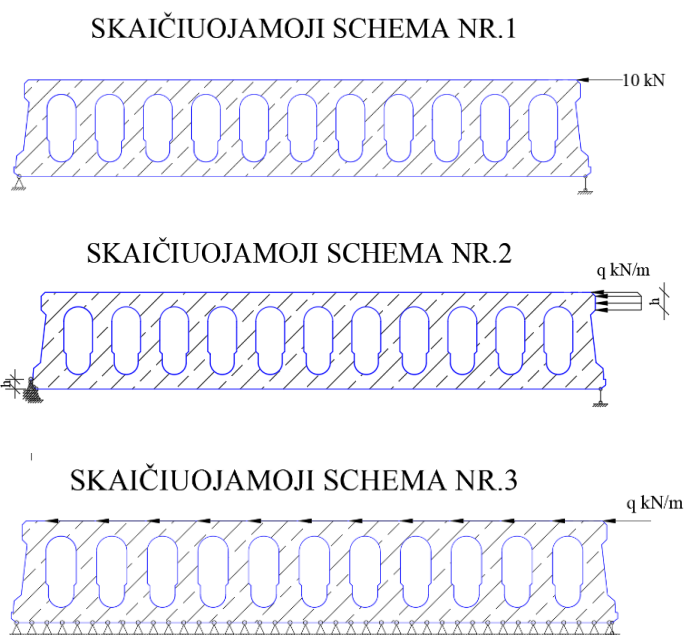
3. Skaičiavimai

3.1. Pirma dalis

Pirmoje dalyje atliekami skaičiavimai su skirtingais kiaurymėtųjų plokščių skerspjūviais. Bandymo metu buvo nagrinėti būtent Lietuvoje gaminamų kiaurymėtųjų plokščių skerspjūviai. Eksperimentu siekiama įrodyti, jog priklausomai nuo to, kokios plokštės naudojamos, gaunamas skirtingas įtempių pasiskirstymas elemente. Taip pat siekiama patikrinti kokią įtaką įtempių pasiskirstymui turi skerspjūvio aukštis ir kiaurymių forma.

Tyrimo objektas – dviejų gelžbetoninių konstrukcijų gamybos įmonių kiaurymėtųjų plokščių elementai. Vienoje gamykloje gaminamos keturios skirtingo skerspjūvių kiaurymėtos plokštės, kitoje – penkios. Iš viso tiriama devyni skirtingi skerspjūviai. Kiekvienam iš skerspjūvių taikomos trys skirtingos skaičiuojamosios schemas. Taip pat, kiekvienam iš skerspjūvių taikoma trys skirtingos situacijos: 1 situacija, kai kiaurymės tuščios, 2 situacija kai užpildoma viena kiaurymė, 3 situacija kai užpildomos dvi arba daugiau plokštės kiaurymių. Eksperimentas atliekamas naudojantis baigtinių elementų programa “Autodesk Robot Structural Analysis Professional”. Susimodeliavus visus devynis skirtingus skerspjūvius atliekama analizė- nustatinėjami pavojingiausi principiniai įtempiai σ_1 .

Kiekvienam iš skerspjūvių taikyta trys skaičiuojamosios schemas:



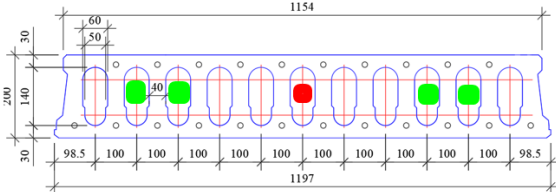
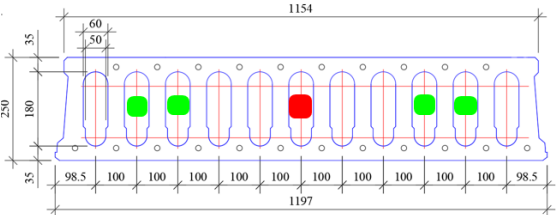
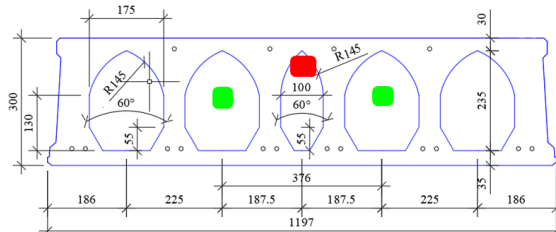
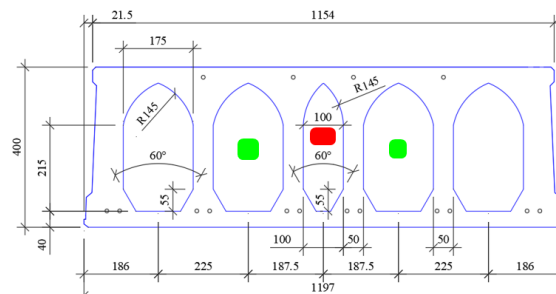
19 pav. Skaičiuojamosios schemas.

Pirmosios dalies suvestiniai rezultatai :

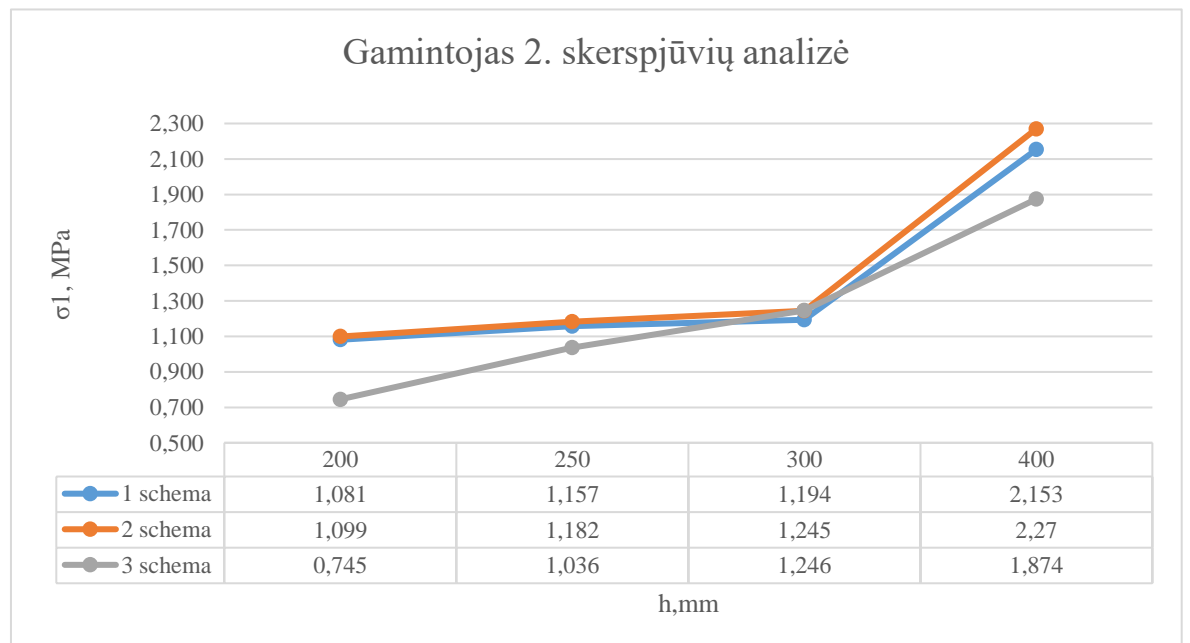
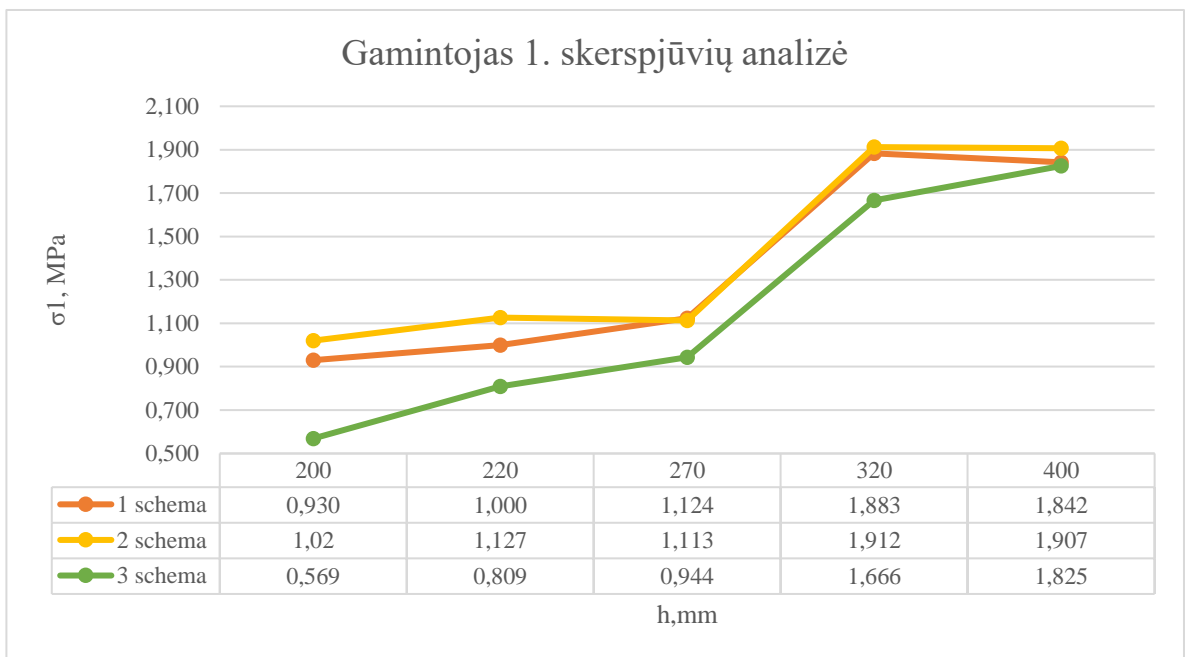
1 lentelė. Gamintojo 1 svarbiausiųjų įtempių rezultatų suvestinė.

Eil. Nr.	Skerspjuvio pavadinimas	Skerspjuvis	Skaičiuojamosios schemos nr.	Svarbiausieji įtempiai kai kiaurymės tuščios, σ_1 (MPa)	Svarbiausieji įtempiai, kai užpildyta viena kiaurymė, σ_1 (MPa) ■	Svarbiausieji įtempiai, kai užpildyta dvi ar daugiau kiaurymių, σ_1 (MPa) ■
1.	PKE20		1 schema 2 schema 3 schema	1,101 1,020 0,569	0,990 0,923 0,467	0,820 0,929 0,319
2.	PKE22		1 schema 2 schema 3 schema	1,095 1,127 0,809	1,082 1,096 0,552	1,008 1,165 0,383
3.	PKE27		1 schema 2 schema 3 schema	1,200 1,113 0,944	1,118 1,031 0,572	0,902 0,957 0,355
4.	PKE32		1 schema 2 schema 3 schema	2,038 1,912 1,666	1,689 1,890 0,769	1,615 1,367 0,452
5.	PKE40		1 schema 2 schema 3 schema	1,961 1,907 1,825	1,813 1,643 0,776	1,501 1,480 0,398

2 lentelė. Gamintojo 2 svarbiausiųjų įtėmpių rezultatų suvestinė.

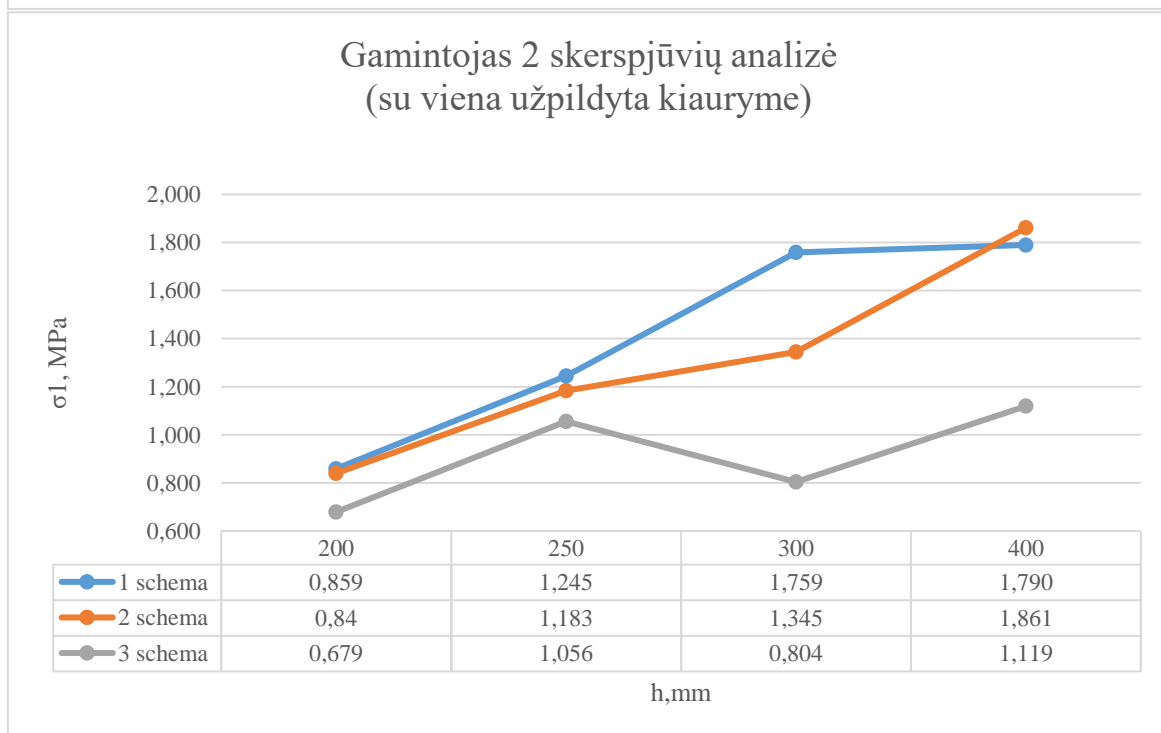
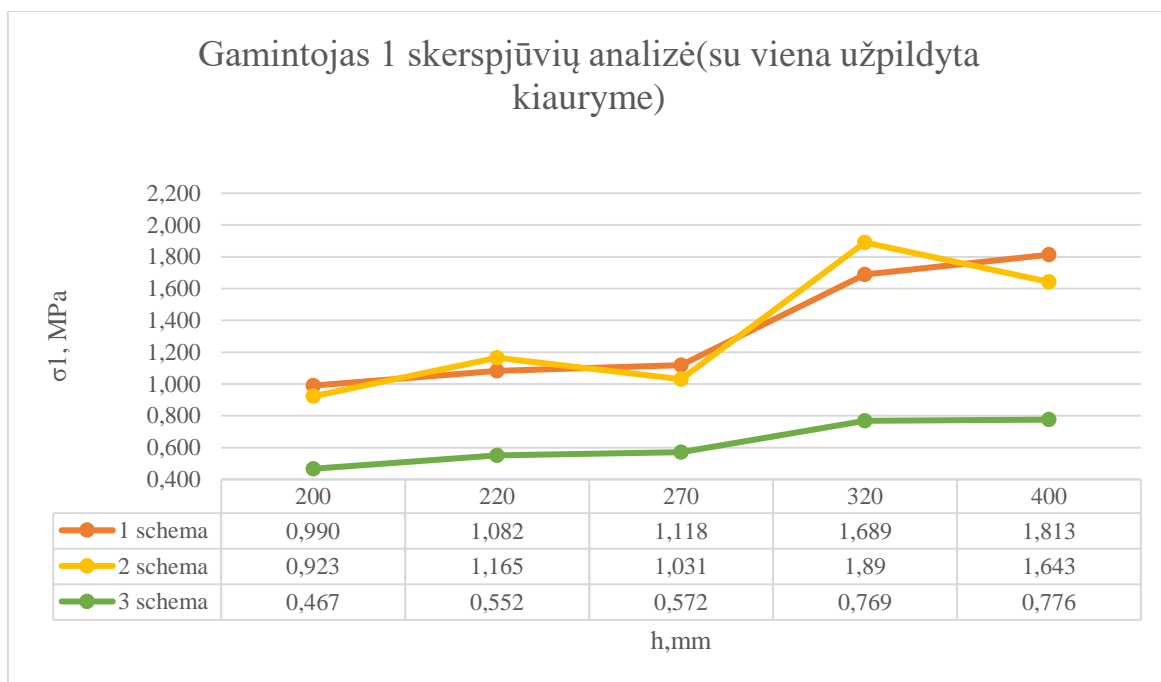
Eil. Nr.	Skerspjūvio pavadinimas	Skerspjūvis	Skaičiuojamosios schemas nr.	Svarbiausieji įtėmpiai, kai kiaurymės tuščios, σ_1 (MPa)	Svarbiausieji įtėmpiai, kai užpildyta viena kiaurymė, σ_1 (MPa) ■	Svarbiausieji įtėmpiai, kai užpildyta dvi ar daugiau kiaurymių, σ_1 (MPa) ■
1.	HCS 20		1 schema 2 schema 3 schema	1,173 1,099 0,745	0,859 0,840 0,679	1,043 1,131 0,541
2.	HCS 25		1 schema 2 schema 3 schema	1,245 1,182 1,036	1,245 1,183 1,056	1,177 1,143 0,666
3.	HCS 30		1 schema 2 schema 3 schema	1,313 1,243 1,246	1,759 1,345 0,804	1,759 1,246 0,661
4.	HCS 40		1 schema 2 schema 3 schema	2,237 2,270 1,874	1,790 1,861 1,119	1,510 1,272 0,637

PASTABA: Svarbiausiųjų (principinių) įtėmpių diagramas skerspjūviuose žr. 1 priede.

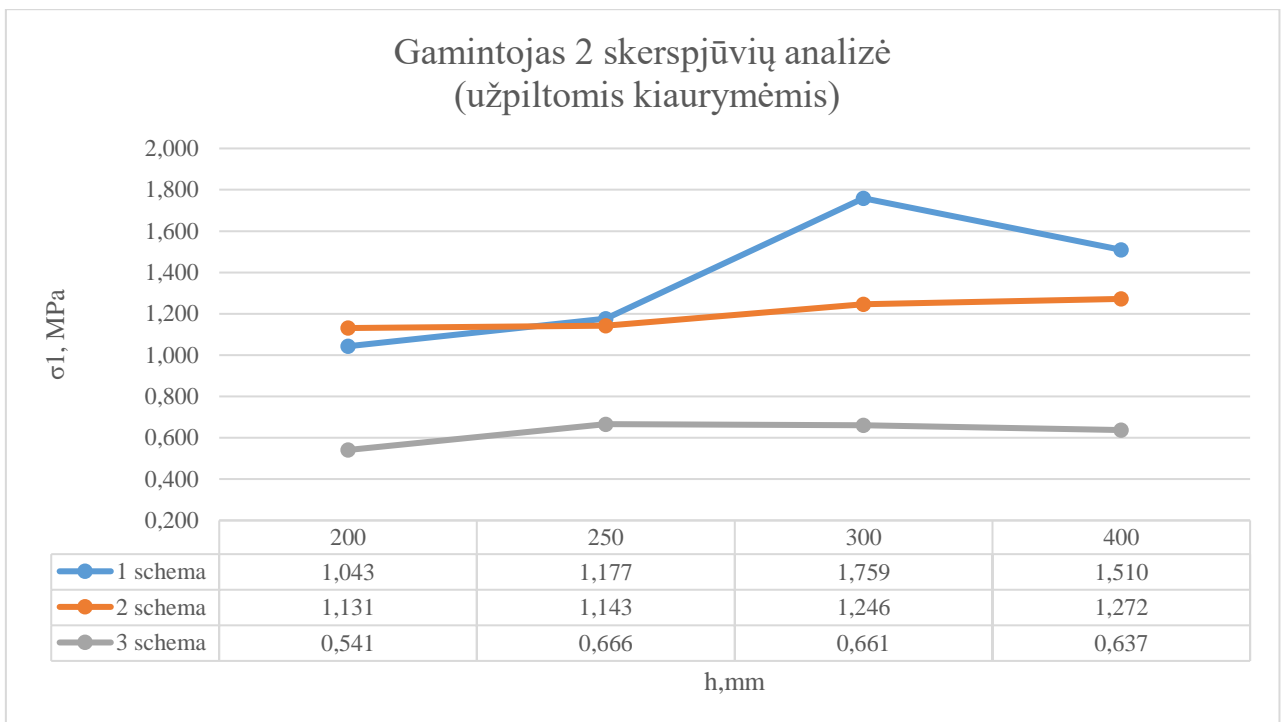
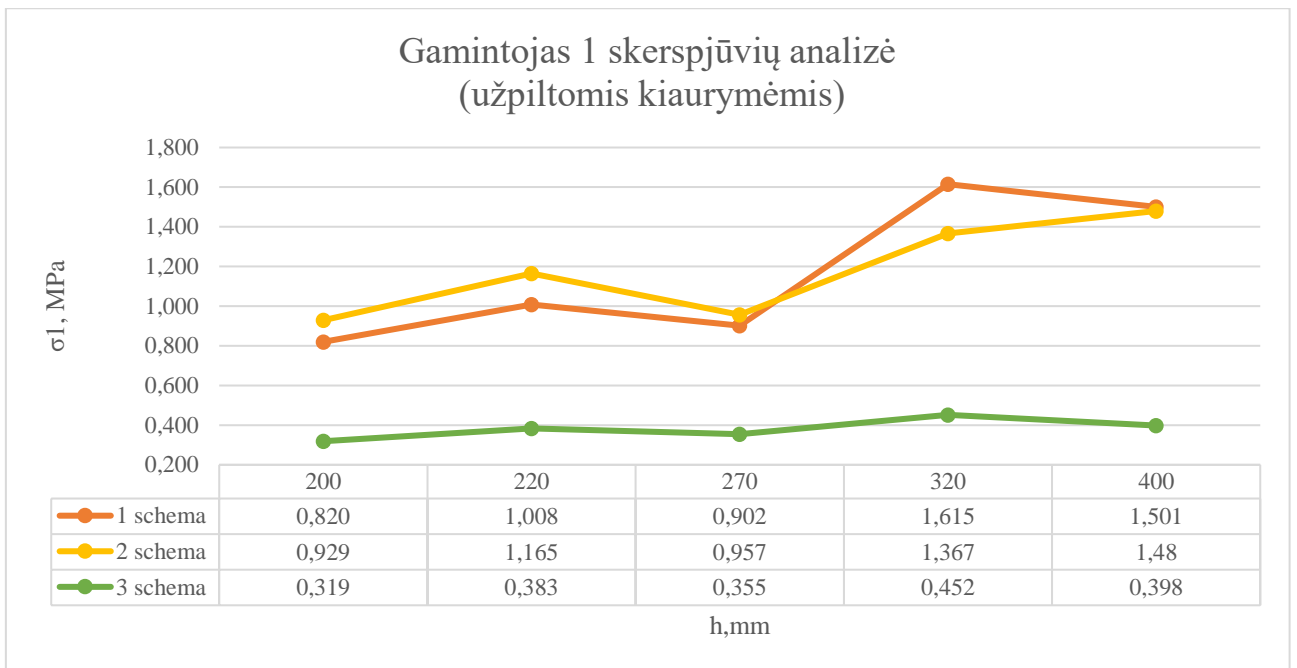


Atlikus pirmąjį eksperimento dalį matome, jog įtempiai didėja priklausomai nuo skerspjūvio aukščio, nors apkrova išlieka ta pati. Tai pasireiškė abiejų gamintojų elementuose. Tai įrodo, jog pavojingesni įtempiai susidaro aukštesnio skerspjūvio plokštėse ir kad ši problema gali atsirasti ir mūsų šalies gamintojų gaminamose plokštėse. Taip pat, remdamiesi grafikais, galime daryti tokią prielaidą, jog antroji skaičiuojamoji schema (2 schema) buvo labiausiai pavojinga abiejų gamintojų kiauromėtoms plokštėms. Iš gautų rezultatų matome, jog kartais buvo gautos net gi virš 2 MPa reikšmės. Jeigu lygintume su betono tempiamuoju stipriu, kai elementas pagamintas iš C45/55 betono stiprio klasės, kai kurios reikšmės yra labai artimos šiai reikšmei. Pvz. būtent C45/55 betono klasės reikšmė $f_{ctk,0.05} = 2.7 \text{ MPa}$. Bet jeigu naudosisime skaičiuotinę betono tempiamojo stiprio reikšmę gausime $f_{ctd} = \frac{f_{ctk,0.05}}{\gamma_c} = \frac{2.7}{1.5} = 1.8 \text{ MPa}$. Lyginant su tokia reikšme matome, jog aukštesnio skerspjūvio plokštės įtempimų reikšmės dažnai didesnės, nei ši skaičiuotinė betono tempiamojo stiprio reikšmė.

Toliau eksperimentas buvo tęsiamas naudojant vieną iš šios problemos sprendimo būdų- kiaurymių monolitinią. Priklausomai nuo skerspjūvio, kelios kiaurymės pakeistos į medžiagą. Priimta betono klasė C20/25. Kiaurymėtos plokštės elemento dalis – C45/55. Šios eksperimento dalies esmė įvertinti, kokią įtaką įtempių reikšmėms ir pasiskirstymui turi kiaurymių pakeitimas į medžiagą, kitaip tariant, jeigu kiaurymės statybvietėje, po elemento sumontavimo, užpilamos betonu.

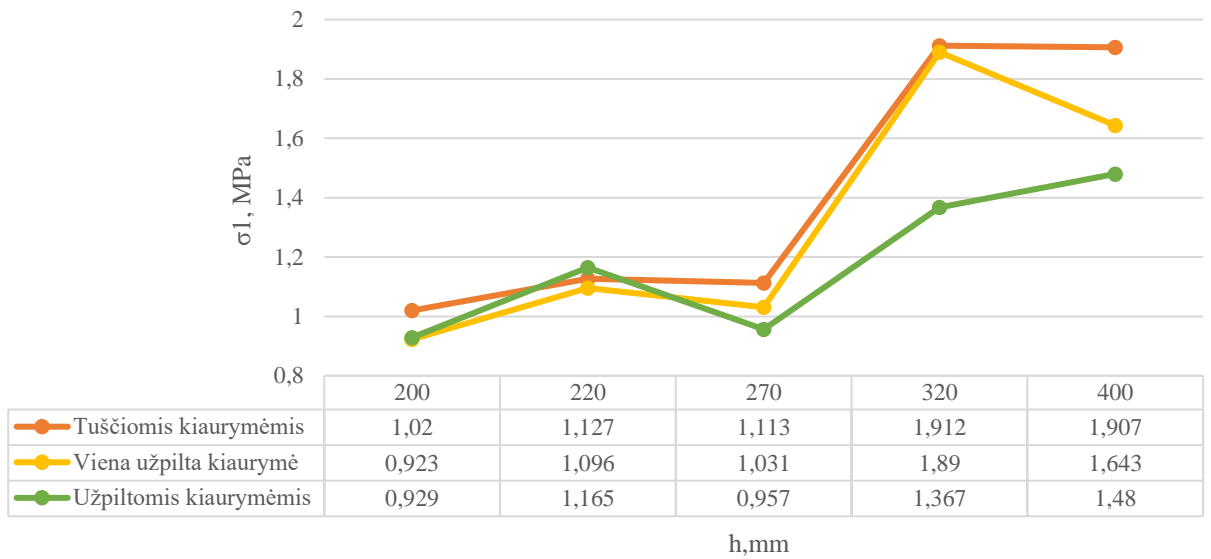


Atlikus antrąją eksperimento dalį buvo analizuojama situacija, kai vidurinę plokštės kiauryme užpildėme silpnesniu betonu, nei pagaminta plokštė. Užpylimui buvo naudojamas C20/25 betonas. Atlikus šią eksperimentų dalį taip pat buvo stebimas įtempių didėjimas aukštėjant plokštės skerspjūviui, tačiau lyginant su rezultatais, kai plokštės skerspjūvio kiaurymės yra tuščios, nustatytas įtempių mažėjimas. Kai kuriuose elementuose reikšmės skyrėsi nedaug, tačiau buvo ir tokių rezultatų, kad įtempių reikšmės sumažėjo daugiau negu du kartus. Gautų maksimalių principinių įtempių rezultatai pateikiami grafikuose.

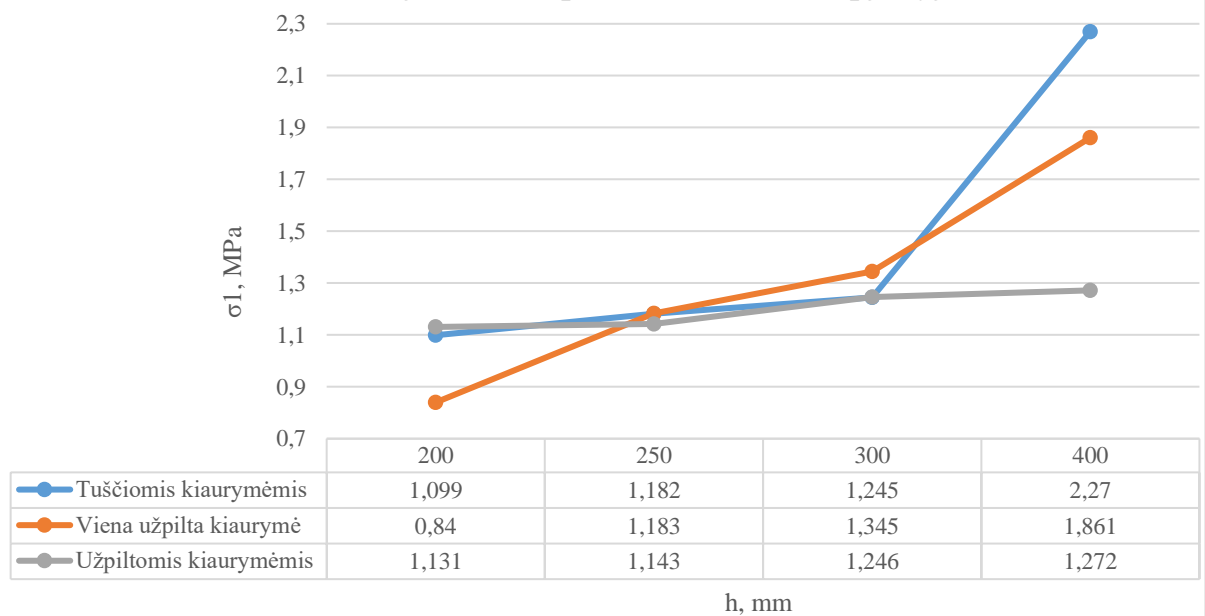


Atlikus antrą eksperimento dalį nustatyta, kad keletą plokštės kiaurymių užpylus betonu, visame skerspjūvyje vyksta įtempių persiskirstymas ir reikšmės sumažėja. Taigi, tai patvirtina, jog plokščių atraminės dalies monolitinis, turi teigiamą reikšmę. Taip pat, galime matyti, jog reikšmės yra žymiai mažesnės lyginant su pirmoje eksperimento dalyje skaičiuotais skerspjūviais. Palyginimas pateiktas grafike. Palyginsime plokštės su tuščiomis kiaurymėmis ir užpildytomis. Lyginami pagal antrąją skaičiuojamąją schemą skaičiuoti skerspjūviai, nes pagal gautus rezultatus priimama, jog ši skaičiuojamoji schema pavojingiausia ir sukelia didžiausius įtempius skerspjūviuose.

Gamintojas 1. Įtempiai elemento skerspjūvyje



Gamintojas 2. Įtempiai elemento skerspjūvyje



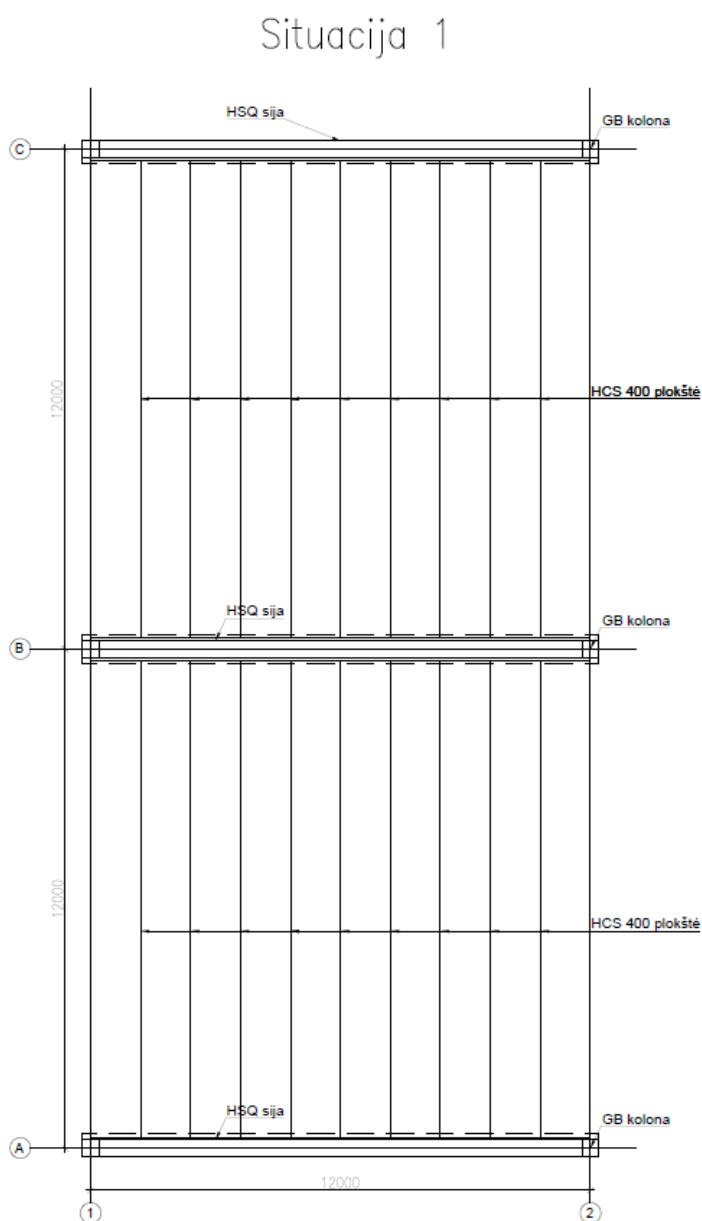
Iš šių grafikų būtų sunku pasakyti tikslią kiaurymių užpylimo naudą, reiktų analizuoti įtempių diagramas iš baigtinių elementų programos, tačiau akivaizdžiai matome, jog įtempių reikšmės gali būti mažesnės. Reikšmė gali skirtis net apie du kartus. Abiejų gamintojų mažesnio skerspjūvio elementų palyginimas gavosi neproporcingas, nes iš įtempių žemėlapiu buvo fiksuojama didžiausia reikšmė, todėl didelio skirtumo nematoma, ar kiaurymės užpildytos, ar ne. Tačiau nagrinėjant aukštesnio skerspjūvio plokštės matome, jog reikšmės mažėja lyginant su plokštės skerspjūviu kuomet kiaurymės tuščios.

3.2. Antra dalis

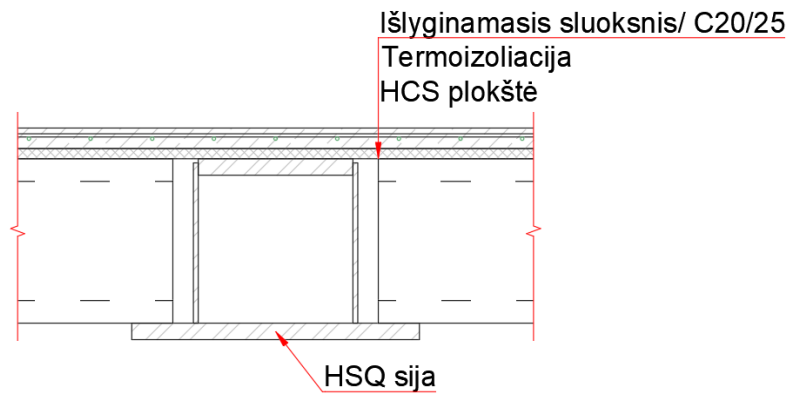
Šioje dalyje atliekami principinių įtempių skaičiavimai kiaurymėtu plokščių atraminėje dalyje, kartu įvertinant papildomus šlyties įtempius. Tikrinama ar jie neviršija leistinų įtempių betone. Skaičiavimai atliekami naudojant suomių „Code card No.18“ standarto metodiką. Nagrinėjamos realios situacijos, kuriomis pasinaudojus bandoma nustatyti, kada šlyties įtempiai kiaurymėtai plokštei gali būti pavojingi ir kaip juos galima sumažinti.

Skaičiavimai atlikti priimant tokias prielaidas:

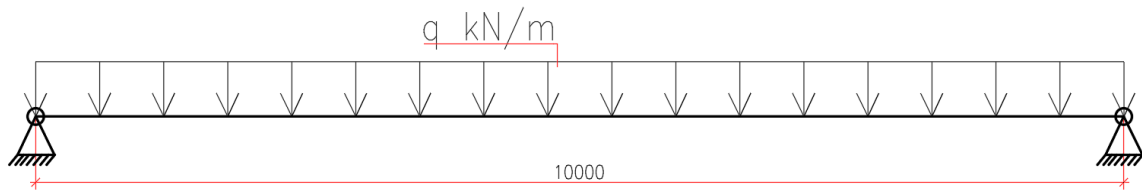
- tangentiniai įtempiai nuo lynų įtempimo jėgos $\tau_{cp} = 0,15 \text{ MPa}$;
- nevertintas konstrukcijų išramstymas;
- nevertinama plokščių galų kamščių įtaka;
- lynų įtempimo nuostoliai priimti 15% nuo pradinių įtempių lyne;



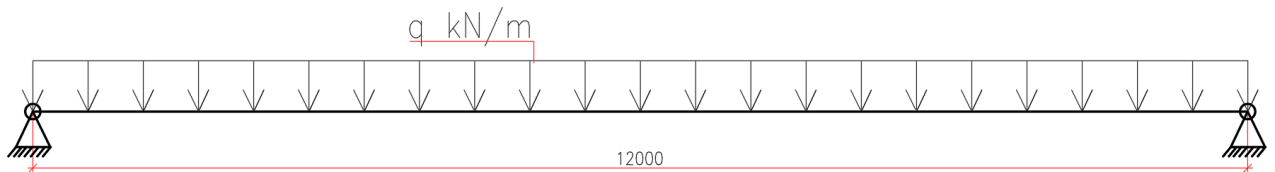
20 pav. Situacija 1. (HSQ metalinė sija 10m. ir HCS 400 kiaurymėta plokštė 12m.)



21 pav. Nagrinėjama detalė



22 pav. Sijos skaičiuojamoji schema.



23 pav Plokštės skaičiuojamoji schema.

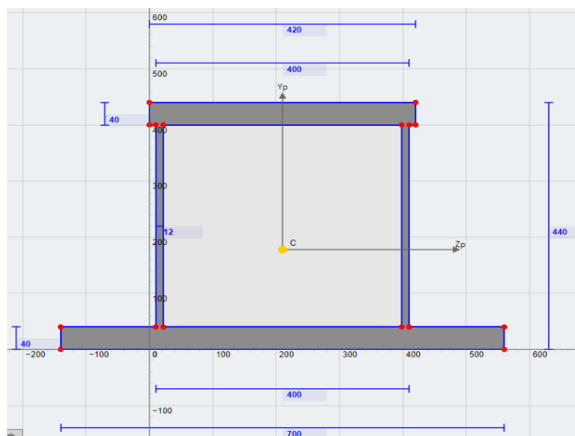
3 lentelė. Naudojamos apkrovos. (1 situacija)

Apkrovos tipas	kN/m ²
Nuolatinės apkrovos (DL):	
Kiaurymėtos plokštės savasis svoris (HCS400)	4,9
Grindų detalė	2
Pertvaros	1,2
Instaliacijos	0,5
Σ	8,6
Kintamos apkrovos (LL):	
Naudojimo apkrova	5
Σ	5

Saugos ribinio būvio derinys: $q_d = 1,35DL + 1,3LL = 1,35 \cdot 8,6 + 1,3 \cdot 5 = 18,11 \text{ kN/m}^2$

Tinkamumo ribinio būvio derinys: $q_k = DL + 0,6LL = 8,6 + 0,6 \cdot 5 = 11,6 \text{ kN/m}^2$

Šiai situacijai suprojektuota reikiamo stiprumo ir skerspjūvio HSQ tipo plieninė sija.

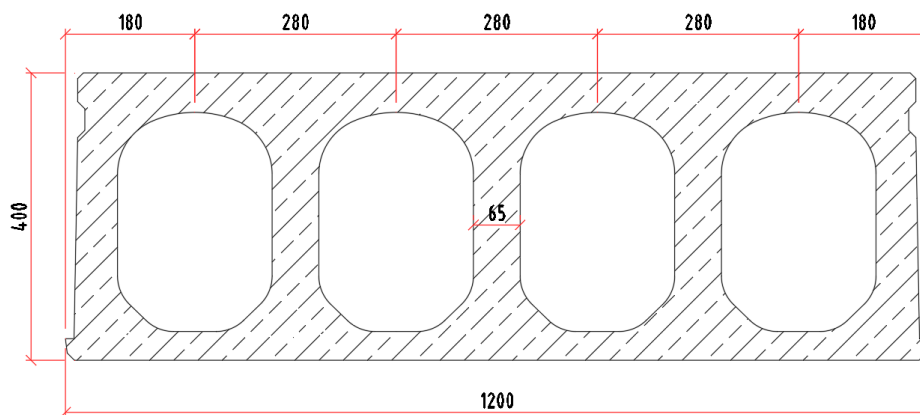


24 pav Metalinės HSQ tipo sijos skerspjūvis.

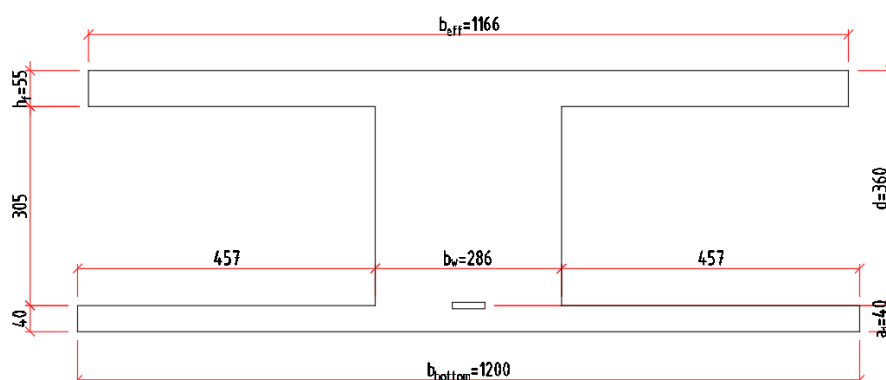
4 lentelė. Metalinės sijos duomenys.

Plieno klasė	Tamprumo modulis E_s (MPa)	Inercijos momentas I_y (mm ⁴)	Sijos įlankis (mm)	Sijos išnaudojimas (%)
S355	210000	$1,797 \cdot 10^9$	50	97

Sijos skaičiavimo ataskaitą žiūrėti „2 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (1 situacija) (sija pagaminta su 20mm išlinkiu. Pagal nuo plokščių savojo svorio gaunamą įlankį)



25 pav Plokštės skerspjūvis.



26 pav Redukuotas plokštės skerspjūvis.

5 lentelė. Kiaurymėtos plokštės duomenys.

Betono klasė	C45/55
Ilgis L_{hc} (m)	12
Plokštės aukštis h_{hc} (mm)	400
Plokštės apačios plotis b_{hc} (mm)	1200
Plokštės viršaus plotis b_{eff} (mm)	1166
Virš.lentynos storis h_f (mm)	55
Efektyvus skerspjūvio aukštis d (mm)	360
Bendras sienučių plotis b_w (mm)	286
Plotas A_{hc} (mm ²)	$1,992 \cdot 10^5$
Inercijos momentas I_{hc} (mm ⁴)	$4,146 \cdot 10^9$
Statinis momentas Sh_c (mm ³)	$1,313 \cdot 10^7$

Plokštei tenkanti apkrova nuo saugos ribinio būvio:

$$q_{d,pl} = q_d \cdot b_{hc} = 18,11 \cdot 1,2 = 21,73 \frac{kN}{m}$$

Plokštę veikiantis momentas:

$$M_{Ed} = \frac{q_{d,pl} \cdot L_{hc}^2}{8} = \frac{21,73 \cdot 12}{8} = 391,176 \text{ kNm} \quad (3.2.1)$$

Tuomet, skaičiuojame reikalingos armatūros skerspjūvio plotą. Tikriname neutralios ašies vietą skerspjūvyje: sienutėje ar lentynoje. Skaičiavimams naudoti koeficientai:

$$\eta = 1 \quad \lambda = 0,8 \quad \gamma_c = 1,5 \quad \alpha_{cc} = 0,9 \quad \gamma_s = 1,15$$

Plokščių gamybai naudojama įtemptoji armatūra: Y1860S klasės lynai Ø12, 9.

Tempiamasis stipris: $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$

Skaičiuotinis stipris: $f_{p0,1d} = 1440 \text{ MPa}$

Tamprumo modulis: $E_{sp} = 195 \text{ GPa}$

Lyno skerspjūvio plotas: $A_{sp} = 100 \text{ mm}^2$

Betono C45/55 charakteristikos:

Charakteristinis kubinis betono stipris: $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$

Skaičiuotinis betono kubinis gniuždomasis stipris: $f_{cd} = \frac{f_{ck} \cdot \alpha_{cc}}{\gamma_c} = \frac{45 \cdot 0,9}{1,5} = 27 \text{ MPa}$

Charakteristinis betono tempiamasis stipris: $f_{ctk,0.05} = 2,7 \text{ MPa}$

Skaičiuotinis betono tempiamasis stipris: $f_{cd} = \frac{f_{ctk,0.05}}{\gamma_c} = \frac{2,7}{1,5} = 1,8 \text{ MPa}$

Betono tamprumo modulis: $E_c = 36 \text{ GPa}$

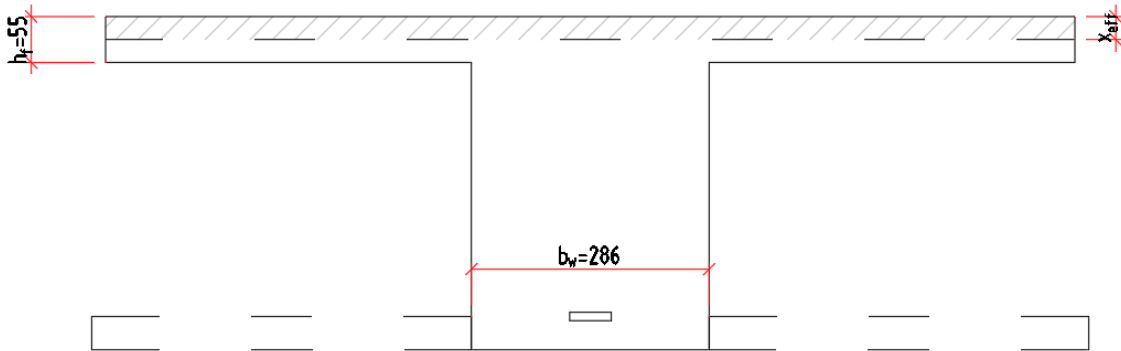
Momentas nuo vidinių jėgų:

$$M_{Rd} = \eta \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot \lambda \cdot h_f \left(d - \frac{\lambda \cdot h_f}{2} \right) = 1 \cdot 27 \cdot 1166 \cdot 0,8 \cdot 55 \left(360 - \frac{0,8 \cdot 55}{2} \right) \quad (3.2.2)$$

$$= 468,2 \text{ kNm}$$

Kadangi, $M_{Rd} > M_{Ed}$ tai gauname jog neutrali ašis skerspjūvio lentynos zonoje.

Armatūra bus skaičiuojama kaip tėjinio skerspjūvio profiliui, kurio plotis tempiamoje zonoje priimamas $b_w = 286 \text{ mm}$



27 pav Redukuotas tėjinis plokštės skerspjūvis.

Skaičiuojamas ribinis gniuždomosios zonos aukštis ξ_{lim} išanksto įtemptam elementui.

$$\xi_{lim} = \frac{0,0035}{0,0035 + \Delta\varepsilon_{p,lim}} = \frac{0,0035}{0,0035 + 2,337 \cdot 10^{-3}} = 0,565 \quad (3.2.3)$$

kur:

$$\Delta\varepsilon_{p,lim} = \left(\frac{0,9 \cdot f_{pk}}{\gamma_s \cdot E_p} \right) - \varepsilon_p = 2,696 \cdot 10^{-3} \quad (3.2.4)$$

Išanksto įtemptų lynų deformacijos

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} = \frac{930}{195 \cdot 10^3} = 4,769 \cdot 10^{-3} \quad (3.2.5)$$

σ_p apskaičiuojame pagal formulę:

$$\sigma_p = 0,5 \cdot f_{pk} = 0,5 \cdot 1860 = 930 \text{ MPa} \quad (3.2.6)$$

Gniuždomą zoną apibūdinantis dydis μ_{Eds} :

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot d^2} = \frac{391,176 \cdot 10^6}{1 \cdot 27 \cdot 1166 \cdot 360^2} = 0,096 \quad (3.2.7)$$

. Santykinis ekvivalentinis gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi_{eff} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_{Eds}} = 0,101 \quad (3.2.8)$$

Santykinis gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,105}{0,8} = 0,126 \quad (3.2.9)$$

$\xi < \xi_{lim}$ Sąlyga tenkinama.

Skaičiuojamas reikiamas lynų skerspjūvio plotas:

$$A_p = \xi_{eff} \cdot \eta \cdot \frac{f_{cd}}{f_{p0,1d}} \cdot b_{eff} \cdot d = 0,105 \cdot 1 \cdot \frac{45}{1440} \cdot 285 \cdot 360 = 7,947 \cdot 10^{-4} m^2 \quad (3.2.10)$$

Priimu 10Ø12,9 lynų. Bendras lynų skerspjūvio plotas $A_{sl} = 0,001 m^2$

Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas

Įstrižojo pjūvio stiprumas pakankamas tada, kai tenkinama sąlyga $V_{Ed} < V_{Rd}$.

Plokštę veikianti skersinė jėga:

$$V_{Ed} = \frac{q_{d,pl} \cdot L_{hc}}{2} = \frac{21,73 \cdot 12}{2} = 130,4 kN \quad (3.2.11)$$

Nesupleišėjusio betono zonose laikomoji skersinė jėga apskaičiuojama pagal formulę:

$$V_{Rd} = \frac{I_{hc} \cdot b_w \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}}}{S_{hc}} \quad (3.2.12)$$

Priimu kad įtempių nuostoliai dėl pradinio įtempimo 15%. Tuomet jėga gauname:

$$N_{Ed} = 0,85 \sigma_p \cdot A_{sl} = 0,85 \cdot 930 \cdot 1000 = 790,5 kN \quad (3.2.13)$$

Įtempiai veikiantys kiaurymėtosios plokštės skerspjūvį nuo lynų įtempimo įvertinus nuostolius:

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_{hc}} = \frac{790,5 \cdot 10^3}{1,922 \cdot 10^5} = 3,968 MPa < 0,2 f_{cd} = 0,2 \cdot 27 = 5,4 MPa \quad (3.2.14)$$

Tuomet pagal formulę 3.2.12 gauname:

$$V_{Rd} = \frac{4,146 \cdot 10^9 \cdot 286 \cdot \sqrt{1,8^2 + 1 \cdot 3,968 \cdot 1,8}}{1,313 \cdot 10^7} = 291 kN$$

Elemento atlaikomoji galia be skersinės armatūros $V_{Rd,c}$ supleišėjusioje zonoje apskaičiuojama pagal dvi formules:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (3.2.15)$$

$$V_{Rd,c} \geq V_{Rd,c,min} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (3.2.16)$$

kur:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k_1 = 0,15$$

Koeficientas k apskaičiuojamas pagal formulę:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{360}} = 1,745 \quad (3.2.17)$$

Nagrinėjamo pjūvio armavimo koeficientas ρ_l :

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{1000}{286 \cdot 360} = 0,009713 \quad (3.2.18)$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 1,751^{\frac{3}{2}} \cdot 45^{\frac{1}{2}} = 0,544 \text{ MPa} \quad (3.2.19)$$

Tuomet, $V_{Rd,c}$ ir $V_{Rd,c,min}$ gauname:

$$V_{Rd,c} = \left[0,12 \cdot 1,751 \cdot (100 \cdot 0,009713 \cdot 45)^{\frac{1}{3}} + (0,15 \cdot 3,968) \right] \cdot 286 \cdot 360 =$$

$$= 137,5 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c,min} = (0,544 + 0,15 \cdot 3,968) \cdot 286 \cdot 360 = 117,3 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} = 137,5 \text{ kN} \geq V_{Rd,c,min} = 117,3 \text{ kN}$$

Sąlyga tenkinama. Gauta $V_{Rd,c}$ reikšmė turėtų būti lyginama su skersine jėga, kuri veikia tame pjūvyje, kuriame ruože prasideda plyšių atsivėrimas.

Plokštės skerspjuvio atsparumas šlyties įtempiams

Apskaičiuojame tangentiniai įtempiai kurie sukelti nuo atraminių reakcijų:

$$\tau_{hc} = \frac{V_{Ed} \cdot S_{hc}}{I_{hc} \cdot b_w} = \frac{130,4 \cdot 10^3 \cdot 1,313 \cdot 10^7}{4,146 \cdot 10^9 \cdot 286} = 1,444 \text{ MPa} \quad (3.2.20)$$

Norint apskaičiuoti kiaurymėtosios plokštės skerspjuvio atsparumą šlyčiai, reikalingas gniuždomų juostų plotis b_{eff} . Pagal "fib. Special design considerations for precast prestressed hollow core floors" literatūrą šis dydis nustatomas taip:

6 lentelė. b_{eff} nustatymas.

h_{sl} [mm]	Cross-section type of the slab voids		Value $b_{eff,0}$ in relations to support beam type	
	oval/round	other	concrete	steel/composite
200	X		150	80
265	X		185	90
320		X	270	100
400		X	400	115

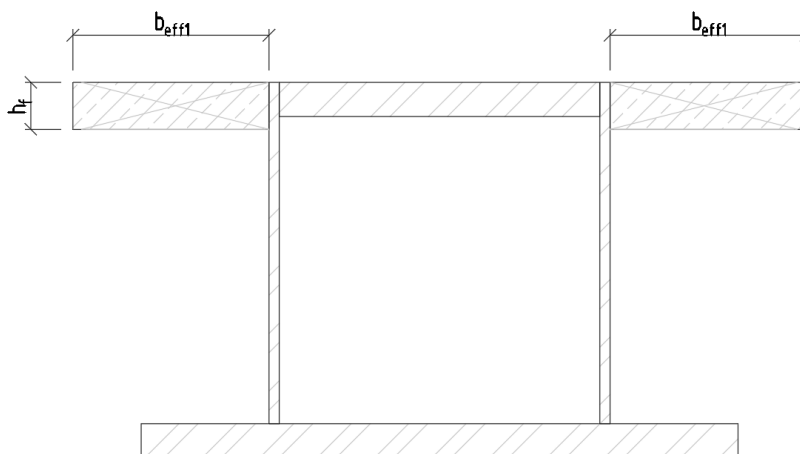
Šis dydis priklauso nuo to, kokio aukščio kiaurymėtoji plokštė ir koks atrėmimo elementas. Tai yra: ar plokštės remiamos ant gelžbetoninių rėmsijų, ar ant metalinių sijų. Ši lentelė yra pateikta kai sijos, ant kurios remiamos kiaurymėtos plokštės, tarpatramis yra $L_0=5m$. Kitiems tarpatramiams yra priimama tokia sąlyginė perskaičiavimo formulė:

$$b_{eff1} = \frac{L_S \cdot b_{eff0}}{L_0} = \frac{10 \cdot 0,115}{5} = 0,23 \text{ m} \quad (3.2.21)$$

kur :

$b_{eff0} = 115 \text{ mm}$ -dydis iš lentelės;

$L_S = 10m$ -sijos ilgis;

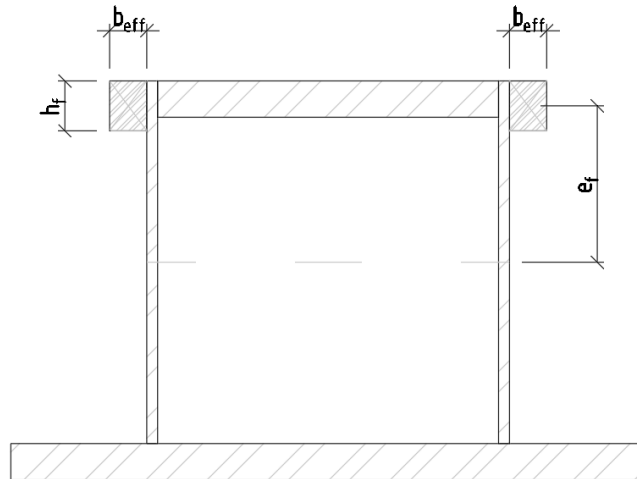


28 pav Kompozitinis skerspjūvis.

Kadangi naudojame kiaurymėtas gelžbetonines plokštes ir metalines sijas, kompozitinis skerspjūvis redukuojamas į metalinį skerspjūvį (su metalinėmis gniuždomomis juostomis). Dydis b_{eff1} perskaičiuojamas taip:

$$b_{eff} = b_{eff1} \frac{E_c}{E_s} = 0,23 \frac{36}{210} = 0,041 \text{ m} \quad (3.2.22)$$

Iš kompozitinio į metalinį konvertuotas skerspjūvis atrodys taip:



29 pav Konvertuotas kompozitinis skerspjūvis į metalinį.

Skaičiavimuose naudojamas šio skerspjūvio inercijos momentas:

$$I_{eff} = 2,062 \cdot 10^{-3} m^4$$

Atstumas nuo gniuždomųjų juostų vidurio iki neutraliosios skerspjūvio ašies:

$$e_f = 213 \text{ mm}$$

Gniuždomųjų juostų plotas apskaičiuojamas:

$$A_t = 2 \cdot b_{eff} \cdot h_f = 2 \cdot 0,041 \cdot 0,055 = 4,554 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (3.2.23)$$

Skaičiuojant šlyties srautą einantį išilgai sijos naudojama skaičiuotinė apkrovų reikšmė be savojo konstrukcijų svorio:

$$q_k = 1,3 \cdot 3,7 + 1,35 \cdot 5 \frac{kN}{m^2} = 11,56 \frac{kN}{m^2}$$

Sijos skersinė jėga nuo apkrovų neįskaitant savojo konstrukcijų svorio:

$$V_{B.Ed} = q_k \cdot L_{hc} \cdot \frac{L_s}{2} = 11,56 \cdot 12 \cdot \frac{10}{2} = 693,6 \text{ kN} \quad (3.2.24)$$

Šlyties srautas veikiantis išilgai sijos apskaičiuojamas:

$$v_{lw} = \frac{E_s \cdot A_t \cdot e_f \cdot V_{B.Ed}}{E_s \cdot I_{eff}} = \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 4,554 \cdot 213 \cdot 693,6 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3 \cdot 1,986 \cdot 10^9} = 326,3 \frac{kN}{m} \quad (3.2.25)$$

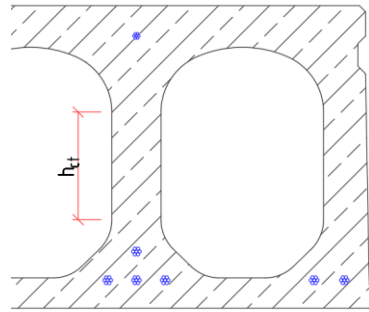
Apskaičiuojami šlyties įtempiai plokštės sienutėje:

$$\tau_{vl} = \frac{1,5 \cdot v_{lw} \cdot b_{hc}}{2(h_{hc} - h_{ct}) \cdot b_w} = \frac{1,5 \cdot 326,3 \cdot 1200}{2(400 - 142) \cdot 286} = 3,98 \text{ MPa} \quad (3.2.26)$$

$$h_{ct} = 142\text{mm}$$

Dydžio h_{ct} nustatymas:

Jeigu kiaurymės apvalios $h_{ct} = 0$.



30 pav Dydis h_{ct} .

Toliau skaičiuojame kokią įtaką turi įtempiami lynai ir kokius įtempius jie sukelia atraminėje skerspjūvio dalyje. Skaičiuojame koeficientą α , kuris įvertina nepilną įtempių perdavimą betonui dėl ne visiško lyno užsiinkaravimo:

$$\alpha = \frac{l_{sup} + 0,5b_{cr}}{L_{bpd}} = \frac{100 + 0,5 \cdot 258}{1006} = 0,228 \quad (3.2.27)$$

čia:

$l_{sup} = 100\text{mm}$ - atramos plotis;

$$b_{cr} = h_{hc} - h_{ct} = 400 - 142 = 258\text{ mm} \quad (3.2.28)$$

Pagal nagrinėtą literatūrą inkaravimo ilgis apskaičiuojamas taip:

$$L_{bpd} = \varnothing \cdot 1,2 \cdot 65^* = 12,9 \cdot 1,2 \cdot 65 = 1006\text{ mm} \quad (3.2.29)$$

$\varnothing = 12,9$ - lyno diametras;

65*- priimama kai lynų atleidimo metu betono cilindrinis gniuždomasis stipris yra nemažiau kaip 35 MPa.

Įtempiai nuo lynų įtempimo įvertinus ne pilną užsiinkaravimą:

$$\sigma_{cp} = \frac{\alpha \cdot \gamma_p \cdot \sigma_p \cdot A_{sl}}{A_{hc}} = \frac{0,228 \cdot 0,9 \cdot 930 \cdot 10 \cdot 100}{1,992 \cdot 10^5} = 0,956\text{ MPa} \quad (3.2.30)$$

Priimu, jog lynų sukelti tangentiniai įtempiai $\tau_{cp} = 0,15\text{ MPa}$ (vidutinė reikšmė iš literatūros)

Tikrinama ar jėga veikianti išilgai sijos skerspjūvio nėra kritinė jėga :

$$F_{fail} = \left(\frac{\tau_{hc} + \tau_{cp}}{f_{ctd}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{vt}}{f_{ctd}} \right)^2 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctd}} \leq 1 \quad (3.2.31)$$

$$F_{fail} = \left(\frac{1,444 + 0,15}{1,8} \right)^2 + \left(\frac{3,98}{1,8} \right)^2 - \frac{0,956}{1,8} = 5,141 \geq 1$$

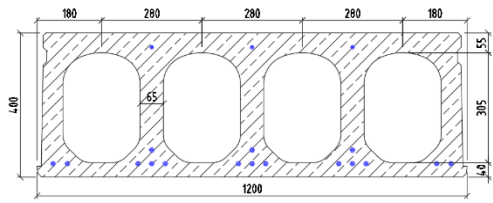
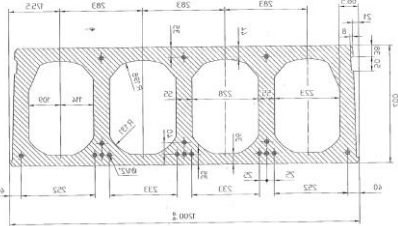
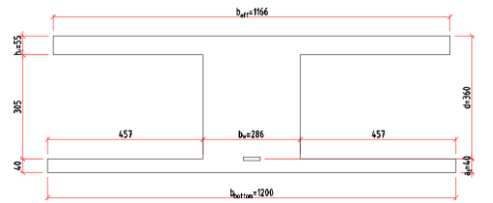
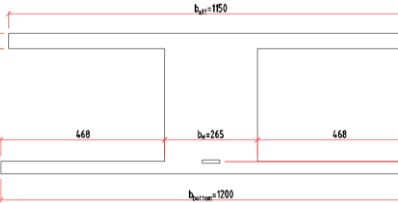
Gauname, jog sąlyga netenkinama. Kompozitinio skerspjūvio išnaudojimas per didelis ir jame atsiranda kritinė jėga. Kokius principinius įtempius sukelia kritinė jėga apskaičiuojama pagal formulę:

$$\sigma_1 = \frac{-\sigma_{cp}}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_{cp}^2}{4} + (\tau_{hc} + \tau_{cp})^2 + \tau_{vl}^2} \leq f_{ctd} \quad (3.2.32)$$

$$\sigma_1 = \frac{-0,956}{2} + \sqrt{\frac{0,956^2}{4} + (1,444 + 0,15)^2 + 3,98^2} = 3,835 \text{ MPa} \geq f_{ctd} = 1,8 \text{ MPa}$$

Apskaičiavę principinius tempimo įtempius gauname, jog sąlyga netenkinama, įtempiai viršijami daugiau nei du kartus lyginant su skaičiuotine tempiamojo betono stiprumo reikšme. Visi skaičiavimo rezultatai pateikiami žemiau esančioje lentelėje.

7 lentelė. Kiaurymėtu plokščių HCS 400 charakteristikos ir rezultatai.

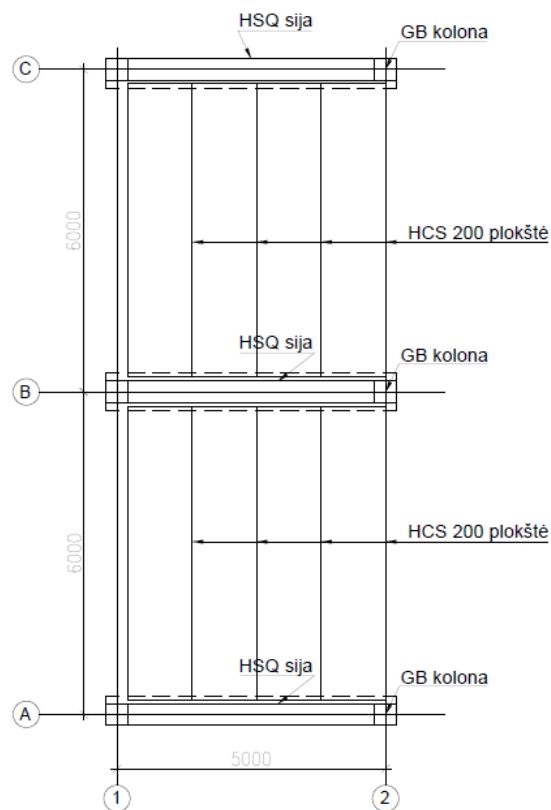
	Gamintojas 1	Gamintojas 2
Skerspjūvis		
Redukuotas skerspjūvis		
Ilgis L_{hc} (m)	12	12
Plokštės aukštis h_{hc} (mm)	400	400
Plokštės apačios plotis b_{hc} (mm)	1200	1200
Plokštės viršaus plotis b_{eff} (mm)	1166	1150
Virš.lentynos storis h_f (mm)	55	44
Efektyvus skerspjūvio aukštis d (mm)	360	365
Bendras sienučių plotis b_w (mm)	286	265
h_{ct} (mm)	142	
Plotas A_{hc} (mm ²)	$1,992 \cdot 10^5$	$1,786 \cdot 10^5$
Inercijos momentas I_{hc} (mm ⁴)	$4,146 \cdot 10^9$	$3,768 \cdot 10^9$
Statinis momentas S_{hc} (mm ³)	$1,313 \cdot 10^7$	$1,182 \cdot 10^7$
REZULTATAI		
M_{Ed} (kNm)	391,18	391,18
M_{Rd} (kNm)	468,2	396,04
μ_{Eds}	0,096	0,095
ξ_{eff}	0,101	0,1
ξ	0,126	0,124
A_{sl} (m ²)	0,001	0,001
ρ_l	0,0097	0,01
N_{Ed} (kN)	79,5	79,5
σ_{cp1} (MPa)	3,968	4,426
V_{Ed} (kN)	130,4	130,4

$V_{Rd,c}(kN)$	137,2	136,9
$V_{Ed,c,min}(kN)$	117	116,4
$V_{Rd}(kN)$	291	201,9
$V_{B.Ed}(kN)$	693,6	693,6
$\tau_{hc}(MPa)$	1,44	1,543
$b_{eff}(mm)$	41	41
$I_{eff}(m^4)$	$2,062 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$
$e_f(mm)$	213	221
$A_t(m^2)$	$4,554 \cdot 10^{-3}$	$3,643 \cdot 10^{-3}$
$v_{lw}\left(\frac{kN}{m}\right)$	326,3	275,2
$\tau_{vl}(MPa)$	3,98	4,45
$\sigma_{cp2}(MPa)$	0,956	0,955
$F_{fail}(< 1)$	5,141	6,467
$\sigma_1(MPa)$	3,835	4,308

Plokščių skaičiavimo ataskaitas žr. 6 ir 7 priede.

Toliau analogiški skaičiavimai atliekami kitoms situacijoms:

Situacija 2

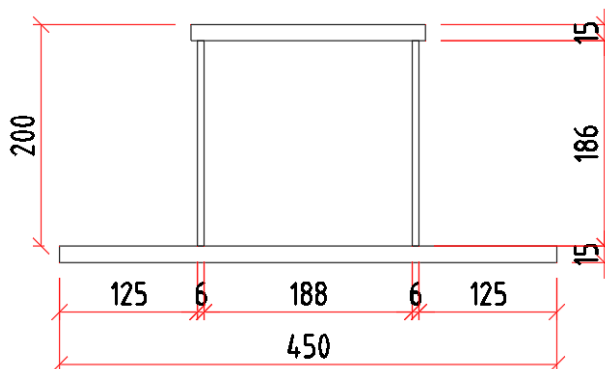


31 pav. Situacija 2. (HSQ metalinė sija 5m. ir HCS 200 kiaurymėta plokštė 6m.)

8 lentelė. Naudojamos apkrovos (2 situacija)

Apkrovos tipas	kN/m²
Nuolatinės apkrovos (DL):	
Kiaurymėtos plokštės savasis svoris (HCS200)	3,3
Grindų detalė	2
Pertvaros	1,2
Instaliacijos	0,5
Σ	7
Kintamos apkrovos (LL):	
Naudojimo apkrova	5
Σ	5

Šiai situacijai suprojektuota reikiamo stiprumo ir skerspjūvio HSQ tipo plieninė sija.



32 pav Metalinės HSQ tipo sijos skerspjūvis. (2 situacija).

9 lentelė. Metalinės HSQ sijos duomenys. (2 situacija).

Plieno klasė	Tamprumo modulis E_s (MPa)	Inercijos momentas I_y (mm ⁴)	Sijos ilkinis (mm)	Sijos išnaudojimas (%)
S355	210000	$9,732 \cdot 10^7$	25	95

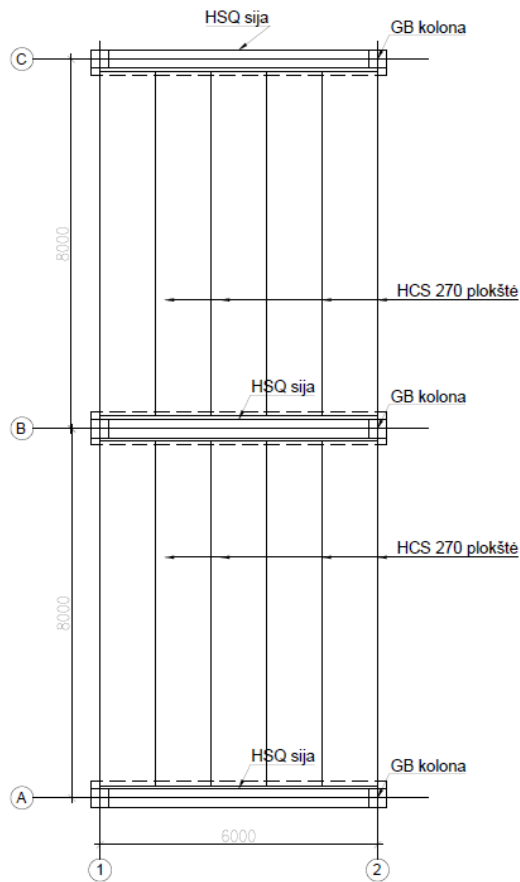
Sijos skaičiavimo ataskaitą žiūrėti „3 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (2 situacija)

10 lentelė. Kiaurymėtų plokščių HCS 200 charakteristikos ir rezultatai.

	Gamintojas 1	Gamintojas 2
Skerspjūvis		
Redukuotas skerspjūvis		
Ilgis L_{hc} (m)	6	6
Plokštės aukštis h_{hc} (mm)	200	200

Plokštės apačios plotis b_{hc} (mm)	1200	1200
Plokštės viršaus plotis b_{eff} (mm)	1156	1146
Virš.lentynos storis h_f (mm)	35	22,5
Efektyvus skerspjūvio aukštis d (mm)	160	165
Bendras sienučių plotis b_w (mm)	336	230
h_{ct} (mm)	0	0
Plotas A_{hc} (mm ²)	$1,217 \cdot 10^5$	$0,884 \cdot 10^5$
Inercijos momentas I_{hc} (mm ⁴)	$6,104 \cdot 10^8$	$4,885 \cdot 10^8$
Statinis momentas S_{hc} (mm ³)	$3,959 \cdot 10^6$	$3,029 \cdot 10^6$
REZULTATAI		
M_{Ed} (kNm)	86,13	86,13
M_{Rd} (kNm)	127,595	86,885
μ_{Eds}	0,108	0,102
ξ_{eff}	0,114	0,108
ξ	0,143	0,135
A_{sl} (m ²)	0,0006	0,0006
ρ_l	0,011	0,016
N_{Ed} (kN)	474,3	474,3
σ_{cp1} (MPa)	3,897	5,368
V_{Ed} (kN)	57,42	57,42
$V_{Rd,c}$ (kN)	79,03	68,3
$V_{Rd,c,min}$ (kN)	67,13	55,76
V_{Rd} (kN)	165,9	133,2
$V_{B,Ed}$ (kN)	173,4	173,4
τ_{hc} (MPa)	1,108	1,548
b_{eff} (mm)	14	14
I_{eff} (m ⁴)	$1,084 \cdot 10^{-3}$	$1,048 \cdot 10^{-3}$
e_f (mm)	125	133
A_t (m ²)	$1,008 \cdot 10^{-3}$	$6,309 \cdot 10^{-4}$
$v_{lw} \left(\frac{kN}{m} \right)$	192	138,8
τ_{vl} (MPa)	2,571	2,716
σ_{cp2} (MPa)	0,738	1,017
$F_{fail} (< 1)$	2,119	2,602
σ_1 (MPa)	2,517	2,735

Situacija 3

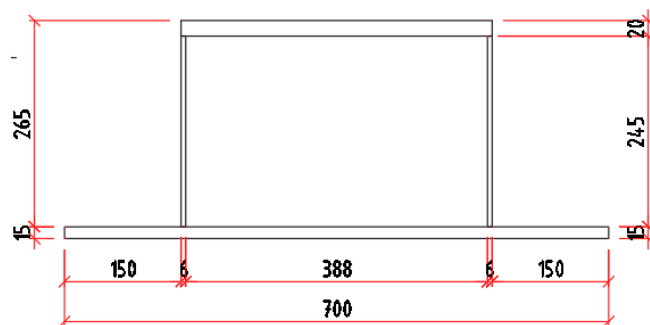


33 pav. Situacija 3. (HSQ metalinė sija 6m. ir HCS 270 kiaurymėta plokštė 8m.)

11 lentelė. Naudojamos apkrovos (3 situacija)

Apkrovos tipas	kN/m ²
Nuolatinės apkrovos (DL):	
Kiaurymėtos plokštės savasis svoris (HCS270)	3,7
Grindų detalė	2
Pertvaros	1,2
Instaliacijos	0,5
Σ	7,4
Kintamos apkrovos (LL):	
Naudojimo apkrova	5
Σ	5

Šiai situacijai suprojektuota reikiamo stiprumo ir skerspjūvio HSQ tipo plieninė sija.



34 pav Metalinės HSQ tipo sijos skerspjūvis. (3 situacija).

12 lentelė. Metalinės HSQ sijos duomenys. (3 situacija).

Plieno klasė	Tamprumo modulis E_s (MPa)	Inercijos momentas I_y (mm ⁴)	Sijos ilkinis (mm)	Sijos išnaudojimas (%)
S355	210000	$2,997 \cdot 10^8$	24	96

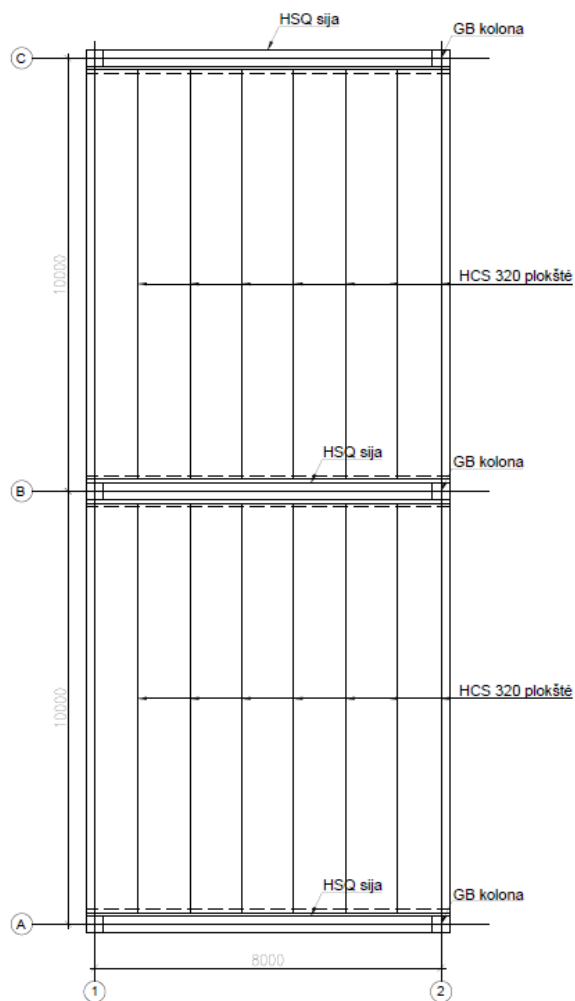
Sijos skaičiavimo ataskaitą žiūrėti „4 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (3 situacija)

13 lentelė. Kiaurymėtų plokščių HCS 270 charakteristikos ir rezultatai.

	Gamintojas 1	Gamintojas 2
Skerspjūvis		
Redukuotas skerspjūvis		
Ilgis L_{hc} (m)	8	8
Plokštės aukštis h_{hc} (mm)	265	265
Plokštės apačios plotis b_{hc} (mm)	1200	1200
Plokštės viršaus plotis b_{eff} (mm)	1154	1164
Virš.lentynos storis h_f (mm)	40	40
Efektyvus skerspjūvio aukštis d (mm)	225	230
Bendras sienučių plotis b_w (mm)	240	240
h_{ct} (mm)	0	0

Plotas A_{hc} (mm ²)	$1,384 \cdot 10^5$	$0,884 \cdot 10^5$
Inercijos momentas I_{hc} (mm ⁴)	$1,329 \cdot 10^9$	$4,885 \cdot 10^8$
Statinis momentas S_{hc} (mm ³)	$6,313 \cdot 10^6$	$3,029 \cdot 10^6$
REZULTATAI		
M_{Ed} (kNm)	158,304	158,304
M_{Rd} (kNm)	208,385	213,37
μ_{Eds}	0,1	0,096
ξ_{eff}	0,106	0,101
ξ	0,132	0,126
A_{sl} (m ²)	0,0008	0,0008
ρ_l	0,015	0,014
N_{Ed} (kN)	632,4	632,4
σ_{cp1} (MPa)	4,569	4,569
V_{Ed} (kN)	79,15	79,15
$V_{Rd,c}$ (kN)	88,34	89,92
$V_{Rd,c,min}$ (kN)	71,63	73,22
V_{Rd} (kN)	171,1	171,1
$V_{B.Ed}$ (kN)	277,4	277,4
τ_{hc} (MPa)	1,576	1,566
b_{eff} (mm)	19	19
I_{eff} (m ⁴)	$3,555 \cdot 10^{-3}$	$3,555 \cdot 10^{-3}$
e_f (mm)	128	128
A_t (m ²)	$1,555 \cdot 10^{-3}$	$1,555 \cdot 10^{-3}$
v_{lw} ($\frac{kN}{m}$)	155,4	148
τ_{vl} (MPa)	2,198	2,094
σ_{cp2} (MPa)	1,022	1,019
$F_{fail} (< 1)$	1,834	1,696
σ_1 (MPa)	2,325	2,245

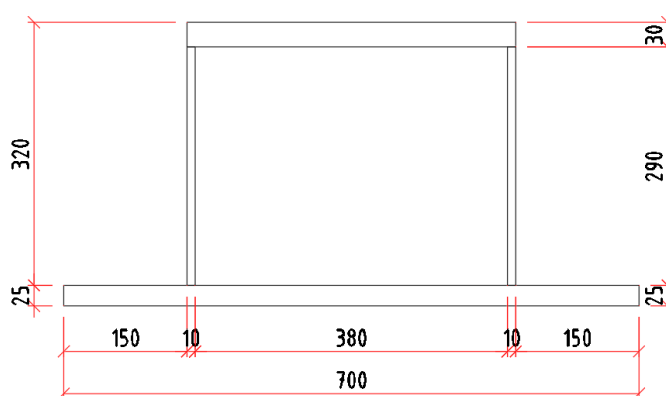
Situacija 4



35 pav. Situacija 4. (HSQ metalinė sija 8m. ir HCS 320 kiaurymėta plokštė 10m.)

14 lentelė. Naudojamos apkrovos (4 situacija)

Apkrovos tipas	kN/m ²
Nuolatinės apkrovos (DL):	
Kiaurymėtos plokštės savasis svoris (HCS270)	4,2
Grindų detalė	2
Pertvaros	1,2
Instaliacijos	0,5
Σ	7,9
Kintamos apkrovos (LL):	
Naudojimo apkrova	5
Σ	5



36 pav Metalinės HSQ tipo sijos skerspjūvis. (4 situacija).

15 lentelė. Metalinės HSQ sijos duomenys. (4 situacija).

Plieno klasė	Tamprumo modulis E_s (MPa)	Inercijos momentas I_y (mm ⁴)	Sijos ilkinis (mm)	Sijos išnaudojimas (%)
S355	210000	$7,839 \cdot 10^8$	40	85

Sijos skaičiavimo ataskaitą žiūrėti „5 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (4 situacija)

16 lentelė. Kiaurymėtų plokščių HCS 320 charakteristikos ir rezultatai.

	Gamintojas 1	Gamintojas 2
Skerspjūvis		
Redukuotas skerspjūvis		
Ilgis L_{hc} (m)	10	10
Plokštės aukštis h_{hc} (mm)	320	320
Plokštės apačios plotis b_{hc} (mm)	1200	1200
Plokštės viršaus plotis b_{eff} (mm)	1150	1144
Virš.lentynos storis h_f (mm)	38	35
Efektyvus skerspjūvio aukštis d (mm)	280	285
Bendras sienučių plotis b_w (mm)	270	262

h_{ct} (mm)	78	105
Plotas A_{hc} (mm ²)	$1,550 \cdot 10^5$	$1,474 \cdot 10^5$
Inercijos momentas I_{hc} (mm ⁴)	$2,11 \cdot 10^9$	$2,012 \cdot 10^9$
Statinis momentas S_{hc} (mm ³)	$8,293 \cdot 10^6$	$7,881 \cdot 10^6$
REZULTATAI		
M_{Ed} (kNm)	257,475	257,475
M_{Rd} (kNm)	262,31	265,884
μ_{Eds}	0,106	0,103
ξ_{eff}	0,112	0,109
ξ	0,14	0,136
A_{sl} (m ²)	0,0008	0,0008
ρ_l	0,011	0,011
N_{Ed} (kN)	632,4	632,4
σ_{cp1} (MPa)	4,08	4,29
V_{Ed} (kN)	103	103
$V_{Rd,c}$ (kN)	106,9	108
$V_{Rd,c,min}$ (kN)	90,76	91,73
V_{Rd} (kN)	277,4	221,5
$V_{B.Ed}$ (kN)	462,4	462,4
τ_{hc} (MPa)	1,499	1,54
b_{eff} (mm)	29	29
I_{eff} (m ⁴)	$8,41 \cdot 10^{-4}$	$8,358 \cdot 10^{-4}$
e_f (mm)	178	182
A_t (m ²)	$2,189 \cdot 10^{-3}$	$2,016 \cdot 10^{-3}$
$v_{lw} \left(\frac{kN}{m} \right)$	214,2	203
τ_{vl} (MPa)	2,951	3,243
σ_{cp2} (MPa)	0,863	0,847
$F_{fail} (< 1)$	3,047	3,657
σ_1 (MPa)	2,976	3,258

Plokščių įstrižieji pjūviai buvo skaičiuojami ir lyginami su šiomis formulėmis:

1. Priimant, kad įstrižasis pjūvis nesupleišęs, skersinės jėgos laikomoji galia:

$$V_{Rd} = \frac{I_{hc} \cdot b_w \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_l \sigma_{cp} f_{ctd}}}{S_{hc}}$$

2. Elemento be skersinės armatūros atlaikomoji galia, supleišėjusiose zonose.

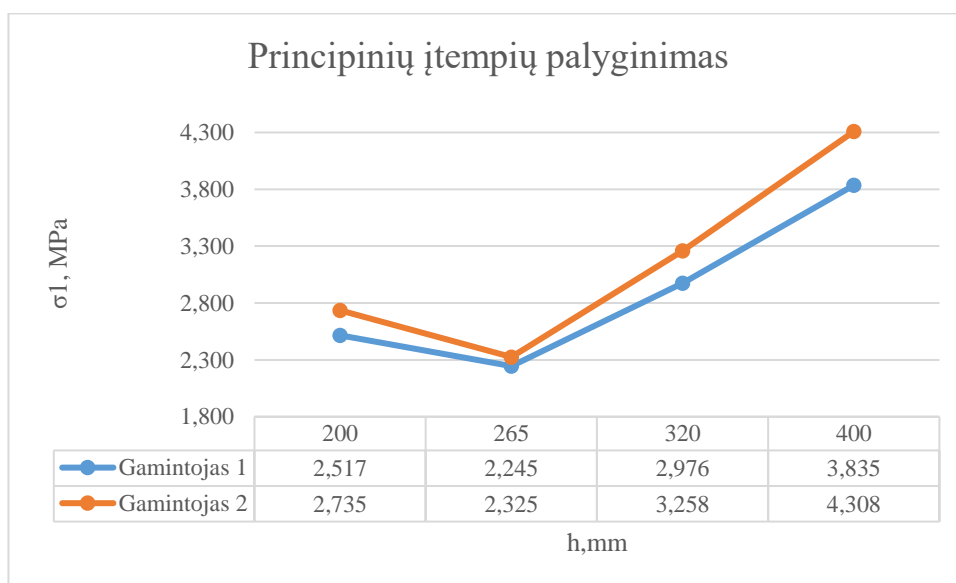
$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{Rd,c} \geq V_{Rd,c,min} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

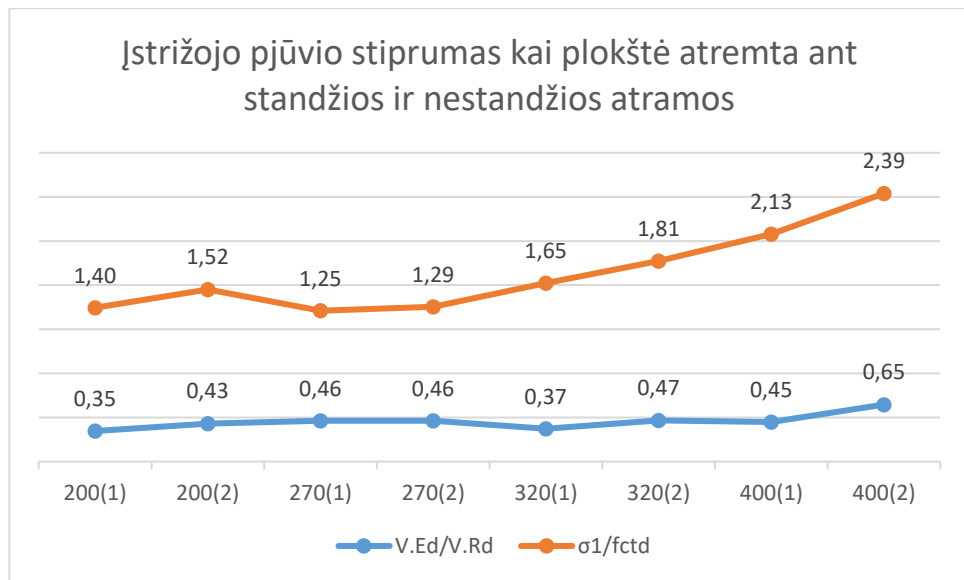
Lentelėje pateikiami skersinių jėgų reikšmės ir plokščių įstrižojo pjūvio išnaudojimo rezultatai.

17 lentelė. Kiaurymėtų plokščių įstrižojo pjūvio laikomoji galia.

h(gamintojas)	V.Ed (kN)	V.Rd (kN)	V.Ed/V.Rd	V.Rdc (kN)
200(1)	57,42	165,9	0,35	79,03
200(2)	57,42	133,2	0,43	68,3
270(1)	79,15	171,1	0,46	88,34
270(2)	79,15	171,1	0,46	89,92
320(1)	103,0	277,4	0,37	106,9
320(2)	103,0	221,5	0,47	108,0
400(1)	130,4	291	0,45	137,2
400(2)	130,4	201,9	0,65	136,9



Atlikę realių situacijų analizę pagal suomių standartą „Code card No.18“ matome, jog, kaip ir buvo nustatyta pirmoje skaičiavimų dalyje, įtempiai didėja didėjant plokštės skerspjūviui. Taip pat, principinių įtempių reikšmės gautos visose situacijose didesnės už tempiamojo betono skaičiuotinę reikšmę f_{ctd} , o dviejose situacijose viršyta ir charakteristinio betono tempiamojo stiprio reikšmė $f_{ctk0,05}$. Tai užfiksuota būtent aukštesnio skerspjūvio plokštėse 320 mm ir 400 mm aukščio. Taip pat, nustatyta, jog tarp pirmojo ir antrojo gamintojų rezultatai skiriasi apie 6-11%. Daugiausia reikšmė f_{ctd} viršijama 2,4 karto.



Iš šio grafiko matome, jog įvertinus lanksčias atramas įstrižojo pjūvio stiprumas gaunamas kur kas mažesnis lyginant su standžia atrama, kur šlyties įtempiai nevertinami. Didžiausias skersinės jėgos laikomosios galios viršijimas nustatytas antrojo gamintojo 400mm aukščio plokštėje, kur išnaudojimas yra beveik 2,5 karto didesnis.

Literatūroje rašoma, jog plokščių galuose kiaurymės gali būti užpildomos betonu. Tokiu atveju yra pateikiama lentelė įtempių mažinimo koeficiento β_f , kuomet visos plokštės kiaurymės užbetonuotos. Koeficiento reikšmės pateikiamos lentelėje:

18 lentelė. Koeficientas β_f .

Plokštės aukštis (mm)	200	265	320	400
Kai kiaurymių užpildymas <50mm	1,0	1,0	1,0	1,0
Kai užpildymo ilgis didesnis arba lygus kiaurymės diametru. Visos kiaurymės užpildytos.	0,7	0,7	0,5	0,5

Pritaikius šią metodiką pirmajai situacijai principinių įtempių formulę gauname:

$$\sigma_1 = \frac{-\sigma_{cp}}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_{cp}^2}{4} + (\tau_{hc} + \tau_{cp})^2 + \beta_f \tau_{vl}^2} \leq f_{ctd} \quad (3.2.33)$$

$$\beta_f = 0,5$$

$$\sigma_1 = \frac{-0,956}{2} + \sqrt{\frac{0,956^2}{4} + (1,444 + 0,15)^2 + 0,5 \cdot 3,98^2} = 2,116 \text{ MPa} > f_{ctd} = 1,8 \text{ MPa}$$

Įvertinus β_f koeficientą principiniai įtempiai sumažėjo 81%, tačiau sąlyga neviršyti skaičiuotinio betono tempiamojo stiprio netenkinama. Įtempiai viršijami 18%. Šioje situacijoje, sprendžiant iš skaičiavimų rezultatų, vien plokščių galų kamščių ir siūlų užbetonavimo nepakaktų ir reiktų priimti daugiau sprendimų, kad ši situacija būtų tinkamai įvertinta ir suprojektuota.

Išvados

1. Atlikus eksperimentą buvo nustatyta, jog ir mūsų šalyje gaminamų kiaurymėtujų plokščių skerspjūviuose gali atsirasti didesni įtempiai didesnio skerspjūvio plokštėse nekeičiant apkrovimo jėgos. Tai nustatėme naudodami baigtinių elementų skaičiavimo programą. Tai įrodo, jog šią problemą reikia vertinti projektavimo stadijoje, ypač, kai, projektuojamos aukšto skerspjūvio plokštės, kurios remiamos ant liaunų atramų (metalinių, gelžbetoninių sijų). Eksperimento metu nustatyta, jog aukšto skerspjūvio plokštės sienutėse gali susikcentruoti įtempiai, kurie gali būti ne tik didesni už betono skaičiuotinį tempiamąjį stiprį f_{ctd} , bet ir už charakteristinę tempiamo betono stiprio reikšmę $f_{ctk,0.05}$. Tai reiškia, jog tokiu atveju, kiaurymėtos plokštės atraminėje dalyje gali atsirasti plyšiai, įtrūkimai, suirimai.
2. Eksperimento metu buvo įrodyta kelių kiaurymių užmonolitinimo nauda. Buvo nustatyta jog užmonolitinus kiaurymes atraminėje plokštės dalyje skerspjūvyje įvyksta įtempių persiskirstymas ir reikšmės tampa kur kas mažesnės. Skerspjūviuose užpiltomis kiaurymėmis nebuvo gauta artimų reikšmių betono charakteristinei tempiamojo stiprio reikšmei $f_{ctk,0.05}$. Buvo nustatyta, jog vienam iš skerspjūvių maksimalus įtempis sumažėjo net 56%, lyginant su tuščiomis kiaurymėmis ir užpildytomis.
3. Antroje dalyje, atlikus skaičiavimus pagal suomių standarto „Code card No.18“ metodiką ir pritaikius realioms situacijoms, buvo nustatyta, pirmoje situacijoje šlyties srautas išilgai sijos (kompozitinio skerspjūvio) sukelia kritinę jėgą. Apskaičiavę svarbiausius (principinius) įtempius, kurie įvertina ir atraminių jėgų, lynų sukiamus įtempius ir šlyties įtempius, rezultatą gavome – įtempiai viršija skaičiuotinę tempiamo betono reikšmę daugiau nei du kartus. Pirmojo gamintojo 400mm aukščio plokštėje skaičiuotinė reikšmė viršyta 2,1 karto. Antrojo gamintojo –2,4 karto. Apibendrinant šiuos rezultatus, galima priimti išvadą, jog šlyties įtempiai, kurie atsiranda skerspjūvyje dėl lanksčių atramų, turi labai didelę įtaką plokštės atraminės dalies atlaikomajai galiai.
4. Taip pat,- buvo tikrinama, kokią įtaką turi plokščių kiaurymių kamščiai, kurie naudojami, kad siūlių betonas nesubėgtų į plokščių kiaurymes. Literatūroje pateiktoje metodikoje, kamščių įtaka įvertinama taip: jeigu kamščio panaudojimas leidžia užbetonuoti daugiau nei 50 mm ilgio plokštės kiaurymių atraminėje dalyje, galima pritaikyti β_f koeficientą, kuris priklauso nuo naudojamų plokščių aukščio. (β_f koeficiento reikšmės pateikiamos 18 lentelėje). β_f - tai mažinamasis šlyties įtempių τ_{vl} koeficientas. Šis metodas buvo pritaikytas 1 situacijos 1 gamintojo plokštei. Nustatyta, jog principiniai įtempiai sumažėjo 81%, tačiau gauta reikšmė vis tiek buvo didesnė nei betono skaičiuotinis tempiamasis stipris. Sąlyga netenkinama ir įtempiai didesni 18%.
5. Taigi, apžvelgiant visus šio projekto rezultatus gavome, kad betono skaičiuotinė tempimo galia f_{ctd} buvo dažnai viršijama principinių įtempių reikšmės. Iš to galima spręsti, jog ir Lietuvoje gaminamos plokštės turėtų būti tikrinamos ir vertinamos, kai plokštės remiamos ant liaunų atramų (sijų). Turi būti tikrinama ar bus pakankamas atraminės dalies stiprumas, kai bus įvertinti atsirandantys papildomi šlyties įtempiai skerspjūvyje. Kadangi, „plonų grindų“ sprendimas (slim floor structure) tampa vis populiariesnis dėl savo praktiškumo ir pastatų aukštų aukščio sumažinimo, lanksčių atramų problema turėtų būti atsakingiau vertinama, o projektavimui Europoje naudojami standartai atnaujinti. Tiek EC2 (EN 1992-1-1:2004) tiek ir kiaurymėtu plokščių standarte (EN 1168:2005) ši problema turėtų būti pristatyta plačiau, o skaičiavimo būdai ir sprendimo metodai aiškiai apibrėžti.

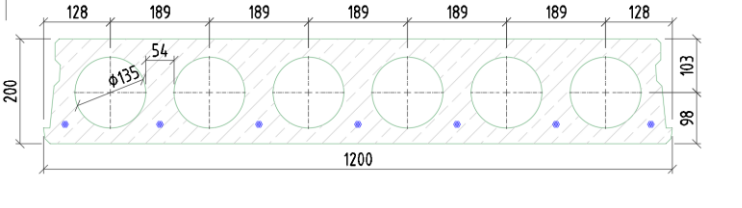
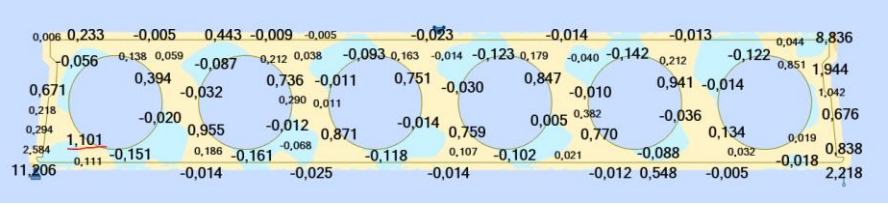
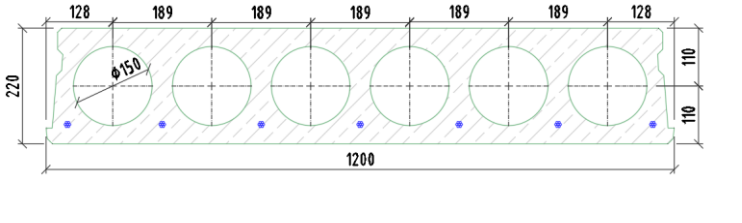
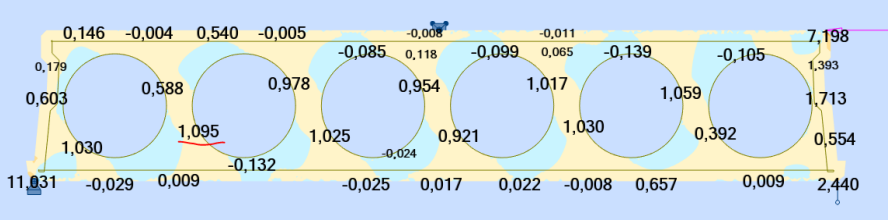
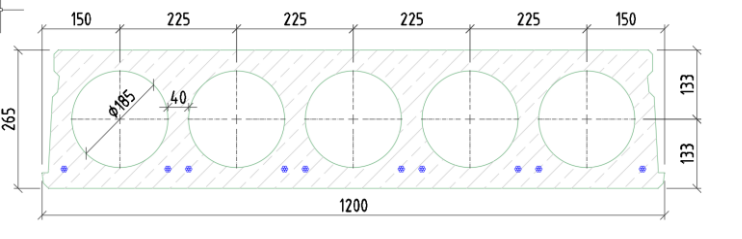
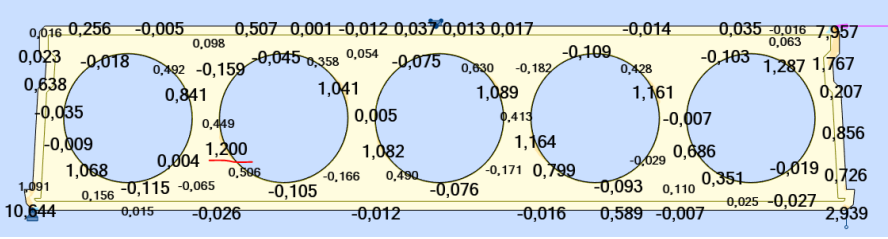
Literatūros sąrašas

1. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
2. EN 1168:2005. Precast concrete products- Hollow core slabs.
3. Pajari M. Yang L. Shear capacity of Hollow Core slabs on flexible supports, VTT Research Notes 1587, Espoo, 1994.
4. Pajari M., Koukkari H. Shear resistance of PHC slabs supported on beams I: Tests, Journal of Structures Engineering, nr 9, 1998.
5. Pajari M. Shear resistance of PHC slabs supported on beams II: Analysis, Journal of Structures Engineering, nr 9, 1998.
6. Pajari M. Prestressed Hollow Core slabs supported on beams. Finnish shear tests on floors in 1990–2006, VTT Working Papers 148, Espoo, 2010.
7. Derkowski W. Surma M. Shear capacity of prestressed hollow core slabs on flexible supports, Technical transactions, Civil engineering, 2-B/2013.
8. Surma M., Prestressed hollow core slabs on flexible support- design models and computational examples, MSc., Cracow University of Technology, Civil Engineering Faculty, Institute for Building Materials and Structures, Warszawska 24, 30-155 Kraków, POLAND.
9. Behaviour and design of steel-concrete composite structures, PG 0917. Psl. 138-156.
10. Roggendorf T. Zum Tragverhalten von spannbeton-fertigdecken bei biegeweicher Lagerung. 2010.
11. Special design considerations for precast prestressed hollow core floors, 2000.
12. Buettner D.R., Becker R.J., PCI manual for the design of hollow core slabs. Second edition. Chicago, 1998.
13. Celal. M. S. Shear behaviour of precast/prestressed hollow-core slabs. Winnipeg, CANADA, 2011.
14. El-Arab, I.M.E. (2017) Web Shear Strengthening Technique of Deep Precast Prestressed Hollow Core Slabs under Truck Loads. Journal of Building Construction and Planning Research, 5, 129-145.
15. Derkowski W., Surma M., Cholewicki A. Analytical model for determining the influence of support flexibility on shear capacity of hollow core slabs, Krakow, POLAND, 2018.

Priedai

1 priedas. Plokščių skerspjūvių principinių įtempių diagramos

19 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant pirmąją skaičiuojamąją schemą.

Eil. Nr.	Skerspjūvio pavadinimas	Skerspjūvis	Principinių įtempių diagrama	Maksimalūs principiniai įtempiai, (MPa)
1.	PKE20 Gamintojas 1			1,101
2.	PKE22 Gamintojas 1			1,095
3.	PKE27 Gamintojas 1			1,200

4.	PKE32 Gamintojas 1			2,038
5.	PKE40 Gamintojas 1			1,961
6.	HCS 20 Gamintojas2			1,173
7.	HCS 25 Gamintojas2			1,245

8.	HCS 30 Gamintojas2			1,313
9.	HCS 40 Gamintojas2			2,237

20 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant antrąją skaičiuojamąją schemą.

Eil. Nr.	Skerspjūvio pavadinimas	Skerspjūvis	Principinių įtempių diagrama	Maksimalūs principiniai įtempiai (MPa)
1.	PKE20 Gamintojas 1			1,020
2.	PKE22 Gamintojas 1			1,127
3.	PKE27 Gamintojas 1			1,113
4.	PKE32 Gamintojas 1			1,912

5.	PKE40 Gamintojas 1			1,907
6.	HCS 20 Gamintojas2			1,099
7.	HCS 25 Gamintojas2			1,182

8.	HCS 30 Gamintojas2			1,243
9.	HCS 40 Gamintojas2			2,270

21 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant trečiąją skaičiuojamąją schemą.

Eil. Nr.	Skerspjūvio pavadinimas	Skerspjūvis	Principinių įtempių diagrama	Maksimalūs principiniai įtempiai (MPa)
1.	PKE20 Gamintojas 1			0,569
2.	PKE22 Gamintojas 1			0,809
3.	PKE27 Gamintojas 1			0,944

4.	PKE32 Gamintojas 1			1,666
5.	PKE40 Gamintojas 1			1,825
6.	HCS200 Gamintojas2			0,745

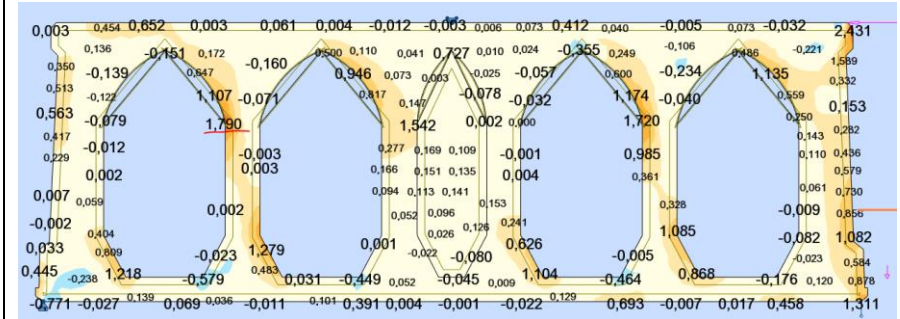
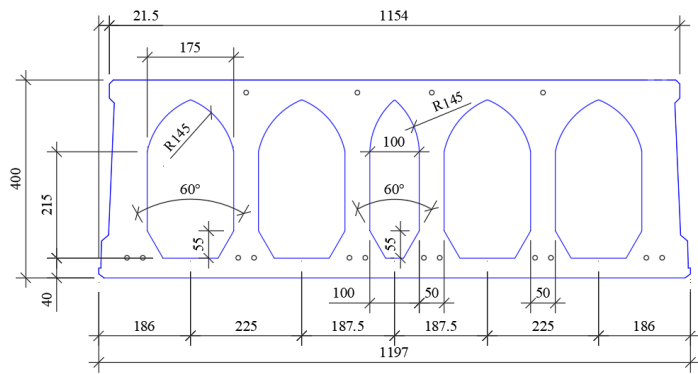
7.	HCS 250 Gamintojas2			1,036
8.	HCS 300 Gamintojas2			1,246
9.	HCS 400 Gamintojas2			1,874

22 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant pirmąją skaičiuojamąją schemą (viena užpildyta kiauryme).

Eil. Nr.	Skerspjūvio pavadinimas	Skerspjūvis	Principinių įtempių diagrama	Maksimalūs principiniai įtempiai (MPa)
1.	PKE20 Gamintojas 1			0,990
2.	PKE22 Gamintojas 1			1,082
3.	PKE27 Gamintojas 1			1,118
4.	PKE32 Gamintojas 1			1,689

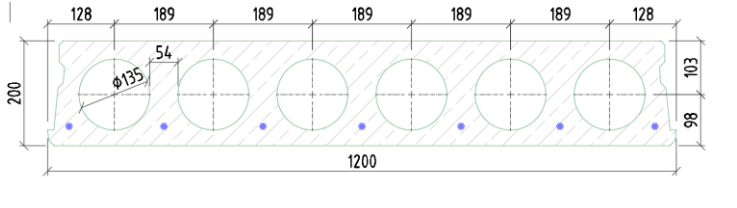
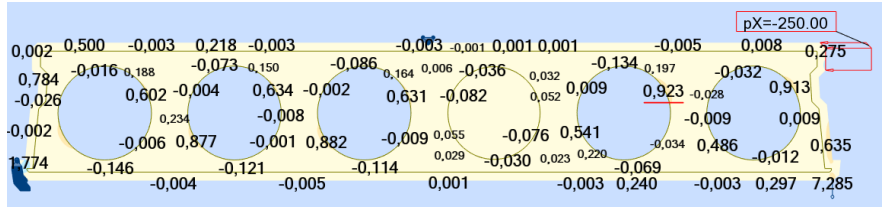
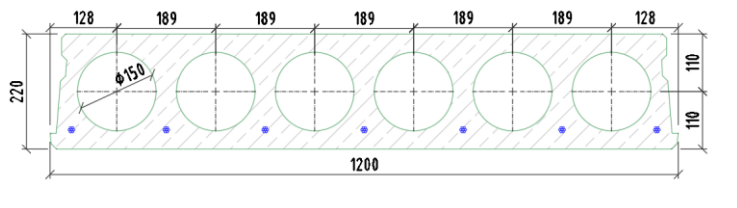
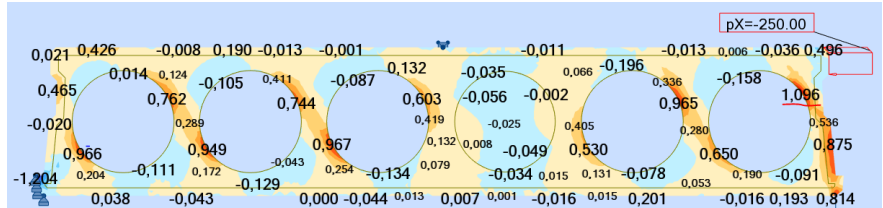
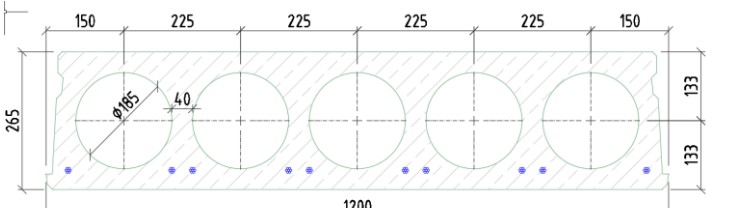
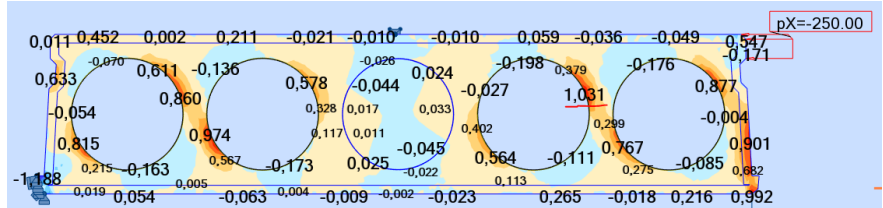
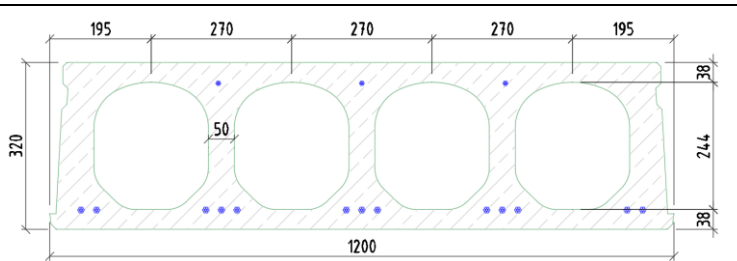
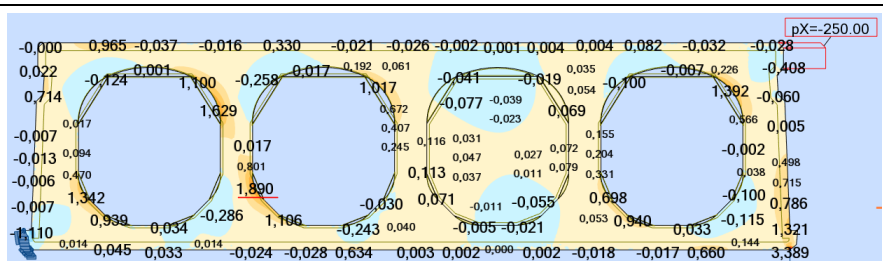
5.	PKE40 Gamintojas 1			1,813
6.	HCS 200 Gamintojas2			0,859
7.	HCS 250 Gamintojas2			1,245
8.	HCS 300 Gamintojas2			1,759

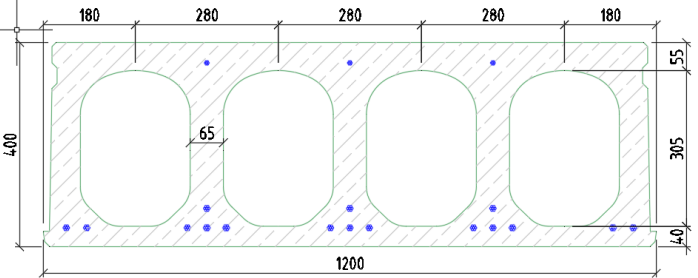
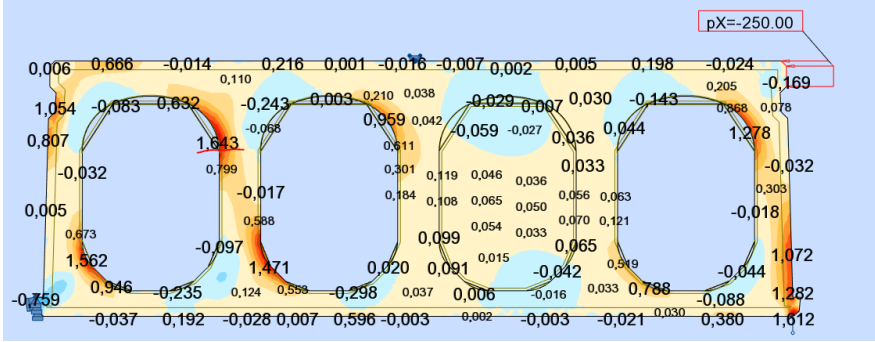
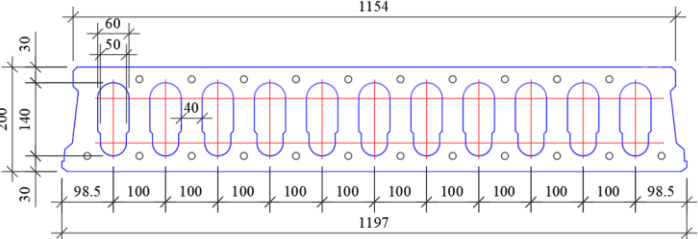
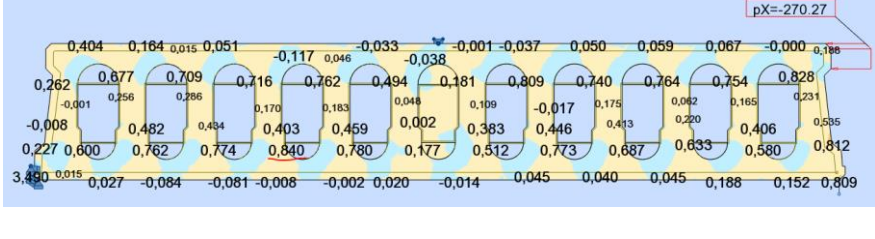
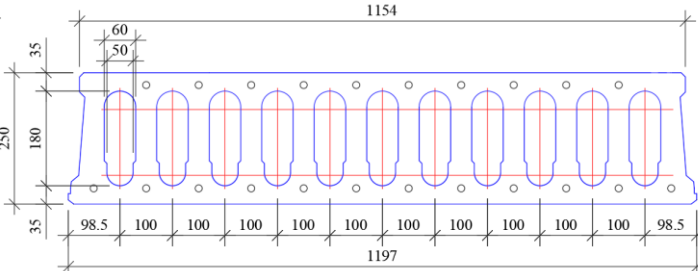
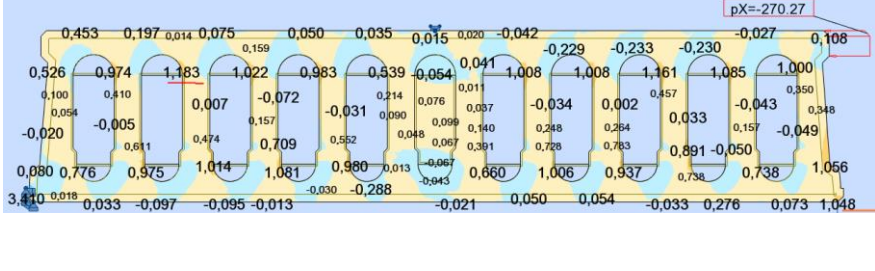
9. HCS 400
Gamintojas2



1,790

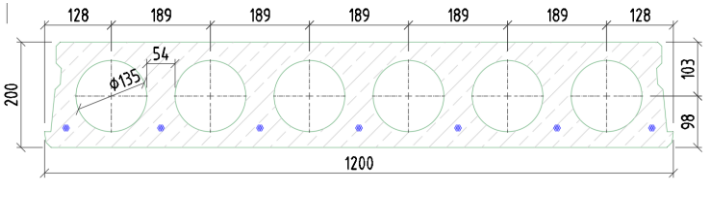
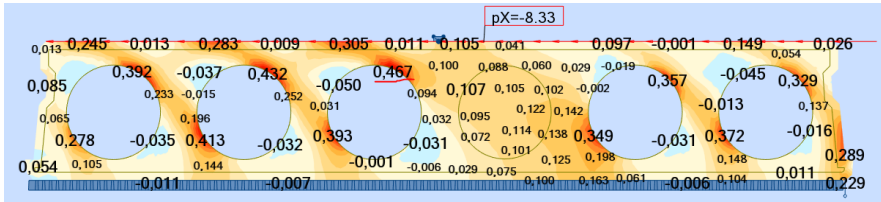
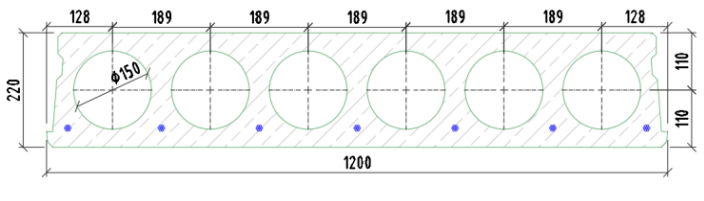
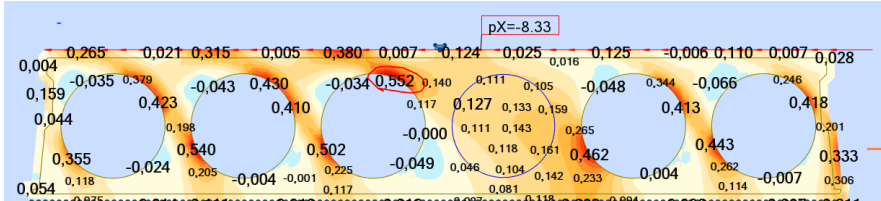
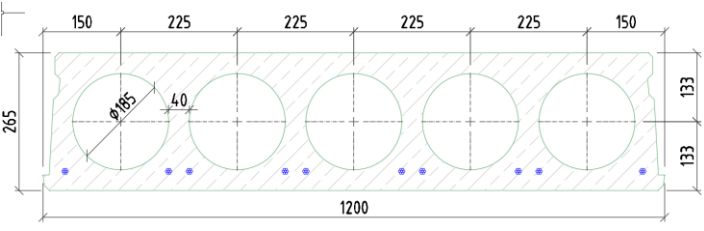
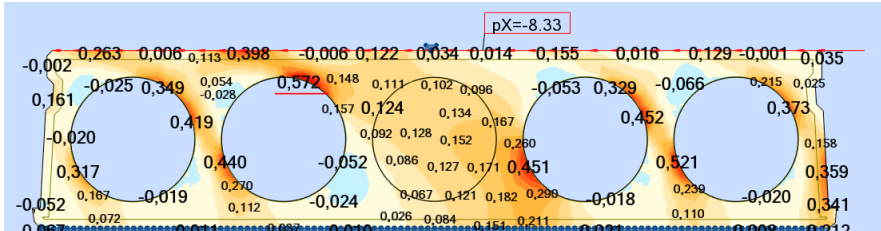
23 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant antrąją skaičiuojamąją schemą (viena užpildyta kiauryme).

Eil. Nr.	Skerspjūvio pavadinimas	Skerspjūvis	Principinių įtempių diagrama	Maksimalūs principiniai įtempiai(MPa)
1.	PKE20 Gamintojas 1			0,923
2.	PKE22 Gamintojas 1			1,096
3.	PKE27 Gamintojas 1			1,031
4.	PKE32 Gamintojas 1			1,890

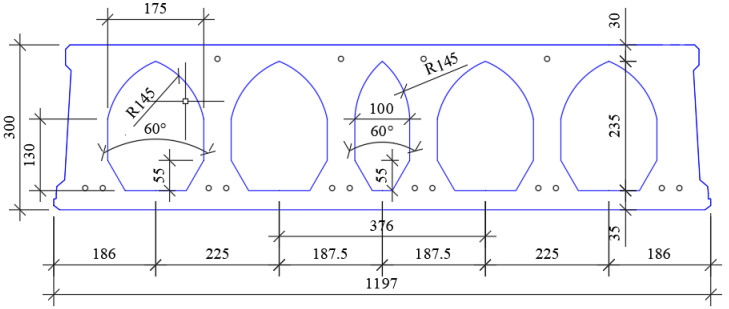
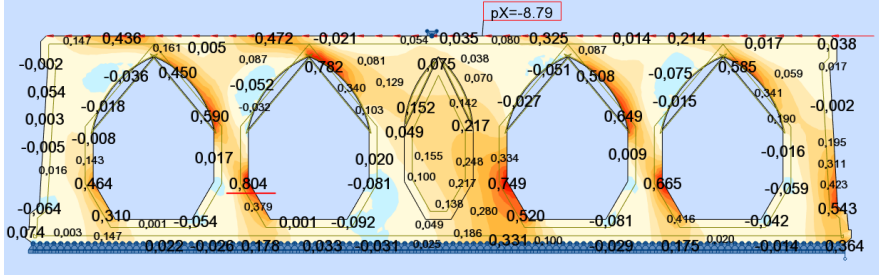
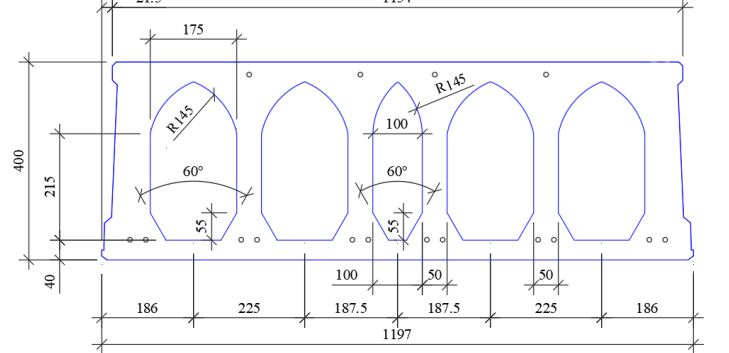
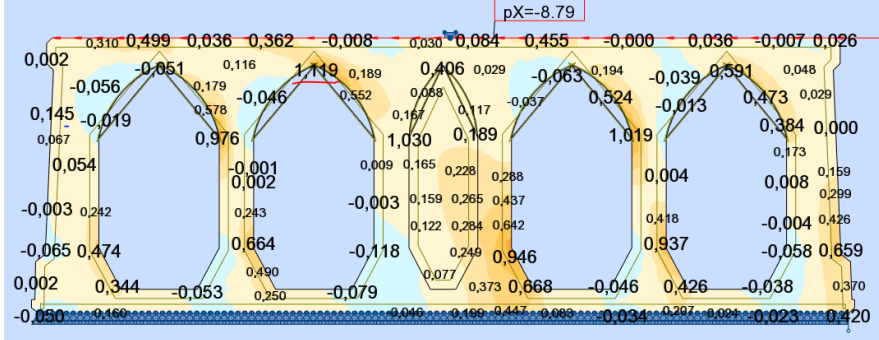
5.	PKE 40 Gamintojas 1			1,643
6.	HCS 200 Gamintojas2			0,840
7.	HCS 250 Gamintojas2			1,183

8.	HCS 300 Gamintojas2			1,345
9.	HCS 400 Gamintojas2			1,861

24 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant trečiąją skaičiuojamąją schemą (viena užpildyta kiauryme).

Eil. Nr.	Skerspjuvio pavadinimas	Skerspjuvis	Principinių įtempių diagrama	Maksimalūs principiniai įtempiai (MPa)
1.	PKE 20 Gamintojas I			0,467
2.	PKE 22 Gamintojas I			0,552
3.	PKE 27 Gamintojas I			0,572

4.	PKE 32 Gamintojas I			0,769
5.	PKE 40 Gamintojas I			0,776
6.	HCS 20 Gamintojas 2			0,679
7.	HCS 250 Gamintojas 2			1,056

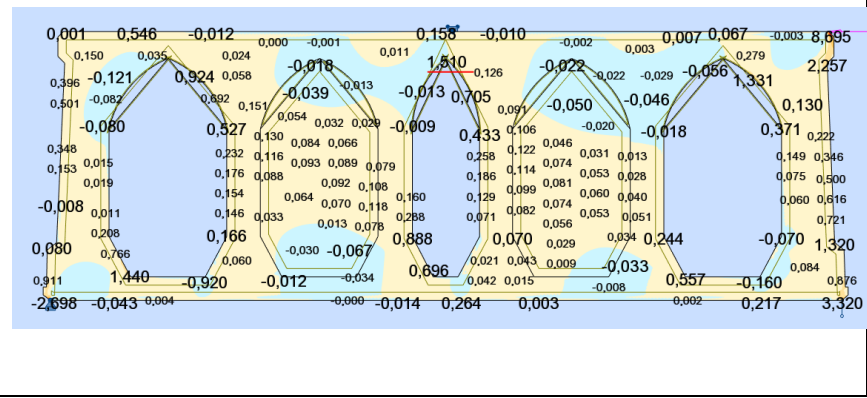
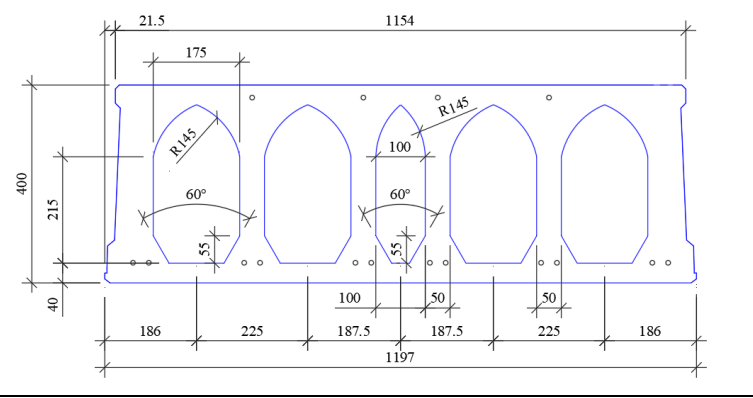
8.	HCS 300 Gamintojas2			0,804
9.	HCS 400 Gamintojas2			1,119

25 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant pirmąją skaičiuojamąją schemą (dviem užpildytomis kiaurymėmis).

Eil. Nr.	Skerspjūvio pavadinimas	Skerspjūvis	Principinių įtempių diagrama	Maksimalūs principiniai įtempiai (MPa)
1.	PKE 20 Gamintojas 1			0,820
2.	PKE 22 Gamintojas 1			1,008
3.	PKE 27 Gamintojas 1			0,902
4.	PKE 32 Gamintojas 1			1,615

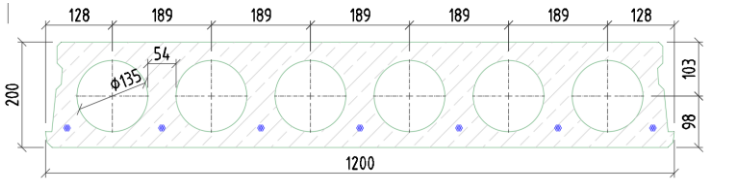
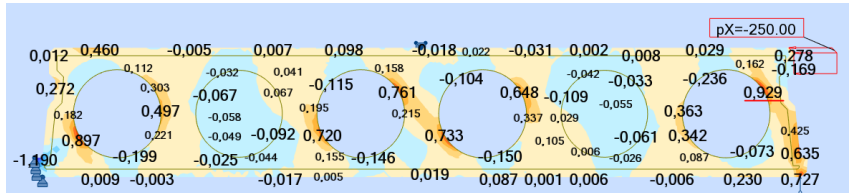
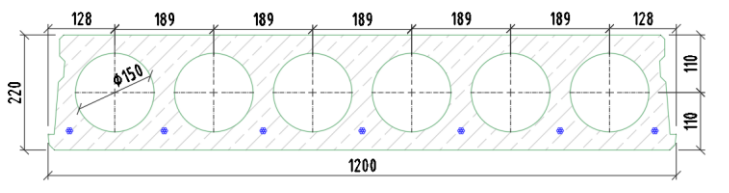
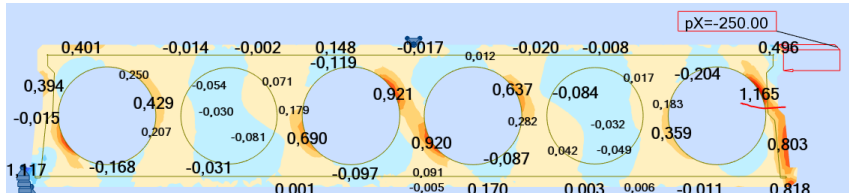
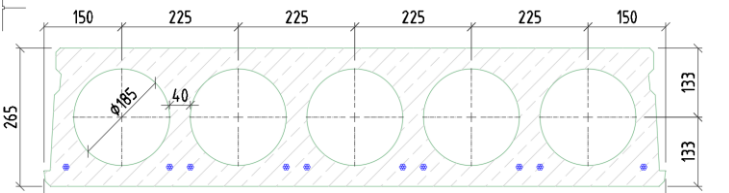
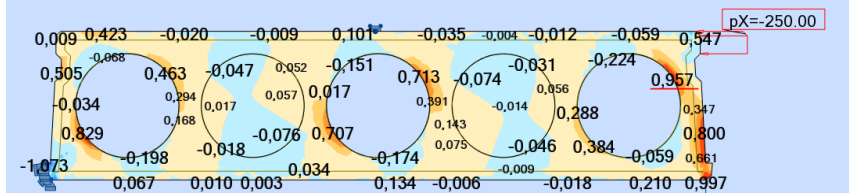
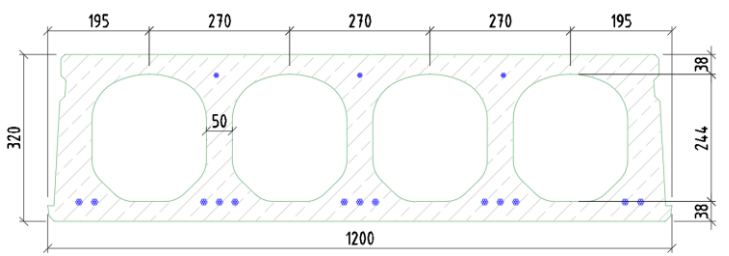
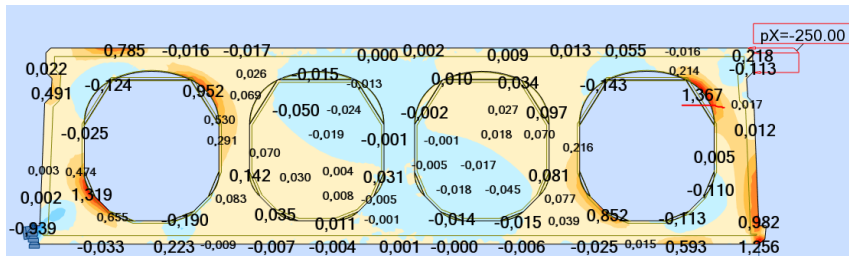
5.	PKE 40 Gamintojas 1			1,501
6.	HCS 200 Gamintojas2			1,043
7.	HCS 250 Gamintojas2			1,177
8.	HCS 300 Gamintojas2			1,759

9. HCS 400
Gamintojas2



1,510

26 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant antrąją skaičiuojamąją schemą (dviem užpildytomis kiaurymėmis).

Eil. Nr.	Skerspjūvio pavadinimas	Skerspjūvis	Principinių įtempių diagrama	Maksimalūs principiniai įtempiai(MPa)
1.	PKE 20 Gamintojas 1			0,929
2.	PKE 22 Gamintojas 1			1,165
3.	PKE 27 Gamintojas 1			0,957
4.	PKE 32 Gamintojas 1			1,367

5.	PKE 40 Gamintojas 1			1,480
6.	HCS 200 Gamintojas2			1,131
7.	HCS 250 Gamintojas2			1,143

8.	HCS 300 Gamintojas2			1,246
9.	HCS 400 Gamintojas2			1,272

27 lentelė. Eksperimento rezultatai taikant trečiąją skaičiuojamąją schemą (dviem užpildytomis kiaurymėmis).

Eil. Nr.	Skerspjuvio pavadinimas	Skerspjuvis	Principinių įtempių diagrama	Maksimalūs principiniai įtempiai (MPa)
1.	PKE 20 Gamintojas 1			0,319
2.	PKE 22 Gamintojas 1			0,383
3.	PKE 27 Gamintojas 1			0,355

4.	PKE 32 Gamintojas 1			0,452
5.	PKE 40 Gamintojas 1			0,398
6.	HCS 20 Gamintojas2			0,541

7.	HCS 250 Gamintojas2			0,666
8.	HCS 300 Gamintojas2			0,661
9.	HCS 400 Gamintojas2			0,637

PASTABA: įtempių žemėlapiuose reikšmės ties atramų ir jėgų pridėjimo vietomis nevertinamos.

2 priedas. Pleninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (1 situacija).

B.1.1

Maximum of load combinations

S 355

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

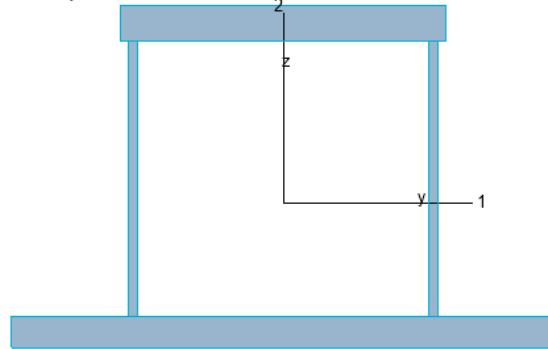
$$G = 80769 \text{ N/mm}^2$$

$$Y_{M0,ult} = 1.00 \quad Y_{M0,acc/seis} = 1.00$$

$$Y_{M1,ult} = 1.00 \quad Y_{M1,acc/seis} = 1.00$$

$$Y_{M2,ult} = 1.25 \quad Y_{M2,acc/seis} = 1.00$$

D HSQ440x430x700/45/40



P	=	2320 mm	$f_y = 335 \text{ N/mm}^2$
A	=	55420 mm ²	$\epsilon = 0.84$
I_y	=	1.889e+09 mm ⁴	$\lambda_1 = 78.65$
I_z	=	1.742e+09 mm ⁴	
I_1	=	1.889e+09 mm ⁴	
I_2	=	1.742e+09 mm ⁴	
$W_{pl,1}$	=	9.207e+06 mm ³	
$W_{pl,2}$	=	8.537e+06 mm ³	
$W_{el,min,1}$	=	7.436e+06 mm ³	
$W_{el,min,2}$	=	4.977e+06 mm ³	
i_1	=	185 mm	
i_2	=	177 mm	
I_t	=	1.221e+09 mm ⁴	
I_w	=	1.667e+13 mm ⁶	

Shear resistance, 1-1 - Part 1-1: 6.2.6, 6.2.8

LC: 'ULS1', $x = 0 \text{ mm}$

Class_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

$$V_{1,pl,Rd} = \frac{A_{1,v} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot Y_{M0}} = \frac{46900 \cdot 335}{\sqrt{3} \cdot 1.00} = 9071.04 \text{ kN} \quad (6.18)$$

$$V_{1,pl,T,Rd} = 1 - \frac{T_{1,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / Y_{M0}} \cdot V_{1,pl,Rd} = 1 - \frac{0.00}{(335 / \sqrt{3}) / 1.00} \cdot 9071.04 = 9071.04 \text{ kN} \quad (6.28)$$

$$\frac{V_{1,Ed}}{V_{1,pl,T,Rd}} = \frac{0.00}{9071.04} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.25) - \text{OK}$$

Shear resistance, 2-2 - Part 1-1: 6.2.6, 6.2.8

LC: 'ULS1', $x = 10000 \text{ mm}$

Class_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

$$V_{2,pl,Rd} = \frac{A_{2,v} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot Y_{M0}} = \frac{8520 \cdot 335}{\sqrt{3} \cdot 1.00} = 1647.87 \text{ kN} \quad (6.18)$$

$$V_{2,pl,T,Rd} = 1 - \frac{T_{1,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / Y_{M0}} \cdot V_{2,pl,Rd} = 1 - \frac{0.00}{(335 / \sqrt{3}) / 1.00} \cdot 1647.87 = 1647.87 \text{ kN} \quad (6.28)$$

$$\frac{V_{2,Ed}}{V_{2,pl,T,Rd}} = \frac{1155.91}{1647.87} = 0.70 \leq 1.00 \quad (6.25) - \text{OK}$$

Torsional resistance - Part 1-1: 6.2.7

LC: 'ULS1', $x = 0 \text{ mm}$

Class_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

$\tau_{max,unit} = 0.34 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{kNm}}$ is calculated by FEM analysis.

$$T_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \tau_{max,unit} \cdot Y_{M0}} = \frac{335}{\sqrt{3} \cdot 0.34 \cdot 1.00} = 566.81 \text{ kNm}$$

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} = \frac{0.00}{566.81} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.23) - \text{OK}$$

Shear stress - Part 1-1: 6.2.6

Not relevant

Normal stress - Part 1-1: 6.2.1

Not relevant

Normal capacity - Part 1-1: 6.2

LC: 'ULS1', $x = 5000 \text{ mm}$

Class_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

$$V_{1,Ed} = 0.00 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot V_{1,pl,T,Rd} = 0.5 \cdot 9071.04 = 4535.52 \text{ kN} \rightarrow \rho_1 = 0.00$$

$$V_{2,Ed} = 0.00 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot V_{2,pl,T,Rd} = 0.5 \cdot 1647.87 = 823.94 \text{ kN} \rightarrow \rho_1 = 0.00$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{1,Ed}}{M_{1,Rd}} + \frac{M_{2,Ed}}{M_{2,Rd}} = \frac{0.00}{18565.70} + \frac{2889.77}{3084.49} + \frac{0.00}{2860.06} = 0.94 \leq 1.00 \quad (6.2) - \text{OK}$$

Flexural buckling, 1-1 - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{L_{cr,1}}{i_1 \cdot \lambda_1} = \frac{10000}{185 \cdot 78.65} = 0.69 \quad (6.50)$$

 $\alpha_1 = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_1 = 0.5 [1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda}_1 - 0.2) + \bar{\lambda}_1^2] = 0.5 [1 + 0.49 \cdot (0.69 - 0.2) + 0.69^2] = 0.86$$

$$\chi_1 = \min\left(\frac{1}{\varphi_1 + \sqrt{\varphi_1^2 - \bar{\lambda}_1^2}}, 1.0\right) = \min\left(\frac{1}{0.86 + \sqrt{0.86^2 - 0.69^2}}, 1.0\right) = 0.73 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,1} = \frac{\chi_1 \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.73 \cdot 55420 \cdot 335}{1.00} = 13584.47 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,1}} = \frac{0.00}{13584.47} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.46) - \text{OK}$$

Flexural buckling, 2-2 - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{L_{cr,2}}{i_2 \cdot \lambda_1} = \frac{10000}{177 \cdot 78.65} = 0.72 \quad (6.50)$$

 $\alpha_2 = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_2 = 0.5 [1 + \alpha_2 \cdot (\bar{\lambda}_2 - 0.2) + \bar{\lambda}_2^2] = 0.5 [1 + 0.49 \cdot (0.72 - 0.2) + 0.72^2] = 0.88$$

$$\chi_2 = \min\left(\frac{1}{\varphi_2 + \sqrt{\varphi_2^2 - \bar{\lambda}_2^2}}, 1.0\right) = \min\left(\frac{1}{0.88 + \sqrt{0.88^2 - 0.72^2}}, 1.0\right) = 0.71 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,2} = \frac{\chi_2 \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.71 \cdot 55420 \cdot 335}{1.00} = 13256.15 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,2}} = \frac{0.00}{13256.15} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.46) - \text{OK}$$

Torsional-flexural buckling - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

$$i_0 = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + y_0^2 + z_0^2} = \sqrt{185^2 + 177^2 + 0^2 + 31^2} = 258 \text{ mm}$$

$$N_{cr,1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{L_{cr,1}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1889315624}{10000^2} = 39158.28 \text{ kN}$$

$$N_{cr,2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_2}{L_{cr,2}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1741924293}{10000^2} = 36103.42 \text{ kN}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_t^2} \right) = \frac{1}{258^2} \left(80769 \cdot 1.221e+09 + \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1.667e+13}{10000^2} \right) = 1488405.81 \text{ kN}$$

$$i_0^2 (N - N_{cr,1}) (N - N_{cr,2}) (N - N_{cr,T}) - N^2 y_0^2 (N - N_{cr,2}) - N^2 z_0^2 (N - N_{cr,1}) = 258^2 (N - 39158.28) (N - 36103.42) (N - 1488405.81) - N^2 0^2 (N - 36103.42) - N^2 31^2 (N - 39158.28) = 0$$

Smallest root of the above equation related to the torsional-flexural buckling:

$$N_{cr,TF} = 36090.37 \text{ kN}$$

$$N_{cr} = \min(N_{cr,T}, N_{cr,TF}) = \min(1488405.81, 36090.37) = 36090.37 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{55420 \cdot 335}{36090.37}} = 0.72 \quad (6.53)$$

 $\alpha_T = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_T = 0.5 [1 + \alpha_T \cdot (\bar{\lambda}_T - 0.2) + \bar{\lambda}_T^2] = 0.5 [1 + 0.49 \cdot (0.72 - 0.2) + 0.72^2] = 0.88$$

$$\chi_T = \min\left(\frac{1}{\varphi_T + \sqrt{\varphi_T^2 - \bar{\lambda}_T^2}}, 1.0\right) = \min\left(\frac{1}{0.88 + \sqrt{0.88^2 - 0.72^2}}, 1.0\right) = 0.71 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,T} = \frac{\chi_T \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.71 \cdot 55420 \cdot 335}{1.00} = 13255.80 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,T}} = \frac{0.00}{13255.80} = 0.00 \leq 1.00 - \text{OK}$$

Lateral torsional buckling, top flange - Part 1-1: 6.3.2.2LC: 'ULS1', $x = 5000$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

$$N_{cr,LT} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L_{cr})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.100e+05 \cdot 1.742e+09}{(1.00 \cdot 10000)^2} = 36103.42 \text{ kN}$$

Loaded on top edge.

$$Z = (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_f) = (0.45 \cdot 285 - 0.52 \cdot 31) = 112.06 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot N_{cr,LT} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{G \cdot I_t}{N_{cr,LT}} + Z^2 \right]^{0.5} - Z \right\} =$$

$$= 1.13 \cdot 3.610e+07 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{1.667e+13}{1.742e+09} + \frac{8.077e+04 \cdot 1.221e+09}{3.610e+07} + 112.06^2 \right]^{0.5} - 112.06 \right\} =$$

$$= 63127.04 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{9207425 \cdot 335}{6.313e+10}} = 0.22$$

 $\alpha_{LT} = 0.76$ (Buckling curve: d)

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0.5 \left[1 + 0.76 \cdot (0.22 - 0.2) + 0.22^2 \right] = 0.53$$

$$\chi_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.53 + \sqrt{0.53^2 - 0.22^2}}, 1.0 \right) = 0.98 \quad (6.56)$$

$$M_{y,b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.98 \cdot 9207425 \cdot 335}{1.00} = 3033.52 \text{ kNm} \quad (6.55)$$

$$\frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} = \frac{2889.77}{3033.52} = 0.95 \leq 1.00 \quad (6.54) - \text{OK}$$

Lateral torsional buckling, bottom flange - Part 1-1: 6.3.2.2LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

$$N_{cr,LT} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L_{cr})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.100e+05 \cdot 1.742e+09}{(1.00 \cdot 10000)^2} = 36103.42 \text{ kN}$$

Loaded on top edge.

$$Z = (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_f) = (0.45 \cdot 155 - 0.52 \cdot 31) = 53.41 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot N_{cr,LT} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{G \cdot I_t}{N_{cr,LT}} + Z^2 \right]^{0.5} - Z \right\} =$$

$$= 1.13 \cdot 3.610e+07 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{1.667e+13}{1.742e+09} + \frac{8.077e+04 \cdot 1.221e+09}{3.610e+07} + 53.41^2 \right]^{0.5} - 53.41 \right\} =$$

$$= 65400.65 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{9207425 \cdot 335}{6.540e+10}} = 0.22$$

 $\alpha_{LT} = 0.76$ (Buckling curve: d)

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0.5 \left[1 + 0.76 \cdot (0.22 - 0.2) + 0.22^2 \right] = 0.53$$

$$\chi_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.53 + \sqrt{0.53^2 - 0.22^2}}, 1.0 \right) = 0.99 \quad (6.56)$$

$$M_{y,b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.99 \cdot 9207425 \cdot 335}{1.00} = 3042.84 \text{ kNm} \quad (6.55)$$

$$\frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} = \frac{0.00}{3042.84} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.54) - \text{OK}$$

Interaction between normal force and bending 1. - Part 1-1: 6.3.3

LC: 'ULS1', $x = 5000$ mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

k_{ij} factors are calculated according to Method 1

$$C_{my} = 1.00 \quad C_{yy} = 1.00$$

$$C_{mz} = 1.00 \quad C_{yz} = 0.98$$

$$C_{mLT} = 1.00 \quad C_{zy} = 1.00$$

$$C_{zz} = 0.82$$

$$M_{2,Rk} = f_y \cdot W_{pl,2} = 335 \cdot 8537500 = 2860.06 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}^{comp}}{N_{b,Rd,1}} + k_{11} \cdot \frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + k_{12} \cdot \frac{M_{2,Ed}}{M_{2,Rk}} =$$

$$= \frac{0.00}{13584.47} + 1.00 \cdot \frac{2889.77}{3033.52} + 0.67 \cdot \frac{0.00}{\frac{2860.06}{1.00}} = 0.95 \leq 1.00 \quad (6.61) - \text{OK}$$

Interaction between normal force and bending 2. - Part 1-1: 6.3.3

LC: 'ULS1', $x = 5000$ mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 1, Class_{M2} = 2

k_{ij} factors are calculated according to Method 1

$$C_{my} = 1.00 \quad C_{yy} = 1.00$$

$$C_{mz} = 1.00 \quad C_{yz} = 0.98$$

$$C_{mLT} = 1.00 \quad C_{zy} = 1.00$$

$$C_{zz} = 0.82$$

$$M_{2,Rk} = f_y \cdot W_{pl,2} = 335 \cdot 8537500 = 2860.06 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}^{comp}}{N_{b,Rd,2}} + k_{21} \cdot \frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + k_{22} \cdot \frac{M_{2,Ed}}{M_{2,Rk}} =$$

$$= \frac{0.00}{13256.15} + 0.55 \cdot \frac{2889.77}{3033.52} + 1.22 \cdot \frac{0.00}{\frac{2860.06}{1.00}} = 0.52 \leq 1.00 \quad (6.62) - \text{OK}$$

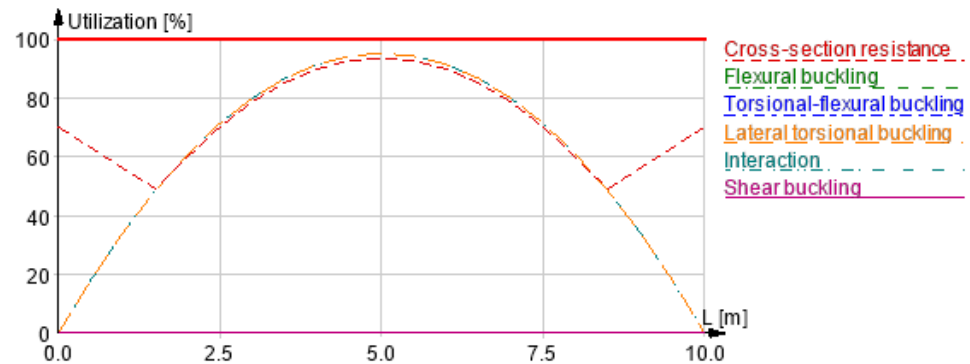
Interaction between normal force and bending, 2nd order - Part 1-1: 6.3.3

Not relevant

Shear buckling - Part 1-5: 5

$$\frac{h_w}{t} = \frac{355}{12} = 29.6 \leq \frac{72}{\eta} \cdot \epsilon = \frac{72}{1.20} \cdot 0.84 = 50.3 \rightarrow \text{Not relevant}$$

Summary



3 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (2 situacija)

B.1.1

Maximum of load combinations

S 355

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

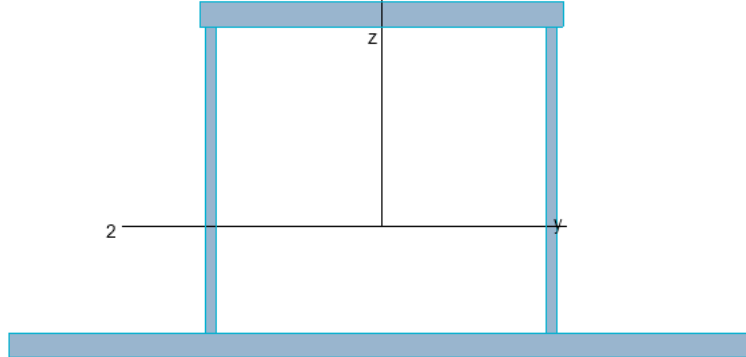
$$G = 80769 \text{ N/mm}^2$$

$$Y_{M0,ut} = 1.00 \quad Y_{M0,acc/seis} = 1.00$$

$$Y_{M1,ut} = 1.00 \quad Y_{M1,acc/seis} = 1.00$$

$$Y_{M2,ut} = 1.25 \quad Y_{M2,acc/seis} = 1.00$$

D 215.0x200.0x220.0x450.0x6.0x15.0x15.0



P	=	1346 mm	f_y	=	355 N/mm ²
A	=	12270 mm ²	ϵ	=	0.81
I_y	=	9.732e+07 mm ⁴	λ_1	=	76.40
I_z	=	1.508e+08 mm ⁴			
I_1	=	1.508e+08 mm ⁴			
I_2	=	9.732e+07 mm ⁴			
$W_{pl,1}$	=	1.170e+06 mm ³			
$W_{pl,2}$	=	8.900e+05 mm ³			
$W_{el,min,1}$	=	6.701e+05 mm ³			
$W_{el,min,2}$	=	7.176e+05 mm ³			
i_1	=	111 mm			
i_2	=	89 mm			
I_t	=	7.561e+07 mm ⁴			
I_w	=	2.020e+11 mm ⁶			

Shear resistance, 1-1 - Part 1-1: 6.2.6, 6.2.8

LC: 'ULS1', x = 5000 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$V_{1,pl,Rd} = \frac{A_{1,v} \cdot f_v}{\sqrt{3} \cdot Y_{M0}} = \frac{2220 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1.00} = 455.01 \text{ kN} \quad (6.18)$$

$$V_{1,pl,T,Rd} = 1 - \frac{T_{1,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / Y_{M0}} \cdot V_{1,pl,Rd} = 1 - \frac{0.00}{(355 / \sqrt{3}) / 1.00} \cdot 455.01 = 455.01 \text{ kN} \quad (6.28)$$

$$\frac{V_{1,Ed}}{V_{1,pl,T,Rd}} = \frac{242.44}{455.01} = 0.53 \leq 1.00 \quad (6.25) - \text{OK}$$

Shear resistance, 2-2 - Part 1-1: 6.2.6, 6.2.8

LC: 'ULS1', x = 5000 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$V_{2,pl,Rd} = \frac{A_{2,v} \cdot f_v}{\sqrt{3} \cdot Y_{M0}} = \frac{10050 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1.00} = 2059.84 \text{ kN} \quad (6.18)$$

$$V_{2,pl,T,Rd} = 1 - \frac{T_{2,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / Y_{M0}} \cdot V_{2,pl,Rd} = 1 - \frac{0.00}{(355 / \sqrt{3}) / 1.00} \cdot 2059.84 = 2059.84 \text{ kN} \quad (6.28)$$

$$\frac{V_{2,Ed}}{V_{2,pl,T,Rd}} = \frac{0.00}{2059.84} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.25) - \text{OK}$$

Torsional resistance - Part 1-1: 6.2.7

LC: 'ULS1', x = 0 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$T_{max,unit} = 2.66 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{kNm}}$ is calculated by FEM analysis.

$$T_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot T_{max,unit} \cdot Y_{M0}} = \frac{355}{\sqrt{3} \cdot 2.66 \cdot 1.00} = 77.06 \text{ kNm}$$

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} = \frac{0.00}{77.06} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.23) - \text{OK}$$

Shear stress - Part 1-1: 6.2.6

Not relevant

Normal stress - Part 1-1: 6.2.1

Not relevant

Normal capacity - Part 1-1: 6.2

LC: 'ULS1', x = 2500 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$V_{1,Ed} = 0.00 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot V_{1,pl,T,Rd} = 0.5 \cdot 455.01 = 227.50 \text{ kN} \rightarrow \rho_1 = 0.00$$

$$V_{2,Ed} = 0.00 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot V_{2,pl,T,Rd} = 0.5 \cdot 2059.84 = 1029.92 \text{ kN} \rightarrow \rho_1 = 0.00$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{1,Ed}}{M_{1,Rd}} + \frac{M_{2,Ed}}{M_{2,Rd}} = \frac{0.00}{4355.85} + \frac{0.00}{415.19} + \frac{303.05}{315.94} = 0.96 \leq 1.00 \quad (6.2) - \text{OK}$$

Flexural buckling, 1-1 - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{L_{cr,1}}{i_1 \cdot \lambda_1} = \frac{5000}{111 \cdot 76.40} = 0.59 \quad (6.50)$$

 $\alpha_1 = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_1 = 0.5 [1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda}_1 - 0.2) + \bar{\lambda}_1^2] = 0.5 [1 + 0.49 \cdot (0.59 - 0.2) + 0.59^2] = 0.77$$

$$X_1 = \min\left(\frac{1}{\varphi_1 + \sqrt{\varphi_1^2 - \bar{\lambda}_1^2}}, 1.0\right) = \min\left(\frac{1}{0.77 + \sqrt{0.77^2 - 0.59^2}}, 1.0\right) = 0.79 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,1} = \frac{X_1 \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.79 \cdot 12270 \cdot 355}{1.00} = 3445.75 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,1}} = \frac{0.00}{3445.75} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.46) - \text{OK}$$

Flexural buckling, 2-2 - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{L_{cr,2}}{i_2 \cdot \lambda_1} = \frac{5000}{89 \cdot 76.40} = 0.73 \quad (6.50)$$

 $\alpha_2 = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_2 = 0.5 [1 + \alpha_2 \cdot (\bar{\lambda}_2 - 0.2) + \bar{\lambda}_2^2] = 0.5 [1 + 0.49 \cdot (0.73 - 0.2) + 0.73^2] = 0.90$$

$$X_2 = \min\left(\frac{1}{\varphi_2 + \sqrt{\varphi_2^2 - \bar{\lambda}_2^2}}, 1.0\right) = \min\left(\frac{1}{0.90 + \sqrt{0.90^2 - 0.73^2}}, 1.0\right) = 0.70 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,2} = \frac{X_2 \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.70 \cdot 12270 \cdot 355}{1.00} = 3062.18 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,2}} = \frac{0.00}{3062.18} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.46) - \text{OK}$$

Torsional-flexural buckling - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$i_0 = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + y_0^2 + z_0^2} = \sqrt{111^2 + 89^2 + 15^2 + 0^2} = 143 \text{ mm}$$

$$N_{cr,1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{L_{cr,1}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 150774890}{5000^2} = 12499.94 \text{ kN}$$

$$N_{cr,2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_2}{L_{cr,2}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 97319574}{5000^2} = 8068.25 \text{ kN}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L^2} \right) = \frac{1}{143^2} \left(80769 \cdot 7.561e+07 + \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2.020e+11}{5000^2} \right) = 299657.95 \text{ kN}$$

$$i_0^2 (N - N_{cr,1}) (N - N_{cr,2}) (N - N_{cr,T}) - N^2 y_0^2 (N - N_{cr,2}) - N^2 z_0^2 (N - N_{cr,1}) = 143^2 (N - 12499.94) (N - 8068.25) (N - 299657.95) - N^2 15^2 (N - 8068.25) - N^2 0^2 (N - 12499.94) = 0$$

Smallest root of the above equation related to the torsional-flexural buckling:

$$N_{cr,TF} = 8068.25 \text{ kN}$$

$$N_{cr} = \min(N_{cr,T}, N_{cr,TF}) = \min(299657.95, 8068.25) = 8068.25 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{12270 \cdot 355}{8068.25}} = 0.73 \quad (6.53)$$

 $\alpha_T = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_T = 0.5 [1 + \alpha_T \cdot (\bar{\lambda}_T - 0.2) + \bar{\lambda}_T^2] = 0.5 [1 + 0.49 \cdot (0.73 - 0.2) + 0.73^2] = 0.90$$

$$X_T = \min\left(\frac{1}{\varphi_T + \sqrt{\varphi_T^2 - \bar{\lambda}_T^2}}, 1.0\right) = \min\left(\frac{1}{0.90 + \sqrt{0.90^2 - 0.73^2}}, 1.0\right) = 0.70 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,T} = \frac{X_T \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.70 \cdot 12270 \cdot 355}{1.00} = 3062.45 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,T}} = \frac{0.00}{3062.45} = 0.00 \leq 1.00 - \text{OK}$$

Lateral torsional buckling, top flange - Part 1-1: 6.3.2.2LC: 'ULS1', $x = 2500$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$N_{cr,LT} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L_{cr})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.100e+05 \cdot 1.508e+08}{(1.00 \cdot 5000)^2} = 12499.94 \text{ kN}$$

Loaded on top edge.

$$Z = (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) = (0.45 \cdot 79 - 0.49 \cdot -0) = 35.72 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot N_{cr,LT} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{G \cdot I_t}{N_{cr,LT}} + Z^2 \right]^{0.5} - Z \right\} =$$

$$= 1.13 \cdot 1.250e+07 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{2.020e+11}{1.508e+08} + \frac{8.077e+04 \cdot 7.561e+07}{1.250e+07} + 35.72^2 \right]^{0.5} - 35.72 \right\} =$$

$$= 9394.94 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1169552 \cdot 355}{9.395e+09}} = 0.21$$

 $\alpha_{LT} = 0.76$ (Buckling curve: d)

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0.5 \left[1 + 0.76 \cdot (0.21 - 0.2) + 0.21^2 \right] = 0.53$$

$$\chi_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.53 + \sqrt{0.53^2 - 0.21^2}}, 1.0 \right) = 0.99 \quad (6.56)$$

$$M_{y,b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.99 \cdot 1169552 \cdot 355}{1.00} = 411.84 \text{ kNm} \quad (6.55)$$

$$\frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} = \frac{0.00}{411.84} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.54) - \text{OK}$$

Lateral torsional buckling, bottom flange - Part 1-1: 6.3.2.2LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$N_{cr,LT} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L_{cr})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.100e+05 \cdot 1.508e+08}{(1.00 \cdot 5000)^2} = 12499.94 \text{ kN}$$

Loaded on top edge.

$$Z = (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) = (0.45 \cdot 136 - 0.49 \cdot -0) = 61.04 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot N_{cr,LT} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{G \cdot I_t}{N_{cr,LT}} + Z^2 \right]^{0.5} - Z \right\} =$$

$$= 1.13 \cdot 1.250e+07 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{2.020e+11}{1.508e+08} + \frac{8.077e+04 \cdot 7.561e+07}{1.250e+07} + 61.04^2 \right]^{0.5} - 61.04 \right\} =$$

$$= 9062.01 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1169552 \cdot 355}{9.062e+09}} = 0.21$$

 $\alpha_{LT} = 0.76$ (Buckling curve: d)

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0.5 \left[1 + 0.76 \cdot (0.21 - 0.2) + 0.21^2 \right] = 0.53$$

$$\chi_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.53 + \sqrt{0.53^2 - 0.21^2}}, 1.0 \right) = 0.99 \quad (6.56)$$

$$M_{y,b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.99 \cdot 1169552 \cdot 355}{1.00} = 410.60 \text{ kNm} \quad (6.55)$$

$$\frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} = \frac{0.00}{410.60} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.54) - \text{OK}$$

Interaction between normal force and bending 1. - Part 1-1: 6.3.3

LC: 'ULS1', $x = 2500$ mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

k_{η} factors are calculated according to Method 1

$$C_{my} = 1.00 \quad C_{yy} = 1.00$$

$$C_{mz} = 1.00 \quad C_{yz} = 1.00$$

$$C_{mLT} = 1.00 \quad C_{zy} = 1.00$$

$$C_{zz} = 1.38$$

$$M_{2,Rk} = f_y \cdot W_{pl,2} = 355 \cdot 889973 = 315.94 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}^{comp}}{N_{b,Rd,1}} + k_{11} \cdot \frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + k_{12} \cdot \frac{M_{2,Ed}}{M_{2,Rk}} =$$

$$= \frac{0.00}{3445.75} + 1.00 \cdot \frac{0.00}{411.84} + 0.42 \cdot \frac{303.05}{\frac{315.94}{1.00}} = 0.40 \leq 1.00 \quad (6.61) - \text{OK}$$

Interaction between normal force and bending 2. - Part 1-1: 6.3.3

LC: 'ULS1', $x = 2500$ mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

k_{η} factors are calculated according to Method 1

$$C_{my} = 1.00 \quad C_{yy} = 1.00$$

$$C_{mz} = 1.00 \quad C_{yz} = 1.00$$

$$C_{mLT} = 1.00 \quad C_{zy} = 1.00$$

$$C_{zz} = 1.38$$

$$M_{2,Rk} = f_y \cdot W_{pl,2} = 355 \cdot 889973 = 315.94 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}^{comp}}{N_{b,Rd,2}} + k_{21} \cdot \frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + k_{22} \cdot \frac{M_{2,Ed}}{M_{2,Rk}} =$$

$$= \frac{0.00}{3062.18} + 0.86 \cdot \frac{0.00}{411.84} + 0.73 \cdot \frac{303.05}{\frac{315.94}{1.00}} = 0.70 \leq 1.00 \quad (6.62) - \text{OK}$$

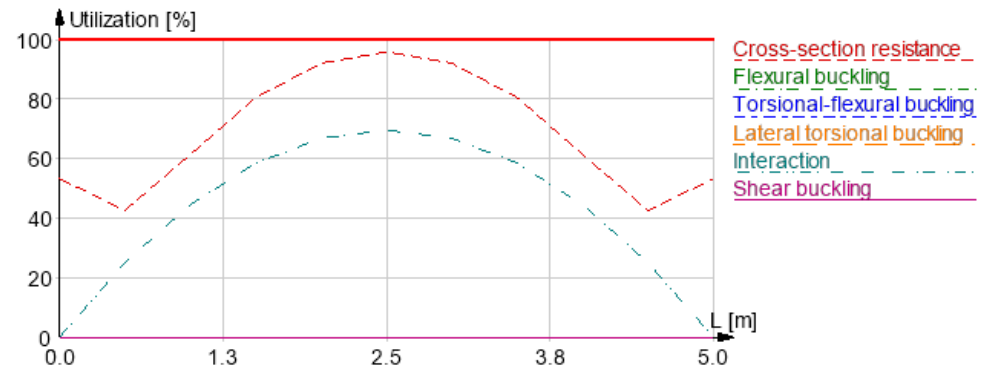
Interaction between normal force and bending, 2nd order - Part 1-1: 6.3.3

Not relevant

Shear buckling - Part 1-5: 5

$$\frac{h_w}{t} = \frac{185}{6} = 30.8 \leq \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon = \frac{72}{1.20} \cdot 0.81 = 48.8 \rightarrow \text{Not relevant}$$

Summary



4 priedas. Plieninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (3 situacija)

B.1.1

Maximum of load combinations

S 355

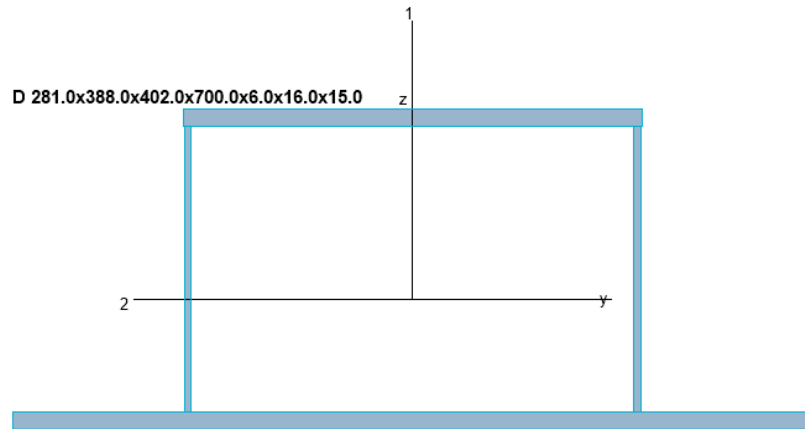
$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$G = 80769 \text{ N/mm}^2$$

$$Y_{M0,ult} = 1.00 \quad Y_{M0,acc/seis} = 1.00$$

$$Y_{M1,ult} = 1.00 \quad Y_{M1,acc/seis} = 1.00$$

$$Y_{M2,ult} = 1.25 \quad Y_{M2,acc/seis} = 1.00$$



P	=	1966 mm	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
A	=	19932 mm ²	$\epsilon = 0.81$
I _y	=	2.997e+08 mm ⁴	$\lambda_1 = 76.40$
I _z	=	6.318e+08 mm ⁴	
I ₁	=	6.318e+08 mm ⁴	
I ₂	=	2.997e+08 mm ⁴	
W _{pl,1}	=	3.075e+06 mm ³	
W _{pl,2}	=	2.113e+06 mm ³	
W _{el,min,1}	=	1.805e+06 mm ³	
W _{el,min,2}	=	1.785e+06 mm ³	
i ₁	=	178 mm	
i ₂	=	123 mm	
I _t	=	3.233e+08 mm ⁴	
I _w	=	9.542e+11 mm ⁶	

Shear resistance, 1-1 - Part 1-1: 6.2.6, 6.2.8

LC: 'ULS1', x = 0 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$V_{1,pl,Rd} = \frac{A_{1,v} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot Y_{M0}} = \frac{3000 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1.00} = 614.88 \text{ kN} \quad (6.18)$$

$$V_{1,pl,T,Rd} = 1 - \frac{T_{1,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / Y_{M0}} \cdot V_{1,pl,Rd} = 1 - \frac{0.00}{(355 / \sqrt{3}) / 1.00} \cdot 614.88 = 614.88 \text{ kN} \quad (6.28)$$

$$\frac{V_{1,Ed}}{V_{1,pl,T,Rd}} = \frac{401.98}{614.88} = 0.65 \leq 1.00 \quad (6.25) - \text{OK}$$

Shear resistance, 2-2 - Part 1-1: 6.2.6, 6.2.8

LC: 'ULS1', x = 0 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$V_{2,pl,Rd} = \frac{A_{2,v} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot Y_{M0}} = \frac{16932 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1.00} = 3470.37 \text{ kN} \quad (6.18)$$

$$V_{2,pl,T,Rd} = 1 - \frac{T_{2,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / Y_{M0}} \cdot V_{2,pl,Rd} = 1 - \frac{0.00}{(355 / \sqrt{3}) / 1.00} \cdot 3470.37 = 3470.37 \text{ kN} \quad (6.28)$$

$$\frac{V_{2,Ed}}{V_{2,pl,T,Rd}} = \frac{0.00}{3470.37} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.25) - \text{OK}$$

Torsional resistance - Part 1-1: 6.2.7

LC: 'ULS1', x = 0 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$\tau_{max,unit} = 1.08 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{kNm}}$ is calculated by FEM analysis.

$$T_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \tau_{max,unit} \cdot Y_{M0}} = \frac{355}{\sqrt{3} \cdot 1.08 \cdot 1.00} = 189.82 \text{ kNm}$$

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} = \frac{0.00}{189.82} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.23) - \text{OK}$$

Shear stress - Part 1-1: 6.2.6

LC: 'ULS1', x = 0 mm

Class_N = 4, Class_{M1} = 4, Class_{M2} = 4

$$\frac{T_{Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / Y_{M0}} = \frac{134.32}{(355 / \sqrt{3}) / 1.00} = 0.66 \leq 1.00 \quad (6.19) - \text{OK}$$

Normal stress - Part 1-1: 6.2.1

LC: 'ULS1', x = 3000 mm

Class_N = 4, Class_{M1} = 4, Class_{M2} = 4

In case of Class 4 sections normal stress and shear stress are calculated on different sections, so their interaction can not be considered.

$$\left| \frac{\sigma_{Ed}}{f_y / Y_{M0}} \right| = \left| \frac{343.33}{355 / 1.00} \right| = 0.97 \leq 1.00 - \text{OK}$$

Normal capacity - Part 1-1: 6.2LC: 'ULS1', $x = 6000$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$V_{1,Ed} = 401.98 \text{ kN} > 0.5 \cdot V_{1,pl,T,Rd} = 0.5 \cdot 614.88 = 307.44 \text{ kN} \rightarrow \rho_1 = \left(\frac{2 \cdot V_{1,Ed}}{V_{1,pl,T,Rd}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 401.98}{614.88} - 1 \right)^2 = 0.09$$

$$V_{2,Ed} = 0.00 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot V_{2,pl,T,Rd} = 0.5 \cdot 3470.37 = 1735.19 \text{ kN} \rightarrow \rho_1 = 0.00$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{1,Ed}}{M_{1,Rd}} + \frac{M_{2,Ed}}{M_{2,Rd}} = \frac{0.00}{7075.86} + \frac{0.00}{1091.60} + \frac{0.00}{737.37} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.2) - \text{OK}$$

Flexural buckling, 1-1 - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{L_{cr,1}}{i_1 \cdot \lambda_1} = \frac{6000}{178 \cdot 76.40} = 0.44 \quad (6.50)$$

 $\alpha_1 = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_1 = 0.5 \left[1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda}_1 - 0.2) + \bar{\lambda}_1^2 \right] = 0.5 \left[1 + 0.49 \cdot (0.44 - 0.2) + 0.44^2 \right] = 0.66$$

$$\chi_1 = \min \left(\frac{1}{\varphi_1 + \sqrt{\varphi_1^2 - \bar{\lambda}_1^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.66 + \sqrt{0.66^2 - 0.44^2}}, 1.0 \right) = 0.88 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,1} = \frac{\chi_1 \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.88 \cdot 19932 \cdot 355}{1.00} = 6193.86 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,1}} = \frac{0.00}{6193.86} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.46) - \text{OK}$$

Flexural buckling, 2-2 - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{L_{cr,2}}{i_2 \cdot \lambda_1} = \frac{6000}{123 \cdot 76.40} = 0.64 \quad (6.50)$$

 $\alpha_2 = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_2 = 0.5 \left[1 + \alpha_2 \cdot (\bar{\lambda}_2 - 0.2) + \bar{\lambda}_2^2 \right] = 0.5 \left[1 + 0.49 \cdot (0.64 - 0.2) + 0.64^2 \right] = 0.81$$

$$\chi_2 = \min \left(\frac{1}{\varphi_2 + \sqrt{\varphi_2^2 - \bar{\lambda}_2^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.81 + \sqrt{0.81^2 - 0.64^2}}, 1.0 \right) = 0.76 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,2} = \frac{\chi_2 \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.76 \cdot 19932 \cdot 355}{1.00} = 5385.64 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,2}} = \frac{0.00}{5385.64} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.46) - \text{OK}$$

Torsional-flexural buckling - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$i_0 = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + y_0^2 + z_0^2} = \sqrt{178^2 + 123^2 + 5^2 + 0^2} = 216 \text{ mm}$$

$$N_{cr,1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{L_{cr,1}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 631805744}{6000^2} = 36374.76 \text{ kN}$$

$$N_{cr,2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_2}{L_{cr,2}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 299672634}{6000^2} = 17252.96 \text{ kN}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_t^2} \right) = \frac{1}{216^2} \left(80769 \cdot 3.233e+08 + \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 9.542e+11}{6000^2} \right) = 559591.08 \text{ kN}$$

$$i_0^2 (N - N_{cr,1}) (N - N_{cr,2}) (N - N_{cr,T}) - N^2 y_0^2 (N - N_{cr,2}) - N^2 z_0^2 (N - N_{cr,1}) = 216^2 (N - 36374.76) (N - 17252.96) (N - 559591.08) - N^2 5^2 (N - 17252.96) - N^2 0^2 (N - 36374.76) = 0$$

Smallest root of the above equation related to the torsional-flexural buckling:

$$N_{cr,TF} = 17252.96 \text{ kN}$$

$$N_{cr} = \min(N_{cr,T}, N_{cr,TF}) = \min(559591.08, 17252.96) = 17252.96 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{19932 \cdot 355}{17252.96}} = 0.64 \quad (6.53)$$

 $\alpha_T = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_T = 0.5 \left[1 + \alpha_T \cdot (\bar{\lambda}_T - 0.2) + \bar{\lambda}_T^2 \right] = 0.5 \left[1 + 0.49 \cdot (0.64 - 0.2) + 0.64^2 \right] = 0.81$$

$$\chi_T = \min \left(\frac{1}{\varphi_T + \sqrt{\varphi_T^2 - \bar{\lambda}_T^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.81 + \sqrt{0.81^2 - 0.64^2}}, 1.0 \right) = 0.76 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,T} = \frac{\chi_T \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.76 \cdot 19932 \cdot 355}{1.00} = 5386.02 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,T}} = \frac{0.00}{5386.02} = 0.00 \leq 1.00 - \text{OK}$$

Lateral torsional buckling, top flange - Part 1-1: 6.3.2.2LC: 'ULS1', $x = 3000$ mmClass_N = 4, Class_{M1} = 4, Class_{M2} = 4

$$N_{cr,LT} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L_{cr})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.100e+05 \cdot 6.318e+08}{(1.00 \cdot 6000)^2} = 36374.76 \text{ kN}$$

Loaded on top edge.

$$Z = (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_i) = (0.45 \cdot 113 - 0.49 \cdot -0) = 50.90 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot N_{cr,LT} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{G \cdot I_t}{N_{cr,LT}} + Z^2 \right]^{0.5} - Z \right\} =$$

$$= 1.13 \cdot 3.637e+07 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{9.542e+11}{6.318e+08} + \frac{8.077e+04 \cdot 3.233e+08}{3.637e+07} + 50.90^2 \right]^{0.5} - 50.90 \right\} =$$

$$= 32830.90 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1783361 \cdot 355}{3.283e+10}} = 0.14$$

$$\alpha_{LT} = 0.76 \quad (\text{Buckling curve: d})$$

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0.5 \left[1 + 0.76 \cdot (0.14 - 0.2) + 0.14^2 \right] = 0.49$$

$$\chi_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.49 + \sqrt{0.49^2 - 0.14^2}}, 1.0 \right) = 1.00 \quad (6.56)$$

$$M_{y,b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1.00 \cdot 1783361 \cdot 355}{1.00} = 633.09 \text{ kNm} \quad (6.55)$$

$$\frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} = \frac{0.00}{633.09} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.54) - \text{OK}$$

Lateral torsional buckling, bottom flange - Part 1-1: 6.3.2.2LC: 'ULS1', $x = 6000$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$N_{cr,LT} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L_{cr})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.100e+05 \cdot 6.318e+08}{(1.00 \cdot 6000)^2} = 36374.76 \text{ kN}$$

Loaded on top edge.

$$Z = (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_i) = (0.45 \cdot 168 - 0.49 \cdot -0) = 75.56 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot N_{cr,LT} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{G \cdot I_t}{N_{cr,LT}} + Z^2 \right]^{0.5} - Z \right\} =$$

$$= 1.13 \cdot 3.637e+07 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{9.542e+11}{6.318e+08} + \frac{8.077e+04 \cdot 3.233e+08}{3.637e+07} + 75.56^2 \right]^{0.5} - 75.56 \right\} =$$

$$= 31892.84 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{3074927 \cdot 355}{3.189e+10}} = 0.19$$

$$\alpha_{LT} = 0.76 \quad (\text{Buckling curve: d})$$

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0.5 \left[1 + 0.76 \cdot (0.19 - 0.2) + 0.19^2 \right] = 0.51$$

$$\chi_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.51 + \sqrt{0.51^2 - 0.19^2}}, 1.0 \right) = 1.00 \quad (6.56)$$

$$M_{y,b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1.00 \cdot 3074927 \cdot 355}{1.00} = 1091.60 \text{ kNm} \quad (6.55)$$

$$\frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} = \frac{0.00}{1091.60} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.54) - \text{OK}$$

Interaction between normal force and bending 1. - Part 1-1: 6.3.3

LC: 'ULS1', x = 3000 mm

Class_N = 4, Class_{M1} = 4, Class_{M2} = 4

k_{fi} factors are calculated according to Method 1

$$C_{my} = 1.00$$

$$C_{mz} = 1.00$$

$$C_{mLT} = 1.00$$

$$M_{2,Rk} = f_y \cdot W_{effz} = 355 \cdot 1752119 = 622.00 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}^{comp}}{N_{b,Rd,1}} + k_{11} \cdot \frac{M_{1,Ed} + \Delta M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + k_{12} \cdot \frac{M_{2,Ed} + \Delta M_{2,Ed}}{M_{2,Rk}} =$$

$$= \frac{0.00}{6107.17} + 1.00 \cdot \frac{0.00 + 0.00}{633.09} + 1.00 \cdot \frac{602.96 + 0.00}{\frac{622.00}{1.00}} = 0.97 \leq 1.00 \quad (6.61) - \text{OK}$$

Interaction between normal force and bending 2. - Part 1-1: 6.3.3

LC: 'ULS1', x = 3000 mm

Class_N = 4, Class_{M1} = 4, Class_{M2} = 4

k_{fi} factors are calculated according to Method 1

$$C_{my} = 1.00$$

$$C_{mz} = 1.00$$

$$C_{mLT} = 1.00$$

$$M_{2,Rk} = f_y \cdot W_{effz} = 355 \cdot 1752119 = 622.00 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}^{comp}}{N_{b,Rd,2}} + k_{21} \cdot \frac{M_{1,Ed} + \Delta M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + k_{22} \cdot \frac{M_{2,Ed} + \Delta M_{2,Ed}}{M_{2,Rk}} =$$

$$= \frac{0.00}{5320.43} + 1.00 \cdot \frac{0.00 + 0.00}{633.09} + 1.00 \cdot \frac{602.96 + 0.00}{\frac{622.00}{1.00}} = 0.97 \leq 1.00 \quad (6.62) - \text{OK}$$

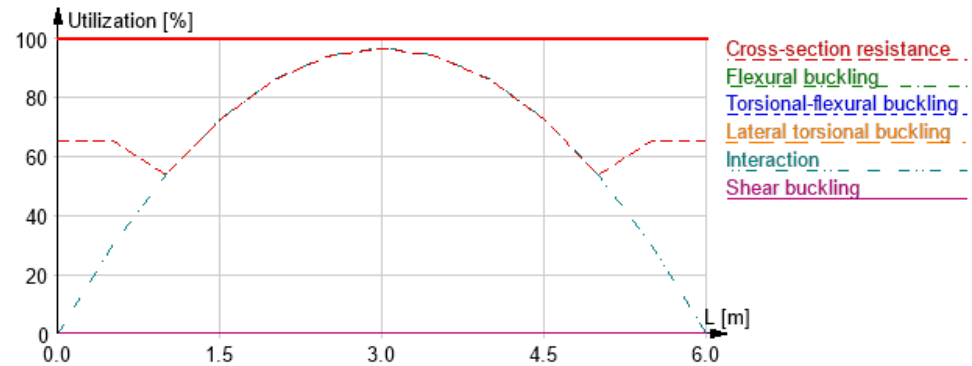
Interaction between normal force and bending, 2nd order - Part 1-1: 6.3.3

Not relevant

Shear buckling - Part 1-5: 5

$$\frac{h_w}{t} = \frac{250}{6} = 41.7 \leq \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon = \frac{72}{1.20} \cdot 0.81 = 48.8 \rightarrow \text{Not relevant}$$

Summary



5 priedas. Pleninės HSQ sijos skaičiavimo ataskaita. (4 situacija)

B.1.1

Maximum of load combinations

S 355

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

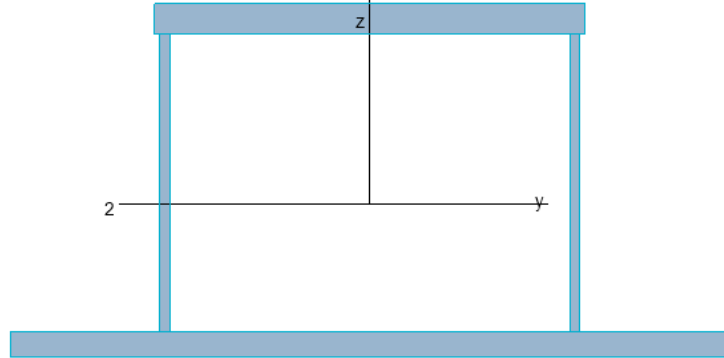
$$G = 80769 \text{ N/mm}^2$$

$$Y_{M0,ult} = 1.00 \quad Y_{M0,acc/seis} = 1.00$$

$$Y_{M1,ult} = 1.00 \quad Y_{M1,acc/seis} = 1.00$$

$$Y_{M2,ult} = 1.25 \quad Y_{M2,acc/seis} = 1.00$$

D HSQ-420x320x700/30/25/10



P	=	2110 mm	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
A	=	35900 mm ²	$\epsilon = 0.81$
I_y	=	7.839e+08 mm ⁴	$\lambda_1 = 76.40$
I_z	=	1.132e+09 mm ⁴	
I_1	=	1.132e+09 mm ⁴	
I_2	=	7.839e+08 mm ⁴	
$W_{pl,1}$	=	5.545e+06 mm ³	
$W_{pl,2}$	=	4.893e+06 mm ³	
$W_{el,min,1}$	=	3.234e+06 mm ³	
$W_{el,min,2}$	=	4.007e+06 mm ³	
i_1	=	178 mm	
i_2	=	148 mm	
I_t	=	7.312e+08 mm ⁴	
I_w	=	3.793e+12 mm ⁶	

Shear resistance, 1-1 - Part 1-1: 6.2.6, 6.2.8

LC: 'ULS1', $x = 0 \text{ mm}$

$$\text{Class}_N = 2, \text{Class}_{M1} = 2, \text{Class}_{M2} = 2$$

$$V_{1,pl,Rd} = \frac{A_{1,v} \cdot f_v}{\sqrt{3} \cdot Y_{M0}} = \frac{5800 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1.00} = 1188.76 \text{ kN} \quad (6.18)$$

$$V_{1,pl,T,Rd} = 1 - \frac{T_{t,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / Y_{M0}} \cdot V_{1,pl,Rd} = 1 - \frac{0.00}{(355 / \sqrt{3}) / 1.00} \cdot 1188.76 = 1188.76 \text{ kN} \quad (6.28)$$

$$\frac{V_{1,Ed}}{V_{1,pl,T,Rd}} = \frac{733.93}{1188.76} = 0.62 \leq 1.00 \quad (6.25) - \text{OK}$$

Shear resistance, 2-2 - Part 1-1: 6.2.6, 6.2.8

LC: 'ULS1', $x = 0 \text{ mm}$

$$\text{Class}_N = 2, \text{Class}_{M1} = 2, \text{Class}_{M2} = 2$$

$$V_{2,pl,Rd} = \frac{A_{2,v} \cdot f_v}{\sqrt{3} \cdot Y_{M0}} = \frac{30100 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1.00} = 6169.28 \text{ kN} \quad (6.18)$$

$$V_{2,pl,T,Rd} = 1 - \frac{T_{t,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / Y_{M0}} \cdot V_{2,pl,Rd} = 1 - \frac{0.00}{(355 / \sqrt{3}) / 1.00} \cdot 6169.28 = 6169.28 \text{ kN} \quad (6.28)$$

$$\frac{V_{2,Ed}}{V_{2,pl,T,Rd}} = \frac{0.00}{6169.28} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.25) - \text{OK}$$

Torsional resistance - Part 1-1: 6.2.7

LC: 'ULS1', $x = 0 \text{ mm}$

$$\text{Class}_N = 2, \text{Class}_{M1} = 2, \text{Class}_{M2} = 2$$

$T_{\max,unit} = 0.52 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{kNm}}$ is calculated by FEM analysis.

$$T_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot T_{\max,unit} \cdot Y_{M0}} = \frac{355}{\sqrt{3} \cdot 0.52 \cdot 1.00} = 392.30 \text{ kNm}$$

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} = \frac{0.00}{392.30} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.23) - \text{OK}$$

Shear stress - Part 1-1: 6.2.6

Not relevant

Normal stress - Part 1-1: 6.2.1

Not relevant

Normal capacity - Part 1-1: 6.2

LC: 'ULS1', $x = 4000 \text{ mm}$

$$\text{Class}_N = 2, \text{Class}_{M1} = 2, \text{Class}_{M2} = 2$$

$$V_{1,Ed} = 0.00 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot V_{1,pl,T,Rd} = 0.5 \cdot 1188.76 = 594.38 \text{ kN} \rightarrow \rho_1 = 0.00$$

$$V_{2,Ed} = 0.00 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot V_{2,pl,T,Rd} = 0.5 \cdot 6169.28 = 3084.64 \text{ kN} \rightarrow \rho_1 = 0.00$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{1,Ed}}{M_{1,Rd}} + \frac{M_{2,Ed}}{M_{2,Rd}} = \frac{0.00}{12744.50} + \frac{0.00}{1968.65} + \frac{1467.86}{1737.01} = 0.85 \leq 1.00 \quad (6.2) - \text{OK}$$

Flexural buckling, 1-1 - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{L_{cr,1}}{i_1 \cdot \lambda_1} = \frac{8000}{178 \cdot 76.40} = 0.59 \quad (6.50)$$

 $\alpha_1 = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_1 = 0.5 [1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda}_1 - 0.2) + \bar{\lambda}_1^2] = 0.5 [1 + 0.49 \cdot (0.59 - 0.2) + 0.59^2] = 0.77$$

$$X_1 = \min\left(\frac{1}{\varphi_1 + \sqrt{\varphi_1^2 - \bar{\lambda}_1^2}}, 1.0\right) = \min\left(\frac{1}{0.77 + \sqrt{0.77^2 - 0.59^2}}, 1.0\right) = 0.79 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,1} = \frac{X_1 \cdot A \cdot f_y}{Y_{M1}} = \frac{0.79 \cdot 35900 \cdot 355}{1.00} = 10086.66 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,1}} = \frac{0.00}{10086.66} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.46) - \text{OK}$$

Flexural buckling, 2-2 - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{L_{cr,2}}{i_2 \cdot \lambda_1} = \frac{8000}{148 \cdot 76.40} = 0.71 \quad (6.50)$$

 $\alpha_2 = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_2 = 0.5 [1 + \alpha_2 \cdot (\bar{\lambda}_2 - 0.2) + \bar{\lambda}_2^2] = 0.5 [1 + 0.49 \cdot (0.71 - 0.2) + 0.71^2] = 0.88$$

$$X_2 = \min\left(\frac{1}{\varphi_2 + \sqrt{\varphi_2^2 - \bar{\lambda}_2^2}}, 1.0\right) = \min\left(\frac{1}{0.88 + \sqrt{0.88^2 - 0.71^2}}, 1.0\right) = 0.72 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,2} = \frac{X_2 \cdot A \cdot f_y}{Y_{M1}} = \frac{0.72 \cdot 35900 \cdot 355}{1.00} = 9167.63 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,2}} = \frac{0.00}{9167.63} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.46) - \text{OK}$$

Torsional-flexural buckling - Part 1-1: 6.3.1LC: 'ULS1', $x = 0$ mmClass_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$i_0 = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + y_0^2 + z_0^2} = \sqrt{178^2 + 148^2 + 11^2 + 0^2} = 231 \text{ mm}$$

$$N_{cr,1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{L_{cr,1}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1131851667}{8000^2} = 36654.61 \text{ kN}$$

$$N_{cr,2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_2}{L_{cr,2}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 783910377}{8000^2} = 25386.65 \text{ kN}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_t^2} \right) = \frac{1}{231^2} \left(80769 \cdot 7.312e+08 + \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 3.793e+12}{8000^2} \right) = 1106617.09 \text{ kN}$$

$$i_0^2 (N - N_{cr,1}) (N - N_{cr,2}) (N - N_{cr,T}) - N^2 y_0^2 (N - N_{cr,2}) - N^2 z_0^2 (N - N_{cr,1}) = 231^2 (N - 36654.61) (N - 25386.65) (N - 1106617.09) - N^2 11^2 (N - 25386.65) - N^2 0^2 (N - 36654.61) = 0$$

Smallest root of the above equation related to the torsional-flexural buckling:

$$N_{cr,TF} = 25386.65 \text{ kN}$$

$$N_{cr} = \min(N_{cr,T}, N_{cr,TF}) = \min(1106617.09, 25386.65) = 25386.65 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{35900 \cdot 355}{25386.65}} = 0.71 \quad (6.53)$$

 $\alpha_T = 0.49$ (Buckling curve: c)

$$\varphi_T = 0.5 [1 + \alpha_T \cdot (\bar{\lambda}_T - 0.2) + \bar{\lambda}_T^2] = 0.5 [1 + 0.49 \cdot (0.71 - 0.2) + 0.71^2] = 0.88$$

$$X_T = \min\left(\frac{1}{\varphi_T + \sqrt{\varphi_T^2 - \bar{\lambda}_T^2}}, 1.0\right) = \min\left(\frac{1}{0.88 + \sqrt{0.88^2 - 0.71^2}}, 1.0\right) = 0.72 \quad (6.49)$$

$$N_{b,Rd,T} = \frac{X_T \cdot A \cdot f_y}{Y_{M1}} = \frac{0.72 \cdot 35900 \cdot 355}{1.00} = 9168.41 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,T}} = \frac{0.00}{9168.41} = 0.00 \leq 1.00 - \text{OK}$$

Lateral torsional buckling, top flange - Part 1-1: 6.3.2.2

LC: 'ULS1', x = 4000 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$N_{cr,LT} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L_{cr})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 100e+05 \cdot 1.132e+09}{(1.00 \cdot 8000)^2} = 36654.61 \text{ kN}$$

Loaded on top edge.

$$Z = (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_f) = (0.45 \cdot 149 - 0.49 \cdot -0) = 67.22 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot N_{cr,LT} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{G \cdot I_t}{N_{cr,LT}} + Z^2 \right]^{0.5} - Z \right\} =$$

$$= 1.13 \cdot 3.665e+07 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{3.793e+12}{1.132e+09} + \frac{8.077e+04 \cdot 7.312e+08}{3.665e+07} + 67.22^2 \right]^{0.5} - 67.22 \right\} =$$

$$= 49920.98 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{5545489 \cdot 355}{4.992e+10}} = 0.20$$

 $\alpha_{LT} = 0.76$ (Buckling curve: d)

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0.5 \left[1 + 0.76 \cdot (0.20 - 0.2) + 0.20^2 \right] = 0.52$$

$$X_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.52 + \sqrt{0.52^2 - 0.20^2}}, 1.0 \right) = 1.00 \quad (6.56)$$

$$M_{y,b,Rd} = \frac{X_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{Y_{M1}} = \frac{1.00 \cdot 5545489 \cdot 355}{1.00} = 1968.65 \text{ kNm} \quad (6.55)$$

$$\frac{M_{1Ed}}{M_{y,b,Rd}} = \frac{0.00}{1968.65} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.54) - \text{OK}$$

Lateral torsional buckling, bottom flange - Part 1-1: 6.3.2.2

LC: 'ULS1', x = 0 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

$$N_{cr,LT} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L_{cr})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 100e+05 \cdot 1.132e+09}{(1.00 \cdot 8000)^2} = 36654.61 \text{ kN}$$

Loaded on top edge.

$$Z = (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_f) = (0.45 \cdot 196 - 0.49 \cdot -0) = 88.05 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot N_{cr,LT} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{G \cdot I_t}{N_{cr,LT}} + Z^2 \right]^{0.5} - Z \right\} =$$

$$= 1.13 \cdot 3.665e+07 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{3.793e+12}{1.132e+09} + \frac{8.077e+04 \cdot 7.312e+08}{3.665e+07} + 88.05^2 \right]^{0.5} - 88.05 \right\} =$$

$$= 49110.98 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{5545489 \cdot 355}{4.911e+10}} = 0.20$$

 $\alpha_{LT} = 0.76$ (Buckling curve: d)

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0.5 \left[1 + 0.76 \cdot (0.20 - 0.2) + 0.20^2 \right] = 0.52$$

$$X_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1.0 \right) = \min \left(\frac{1}{0.52 + \sqrt{0.52^2 - 0.20^2}}, 1.0 \right) = 1.00 \quad (6.56)$$

$$M_{y,b,Rd} = \frac{X_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{Y_{M1}} = \frac{1.00 \cdot 5545489 \cdot 355}{1.00} = 1968.31 \text{ kNm} \quad (6.55)$$

$$\frac{M_{1Ed}}{M_{y,b,Rd}} = \frac{0.00}{1968.31} = 0.00 \leq 1.00 \quad (6.54) - \text{OK}$$

Interaction between normal force and bending 1. - Part 1-1: 6.3.3

LC: 'ULS1', x = 4000 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

k_{ij} factors are calculated according to Method 1

$$\begin{aligned} C_{my} &= 1.00 & C_{yy} &= 1.00 \\ C_{mz} &= 1.00 & C_{yz} &= 1.00 \\ C_{mLT} &= 1.00 & C_{zy} &= 1.00 \\ & & C_{zz} &= 1.07 \end{aligned}$$

$$M_{2,Rk} = f_y \cdot W_{pl,2} = 355 \cdot 4892985 = 1737.01 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}^{comp}}{N_{b,Rd,1}} + k_{11} \cdot \frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + k_{12} \cdot \frac{M_{2,Ed}}{M_{z,Rd}} &= \\ = \frac{0.00}{10086.66} + 1.00 \cdot \frac{0.00}{1968.65} + 0.47 \cdot \frac{1467.86}{\frac{1737.01}{1.00}} &= 0.40 \leq 1.00 \quad (6.61) - \text{OK} \end{aligned}$$

Interaction between normal force and bending 2. - Part 1-1: 6.3.3

LC: 'ULS1', x = 4000 mm

Class_N = 2, Class_{M1} = 2, Class_{M2} = 2

k_{ij} factors are calculated according to Method 1

$$\begin{aligned} C_{my} &= 1.00 & C_{yy} &= 1.00 \\ C_{mz} &= 1.00 & C_{yz} &= 1.00 \\ C_{mLT} &= 1.00 & C_{zy} &= 1.00 \\ & & C_{zz} &= 1.07 \end{aligned}$$

$$M_{2,Rk} = f_y \cdot W_{pl,2} = 355 \cdot 4892985 = 1737.01 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}^{comp}}{N_{b,Rd,2}} + k_{21} \cdot \frac{M_{1,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + k_{22} \cdot \frac{M_{2,Ed}}{M_{z,Rd}} &= \\ = \frac{0.00}{9167.63} + 0.76 \cdot \frac{0.00}{1968.65} + 0.93 \cdot \frac{1467.86}{\frac{1737.01}{1.00}} &= 0.79 \leq 1.00 \quad (6.62) - \text{OK} \end{aligned}$$

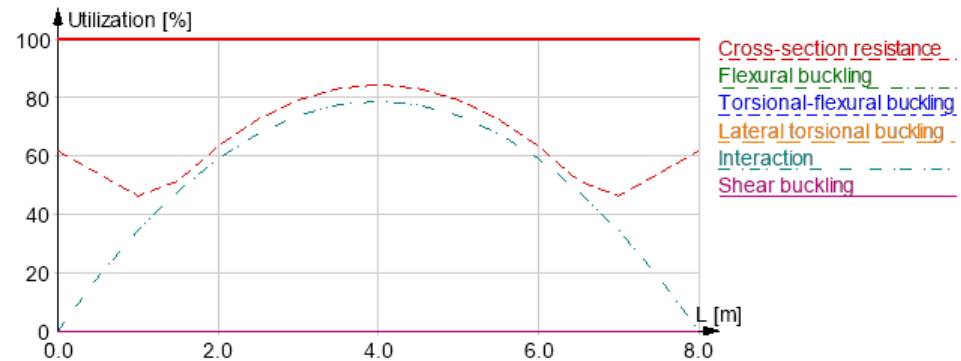
Interaction between normal force and bending, 2nd order - Part 1-1: 6.3.3

Not relevant

Shear buckling - Part 1-5: 5

$$\frac{h_w}{t} = \frac{290}{10} = 29.0 \leq \frac{72}{\eta} \quad \varepsilon = \frac{72}{1.20} \cdot 0.81 = 48.8 \rightarrow \text{Not relevant}$$

Summary



6 priedas. Kiaurymėtos plokštės h=400 skaičiavimo ataskaita. (1 gamintojas)

Plokštės ilgis

$$l_{pl} := 12\text{m}$$

Plokštės top plotis

$$b_{\text{eff}} := 1.166\text{m}$$

Ekvivalentinio skerspjūvio viršutinės lentynos storis

$$h_f := 0.055\text{m}$$

Atstumas nuo skerspj. apačios iki armatūros centro

$$a_1 := 0.04\text{m}$$

Sienelės plotis

$$b_w := 0.286\text{m}$$

Skerspjūvio plotas

$$A_c := 0.1992 \cdot \text{m}^2$$

Apkrova 18.11 kN/m²

$$q_d := 18.11 \cdot \frac{\text{kN} \cdot 1.2 \cdot \text{m}}{\text{m}^2} = 2.173 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$M_{Ed} := \frac{q_d \cdot l_{pl}^2}{8} = 391.176 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Reikalingos armatūros skerspjūvio ploto skaičiavimas

Tikriname neutralios ašies vietą: sienutėje ar lentynoje

$$\eta := 1 \quad \lambda := 0.8 \quad \gamma_c := 1.5 \quad \alpha_{cc} := 0.9 \quad \gamma_s := 1.15$$

Y1860S klasės lynai d12.9

$$f_{pk} := 1860 \cdot \text{MPa} \quad E_p := 195 \cdot 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Charakteristinis kubinis betono stipris

$$f_{ck} := 45 \text{ MPa}$$

Skaičiuotinis betono kubinis gniuždomasis stipris

$$f_{cd} := \frac{f_{ck} \cdot \alpha_{cc}}{\gamma_c} = 2.7 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Efektyvus skerspjūvio aukštis

$$d := 0.36 \text{ m}$$

Momentas nuo vidinių jėgų

$$M_{Rd} := \eta \cdot f_{cd} \cdot b_{\text{eff}} \cdot \lambda \cdot h_f \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot h_f}{2} \right) = 468.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$M_{Rd} > M_{Ed} = 1$ Viršutinėje lentynoje neutrali ašis

$$\sigma_p := 0.5 \cdot f_{pk} = 9.3 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\varepsilon_p := \frac{\sigma_p}{E_p} = 4.769 \times 10^{-3}$$

$$\Delta \varepsilon_{plim} := \left(0.9 \cdot \frac{f_{pk}}{\gamma_s \cdot E_p} \right) - \varepsilon_p = 2.696 \times 10^{-3}$$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \Delta \varepsilon_{plim}} = 0.565$$

Gniuždomąją zoną apibūdinantis dydis μ_{Eds} :

$$\mu_{Eds} := \frac{M_{Ed}}{(\eta \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot d^2)} = 0.096$$

Santykinis ekvivalentinis gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi_{eff} := (1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_{Eds}}) = 0.101$$

Santykinis gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi := \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = 0.126$$

$$\xi < \xi_{lim} = 1$$

$$f_{p0.1d} := 1440 \text{ MPa}$$

$$A_p := \xi_{eff} \cdot \eta \cdot \frac{f_{cd}}{f_{p0.1d}} \cdot b_{eff} \cdot d = 7.947 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{strain} := 100 \text{ mm}^2 \quad d12,9$$

přimu 10 lynų

$$n := 10$$

$$A_{sl} := A_{strain} \cdot n = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Istrižojo pjūvio stiprumas

$$V_{Ed} < V_{Rd,c}$$

$$C_{Rdc} := \frac{0.18}{1.5} = 0.12$$

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200}{360}} = 1.745$$

$$A_{s1} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Armavimo koeficientas:

$$\rho_1 := \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = 9.713 \times 10^{-3} \quad \blacksquare < 0.02$$

Jėga veikianti skerspjūvį (vertinus 15% lynų įtempių nuostolius)

$$N_{Ed} := 0.85 \sigma_p \cdot A_{s1} = 7.905 \times 10^5 \text{ N}$$

Skerspjūvio plotas:

$$A_{hc} := 199200 \text{ mm}^2$$

Įtempiai nuo lynų įtempimo:

$$\sigma_{cp} := \frac{N_{Ed}}{A_{hc}} = 3.968 \times 10^6 \text{ Pa} \quad \blacksquare < \blacksquare \quad 0.2 \cdot f_{cd} = 5.4 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Neamuoto elemento skersinės jėgos atsparumas apskaičiuojamas:

$$k_1 := 0.15$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot 45^{\frac{1}{2}} = 0.541$$

$$V_{Rdc} := \left[C_{Rdc} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot 45 \right)^{\frac{1}{3}} \text{ MPa} + (k_1 \cdot \sigma_{cp}) \right] \cdot b_w \cdot d = 1.372 \times 10^5 \text{ N}$$

$$V_{Rdcmin} := (v_{min} \cdot \text{MPa} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d = 1.17 \times 10^5 \text{ N}$$

$$(V_{Rdc} > V_{Rdcmin}) = 1$$

$$V_{Ed} := q_d \cdot \frac{l_{pl}}{2} = 1.304 \times 10^5 \text{ N} \quad \blacksquare < \blacksquare \quad V_{Rdc} = 1.372 \times 10^5 \text{ N}$$

$$V_{Ed} < V_{Rdc} = 1 \quad \frac{V_{Ed}}{V_{Rdc}} = 0.95$$

Supleišėjusio betono mažinamasis koeficientas:

$$v := 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) = 0.492$$

Gniuždomųjų spyrių laikomoji galia:

$$V_{Rdcmax} := 0.5 \cdot b_w \cdot d \cdot v \cdot f_{cd} = 6.839 \times 10^5 \text{ N}$$

Nesupleišėjusių zonų skersinės jėgos laikomoji galia:

$$f_{\text{ctk005}} := 2.7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{\text{ex}} := 1.5$$

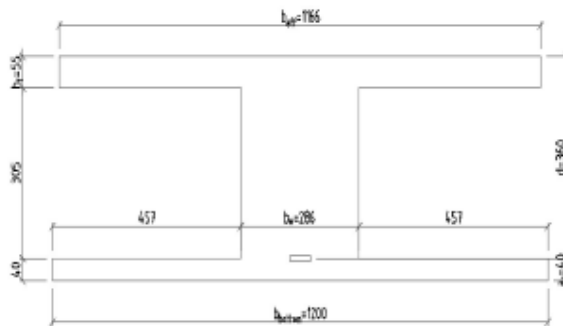
$$f_{\text{ctd}} := \frac{f_{\text{ctk005}}}{\gamma_c} = 1.8 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$I_{\text{hc}} := 4.146 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$S_{\text{hc}} := 1.313 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{Rd}} := \frac{I_{\text{hc}} \cdot b_w \sqrt{(f_{\text{ctd}})^2 + 1 \cdot \sigma_{\text{cp}} \cdot f_{\text{ctd}}}}{S_{\text{hc}}} = 2.91 \times 10^5 \text{ N}$$

PLOKŠTĖS ATSPARUMU ŠLYTIES ĮTEMPIAMS SKAIČIAVIMAS



Plokštės plotis:

$$b_{hc} := 1200 \text{ mm}$$

Statinis momentas:

$$S_{hc} := 1.3128 \cdot 10^7 \cdot \text{mm}^3$$

Inercijos momentas:

$$I_{hc} := 4.1457 \cdot 10^9 \cdot \text{mm}^4$$

Bendras sienučių plotis:

$$b_w := 286 \text{ mm}$$

Skaičiuotinė apkrova

$$q_d := 18.11 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Plokštės skersinė jėga V_{Ed} :

$$V_{Ed} := q_d \cdot b_{hc} \cdot \frac{L_{hc}}{2} = 1.304 \times 10^5 \text{ N}$$

Šlyties įtempiai nuo atraminių reakcijų:

$$\tau_{hc} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{hc}}{I_{hc} \cdot b_w} = 1.444 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Plokštės ilgis:	skerspjūvio plotas:
$L_{hc} := 12000 \text{ mm}$	$A_{hc} := 199200 \text{ mm}^2$

Plokštės aukštis:

$$h_{hc} := 400 \text{ mm}$$

Kiaurymėtos plokštės betono klasė C45/55

$$f_{ctk005} := 2.7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c := 1.5$$

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctk005}}{\gamma_c} = 1.8 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Plieno tamprumo modulis:

$$E_s := 210000 \text{ MPa}$$

Betono tamprumo modulis:

$$E_c := 36000 \text{ MPa}$$

h	Voids	voids	concrete beam	top hat beam
	Circular	non-circular		or equivalent
200	X		150	80
265	X		(185)	(90)
320		x	270	100
400		x	(400)	(115)

$$b_{\text{eff0}} := 115 \text{ mm} \quad \text{iš lentelės}$$

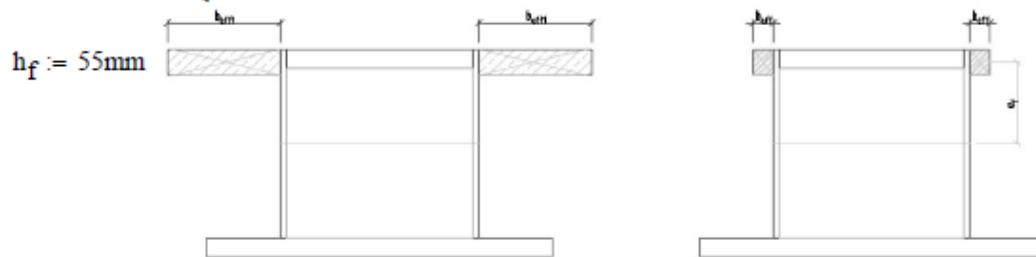
$$L_0 := 5 \text{ m}$$

$$L_s := 10 \text{ m} \quad \text{sijos ilgis}$$

$$b_{\text{eff1}} := \frac{L_s \cdot b_{\text{eff0}}}{L_0} = 0.23 \text{ m}$$

perskaičiuojamas ekvivalentinio skerspjūvio beff:

$$b_{\text{eff}} := b_{\text{eff1}} \cdot \frac{E_c}{E_s} = 0.039 \text{ m}$$



Gniuždomųjų flanšų plotas:

$$A_t := 2 \cdot b_{\text{eff}} \cdot h_f = 4.337 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Skerspjūvio Inercijos momentas :

$$I_{\text{ccs}} := 0.002062 \text{ m}^4$$

Atstumas nuo gniuždomųjų flašų iki neutraliosios skerspjūvio ašies:

$$e_f := 213 \text{ mm}$$

Skaičiuotinė apkrovų reikšmė be konstrukcijų savojo svorio:

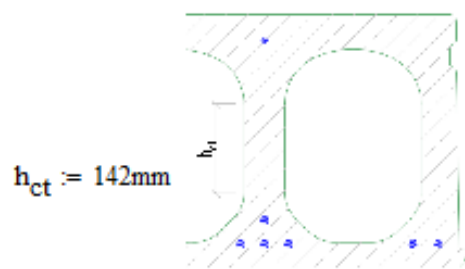
$$q_k := 1.3 \cdot 3.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1.35 \cdot 5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1.156 \times 10^4 \text{ Pa}$$

Sijos skersinė jėga:

$$V_{\text{B.Ed}} := q_k \cdot L_{\text{hc}} \cdot \frac{L_s}{2} = 6.936 \times 10^5 \text{ N}$$

Šlyties srautas išilgai sijos:

$$v_{lw} := \frac{(E_s \cdot A_t) \cdot e_f \cdot V_{B.Ed}}{(E_s \cdot I_{ccs})} = 3.263 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$



Šlyties įtempių skaičiavimas:

$$\tau_{vl} := \frac{1.5 v_{lw} \cdot b_{hc}}{2(h_{hc} - h_{ct}) \cdot b_w} = 3.98 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Įtempių nuo plokštės lynų skaičiavimas

Atrėmimo ilgis:

$$l_{sup} := 100 \text{ mm}$$

$$b_{cr} := h_{hc} - h_{ct} = 0.258 \text{ m}$$

Inkaravimo ilgis

$$L_{bpd} := 1.2 \cdot 65 \cdot 12.9 \text{ mm} = 1.006 \text{ m}$$

Koeficientas α įvertinantis nepilną įtempių perdavimą betonui

$$\alpha := \frac{l_{sup} + 0.5 \cdot b_{cr}}{L_{bpd}} = 0.228 \quad A_{strain} := 100 \text{ mm}^2 \quad n := 10$$

$$\sigma_p := 930 \text{ MPa} \quad \gamma_p := 0.9 \quad A_{sl} := A_{strain} \cdot n = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\sigma_{cp} := \frac{\alpha \cdot \gamma_p \cdot \sigma_p \cdot A_{sl}}{A_{hc}} = 9.563 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Tangentiniai įtempiai nuo lynų įtempimo

$$\tau_{cp} := 0.15 \text{ MPa}$$

Kritinė jėga:

$$F_{fail} := \left(\frac{\tau_{hc} + \tau_{cp}}{f_{ctd}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{vl}}{f_{ctd}} \right)^2 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctd}} = 5.141 \quad \blacksquare < 1$$

Principiniai įtempiai:

$$\sigma_1 := \frac{-\sigma_{cp}}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_{cp}^2}{4} + (\tau_{hc} + \tau_{cp})^2 + (\tau_{vl})^2} = 3.835 \times 10^6 \text{ Pa} \quad \blacksquare > \blacksquare f_{ctd} = 1.8 \times 10^6 \text{ Pa}$$

7 priedas. Kiaurymėtos plokštės h=400 skaičiavimo ataskaita. (2 gamintojas)

Plokštės ilgis

$$l_{pl} := 12\text{m}$$

Plokštės top plotis

$$b_{eff} := 1.150\text{m}$$

Ekvivalentinio skerspjūvio viršutinės lentynos storis

$$h_f := 0.046\text{m}$$

Atstumas nuo skerspj. apačios iki armatūros centro

$$a_1 := 0.035\text{m}$$

Sienelės plotis

$$b_w := 0.265\text{m}$$

Skerspjūvio plotas

$$A_c := 0,1992 \cdot \text{m}^2$$

Apkrova 18.11 kN/m²

$$q_d := 18.11 \cdot \frac{\text{kN} \cdot 1.2 \cdot \text{m}}{\text{m}^2} = 2.173 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$M_{Ed} := \frac{q_d \cdot l_{pl}^2}{8} = 391.176 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Reikalingos armatūros skerspjūvio ploto skaičiavimas

Tikriname neutralios ašies vietą: sienutėje ar lentynoje

$$\eta := 1 \quad \lambda := 0.8 \quad \gamma_c := 1.5 \quad \alpha_{cc} := 0.9 \quad \gamma_s := 1.15$$

Y1860S klasės lynai d12.9

$$f_{pk} := 1860 \cdot \text{MPa} \quad E_p := 195 \cdot 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Charakteristinis kubinis betono stipris Skaičiuotinis betono kubinis gniuždomasis stipris

$$f_{ck} := 45 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} := \frac{f_{ck} \cdot \alpha_{cc}}{\gamma_c} = 2.7 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Efektyvus skerspjūvio aukštis

$$d := 0.365 \cdot \text{m}$$

Momentas nuo vidinių jėgų

$$M_{Rd} := \eta \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot \lambda \cdot h_f \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot h_f}{2} \right) = 396.039 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$M_{Rd} > M_{Ed} = 1$ Viršutinėje lentynoje neutrali ašis

$$\sigma_p := 0.5 \cdot f_{pk} = 9.3 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\varepsilon_p := \frac{\sigma_p}{E_p} = 4.769 \times 10^{-3}$$

$$\Delta\varepsilon_{plim} := \left(0.9 \cdot \frac{f_{pk}}{\gamma_s \cdot E_p} \right) - \varepsilon_p = 2.696 \times 10^{-3}$$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \Delta\varepsilon_{plim}} = 0.565$$

Gniuždomąją zoną apibūdinantis dydis μ_{Eds} :

$$\mu_{Eds} := \frac{M_{Ed}}{\left(\eta \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot d^2 \right)} = 0.095$$

Santykinis ekvivalentinis gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi_{eff} := \left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_{Eds}} \right) = 0.1$$

Santykinis gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi := \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = 0.124$$

$$\xi < \xi_{lim} = 1$$

$$f_{p0.1d} := 1440 \text{ MPa}$$

$$A_p := \xi_{eff} \cdot \eta \cdot \frac{f_{cd}}{f_{p0.1d}} \cdot b_{eff} \cdot d = 7.832 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{strain} := 100 \text{ mm}^2 \quad d12,9$$

priimu 10 lynų

$$n := 10$$

$$A_{sl} := A_{strain} \cdot n = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

[strižojo pjūvio stiprumas

$$V_{Ed} < V_{Rd,c}$$

$$C_{Rdc} := \frac{0.18}{1.5} = 0.12$$

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200}{365}} = 1.74$$

$$A_{s1} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Armavimo koeficientas:

$$\rho_1 := \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = 0.01 \quad \rho < 0.02$$

Jėga veikianti skerspjūvį (įvertinus 15% lynų įtempių nuostolius)

$$N_{Ed} := 0.85 \sigma_p \cdot A_{s1} = 7.905 \times 10^5 \text{ N}$$

Skerspjūvio plotas:

$$A_{hc} := 178600 \text{ mm}^2$$

Įtempiai nuo lynų įtempimo:

$$\sigma_{cp} := \frac{N_{Ed}}{A_{hc}} = 4.426 \times 10^6 \text{ Pa} \quad \rho < \rho_{lim} = 0.2 \cdot f_{cd} = 5.4 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$k_1 := 0.15$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot 45^{\frac{1}{2}} = 0.539$$

Nearmuoto elemento skersinės jėgos atsparumas apskaičiuojamas:

$$V_{Rdc} := \left[C_{Rdc} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot 45)^{\frac{1}{3}} \text{ MPa} + (k_1 \cdot \sigma_{cp}) \right] \cdot b_w \cdot d = 1.369 \times 10^5 \text{ N}$$

$$V_{Rdcmin} := (v_{min} \cdot \text{MPa} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d = 1.164 \times 10^5 \text{ N}$$

$$(V_{Rdc} > V_{Rdcmin}) = 1$$

$$V_{Ed} := q_d \cdot \frac{l_p1}{2} = 1.304 \times 10^5 \text{ N} \quad \rho < \rho_{lim} \quad V_{Rdc} = 1.369 \times 10^5 \text{ N}$$

$$V_{Ed} < V_{Rdc} = 1 \quad \frac{V_{Ed}}{V_{Rdc}} = 0.953$$

Supleišėjusio betono mažinamasis koeficientas:

$$v := 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) = 0.492$$

Gniuždomųjų spyrių laikomoji galia:

$$V_{Rdcmax} := 0.5 \cdot b_w \cdot d \cdot v \cdot f_{cd} = 6.424 \times 10^5 \text{ N}$$

$$f_{\text{ctk005}} := 2.7 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{\text{a1}} := 1.5$$

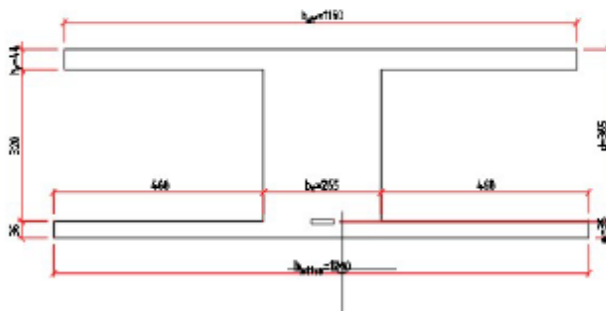
$$f_{\text{ctd}} := \frac{f_{\text{ctk005}}}{\gamma_c} = 1.8 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$I_{\text{hc}} := 3.768 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$S_{\text{hc}} := 1.656 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{Rd}} := \frac{I_{\text{hc}} \cdot b_w \cdot \sqrt{(f_{\text{ctd}})^2 + 1 \cdot \sigma_{\text{cp}} \cdot f_{\text{ctd}}}}{S_{\text{hc}}} = 2.019 \times 10^5 \text{ N}$$

PLOKŠTĖS ATSPARUMU ŠLYTIES ĮTEMPIAMS SKAIČIAVIMAS



Plokštės plotis:

$$b_{fc} := 1200 \text{ mm}$$

Statinis momentas:

$$S_{hc} := 1.18195 \cdot 10^7 \cdot \text{mm}^3$$

Inercijos momentas:

$$I_{hc} := 3.768 \cdot 10^9 \cdot \text{mm}^4$$

Bendras sienelių plotis:

$$b_w := 265 \text{ mm}$$

Skaičiuotinė apkrova

$$q_d := 18.11 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Plokštės skersinė jėga V_{Ed} :

$$V_{Ed} := q_d \cdot b_{fc} \cdot \frac{L_{hc}}{2} = 1.304 \times 10^5 \text{ N}$$

Šlyties įtempiai nuo atraminių reakcijų:

$$\tau_{hc} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{hc}}{I_{hc} \cdot b_w} = 1.543 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Plokštės ilgis:

$$L_{hc} := 12000 \text{ mm}$$

Plokštės aukštis:

$$h_{hc} := 400 \text{ mm}$$

Kiaurymėtos plokštės betono klasė C45/55

$$f_{ctk005} := 2.7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c := 1.5$$

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctk005}}{\gamma_c} = 1.8 \times 10^6 \text{ Pa}$$

skerspjūvio plotas:

$$A_{hc} := 178600 \text{ mm}^2$$

Plieno tamprumo modulis:

$$E_s := 210000 \text{ MPa}$$

Betono tamprumo modulis:

$$E_c := 36000 \text{ MPa}$$

h	Voids Circular	voids non-circular	concrete beam	top hat beam or equivalent
200	X		150	80
265	X		(185)	(90)
320		x	370	100
400		x	(400)	(115)

$$b_{\text{eff0}} := 115 \text{ mm} \quad \text{iš lentelės}$$

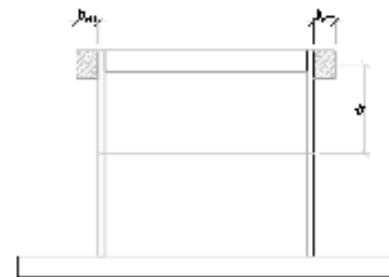
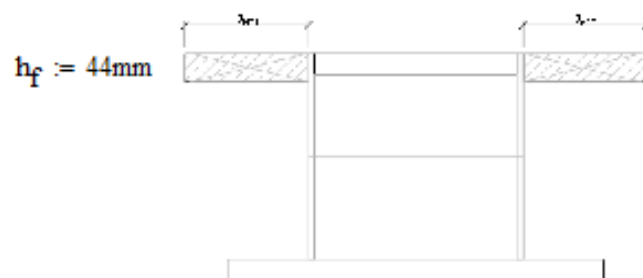
$$L_0 := 5 \text{ m}$$

$$L_s := 10 \text{ m} \quad \text{sijos ilgis}$$

$$b_{\text{eff1}} := \frac{L_s \cdot b_{\text{eff0}}}{L_0} = 0.23 \text{ m}$$

perskaičiuojamas ekvivalentinio skerspjūvio beff.

$$b_{\text{eff}} := b_{\text{eff1}} \cdot \frac{E_c}{E_s} = 0.039 \text{ m}$$



Gniuždomųjų flanšų plotas:

$$A_t := 2 \cdot b_{\text{eff}} \cdot h_f = 3.47 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Skerspjūvio Inercijos momentas :

$$I_{\text{CCS}} := 0.0020295 \text{ m}^4$$

Atstumas nuo gniuždomų flašų iki neutraliosios skerspjūvio ašies:

$$e_f := 221 \text{ mm}$$

Skaičiuotinė kintamo apkrovos reikšmė:

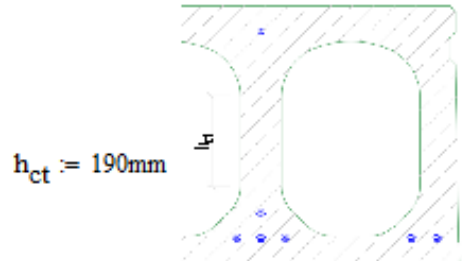
$$q_k := 1.3 \cdot 3.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1.35 \cdot 5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1.156 \times 10^4 \text{ Pa}$$

Sijos skersinė jėga:

$$V_{\text{BEd}} := q_k \cdot L_{\text{hc}} \cdot \frac{L_s}{2} = 6.936 \times 10^5 \text{ N}$$

Šlyties srautas išilgai sijos:

$$v_{lw} := \frac{(E_s \cdot A_t) \cdot e_f \cdot V_{B.Ed}}{(E_s \cdot I_{ccs})} = 2.621 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$



Šlyties įtempių skaičiavimas:

$$\tau_{vl} := \frac{1.5v_{lw} \cdot b_{hc}}{2(h_{hc} - h_{ct}) \cdot b_w} = 4.238 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Įtempių nuo plokštės lynų skaičiavimas

Atrėmimo ilgis:

$$l_{sup} := 100 \text{ mm}$$

$$b_{cr} := h_{hc} - h_{ct} = 0.21 \text{ m}$$

Inkaravimo ilgis

$$L_{bpd} := 1.2 \cdot 65 \cdot 12.9 \text{ mm} = 1.006 \text{ m}$$

Koeficientas α įvertinantis nepilną įtempių perdavimą betonui

$$\alpha := \frac{l_{sup} + 0.5 \cdot b_{cr}}{L_{bpd}} = 0.204 \quad A_{strain} := 100 \text{ mm}^2 \quad n := 10$$

$$\sigma_p := 930 \text{ MPa} \quad \gamma_p := 0.9 \quad A_{sl} := A_{strain} \cdot n = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Betono įtempiai dėl lynų įtempimo įvertinus nepilną užsiinkaravimą:

$$\sigma_{cp} := \frac{\alpha \cdot \gamma_p \cdot \sigma_p \cdot A_{sl}}{A_{hc}} = 9.548 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Tangentiniai įtempiai nuo lynų įtempimo

$$\tau_{cp} := 0.15 \text{ MPa}$$

Kritinė jėga:

$$F_{fail} := \left(\frac{\tau_{hc} + \tau_{cp}}{f_{ctd}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{vl}}{f_{ctd}} \right)^2 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctd}} = 5.899 \quad \bullet < 1$$

Principiniai įtempiai:

$$\sigma_1 := \frac{-\sigma_{cp}}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_{cp}^2}{4} + (\tau_{hc} + \tau_{cp})^2 + \tau_{vl}^2} = 4.112 \times 10^6 \text{ Pa} \quad \bullet > \bullet \quad f_{ctd} = 1.8 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Kitų plokščių ir situacijų skaičiavimai atliekami analogiškai.