



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Gelžbetoninių besijinių perdangų praspaudžiamosios zonos stiprumo analizė**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Tumantas Nikonovas**

Projekto autorius

**Doc. dr. Mindaugas Augonis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Gelžbetoninių besijinių perdangų praspaudžiamosios zonos stiprumo analizė**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Tumantas Nikonovas**

Projekto autorius

**Doc. dr. Mindaugas Augonis**

Vadovas

**Lekt. dr. Nerijus Adamukaitis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Tumantas Nikonovas

## **Gelžbetoninių besijinių perdangų praspaudžiamosios zonos stiprumo analizė**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Tumantas Nikonovas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Magistro baigiamojo projekto užduotis**

**Studijų programa:** STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

**Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):**  
GELŽBETONINIŲ BESIJINIŲ PERDANGŲ PRASPAUDŽIAMOSIOS ZONOS STIPRUMO  
ANALIZĖ

**Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanı potvarkiu Nr.:** ST18-F-09-3

**(lietuvių k.): GELŽBETONINIŲ BESIJINIŲ PERDANGŲ PRASPAUDŽIAMOSIOS ZONOS  
STIPRUMO ANALIZĖ**

**(anglų k.): THE RESISTANCE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FLAT SLAB  
PUNCHING SHEAR ZONE**

**Pradiniai duomenys darbui:**

|  |
|--|
|  |
|--|

**Baigiamojo projekto dalys:**

|                          | <b>Atlikti</b>           |
|--------------------------|--------------------------|
| Įvadas                   | <b>x</b>                 |
| Literatūros apžvalga     | <b>x</b>                 |
| Metodologija             | <b>x</b>                 |
| Eksperimentiniai tyrimai | <input type="checkbox"/> |
| Analitiniai tyrimai      | <b>x</b>                 |
| Skaitiniai tyrimai       | <input type="checkbox"/> |
| Ekonominė dalis          | <input type="checkbox"/> |
| Išvados                  | <b>x</b>                 |

**Kita informacija (pagal poreikį):**

**KONSULTACIJŲ LAIKAS: NELYGINĖMIS SAVAITĖMIS PENKTADIENIAIS 17:30-18:00,  
(NUOTOLINĖ KONSULTACIJA ZOOM PLATFORMOJE)**

**Vadovas:** Doc. dr. Mindaugas Augonis  
(indėlis 100 %) *pareigos, vardas, pavardė*  
*Patvirtinta elektroniniu būdu*

**Studentas:** Tumantas Nikonovas  
*vardas, pavardė*  
*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Tumantas Nikonovas. Gelžbetoninių besijinių perdangų praspaudžiamosios zonos stiprumo analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: besijinės perdangos plokštės, praspaudžiamoji šlytis, projektavimo normos, skersinis armavimas.

Kaunas, 2022. 89 p.

### **Santrauka**

Magistro baigiamajame projekte nagrinėjamas praspaudimas, galintis pasireiškianti besijinės perdangos plokštės ir kolonos sandūroje. Tyrimo metu buvo identifikuoti pagrindiniai kriterijai, nulemiantys gelžbetoninių besijinių perdangos plokščių praspaudžiamosios šlyties galią, bei nustatytos tiksliausios ir patikimiausios skaičiavimo metodikos.

Analitinėje darbo dalyje apžvelgiamos skirtingos skaičiavimo metodikos, kai gelžbetoninėje perdangos plokštėje netaikomas skersinis armavimas ir kai naudojami armatūros strypai arba strypai su galvutėmis abėjuose galuose. Identifikuojamos projektavimo normose pateikiamos skaičiavimų formulės bei jose taikomos prielaidos. Teorinės laikomųjų galių vertės buvo lyginamos su eksperimentinėmis, nustatant tiksliausias ir, tuo pačiu, patikimiausias bei nepatikimiausias skaičiavimo metodikas. Tyrimo metu taip pat buvo analizuojama betono stiprio gniuždant, išilginės armatūros intensyvumo, kolonos perimetro ir efektyvaus aukščio santykio bei skersinio armavimo įtaka rezultatų tikslumui atskirai. Atsižvelgiant į gautus rezultatus buvo įvesti ribojimai atskiroms dedamosioms, kurių dėka pavyko pagerinti skaičiavimo metodikų tikslumą ir sumažinti gaunamų rezultatų sklaidą.

Baigiamojo darbo apimtis – 89 psl., teksto be priedų – 65 psl., lentelių skaičius – 12 vnt., paveikslų skaičius – 36 vnt., literatūros sąrašas – 42 šaltiniai, priedai – 6 vnt.

Tumantas Nikonovas. The Resistance Analysis of Reinforced Concrete Flat Slab Punching Shear Zone Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Mindaugas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Flat slab, punching shear, design proposals, shear reinforcement.

Kaunas, 2022. 89 pages.

### **Summary**

This Master's thesis aims to analyze punching shear failure which happens to occur in the connection of flat slab and column. During the analysis, the main criteria of punching shear failure together with the most accurate and reliable calculation method were identified.

In the analytical part of the thesis, different design proposals were covered when reinforced concrete slab is without shear reinforcement and when shear stirrups and double headed studs are used. Calculation methods and design assumptions for punching shear resistance of those different design proposals were analyzed. Theoretical and experimental resistance comparison helped to find the most accurate and reliable design proposal. In this thesis, the influence of compressive concrete strength, longitudinal tensile reinforcement ratio, column perimeter and effective slab height ratio and shear reinforcement for the accuracy of calculation results were analyzed. Based on obtained results, restrictions were implemented for the individual components, which helped to improve the accuracy of the calculation methodologies and to reduce the dispersion of the results.

Master thesis consist of 89 pages, text without appendixes – 65 pages, number of tables – 12, number of illustrations – 36, references – 42, appendixes – 6.

## Turinys

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Lentelių sąrašas .....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>Paveikslų sąrašas .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>Įvadas.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>1. Literatūros apžvalga .....</b>   | <b>13</b> |
| 1.1. Nagrinėjama problema .....  | 13        |
| 1.2. Praspaudimas be skersinės armatūros .....   | 14        |
| 1.3. Pagrindinės charakteristikos, nulemiančios praspaudžiamąją galią be skersinio armavimo....  | 14        |
| 1.3.1. Išilginio armavimo įtaka praspaudžiamajam stipriui .....  | 15        |
| 1.3.2. Betono stiprio gniuždant įtaka praspaudžiamajam stipriui .....  | 15        |
| 1.3.3. Efektyvaus skerspjuvio aukščio įtaka praspaudžiamajam stipriui .....  | 16        |
| 1.3.4. Kolonos dydžio ir formos įtaka praspaudžiamajam stipriui.....   | 16        |
| 1.3.5. Kolonos padėties perdangoje įtaka praspaudžiamajam stipriui.....  | 16        |
| 1.3.6. Pagrindinio tikrinamojo perimetro įtaka praspaudžiamajam stipriui .....   | 17        |
| 1.4. Praspaudimo skaičiavimo modeliai .....  | 17        |
| 1.5. Laikomosios galios didinimas storinant koloną .....   | 19        |
| 1.6. Laikomosios galios didinimas naudojant skersinį armavimą.....   | 20        |
| 1.6.1. Pagrindinės charakteristikos, nulemiančios praspaudžiamąją galią be skersinio armavimo  | 22        |
| <b>2. Analitinis tyrimas .....</b>   | <b>24</b> |
| 2.1. Praspaudimo analizė be skersinio armavimo .....   | 24        |
| 2.1.1. Praspaudžiamosios galios be skersinio armavimo skaičiavimų metodikų analizė.....  | 24        |
| 2.1.2. Priimamos prielaidos teoriniam praspaudžiamajam stipriui skaičiuoti, kai perdangos plokštėje nenaudojamas skersinis armavimas ..... | 30        |
| 2.1.3. Perdangos plokščių be skersinė armatūros eksperimentiniai duomenys.....   | 31        |
| 2.1.4. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas, kai perdangos plokštė be skersinio armavimo .....                                | 35        |
| 2.1.5. Projektavimo normų tikslumas, priklausomai nuo armavimo intensyvumo .....   | 38        |
| 2.1.6. Projektavimo normų tikslumas, priklausomai nuo betono stiprio gniuždant.....  | 40        |
| 2.1.7. Projektavimo normų tikslumas, priklausomai nuo kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykio .....            | 41        |
| 2.1.8. Apribojimų įvedimas projektavimo normoms, skaičiuojant praspaudimą be skersinės armatūros .....                                     | 42        |
| 2.2. Praspaudimo analizė su skersiniu armavimu.....  | 43        |
| 2.2.1. Praspaudžiamosios galios su skersiniu armavimu skaičiavimų metodikų analizė.....  | 43        |
| 2.2.2. Perdangos su skersine armatūra teorinių praspaudimo laikomųjų galių skaičiavimas.....   | 51        |
| 2.2.3. Perdangos plokščių su skersine armatūra eksperimentiniai duomenys.....  | 52        |
| 2.2.4. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas, kai perdangos plokštė su skersiniu armavimu.....                                 | 55        |
| 2.2.5. Skersinės armatūros intensyvumo įtaka projektavimo normų tikslumui .....  | 59        |
| 2.2.6. Praspaudimo laikomųjų galių prieaugis naudojant skersinį armavimą. ....   | 60        |
| <b>Išvados .....</b>   | <b>62</b> |
| <b>Literatūros sąrašas .....</b>   | <b>63</b> |
| <b>Priedai.....</b>  | <b>66</b> |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | priedas. Kiekvieno bandinio eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė nuo armavimo intensyvumo pagal skirtingas projektavimo normas .....   | 66 |
| 2 | priedas. Kiekvieno bandinio eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė nuo betono stiprio gniuždant pagal skirtingas projektavimo normas .....   | 67 |
| 3 | priedas. Kiekvieno bandinio eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė nuo kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykio pagal skirtingas projektavimo normas..... | 68 |
| 4 | priedas. Kiekvieno bandinio eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė nuo skersinio armavimo intensyvumo pagal skirtingas projektavimo normas.....                                      | 69 |
| 5 | priedas. Kiekvieno bandinio teorinių praspaudimo laikomųjų galių palyginimas, kai perdangos plokštė su skersiniu armavimu ir be skersinio armavimo pagal skirtingas projektavimo normas ....                     | 71 |
| 6 | priedas. Projektavimo normų palyginimas, skaičiuojant PL9 bandinį.....   | 72 |



## Lentelių sąrašas

|   |    |
|---|----|
| <b>1 lentelė.</b> Eksperimentinių bandinių be skersinio armavimo parametrai, ardomosios galios ir jų palyginimas su teoriniais rezultatais pagal skirtingas projektavimo normas ..... | 32 |
| <b>2 lentelė.</b> Projektavimo normų tikslumo analizė, skaičiuojant praspaudimą be skersio armavimo..   | 35 |
| <b>3 lentelė.</b> Projektavimo normų tikslumas, esant skirtingam išilginio armavimo intensyvumui .....  | 39 |
| <b>4 lentelė.</b> Projektavimo normų tikslumas, esant skirtingam betono stipriui gniuždant .....  | 40 |
| <b>5 lentelė.</b> Projektavimo normų tikslumas, esant skirtingam kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščių santykiui .....   | 42 |
| <b>6 lentelė.</b> Rezultatų suvestinė, įvedus numatytus ribojimus projektavimo normoms .....  | 43 |
| <b>7 lentelė.</b> Eksperimentinių bandinių su skersiniu armavimu parametrai reikalingi teorinėms praspaudimo laikomosios galioms apskaičiuoti .....                                   | 53 |
| <b>8 lentelė.</b> Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas atsižvelgiant į suirimo pobūdį.....   | 55 |
| <b>9 lentelė.</b> Projektavimo normų tikslumo analizė, skaičiuojant praspaudimą su skersiniu armavimu   | 57 |
| <b>10 lentelė.</b> Projektavimo normų tikslumas, esant skirtingam skersinio armavimo intensyvumui....   | 59 |
| <b>11 lentelė.</b> Praspaudimo laikomosios galios prieaugio analizė pagal skirtingas projektavimo normas .....  | 60 |
| <b>12 lentelė.</b> $k_{max,STR}$ koeficiento įtaka STR 2.05.05:2005 skaičiavimo metodikos tikslumui.....  | 60 |

## Paveikslų sąrašas

|  |    |
|--|----|
| <b>1 pav.</b> Praspaudimas ties gelžbetoninės perdangos plokštės ir kolonos sandūra [3] .....  | 13 |
| <b>2 pav.</b> Daugiaaukštės stovėjimo aikštelės griūtis, Wolverhamptone, Anglijoje 1997 [5] .....  | 13 |
| <b>3 pav.</b> Praspaudimo formavimasis be skersinio armavimo [9] .....   | 14 |
| <b>4 pav.</b> Apkrovų ir deformacijų priklausomybė nuo išilginės armatūros kiekio [15] .....   | 15 |
| <b>5 pav.</b> Rekomenduojamos $\beta$ koeficiento reikšmės pagal <i>Eurocode 2</i> [11] .....  | 17 |
| <b>6 pav.</b> Plokštės praspaudimo skaičiuojamoji schema [11],[20]. a) pagal <i>Eurocode 2</i> ; b) pagal STR 2.05.05:2005; A – pagrindinis tikrinamasis skerspjūvis. ....                             | 17 |
| <b>7 pav.</b> Perpjauta perdangos plokštė be skersinio armavimo [4].....   | 18 |
| <b>8 pav.</b> Perpjauta perdangos plokštė su skersiniu armavimu [4].....   | 18 |
| <b>9 pav.</b> CEB-FIB skaičiavimo modelių patikimumo analizė [26].....   | 19 |
| <b>10 pav.</b> Kolonos su kapiteliu tikrinamieji perimetrai.....   | 20 |
| <b>11 pav.</b> Stygų ir spyrių modelis perdangos plokštėje su skersiniu armavimu [31].....   | 20 |
| <b>12 pav.</b> Praspaudimo suirimo pobūdžiai, naudojant skersinį armavimą [32] .....   | 21 |
| <b>13 pav.</b> Skersinės armatūros išdėliojimo ir tikrinamųjų perimetrų atstumai, pagal <i>Eurocode 2</i> projektavimo normas [34] .....   | 22 |
| <b>14 pav.</b> Skersinės armatūros stiprumo ir praslydimo priklausomybė nuo skirtingų inkaravimo būdų [35] .....   | 23 |
| <b>15 pav.</b> Tikrinamojo perimetro schema pagal STR 2.05.05:2005 projektavimo normas .....   | 26 |
| <b>16 pav.</b> Tikrinamojo perimetro schema pagal <i>Eurocode 2</i> projektavimo normas .....  | 26 |
| <b>17 pav.</b> Tikrinamojo perimetro schema pagal DIN-1045 projektavimo normas .....   | 28 |
| <b>18 pav.</b> Tikrinamojo perimetro schema pagal BS 8110 projektavimo normas.....   | 28 |
| <b>19 pav.</b> Tikrinamojo perimetro schema pagal ACI 318-08 projektavimo normas .....   | 29 |
| <b>20 pav.</b> Tikrinamojo perimetro schema pagal SNiP 2.03.01-84 projektavimo normas.....   | 30 |
| <b>21 pav.</b> Projektavimo normų reikšmių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai, kai skaičiuojamas praspaudimas be skersinės armatūros.....   | 35 |
| <b>22 pav.</b> Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas (1-20 bandiniai)...   | 36 |
| <b>23 pav.</b> Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas (21-40 bandiniai)..   | 36 |
| <b>24 pav.</b> Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas (41-60 bandiniai)..   | 37 |
| <b>25 pav.</b> Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas (61-80 bandiniai)..   | 37 |
| <b>26 pav.</b> Eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykio priklausomybė nuo armavimo intensyvumo pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas.....             | 38 |
| <b>27 pav.</b> Variacijos koeficiento priklausomybė nuo kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykio .....  | 41 |
| <b>28 pav.</b> Praspaudimo laikomosios galios skaičiavimuose vertinamos suirimo sąlygos, kai perdangos plokštėje naudojamas skersinis armavimas [39] .....   | 44 |
| <b>29 pav.</b> Zonų paskirstymas pagal EOTA TR60 ir didžiausi galimi atstumai tarp strypų [37].....  | 47 |
| <b>30 pav.</b> Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai naudojamas skersinis armavimas (1-18 bandiniai) .....  | 56 |
| <b>31 pav.</b> Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai naudojamas skersinis armavimas (19-36 bandiniai) ..... | 56 |

|  |    |
|--|----|
| <b>32 pav.</b> Projektavimo normų reikšmių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai, kai vertinami visi skersinės armatūros tipai kartu .....                           | 58 |
| <b>33 pav.</b> Projektavimo normų reikšmių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai, kai vertinami tik skersinės armatūros strypai .....                                | 58 |
| <b>34 pav.</b> Projektavimo normų reikšmių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai, kai vertinami tik skersinės armatūros strypai su galvutėmis abėjuose galuose ..... | 58 |
| <b>35 pav.</b> STR 2.05.05:2005 skaičiavimo metodikos tikslumas, kai nevertinamas $k_{max,STR}$ koeficientas .....   | 61 |
| <b>36 pav.</b> STR 2.05.05:2005 skaičiavimo metodikos tikslumas, kai vertinamas $k_{max,STR}$ koeficientas   | 61 |

## Įvadas

### Darbo aktualumas

Augant statybinių medžiagų ir statybos darbų kainoms, projektuotojai stengiasi ieškoti naujų, tvaresnių ir ekonomiškesnių sprendimų. Būtent dėl, to šiuolaikinėje statyboje neretai sutinkamos gelžbetoninės konstrukcijos, kurios pasižymi ilgalaikiškumu bei santykinai maža statybos ir eksploatacijos kaina. Daugiaaukštėje pastatų statyboje neretai naudojamos gelžbetoninės besijinės perdangos plokštės, kurių privalumas yra greita statyba, naudojant perstatomus klojinius. Tačiau tokio tipo konstrukcijose, ties kolonos ir gelžbetoninės perdangos plokštės sandūra, gali susidaryti praspaudžiamoji šlytis. Siekiant išvengti galimo suirimo dėl praspaudimo, inžinieriams neretai tenka numatyti skersinį armavimą, o jei šio nepakanka, storinti perdangos plokštę arba kolonas, dėl ko kartais gali išaugti viso projekto kaina. Šie konstrukciniai sprendimai atliekami vadovaujantis projektavimo normose pateikiama skaičiavimų metodika, kuri tarp skirtingų šalių yra nevienoda. Todėl analizuojant tą pačią situaciją pagal skirtingų šalių projektavimo normas, gaunami rezultatai gali ženkliai skirtis.

**Tyrimo objektas** – gelžbetoninių besijinių perdangų praspaudžiamosios zonos skaičiavimo metodikos, kai netaikomas skersinis armavimas ir kai naudojami armatūros strypai arba strypai su galvutėmis abėjuose galuose.

**Darbo tikslas** – identifikuoti pagrindinius kriterijus, nulemiančius gelžbetoninių besijų perdangos plokščių praspaudžiamosios šlyties galią, nustatant tiksliausią ir patikimiausią skaičiavimo metodiką.

### Darbo uždaviniai

1. Atlikti išsamią gelžbetoninių besijinių perdangos plokščių praspaudžiamosios šlyties tyrimų literatūros analizę, nustatant pagrindinius kriterijus, apsprendžiančius laikomąją galią praspaudimui.
2. Išanalizuoti skirtingas skaičiavimo metodikas, skirtas praspaudžiamosios šlyties laikomajai galiai nustatyti, kai nenaudojamas skersinis armavimas ir, lyginant eksperimentinius duomenis su teoriniais, identifikuoti tiksliausias skaičiavimo metodikas.
3. Nustatyti ribojimus projektavimo normoms praspaudimo laikomosios galios skaičiavime be skersinio armavimo, kurių laikantis gaunamų rezultatų sklaida būtų sumažinama.
4. Išanalizuoti skirtingas skaičiavimo metodikas, skirtas praspaudžiamosios šlyties laikomajai galiai nustatyti, kai naudojamas skersinis armavimas iš armatūros strypų ir strypų su galvutėmis abėjuose galuose bei lyginant eksperimentinius duomenis su teoriniais, identifikuoti tiksliausias skaičiavimo metodikas.
5. Nustatyti ribojimus projektavimo normoms praspaudimo laikomosios galios skaičiavime su skersiniu armavimu, kurių laikantis gaunamų rezultatų sklaida būtų sumažinama.

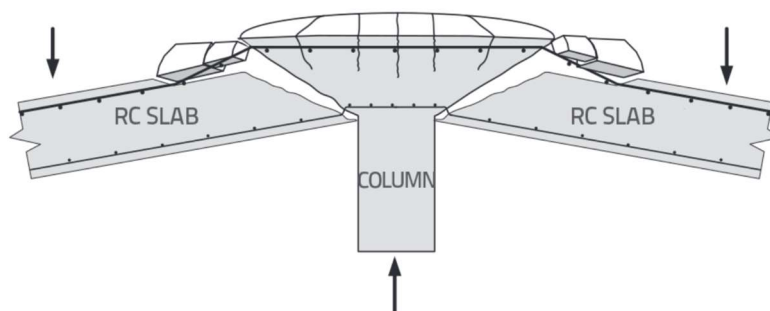
**Mokslinis naujumas** – skirtingose projektavimo normose praspaudžiamoji galia skaičiuojama nevienodai, dėl to gaunami rezultatai tai pačiai situacijai gali būti skirtingi. Numatyti ribojimai projektavimo normoms padės tiksliau įvertinti realią praspaudimo laikomąją galią.

**Praktinė vertė** – atliktame tyrime nustatytos tiksliausios bei patikimiausios skaičiavimo metodikos, kuriomis remiantis gaunamos praspaudimo laikomosios galios geriausiai atspindi realią situaciją.

## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1. Nagrinėjama problema

Monolitinio gelžbetonio konstrukcijos buvo pradėtos taikyti daugiau nei prieš 100 metų. Dar 1905–1909 metais Amerikoje pirmasis besijines perdangos plokštės pritaikė inžinierius Turner [1], o panašiu laikotarpiu (1909 metais) Šveicarijoje, nagrinėtą sistemą su kapiteliais užpatentavo Maillart [2]. Šiai dienai monolitinės besijės perdangos plokštės yra dažnai taikomos daugiaaukščių pastatų statyboje. Jos pasižymi greita ir ekonomiška statyba bei leidžia išgauti išskirtines architektūrines formas. Kadangi gelžbetoninėje perdangos plokštėje nenaudojamos sijos, galima sutaupyti atskirų aukštų ir, tuo pačiu, sumažinti viso pastato aukštį. Tačiau jautrioji šios sistemos dalis yra gelžbetoninės perdangos plokštės ir kolonos sandūra, kurioje susidarius didelei įtempių koncentracijai atsiranda riziką įvykti praspaudimui (žr. 1 pav.).



1 pav. Praspaudimas ties gelžbetoninės perdangos plokštės ir kolonos sandūra [3]

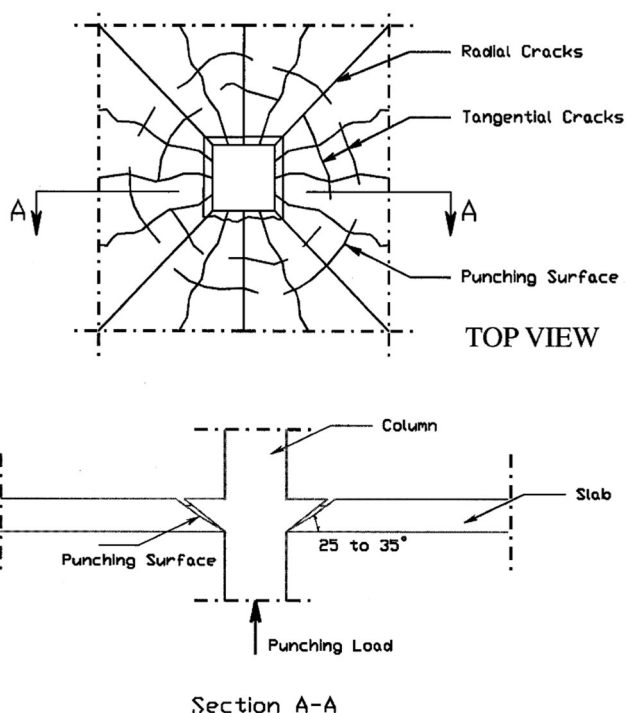
Praspaudimas gali būti trapius pobūdžio suirimas, kuris gali lemti progresyvią viso pastato griūtį [4]. Viena iš tokių griūčių įvyko 1997 metais Wolverhamptone, Anglijoje, daugiaaukštėje mašinų stovėjimo aikštelėje (žr. 2 pav.). Pagrindinė šios katastrofos priežastis buvo projektavimo ir statybos metu padarytos klaidos bei medžiagų laikomųjų galių netekimas per pastato eksploataavimo laikotarpį [5]. Per ilgą laiką griūčių dėl gelžbetoninės perdangos plokštės praspaudimo yra įvykę ir daugiau: 1971 metais Bostone, Masačusetse [6], taip pat 1995 metais Sampoong universalinėje parduotuvėje Seule, Korėjoje [7]. Dažnu atveju, šių katastrofų priežastimi buvo projektavimo ar statybos metu padarytos klaidos, tačiau pasitaikydavo ir tokių atvejų, kai griūtis priežastimi buvo projektavimo normose paliktos spragos. Šios nelaimės pastūmėjo imtis veiksmų ir projektavimo normose įvesti papildomus atsargos koeficientus, įvertinančius galimas nepageidautinas sąlygas.



2 pav. Daugiaaukštės stovėjimo aikštelės griūtis, Wolverhamptone, Anglijoje 1997 [5]

## 1.2. Praspaudimas be skersinės armatūros

Praspaudimas perdangos plokštėje pradeda formuotis, kai yra pasiekiamas ribinis betono tempiamasis stipris viršutinėje perdangos plokštės dalyje. Tuo metu perimetru aplink koloną pradeda atsivėrinėti radialieji / spinduliniai bei tangentiniai plyšiai, kurie įsitižai perdangos plokštės toliau formuojasi link kolonos. Didėjant apkrovai, sistema tampa priklausoma nuo dviejų dedamųjų: betono stiprio gniuždant ir armatūros stiprio tempiant. Jei nutinka taip, kad ribinį stiprį pirmiau pasiekia betonas, įvyksta trapus suirimas, tačiau jei betonas yra stipresnis, tada pasiekusi takumo ribą armatūra pradeda tekėti ir suirimas tampa plastišku. Siekiant užtikrinti, kad suirimas nebūtų trapaus pobūdžio, projektavimo normos numato išilginės armatūros kiekio ribojimą. Tyrimai rodo, kad didėjant išilginio armavimo intensyvumui, kartu su juo kinta ir įstrižųjų plyšių vystymosi kampas, kuris nulemia didesnę tikrinamąjį perimetrą bei taip užtikrina didesnę laikomąją galią praspaudimui [8].



3 pav. Praspaudimo formavimasis be skersinio armavimo [9]

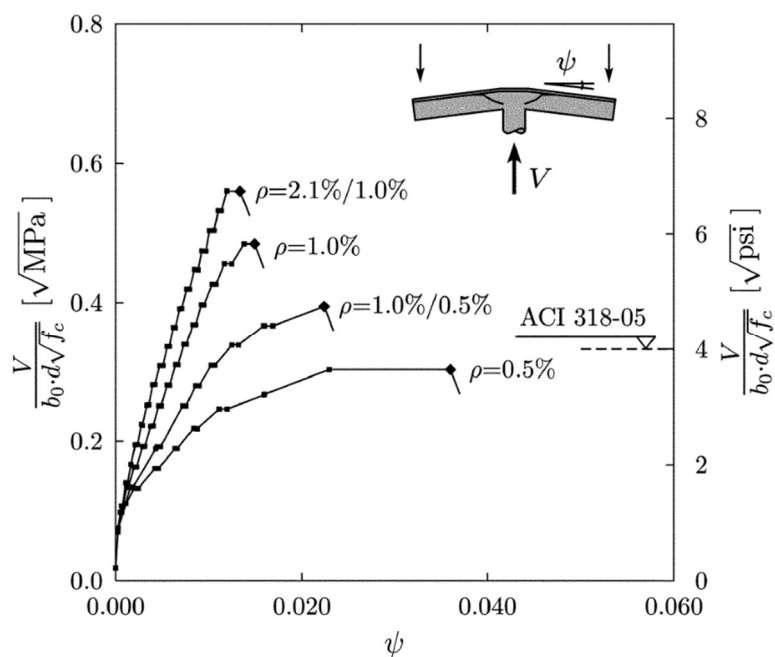
## 1.3. Pagrindinės charakteristikos, nulemiančios praspaudžiamąją galią be skersinio armavimo

Kai perdangos plokštėje nenaudojamas skersinis armavimas, plokštės laikomoji galia praspaudimui priklauso nuo penkių pagrindinių dedamųjų:

- išilginio armavimo, išreikšto armavimo intensyvumu ( $\rho_1, \%$ );
- betono stiprio gniuždant ( $f_{ck}, MPa$ );
- efektyviojo skerspjūvio aukščio ( $d, mm$ );
- kolonos dydžio ir formos ( $c, mm$ );
- kolonos padėties perdangoje ( $\beta$ );
- pagrindinio tikrinamojo perimetro ( $u_1, mm$ ).

### 1.3.1. Išilginio armavimo įtaka praspaudžiamajam stipriui

Tyrimai rodo, kad priklausomai nuo išilginio armavimo kiekio, praspaudimo laikomoji galia taip pat kinta. Laikomosios galios ir deformacijų priklausomybė nuo išilginės armatūros kiekio pateikiama 4 paveikslėlyje. Duomenys rodo, kad kai armavimo intensyvumas yra žemas, suirimo pobūdis dažniausiai būna plastiškas ir su didelėmis deformacijomis. Pasak Mari [10], suirimas dėl žemo išilginės armatūros kiekio gali pasireikšti esant net 0,75 % armavimo intensyvumui. Esant vidutiniam armatūros kiekiui (1–1,5 %), išilginė armatūra dažniausiai nepasiekia savo takumo ribos, todėl atitinkamai sumažėja deformacijos bei išauga laikomoji galia praspaudimui. Kai armavimo intensyvumas yra aukštas (>2 %), ženkliai sumažėja perdangos plokštės deformacijos, tačiau atsiranda rizika trapiam suirimo pobūdžiui pasireikšti. Skirtingose projektavimo normose galima rasti išilginio armavimo intensyvumo ribojimų, skirtų išvengti trapiaus suirimo pobūdžio. Pagal Europos bendrines projektavimo normas (*Eurocode 2*), išilginio armavimo intensyvumas ( $\rho_1$ ) negali viršyti 2 %, o pagal Didžiosios Britanijos normas (BS 8110) – 3 % [11], [12]. Tuo tarpu Jungtinių Amerikos Valstijų (ACI 318-08) ir Rusijos (SNiP 2.03.01-84) projektavimo normose išilginio armavimo įtaką nėra vertinama [13], [14].



4 pav. Apkrovų ir deformacijų priklausomybė nuo išilginės armatūros kiekio [15]

### 1.3.2. Betono stiprio gniuždant įtaka praspaudžiamajam stipriui

Betono dedamoji yra tiesiogiai susijusi su praspaudimo laikomąja galia ir yra vertinama visose skaičiavimų metodikose. Didėjant betono gniuždomajam stipriui, kartu su juo auga ir gelžbetoninės perdangos plokštės atsparumas praspaudimui. Inácio [16] atliktame tyrime, kai nagrinėjamų bandinių betono gniuždomasis stipris kito nuo 36 iki 130 MPa, buvo nustatyta, kad laikomoji galia vidutiniškai padidėjo 42 %. Šią tendenciją taip pat patvirtina ir Metwally [17] atliktas tyrimas, kuriame buvo nustatyta, kad nagrinėjamų bandinių laikomoji galia išaugo net 56 %, kai betono gniuždomasis stipris variavo nuo 29,9 iki 66,6 MPa.

### 1.3.3. Efektyvaus skerspjūvio aukščio įtaka praspaudžiamajam stipriui

Naudingasis skerspjūvio aukštis nusako išilginės armatūros padėtį perdangos plokštėje ir yra matuojamas nuo perdangos plokštės apačios iki tempiamos armatūros centro (žr. 6 pav.). Ši dedamoji priklauso nuo perdangos plokštės aukščio ir nuo numatyto apsauginio betono sluoksnio storio. Apsauginio betono sluoksnio dydį numato projektavimo normos, jis dažniausiai priklauso nuo išilginės armatūros skersmens, užpildo dalelių dydžio ir aplinkos agresyvumo sąlygų. Skaičiuojant besijinių perdangos plokščių laikomąją galią praspaudimui, skirtingose projektavimo normose galima rasti numatomus minimalius reikalavimus efektyviajam skerspjūvio aukščiui. Pagal Vokietijos projektavimo normas (DIN 1045) numatoma, kad šis aukštis negali būti mažesnis kaip 150 mm [18], o pagal Europos bendrines normas (*Eurocode 2*) – 200 mm [11]. Tuo tarpu Didžiosios Britanijos normose (BS 8110) nurodoma maksimali leistina šio aukščio reikšmė, kuri yra 400 mm [12].

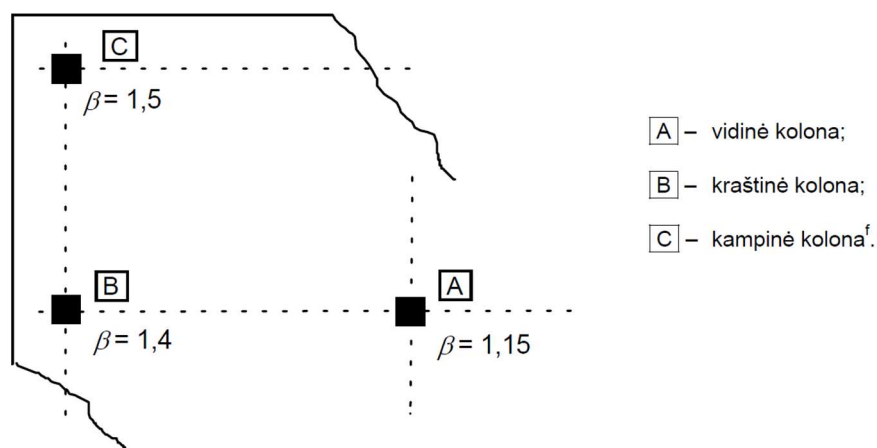
### 1.3.4. Kolonos dydžio ir formos įtaka praspaudžiamajam stipriui

Kolonos dydis yra svarbi dedamoji praspaudimo analizėje, kadangi gniuždomas spyris formuojasi nuo kolonos kraštų. Taip pat, kuo kolonos perimetras yra ilgesnis, tuo gaunamas didesnis plotas per kurį perduodama praspaudžiamoji jėga. Ši dedamoji nėra tiesiogiai įtraukiama į skaičiavimų formules, tačiau kolonos dydis taikomas nustatant pagrindinį tikrinamąjį perimetrą (žr. 6 pav.). Dönmez [19] atliktame tyrime buvo analizuojama praspaudžiamoji galia naudojant didelių matmenų kolonas. Tyrimo metu buvo pastebėta, kad laikomoji galia mažėja didėjant kolonos perimetro ir efektyvaus skerspjūvio aukščio santykiui. Projektavimo normose *Eurocode 2*, STR 2.05.05:2005 ir DIN 1045 siekiant įvertinti šio santykio įtaką praspaudžiamajai galiai, taikomas laikomosios galios mažinimo koeficientas ( $C_{Rd,c}$ ) [20]. Tačiau tik Vokietijos projektavimo normose (DIN 1045) nurodoma, kad viršijus kolonos perimetro ir efektyvaus skerspjūvio aukščio santykiui 4 ribą ( $u_0/d > 4$ ), laikomosios galios mažinimo koeficientas ( $C_{Rd,c}$ ) privalo būti perskaičiuojamas.

### 1.3.5. Kolonos padėties perdangoje įtaka praspaudžiamajam stipriui

Priklausomai nuo nagrinėjamos situacijos perdangos plokštėje (vidinė kolona, kraštinė kolona, kampinė kolona), pagal STR 2.05.05:2005, *Eurocode 2*, DIN-1045 ir BS 8110 projektavimo normas, yra įvedamas papildomas koeficientas  $\beta$ . Šio koeficiento paskirtis yra įvertinti galimą netolygų skersinių jėgų pasiskirstymą skirtingose perdangos plokštės dalyse. Kadangi perdangos plokštė su kolona sudaro standų mazgą, esant skirtingiems tarpatramiams tarp atramų, kolonoje gali susidaryti lenkimo momentas. Ferreira tyrimo [21], kuriame buvo nagrinėjamos ekscentriškai apkrautos perdangos plokštės, rezultatai parodė, kad susidarantis lenkimo momentas turi reikšmingos įtakos radialiųjų ir tangentinių plyšių vystymuisi, kurie perdangos plokštėje aplink koloną pasiskirsto netolygiai. Vadovaujantis *Eurocode 2*, jei gretimų tarpatramių ilgis nesiskiria daugiau kaip 25 %, galima vadovautis rekomendacinėmis reikšmėmis (žr. 5 pav.), tačiau šios gali skirtis reikšmės priklausomai nuo šalies. Pagal STR 2.05.05:2005, *Eurocode 2* ir BS 8110 projektavimo normas, vidinėms kolonomis taikoma  $\beta$  koeficiento vertė yra 1,15, o pagal DIN-1045 – 1,1. Jungtinių Amerikos Valstijų normose (ACI 318-08) pateikiamoje skaičiavimo metodikoje taip pat vertinama kolonos padėties įtaka, tačiau tai daroma per papildomą koeficientą –  $\alpha_s$ . Šis koeficientas yra įtrauktas tik į vieną iš trijų formuliu, apsprendžiančių praspaudžiamosios zonos laikomąją galią, todėl pagal šias normas ne kiekvienu atveju atsižvelgiama į kolonos padėtį perdangoje. Vienintelėse Rusijos projektavimo normose (SNiP 2.03.01-84) netaikomas laikomosios galios mažinimo koeficientas, atsižvelgiant į kolonos padėtį perdangoje.

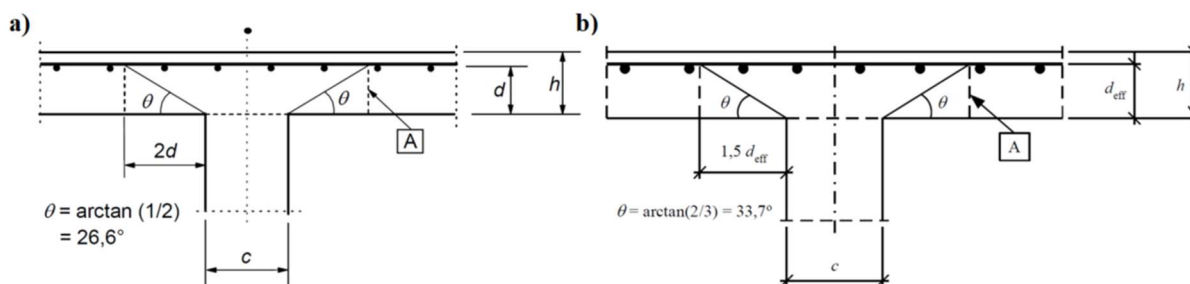




5 pav. Rekomenduojamos  $\beta$  koeficiento reikšmės pagal *Eurocode 2* [11]

### 1.3.6. Pagrindinio tikrinamojo perimetro įtaka praspaudžiamajam stipriui

Šis parametras skirtas įvertinti įstrižųjų plyšių vystymosi kampą ir, atitinkamai, pagal jį nustatyti perimetrą, kuriuo aplink koloną susiformuos kritiniai tangentiniai plyšiai. Kuo kampas didesnis, tuo mažesnis efektyvusis plotas aplink koloną yra įvertinamas ir dėl to laikomoji galia sumažėja. Kampo dydis yra eksperimentiškai išreikštas dydis, kuris tiesiogiai priklauso nuo išilginės armatūros kiekio viršutinėje perdangos plokštės dalyje. Skirtingose projektavimo normose posvyrio kampas  $\theta$  ir tikrinamasis perimetras vertinami nevienodai. Pagal *Eurocode 2*, jis numatomas  $26,6^\circ$  ( $2d$ ), o pagal STR 2.05.05:2005, BS 8110 ir DIN 1045 –  $33,7^\circ$  ( $1,5d$ ) (žr. 6 pav.) [20], [22]. Kadangi ACI 318-08 ir SNiP 2.03.01-84 projektavimo normose nevertinama išilginio armavimo įtaka, todėl pasirenkamo kampo dydis yra  $45^\circ$  ( $0,5d$ ).



6 pav. Plokštės praspaudimo skaičiuojamoji schema [11],[20].

a) pagal *Eurocode 2*; b) pagal STR 2.05.05:2005; A – pagrindinis tikrinamasis skerspjūvis.

### 1.4. Praspaudimo skaičiavimo modeliai

Praeitame skyriuje buvo apžvelgti skaičiavimuose vertinami esminiai kriterijai, lemiantys praspaudimo laikomąją galią be skersinio armavimo. Buvo pastebėta, kad tarp skirtingų šalių normų tie patys parametrai vertinami nevienodai, dėl šios priežasties, apskaičiuotos praspaudžiamosios stiprios galios taip pat turėtų skirtis. Vainiūno [22] atliktame tyrime buvo analizuojamos *Eurocode 2*, STR 2.05.05:2005 ir SNiP 2.03.01-84 praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo metodikos. Taip pat eksperimentinės realių bandinių praspaudžiamosios galios vertės buvo lyginamos su teorinėmis, paskaičiuotomis pagal nagrinėjamas projektavimo normas, siekiant nustatyti jų tikslumą. Gauti rezultatai parodė, kad pagal *Eurocode 2* apskaičiuota praspaudžiamoji galia nuo eksperimentinių skyrėsi 1,11–1,35 karto, pagal STR 2.05.05:2005 1,23–1,56 karto, o pagal SNiP 2.03.01-84 1,06–1,93 karto.

Projektuojant labai svarbu nustatyti kiek įmanoma tikslesnę praspaudimo laikomąją galią, tačiau kadangi praspaudimo laikomąją galią lemia daug skirtingų parametru, paprastos empirinės formulės išvedimas yra sudėtinga užduotis. Vienas iš pagrindinių sunkumų nagrinėjant praspaudimą, yra tai, jos perdangoje vykstantis suirimas negali būti stebimas realiu laiku [23]. Bandinių analizė dažniausiai atliekama tik praspaudus perdangą ir ją perpjovus pusiau ties kolona. Tokiu būdu galima pamatyti įstrižųjų plyšių vystymąsi bei identifikuoti suirimo pobūdį (žr. 7 pav., 8 pav.). Taip pat, sunkumus supaprastinto skaičiavimo modelio sukūrimui kelia tai, kad perdangos plokštės ir kolonos elgsena jungtyje turi būti vertinama trimatėje erdvėje, o supaprastinti skaičiavimo modeliai pateikiami dvimatėje.



7 pav. Perpjauta perdangos plokštė be skersinio armavimo [4]



8 pav. Perpjauta perdangos plokštė su skersiniu armavimu [4]

Projektavimo normose pateikiamos skaičiavimo metodikos nėra vienintelis informacijos šaltinis, kuriuo vadovaujantis gali būti randama praspaudžiamosios šlyties galia. Jai rasti gali būti taikomi įvairūs skaičiavimo modeliai, kuriuos yra pateikę mokslininkai. Siūlomi skaičiavimų modeliai gali būti tikslesni už projektavimo normose nurodomus, tačiau juose neretai įtraukiamos sąlygos, kurių parametrus nustatyti įprastu atveju gali būti sudėtinga [24]. Nagrinėdamas skaičiavimo modelius, Marčiukaitis [25] pastebėjo, kad kaip ir projektavimo normose, ne visuose juose vertinama išilginės armatūros įtaką. Pasiūlymų, kaip galėtų būti skaičiuojama praspaudžiamoji šlyties galia, yra labai daug ir juos visus apžvelgti būtų sudėtinga, todėl literatūros analizėje pateikiami tik pagrindiniai, publikacijose dažniausiai sutinkami skaičiavimų modeliai. Skirtinguose skaičiavimo modeliuose šlyties perdavimą praspaudimo metu siūloma vertinti per:

**Stiprį lenkiant** – ankstyvųjų bandymų metu buvo pastebėta, kad praspaudžiamos perdangos plokštės laikomoji galia nuo stiprumo lenkiant skiriasi neženkiai, dėl šios priežasties vieni pirmųjų skaičiavimo modelių buvo sudaromi remiantis būtent šia logika. Šis modelis taikomas Jungtinių Amerikos Valstijų (ACI 318-08) projektavimo normose. Mokslininkai, kurių pasiūlyti modeliai buvo paremti perdangos plokštės stiprumu lenkiant: Moe (1961), Yitzhaki (1966), Long (1975) ir kiti.

**Plastiškumo teorija** – šioje metodikoje nevertinama išilginė armatūra, ji yra labiau orientuota į viršutinės perdangos dalies suirimą. Šiam modeliui taikoma sąlyga, kad betonas yra idealiai plastiška medžiaga, kurios tempiamasis stipris yra labai mažas ( $f_{ct} = f_c/400$ , kai  $f_c$  – betono stipris gniuždant). Mokslininkai, kurių pasiūlyti modeliai buvo paremti plastiškumo teorija: Braestrup ir Nielsen (1976)

**Santvaros modelį** – šis modelis susideda iš gniuždomų spyrių ir tempiamų stygų sistemos, kurios abi dalis sudaro betonas. Suirimas įvyksta tada, kai išorinė veikianti apkrova viršija gniuždomo spyrio laikomąją galią. Mokslininkai, pritaikę modelį savo skaičiavimo metodikoje: Pralong (1982) Andrā (1982), Alexander (1990), Simmonds (1992) ir kiti.

**The Kinnunen/Nylander** – tai vienas pirmųjų ir tiksliausių modelių, kuriame laikomoji galia apsprendžiama per du galimus surimo būdus, iš kurių vieną nulemia ribinis gniuždomo betono įtempis, o antrą – tempiamos armatūros takumo riba ir armavimo koeficientas. Šis modelis vėliau buvo taikomas kaip pagrindas sudarinėjant kitus praspaudimo skaičiavimo modelius. Šio modelio autoriai: Kinnunen ir Nylander (1960).

CEB-FIB pateikiamoje analizėje eksperimentinių bandinių rezultatai buvo lyginami su skirtingų autorių skaičiavimo modeliais [26]. Tyrimui atlikti buvo sukaupta duomenų bazė sudaryta iš 200 bandinių. CEB-FIB skaičiavimų modelių patikimumo analizės lentelėje (žr. 9 pav.) pateikiama informacija apie: reikšmių vidurkis ( $m$ ), standartinis nuokrypis ( $s$ ) ir variacijos koeficientą ( $v$ ). Ši analizė parodė, kad kaip ir projektavimo normos, ne visi skaičiavimo modeliai gali tiksliai nustatyti praspaudžiamosios šlyties laikomąją galią.

| Parameters | number of tests | $V_{exp}/V_{cal}$ | Kinnunen | Moe   | Braestrup | Georgopoulos | Menétrey | Hallgren | Staller |
|------------|-----------------|-------------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|---------|
| all        | 200             | <b>m</b>          | 1,174    | 1,057 | 0,864     | 1,167        | 1,294    | 1,030    | 0,939   |
|            |                 | <b>s</b>          | 0,304    | 0,226 | 0,403     | 0,315        | 0,401    | 0,243    | 0,176   |
|            |                 | <b>v</b>          | 0,259    | 0,214 | 0,466     | 0,270        | 0,310    | 0,236    | 0,188   |

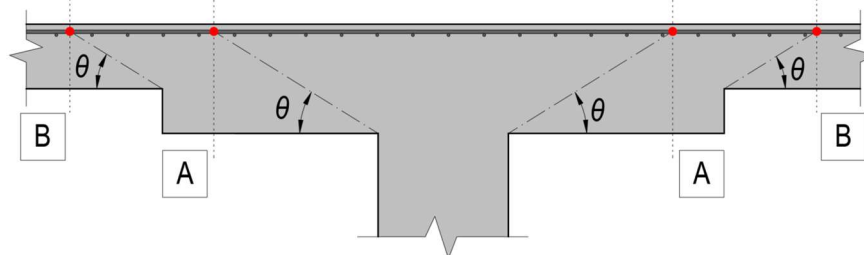
9 pav. CEB-FIB skaičiavimo modelių patikimumo analizė [26]

### 1.5. Laikomosios galios didinimas storinant koloną

Kaip buvo išsiaiškinta ankstesniuose skyriuose, išilginės armatūros ir betono mechaninių savybių gerinimas gali turėti reikšmingos įtakos praspaudžiamajam stipriui. Tačiau atsižvelgiant į kainos ir naudos santykį, dažnu atveju šie sprendimai nėra racionalūs. Praspaudimo laikomąją galią taip pat galima padidinti keičiant gelžbetoninės perdangos plokštės arba kolonos geometrines savybes. Numatant didesnę perdangos plokštės aukštį, atitinkamai keičiasi ir efektyvusis skerspjuvio aukštis, kurio dydis vertinamas visose skaičiavimo metodikose. Tuo tarpu kolonos storinimas leidžia padidinti atramos plotą, kuriame susidaro skersinių jėgų koncentracija, kas atitinkamai leidžia pasiekti didesnę laikomąją galią praspaudimui.

Viso aukšto perdangos plokštės storinimas nėra racionalus sprendimas, atsižvelgiant į tai, kad skersinių jėgų koncentracija susidaro tik ties atramomis. Siekiant išvengti viso aukšto perdangos storinimo, tam gali būti suprojektuota padidinta kolonos dalis ties jungtimi su gelžbetonine perdangos plokšte, vadinama kapiteliu. Šis praspaudžiamos zonos laikomosios galios didinimo būdas buvo taikomas dar XX amžiaus pradžioje besijinių perdangos plokščių pradininkų Turner [27] ir Maillart [28]. Tyrimai rodo, kad kapitelių sistema leidžia efektyviai pasiekti didesnę laikomąją galią

praspaudimui [29]. Kolonom su kapiteliais skaičiavimo metodiką ir keliamus reikalavimus numato projektavimo normos. Laikomosios galios patikra, taikant šį metodą, atliekama dviejose zonosė – ties tikrinamuoju perimetru, numatytu atitinkamu atstumu nuo kolonos krašto (žr. 10 pav., A) ir ties tikrinamuoju perimetru už suplonėjusios perdangos plokštės dalies (žr. 10 pav., B).

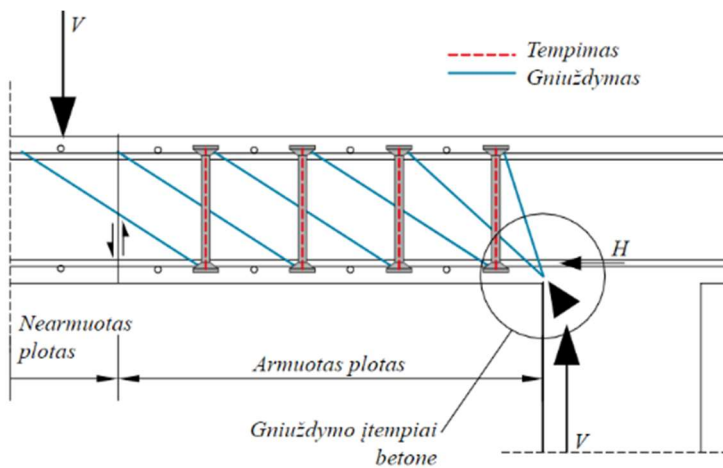


10 pav. Kolonos su kapiteliu tikrinamieji perimetrai

Kolonos kapitelių įrengimas gali būti efektyvus laikomosios galios didinimo būdas praspaudžiamoje zonoje, tačiau jam negalima taikyti slenkančių klojinių, dėl ko statybos procesas tampa apsunkintas, o darbo laikas statybos aikštelėje išauga. Taip pat kolonos storinimas ties perdangos plokštėmis dažnu atveju apsunkina inžinerinių tinklų išplanavimą ir padidina patalpos aukštingumą.

### 1.6. Laikomosios galios didinimas naudojant skersinį armavimą

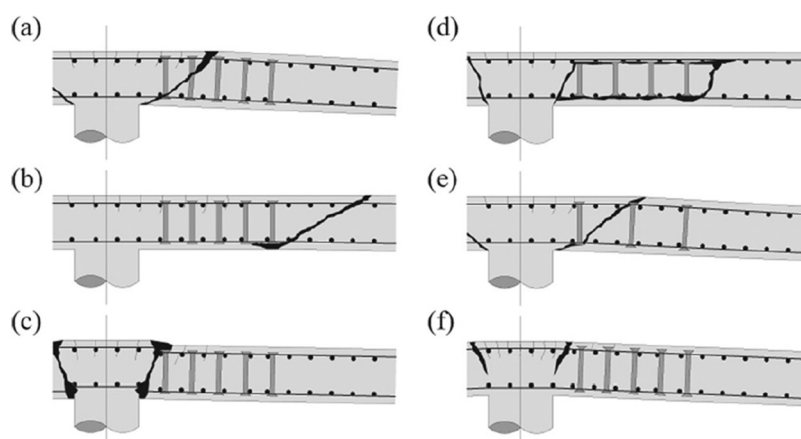
Naudojant skersinį armavimą galima užtikrinti didesnę laikomąją galią praspaudimo zonoje, nekeičiant perdangos plokštės ar kolonos geometrijos. Kai perdangos plokštėje pradeda atsivėrinėti įstrižieji plyšiai, jų tolimesnį vystymąsi suvaržo skersinė armatūra, sudarydama sistemą, vadinama santvaros modeliu. Šio modelio veikimo principas susideda iš gniuždomų betono spyrių ir tempiamos armatūros stygų (žr. 11 pav.). Būdų, kaip paskaičiuoti tokios konstrukcijos laikomąją galią, galima rasti skirtingų šalių projektavimo normose, tačiau metodikos čia taip pat skiriasi ir skaičiuojant tą pačią situaciją galima gauti skirtingas laikomųjų galių vertes. Tai patvirtina Oliveira ir bendraautorių [30] atliktas tyrimas, kuriame buvo nagrinėjamos Jungtinių Amerikos Valstijų (ACI 318-08), Europos (*Eurocode 2*) ir Azijos (NBR 6118) siūlomos skaičiavimų metodikos praspaudžiamajam stipriui nustatyti, kai naudojamas skersinis armavimas su galvutėmis abėjuose galuose. Eksperimentiniai duomenimis buvo lyginimai su teorinėmis laikomųjų galių vertėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas. Tyrimo rezultatai parodė, kad pagal *Eurocode 2* projektavimo normas, vidutinis nuokrypis buvo 1,13, pagal ACI 318-08 – 1,48, o pagal NBR 6118 siekė 0,97.



11 pav. Stygų ir spyrių modelis perdangos plokštėje su skersiniu armavimu [31]

Praspaudžiamos zonos suirimas gelžbetoninėje perdangos plokštėje su skersiniu armavimu gali pasireikšti šešiais skirtingais būdais. Dalies šių suirimo pobūdžių galima išvengti laikantis projektavimo normose nurodomų projektavimo reikalavimų, tačiau suirimo pobūdžiai, priklausantys nuo medžiagų mechaninių savybių, privalo būti tikrinami skaičiavimais. Galimi perdangos plokštės suirimo pobūdžiai naudojant skersinį armavimą (žr. 12 pav.):

- a) suirimas ties skersine armatūra;
- b) suirimas už tikrinamojo perimetro, kur skersinis armavimas nebenaudojamas;
- c) suirimas ties kolona, dėl gniuždomo betono spyrio laikomosios galios trūkumo;
- d) suirimas dėl blogo medžiagų sukibimo;
- e) suirimas atsivėrus įstrižajam plyšiui tarp skersinės armatūros strypų;
- f) suirimas ties išilgine gelžbetoninės perdangos armatūra.



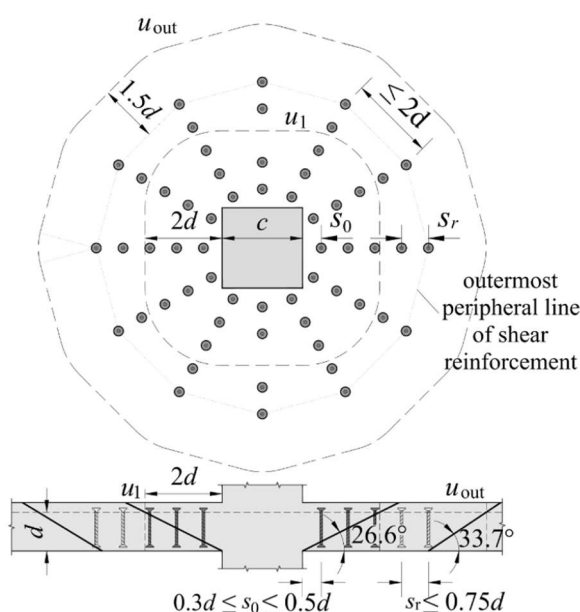
12 pav. Praspaudimo suirimo pobūdžiai, naudojant skersinį armavimą [32]

Suirimas dėl blogo medžiagų sukibimo (žr. 12 pav., d) pasireiškia, kai korozijos paveikta armatūra plėsdamasi praranda sukibimą su betonu. To galima išvengti laikantis projektavimo normose numatomų apsauginio betono sluoksnio reikalavimų, priklausančių nuo armatūros sukibimo su betonu reikalavimų ir aplinkos agresyvumo klasės. Suirimo dėl įstrižojo plyšio atsivėrimo tarp skersinės armatūros strypų (žr. 12 pav., e) taip pat galima išvengti. Tam būtina išlaikyti leistiną didžiausią atstumą tarp skersinės armatūros strypų, kurį dažniausiai numato projektavimo normos. Skirtingose skaičiavimų metodikose šis atstumas gali būti nurodomas skirtingai. Pagal *Eurocode 2* numatoma, kad atstumas tarp skersinės armatūros strypų negali viršyti  $0,75d$ . Remiantis Schmidt [33] atlikto tyrimo rezultatais, šis atstumas taip pat buvo įvardintas kaip racionaliausias. Tuo tarpu atstumą nuo kolonos krašto iki pirmo armatūros strypo, pagal *Eurocode 2*, rekomenduojama numatyti  $0,3d - 0,5d$  režiose. Suirimas prie atramos ties išilgine armatūra (žr. 12 pav., f) gali pasireikšti dėl didelio skersinės armatūros kiekio palyginti su išilginiu armavimu. Šio suirimo pobūdžio galima išvengti, numatant atitinkamą kiekį išilginio armavimo viršutinėje perdangos plokštės dalyje.

Skaičiuojant laikomąją galią praspaudimui su skersiniu armavimu, normos dažniausiai numato maksimalią laikomąją galią, kuri priklauso nuo betono gniuždomojo spyrio (žr. 12 pav., c). Halvonik [4] atliktame tyrime buvo pastebėta, kad dažnu atveju projektavimo normose įvedamas papildomas koeficientas  $k_{max}$ . Šiuo koeficientu yra padidinama besijinės perdangos plokštės laikomoji galia be

skersinio armavimo, priklausomai nuo projektavimo normų, šio koeficiento vertė gali kisti nuo 1,4 iki 2. Maksimali laikomoji galia taip pat gali priklausyti nuo skersinės armatūros tipo, tačiau tai vertina ne visos projektavimo normos. Pagal ACI 318-08 numatoma, kad koeficiento dydis nusakantis maksimalią praspaudimo laikomąją galią, kai naudojama įprasta skersinė armatūra, yra 1,52, o naudojant armatūros strypus su galvutėmis abėjuose galuose, šio koeficiento vertė yra lygi 2.

Suirimas išoriniame tikrinamajame perimetre už skersinio armavimo zonos (žr. 12 pav., b), pagal projektavimo normas skaičiuojamas tuo pačiu principu kaip ir perdangos plokštė be skersinio armavimo. Tik šiuo atveju, tikrinamasis perimetras vertinamas numatytu atstumu nuo paskutinės skersinės armatūros (žr. 13 pav.,  $u_{out}$ ), o ne nuo kolonos krašto (žr. 13 pav.,  $u_1$ ). Taip pat numatomas įstrižųjų plyšių vystymosi kampas išoriniame perimetre, pagal *Eurocode 2* numatomas didesnis –  $33,7^\circ$ . Atitinkamai skaičiavimuose jis vertinamas  $1,5d$  atstumu nuo paskutinio skersinės armatūros strypo. Pagal STR 2.05.05:2005, DIN 1045 ir ACI 318-08 projektavimo normas, įstrižųjų plyšių vystymosi kampas išoriniame tikrinamajame perimetre priimamas toks pat kaip ir pagrindiniame.

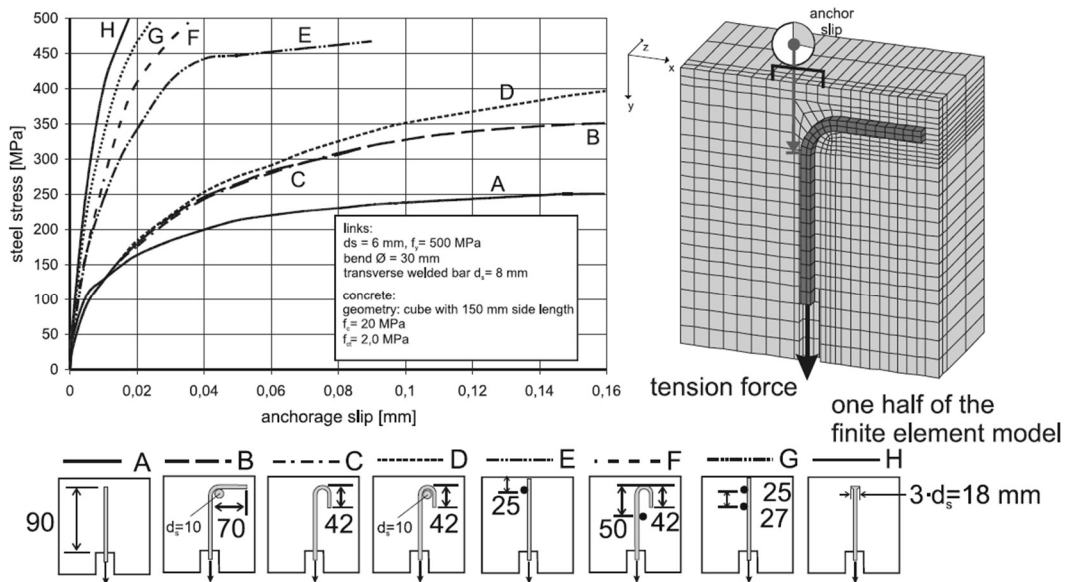


**13 pav.** Skersinės armatūros išdėliojimo ir tikrinamųjų perimetrų atstumai, pagal *Eurocode 2* projektavimo normas [34]

### 1.6.1. Pagrindinės charakteristikos, nulemiančios praspaudžiamąją galią be skersinio armavimo

Pagal skirtingas skaičiavimų metodikas, besijinės perdangos plokštės praspaudžiamasis stipris su skersiniu armavimu nustatomas sumuojant praspaudimo laikomąją galią be skersinio armavimo su skersinio armavimo laikomosios galios dedamąja. Šios dedamosios indelis priklauso nuo:

- skersinės armatūros inkaravimo būdo;
- skersinės armatūros išdėliojimo ( $s_0, s_r, mm$ );
- skersinės armatūros ploto nagrinėjamame pjūvyje ( $A_{sw}, mm^2$ );
- skersinės armatūros stiprio tempiant ( $f_{ywk}, MPa$ );
- skersinė armatūros posvyrio kampo ( $\alpha$ ).



14 pav. Skersinės armatūros stiprumo ir praslydimio priklausomybė nuo skirtingų inkaravimo būdų [35]

Remiantis Marí ir bendraautorių [10] atliktu tyrimu, kurio metu buvo nagrinėjami realūs bandiniai su skersine armatūra, buvo pastebėta, kad 50 % bandinių, kuriuose suirimas įvyksta ties skersine armatūra, priklauso ne nuo armatūros tempiamojo stiprio, bet nuo inkaravimo savybių. Pagal *Eurocode 2*, STR 2.05.05:2005, BS 8110 ir DIN 1045 projektavimo normas, armatūros inkaravimo efektyvumas vertinamas mažinant skersinės armatūros tempiamąjį stiprį  $f_{ywk}$ , atsižvelgiant į efektyvųjį skerspjūvio aukštį ( $d$ ). Tačiau inkaravimo savybės taip pat priklauso ir nuo skersinės armatūros tipo, ko šios projektavimo normos nevertina. Beutel [35] atliktame tyrime buvo analizuojamas skersinės armatūros inkaravimo efektyvumas, priklausomai nuo skersinės armatūros tipo. Skersinės armatūros stiprumo tempiant ir praslydimio priklausomybė nuo skirtingų inkaravimo būdų pateikiama 14 paveikslėlyje. Bandymo rezultatai atskleidė, kad efektyviausias skersinės armatūros inkaravimo būdas gaunamas naudojant skersinį armavimą su galvutėmis abejuose galuose (žr. 14 pav., H bandinys). Pasak Ricker [26], šio tipo armatūros taip pat yra pigesnės bei pasižymi greitesne statyba. Pagal *Eurocode 2* projektavimo normas, armatūros strypams su galvutėmis abejuose galuose pakeitimai skaičiavimuose nenumatomi, tačiau gaires galima rasti Europos techninio įvertinimo organizacijos (EOTA TR60) pateikiamoje skaičiavimų metodikoje [37]. Pagrindinis skirtumas, nulemiantis didesnę laikomąją galią praspaudimui, yra  $k_{max}$  koeficiento reikšmė, kuri strypų gamintojams nustatoma individualiai, atliekant bandymus pagal EOTA patvirtintą bandymų metodiką. Atsižvelgiant į Lietuvos rinkoje naudojamų armatūros strypų su galvutėmis abejuose galuose gamintojų specifikacijas, šis koeficientas yra priimamas kaip 1,96, kas, palyginus su įprastais armatūros strypais, reiškia 30% laikomosios galios prieaugį.

## 2. Analitinis tyrimas

### 2.1. Praspaudimo analizė be skersinio armavimo

Tiriamąjį darbą buvo atliekama praspaudimo be skersinio armavimo analizė, pagal skirtingas projektavimo normas, siekiant išsiaiškinti kurie skaičiavimo modeliai yra tiksliausi. Tai pat buvo siekiama nustatyti skaičiavimuose taikomų dedamųjų įtaką praspaudžiamajam stipriui bei numatyti galimus ribojimus, kurie sumažintų rezultatų sklaidą. Projektavimo normų tikslumas yra svarbus kriterijus statyboje, kadangi apskaičiuotos laikomosios galios turi būti kiek įmanoma artimesnės realiai situacijai. Jei gaunami rezultatai yra konservatyvūs, projektuose numatomi sprendimai negalėtų būti laikomi optimaliais. Priešingu atveju, jei apskaičiuotos praspaudimo laikomosios galios būtų didesnės lyginant su realia situacija, priimti sprendimai taptų pavojingi taikyti praktikoje. Tyrimui atlikti buvo pasirinktos šešios skirtingos projektavimo normos:

- Lietuvos – *STR 2.05.05:2005* [20];
- Didžiosios Britanijos – *BS 8110* [12];
- Vokietijos – *DIN-1045* [18];
- Europos – *Eurocode 2 (EC2)* [11];
- Jungtinių Amerikos Valstijų – *ACI 318-08* [13];
- Rusų – *SNiP 2.03.01-84* [14].

#### 2.1.1. Praspaudžiamosios galios be skersinio armavimo skaičiavimų metodikų analizė

Praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo metodikos, pagal pasirinktas projektavimo normas, tarpusavyje skiriasi, tai jau buvo apžvelgta literatūros analizės dalyje. *STR 2.05.05:2005*, *DIN-1045* ir *BS 8110* projektavimo normos sudarytos remiantis bendrinėmis Europos projektavimo normomis (*Eurocode 2*), todėl šių šalių skaičiavimų metodikos turi nemažai panašumų. Tačiau vienas iš pagrindinių kriterijų, skiriančių šias projektavimo normas, yra pagrindinis tikrinamasis perimetras. Pagal *STR 2.05.05:2005*, *DIN-1045* ir *BS 8110* jis taikomas  $1,5d$ , pagal *Eurocode 2* –  $2d$ , o pagal *ACI 318-08* ir *SNiP 2.03.01-84*,  $0,5d$  atstumu nuo kolonos krašto. Taip pat, šiose metodikose skirtingai vertinami pagrindinio tikrinamojo perimetro kampai: pagal *STR 2.05.05:2005*, *Eurocode 2* ir *DIN-1045*, jie suapvalinti (žr. 15 pav., 16 pav., 17 pav.), o pagal *BS 8110*, *ACI 318-08* ir *SNiP 2.03.01-84*, yra statūs (žr. 18 pav., 19 pav., 20 pav.). Normose, sudarytose remiantis bendrinėmis Europos projektavimo normomis, praspaudimo laikomajai galiai apskaičiuoti vertinama išilginio armavimo įtaka. Tuo tarpu, pagal *ACI 318-08* ir *SNiP 2.03.01-84*, išilginis armavimas nėra vertinamas. JAV skaičiavimų metodikoje praspaudžiamoji galia priklauso nuo betono stiprio gniuždant ( $f_{ck}$ ), o Rusijos skaičiavimų metodikoje betono stiprio tempiant ( $R_{bt}$ ).

Laikomoji galia praspaudimui pagal *STR 2.05.05:2005*, *Eurocode 2*, *DIN-1045* ir *BS 8110* projektavimo normas, skaičiuojama pagal formulę:

$$V_{Rd,c,1} = \frac{v_{Rd,c} \cdot d \cdot u_1}{\beta} \quad (2.1.1.1)$$



Laikomoji galia praspaudimui pagal ACI 318-08 ir SNiP 2.03.01-84 projektavimo normas, skaičiuojama pagal formulę:

$$V_{Rd,c,2} = v_{Rd,c} \cdot d \cdot u_1; \quad (2.1.1.2)$$

čia  $v_{Rd,c}$  – praspaudžiamasis stipris be skersinio armavimo (MPa);

$d$  – efektyvusis skerspjūvio aukštis, vertinamas nuo perdangos apatinio krašto iki tempiamo armatūros centro (žr. 6 pav.) (mm);

$u_1$  – pagrindinis tikrinamasis perimetras (mm);

$\beta$  – lakamosios galios mažinamasis koeficientas priklausantis nuo kolonos padėties.

### STR 2.05.05:2005

Gelžbetoninės perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui be skersinio armavimo pagal STR 2.05.05:2005 projektavimo normas:

$$v_{Rd,c,STR} = \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} - 0.10 \cdot \sigma_{cp} \geq (0.4 \cdot f_{ctd} - 0.10 \cdot \sigma_{cp}); \quad (2.1.1.3)$$

čia  $\gamma_c$  – betono dalinis patikimumo koeficientas ( $\gamma_c = 1,5$ );

$f_{ck}$  – charakteristinis gniuždomasis betono stipris (MPa);

$f_{ctd}$  – skaičiuotinis betono stipris tempiant (MPa);

$$f_{ctd} = \frac{0.7 \cdot 0.3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c}; \quad (2.1.1.4)$$

$k$  – koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0; \quad (2.1.1.5)$$

$\rho_1$  – išilginio armavimo intensyvumas, skaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_{1y} \cdot \rho_{1z}} \leq 0,02; \quad (2.1.1.6)$$

$\rho_{1y}, \rho_{1z}$  – armavimo intensyvumas, atitinkamai  $y$  ir  $z$  ašių linkmėmis.  $\rho_{1y}, \rho_{1z}$  apskaičiuojami ruože, kurio plotis lygus kolonos pločiui, pridodant po  $3d$  į kiekvieną kolonos pusę;

$\sigma_{cp}$  – ašiniai betono įtempiai (MPa) skaičiuojami pagal formulę:

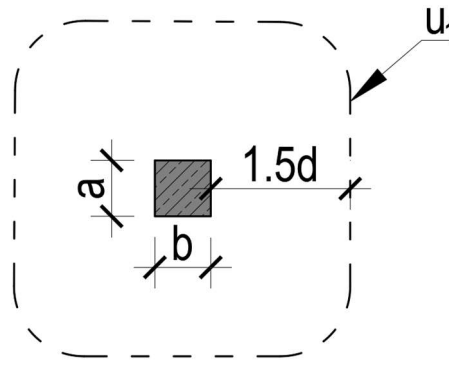
$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{cy} + \sigma_{cz}}{2}; \quad (2.1.1.7)$$

$\sigma_{cy}, \sigma_{cz}$  – ašiniai betono įtempiai tikrinamajame skerspjūvyje  $y$  ir  $z$  ašių kryptimis (MPa), šiame tyrime šie įtempiai nėra aktualūs, todėl jie nėra vertinami.

Pagal STR 2.05.05:2005, besijęs perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui nustatoma taikant 2.1.1.1 formulę, kurioje tikrinamasis perimetras vertinamas pagal 15 paveikslėlyje pateiktą schemą ir yra skaičiuojamas pagal žemiau esančią formulę:

$$u_{1,STR} = 2 \cdot (1,5 \cdot d \cdot \pi + a + b); \quad (2.1.1.8)$$

čia  $a$  ir  $b$  – kolonos kraštinės ilgai (mm).



15 pav. Tikrinamojo perimetro schema pagal STR 2.05.05:2005 projektavimo normas

### **Eurocode 2**

Gelžbetoninės perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui be skersinio armavimo pagal *Eurocode 2* projektavimo normas:

$$v_{RD,c,EC2} = C_{RD,c,EC2} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0.10 \cdot \sigma_{cp} \geq (v_{min,EC2} + 0.10 \cdot \sigma_{cp}); \quad (2.1.1.9)$$

čia  $C_{RD,c,EC2}$  – koeficientas, skirtas įvertinti kolonos ir efektyviojo perdangos plokštės aukščio santykiui, pagal *Eurocode 2*, apskaičiuojamas taikant formulę:

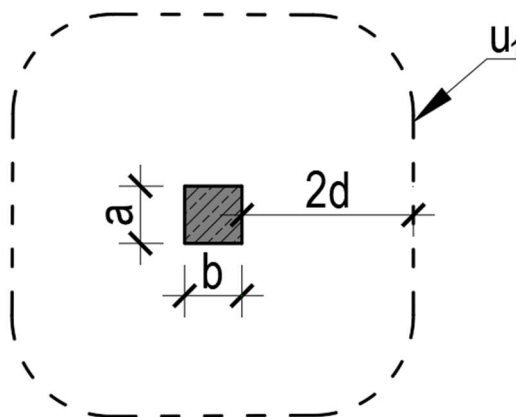
$$C_{RD,c,EC2} = \frac{0,18}{\gamma_c}; \quad (2.1.1.10)$$

$v_{min,EC2}$  – minimali laikomoji galia praspaudimui (MPa) apskaičiuojama taikant formulę:

$$v_{min,EC2} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}. \quad (2.1.1.11)$$

Pagal *Eurocode 2* besijės perdangos plokštė laikomoji galia praspaudimui nustatoma taikant 2.1.1.1 formulę, kurioje tikrinamasis perimetras vertinamas pagal 16 paveikslėlyje pateiktą schemą ir yra skaičiuojamas pagal žemiau esančią formulę:

$$u_{1,EC2} = 2 \cdot (2 \cdot d \cdot \pi + a + b). \quad (2.1.1.12)$$



16 pav. Tikrinamojo perimetro schema pagal *Eurocode 2* projektavimo normas

## DIN-1045

Pagal DIN-1045, praspaudžiamajam stipriui apskaičiuoti skirta formulė yra identiška į pateikiamą *Eurocode 2* projektavimo normose, tačiau formulėse esamų dedamųjų vertinimas yra skirtingas. Gelžbetoninės perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui be skersinio armavimo pagal DIN-1045 projektavimo normų nacionalinį priedą [38] apskaičiuojama pagal formulę:

$$v_{Rd,c,DIN} = C_{Rd,c,DIN} \cdot k(100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0.10 \cdot \sigma_{cp} \geq (v_{min,DIN} + 0.10 \cdot \sigma_{cp}); \quad (2.1.1.13)$$

čia  $C_{Rd,c,DIN}$  – koeficientas, skirtas įvertinti kolonos ir efektyviojo perdangos plokštės aukščio santykiui, pagal DIN-1045, apskaičiuojamas taikant formulę:

$$C_{Rd,c,DIN} = \begin{cases} \frac{u_0}{d} \geq 4 \rightarrow C_{Rd,c,DIN} = \frac{0,18}{\gamma_c} \\ \frac{u_0}{d} < 4 \rightarrow C_{Rd,c,DIN} = \max\left(\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot \left(0.1 \cdot \frac{u_0}{d} + 0.6\right), \frac{0,15}{\gamma_c}\right); \end{cases} \quad (2.1.1.14)$$

$u_0$  – kolonos perimetras (mm);

$\rho_1$  – išilginio armavimo intensyvumas, pagal DIN-1045, skaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho_1 = \min\left(\sqrt{\rho_{1y} \cdot \rho_{1z}}; 0.02; 0.5 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}\right); \quad (2.1.1.15)$$

$f_{yd}$  – skaičiuotinis išilginės armatūros stipris tempiant pagal takumo ribą (MPa);

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}; \quad (2.1.1.16)$$

$\gamma_s$  – armatūros dalinis patikimumo koeficientas ( $\gamma_s = 1,15$ );

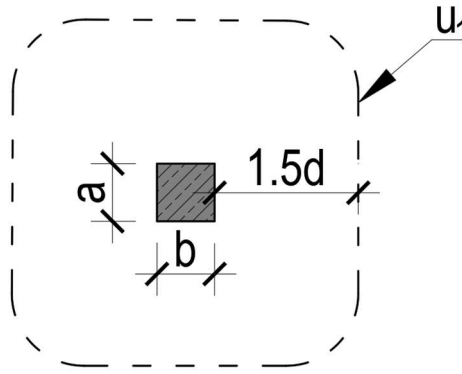
$v_{min,DIN}$  – minimali laikomoji galia praspaudimui (MPa), pagal DIN-1045, apskaičiuojama taikant formulę:

$$v_{min,DIN} = \begin{cases} d \leq 600 \text{ mm} \rightarrow \frac{0,0375}{\gamma_c} \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \\ d > 800 \text{ mm} \rightarrow \frac{0,0525}{\gamma_c} \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2.1.1.17)$$

Minimali laikomoji galia praspaudimui  $v_{min,DIN}$ , kai efektyvusis perdangos plokštės aukštis yra tarp 600 mm ir 800 mm, randama interpoliuojant.

Pagal DIN-1045, besijinės perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui nustatoma taikant 2.1.1.1 formulę, kurioje tikrinamasis perimetras vertinamas pagal 17 paveikslėlyje pateiktą schemą ir yra skaičiuojamas pagal žemiau esančią formulę:

$$u_{1,DIN} = 2 \cdot (1,5 \cdot d \cdot \pi + a + b). \quad (2.1.1.18)$$



17 pav. Tikrinamojo perimetro schema pagal DIN-1045 projektavimo normas

### BS 8110

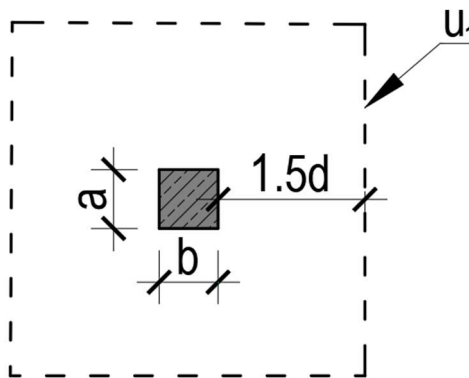
Gelžbetoninės perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui be skersinio armavimo pagal BS 8110 projektavimo normas:

$$v_{Rd,c,BS} = 0,79 \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot \frac{f_{ck}}{25}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\left(\frac{400}{d}\right)^{\frac{1}{4}}}{\gamma_m} \leq 0,8 \cdot \sqrt{f_{ck}}; \quad (2.1.1.19)$$

čia  $\gamma_m$  – betono dalinis patikimumo koeficientas ( $\gamma_m = 1,25$ ).

Pagal BS 8110, besijinės perdangos plokštė laikomoji galia praspaudimui nustatoma taikant 2.1.1.1 formulę, kurioje tikrinamasis perimetras vertinamas pagal 18 paveikslėlyje pateiktą schemą ir yra skaičiuojamas pagal žemiau esančią formulę:

$$u_{1,BS} = 2 \cdot (6 \cdot d + a + b). \quad (2.1.1.20)$$



18 pav. Tikrinamojo perimetro schema pagal BS 8110 projektavimo normas

Skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią pagal BS 8110 projektavimo normas, numatomi papildomi ribojimai atskiroms dedamosioms. Efektyvusis skerspjūvio aukštis ( $d$ ) negali viršyti 400 mm, o betono stipris gniuždant ( $f_{ck}$ ) negali būti didesnis kaip 40 MPa.

## ACI 318-08

Gelžbetoninės perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui be skersinio armavimo pagal ACI 318-08 projektavimo normas skaičiuojama vertinant tris formules. Gaunama žemiausia vertė yra laikoma besijinės perdangos plokštės laikomąja galia:

$$v_{Rd,c,ACI} = \min \begin{cases} \frac{1}{3} \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \\ 0,17 \left( 1 + \frac{2}{\beta_{ACI}} \right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} ; \\ 0,083 \left( 2 + \frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} \right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \end{cases} \quad (2.1.1.21)$$

čia  $\lambda$  – betono modifikacijos koeficientas (sunkiajam betonui taikoma:  $\lambda = 1$ );

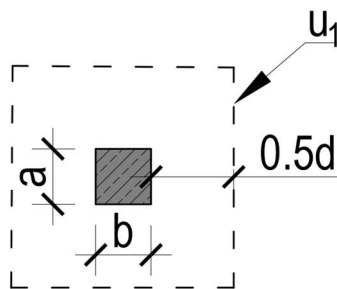
$\beta_{ACI}$  – koeficientas, įvertinantis kolonos kraštinių santykį (kai kolonos kraštinių ilgis vienodas, galima priimti, kad  $\beta_{ACI} = 1$ );

$\alpha_s$  – koeficientas, priklausantis nuo kolonos padėties perdangoje: vidinė kolona – 40, kraštinė kolona – 30, kampinė kolona – 20 (skaičiavimuose priimama, kad  $\alpha_s = 40$ );

$b_0 = u_{1,ACI}$  – pagrindinis tikrinamasis perimetras (mm) (žr. 2.1.1.22 formulę).

Pagal ACI 318-08, besijės perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui nustatoma taikant 2.1.1.2 formulę, kurioje tikrinamasis perimetras vertinamas pagal 19 paveikslėlyje pateiktą schemą ir yra skaičiuojamas pagal žemiau esančią formulę:

$$u_{1,ACI} = 2 \cdot (2d + a + b). \quad (2.1.1.22)$$



**19 pav.** Tikrinamojo perimetro schema pagal ACI 318-08 projektavimo normas

Skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią pagal ACI 318-08 projektavimo normas, numatomi papildomi reikalavimai charakteristiniam betono stipriui gniuždant ( $f_{ck}$ ), kuris negali būti didesnis kaip 35 MPa.

## SNiP 2.03.01-84

Gelžbetoninės perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui be skersinio armavimo pagal SNiP 2.03.01-84 projektavimo normas:

$$F_{Rd,c,SNiP} = \alpha \cdot R_{bt} \cdot u_m \cdot h_0; \quad (2.1.1.23)$$

čia  $\alpha$  – betono modifikacijos koeficientas (sunkiajam betonui taikoma:  $\alpha = 1$ );

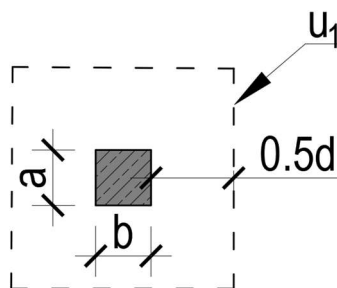
$R_{bt}$  – betono stipris tempiant (MPa), įprastai nustatomas pagal betono klasę iš lentelių;

$u_m = u_{1,SNiP}$  – pagrindinis tikrinamasis perimetras (mm) (žr. 2.1.1.24 formulę);

$h_0 = d$  – efektyvusis skerspjūvio aukštis (mm).

Pagal SNiP 2.03.01-84, besijinės perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui nustatoma taikant 2.1.1.2 formulę, kurioje tikrinamasis perimetras vertinamas pagal 20 paveikslėlyje pateiktą schemą ir yra skaičiuojamas pagal žemiau esančią formulę:

$$u_{1,SNiP} = 2 \cdot (2 \cdot d + a + b). \quad (2.1.1.24)$$



20 pav. Tikrinamojo perimetro schema pagal SNiP 2.03.01-84 projektavimo normas

### 2.1.2. Priimamos prielaidos teoriniam praspaudžiamajam stipriui skaičiuoti, kai perdangos plokštėje nenaudojamas skersinis armavimas

Tam, kad būtų galima atlikti objektyvų eksperimentinių ir teorinių duomenų palyginimą, tyrimo metu teorinės laikomosios galios pagal skirtingas projektavimo normas buvo skaičiuojamos neatsižvelgiant į medžiagų patikimumo koeficientus. Formulėse naudojami daliniai patikimumo koeficientai  $\gamma_c$  ir  $\gamma_m$ , skirti skaičiuotiniam betono stipriui nustatyti, buvo ignoruojami, nes bandymai atliekami laboratorinėmis sąlygomis, o laikas, per kurį betono stipruminės savybės gali sumažėti, nėra aktualus. Jungtinių Amerikos Valstijų (ACI 318-08) ir Didžiosios Britanijos (BS 8110) projektavimo normose nurodoma, kad pateiktos skaičiavimo metodikos nėra pritaikytos skaičiuoti praspaudimo laikomosioms galioms, kai betono klasė yra aukšta (ACI 318-08 – 35 MPa; BS 8110 – 40 MPa). Tačiau šiame tiriamajame darbe ribinės betono klasės nebuvo vertinamos todėl, kad buvo siekiama nustatyti, kokią įtaką skaičiavimų patikimumui gali turėti įvairus betono stipris gniuždant. Tai pat, kadangi šio tyrimo metu buvo nagrinėjamos tik centriškai gniuždomos perdangos plokštės, 2.1.1.1 formulėje taikomas laikomosios galios mažinimo koeficientas  $\beta$  buvo priimamas vienetai. Projektavimo normas, kuriose vertinama išilginio armavimo įtaką praspaudimo laikomajai galiai, taip pat numato ir ribojimus maksimaliam armavimo intensyvumui. Tačiau siekiant nustatyti kokią įtaką rezultatų tikslumui turi skirtingo intensyvumo armavimas, į šiuos ribojimus taip pat nebuvo atsižvelgiama.

### 2.1.3. Perdangos plokščių be skersinė armatūros eksperimentiniai duomenys

Projektavimo normų tikslumui analizuoti buvo sudaryta duomenų bazė iš aštuoniasdešimties eksperimentinių bandinių. Didžioji dalis informacijos buvo surinkta iš CEB FIB [26] sukauptos duomenų basės, kurioje buvo pateikiami bandiniai be skersinio armavimo. Tyrime pasirinkta naudoti šių autorių eksperimentinius duomenis: Tomaszewicz, Regan, Manterola, Moe, Elstner ir Hognestad [26], Lips [32]. Detali informacija apie nagrinėjamus bandinius, jų medžiagų charakteristikas bei geometrines savybes, reikalingas nustatyti teorinę praspaudimo laikomąją galią, pateikiama 1 lentelėje. Šioje lentelėje taip pat pateikiamos eksperimentinių ir torinių rezultatų santykinės vertės pagal skirtingas skaičiavimo metodikas.

Tyrime buvo naudojami tik tie bandiniai, kurie suiro pasiekę maksimalią laikomąją galią praspaudimui. Taip pat, suirimas visuose bandiniuose įvyko išilginei armatūrai nepasiekus plastiškumo ribos. Žemiau pateikiamos analizuojamų bandinių pagrindinių charakteristikų minimalios ir maksimalios vertės:

- betono stipris gniuždant ( $f_{ck}$ ): 11,2–118,7 MPa;
- armavimo intensyvumas ( $\rho_1$ ): 0,5–3,7 %;
- kolonų matmenys ( $c$ ): 54–520 mm (visų bandinių kolonos kvadratinės);
- perdangos plokštės storis ( $h$ ): 80–400 mm.

Stefan [32] atliktame tyrime (75–80 bandiniai) nebuvo nurodytas betono stipris tempiant ( $f_{ctm}$ ), kuris yra būtinas skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią, pagal SNiP 2.03.01-84 projektavimo normas. Atliekant teorinių laikomųjų galių skaičiavimus pagal šias projektavimo normas, buvo taikomas teorinis betono stipris tempiant, paskaičiuotas iš charakteristinio betono stiprio gniuždant pagal 2.1.3.1 formulę.

$$R_{bt} = 0,23 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (2.1.3.1)$$

**1 lentelė.** Eksperimentinių bandinių be skersinio armavimo parametrai, ardamosios galios ir jų palyginimas su teoriniais rezultatais pagal skirtingas projektavimo normas

| Poz. | Autorius    | Šaltinis | Bandinio pavadinimas | c, (mm) | h, (mm) | d, (mm) | $\rho_l$ , (%) | $f_{ck}$ , (MPa) | $f_{ctk}$ , (MPa) | $V_{Rd,Exp}$ , (MN) | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,STR}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,EC2}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,SNiP}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,DIN}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,BS}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,ACI}$ |
|------|-------------|----------|----------------------|---------|---------|---------|----------------|------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1    | Tomaszewicz | [26]     | ND65-1-1             | 200     | 320     | 275     | 1.5%           | 64.1             | 3.9               | 2.05                | 1.44                    | 1.15                    | 1.01                     | 1.61                    | 1.34                   | 1.47                    |
| 2    |             |          | ND65-2-1             | 150     | 240     | 200     | 1.7%           | 70               | 3.9               | 1.2                 | 1.36                    | 1.09                    | 1.10                     | 1.52                    | 1.27                   | 1.54                    |
| 3    |             |          | ND95-1-1             | 200     | 320     | 275     | 1.5%           | 83.5             | 4.7               | 2.25                | 1.45                    | 1.15                    | 0.92                     | 1.62                    | 1.35                   | 1.41                    |
| 4    |             |          | ND95-1-3             | 200     | 320     | 275     | 2.5%           | 89.7             | 4.5               | 2.4                 | 1.27                    | 1.01                    | 1.02                     | 1.43                    | 1.18                   | 1.45                    |
| 5    |             |          | ND95-2-1             | 150     | 240     | 200     | 1.7%           | 88               | 4.7               | 1.1                 | 1.16                    | 0.92                    | 0.84                     | 1.29                    | 1.08                   | 1.26                    |
| 6    |             |          | ND95-2-1D            | 150     | 240     | 200     | 1.7%           | 86.5             | 4.5               | 1.3                 | 1.38                    | 1.10                    | 1.03                     | 1.53                    | 1.28                   | 1.50                    |
| 7    |             |          | ND95-2-3             | 150     | 240     | 200     | 2.6%           | 89.3             | 4.7               | 1.45                | 1.32                    | 1.05                    | 1.10                     | 1.47                    | 1.22                   | 1.64                    |
| 8    |             |          | ND95-2-3D            | 150     | 240     | 200     | 2.6%           | 80.1             | 4.2               | 1.25                | 1.18                    | 0.94                    | 1.06                     | 1.31                    | 1.09                   | 1.50                    |
| 9    |             |          | ND95-2-3D+           | 150     | 240     | 200     | 2.6%           | 97.8             | 4.9               | 1.45                | 1.28                    | 1.02                    | 1.06                     | 1.42                    | 1.19                   | 1.57                    |
| 10   |             |          | ND95-3-1             | 100     | 120     | 88      | 1.8%           | 84.9             | 4.5               | 0.33                | 1.58                    | 1.29                    | 1.11                     | 1.58                    | 1.22                   | 1.62                    |
| 11   |             |          | ND115-1-1            | 200     | 320     | 275     | 1.5%           | 111.7            | 5.3               | 2.45                | 1.43                    | 1.14                    | 0.88                     | 1.60                    | 1.33                   | 1.33                    |
| 12   |             |          | ND115-2-1            | 150     | 240     | 200     | 1.7%           | 118.7            | 5.2               | 1.4                 | 1.33                    | 1.06                    | 0.96                     | 1.48                    | 1.24                   | 1.38                    |
| 13   |             |          | ND115-2-3            | 150     | 240     | 200     | 2.6%           | 107.8            | 5.2               | 1.55                | 1.32                    | 1.06                    | 1.06                     | 1.47                    | 1.23                   | 1.60                    |
| 14   | Regan       | I/1      | 200                  | 100     | 77      | 2.4%    | 25.4           | 2.1              | 0.194             | 1.17                | 1.01                    | 1.08                    | 1.17                     | 0.91                    | 1.35                   |                         |
| 15   |             | I/2      | 200                  | 100     | 77      | 1.2%    | 23.1           | 1.9              | 0.176             | 1.38                | 1.19                    | 1.09                    | 1.38                     | 1.07                    | 1.29                   |                         |
| 16   |             | I/3      | 200                  | 100     | 77      | 1.4%    | 27.1           | 2.3              | 0.194             | 1.37                | 1.18                    | 0.99                    | 1.37                     | 1.07                    | 1.31                   |                         |
| 17   |             | I/4      | 200                  | 100     | 77      | 1.2%    | 31.9           | 2.6              | 0.194             | 1.36                | 1.17                    | 0.87                    | 1.36                     | 1.06                    | 1.21                   |                         |
| 18   |             | I/5      | 200                  | 100     | 79      | 1.5%    | 27.8           | 2.3              | 0.165             | 1.08                | 0.93                    | 0.81                    | 1.08                     | 0.85                    | 1.06                   |                         |
| 19   |             | I/6      | 200                  | 100     | 79      | 0.8%    | 21.6           | 1.8              | 0.165             | 1.45                | 1.25                    | 1.04                    | 1.45                     | 1.14                    | 1.21                   |                         |
| 20   |             | I/7      | 200                  | 100     | 79      | 0.8%    | 30             | 2.5              | 0.186             | 1.47                | 1.26                    | 0.84                    | 1.47                     | 1.15                    | 1.16                   |                         |
| 21   |             | II/2     | 250                  | 250     | 200     | 1.0%    | 34.4           | 2.8              | 0.825             | 1.22                | 1.00                    | 0.82                    | 1.22                     | 1.16                    | 1.17                   |                         |
| 22   |             | II/3     | 160                  | 160     | 128     | 1.0%    | 32.9           | 2.7              | 0.39              | 1.43                | 1.17                    | 0.98                    | 1.43                     | 1.22                    | 1.38                   |                         |
| 23   |             | II/4     | 160                  | 160     | 128     | 1.0%    | 33.9           | 2.8              | 0.365             | 1.33                | 1.09                    | 0.88                    | 1.33                     | 1.13                    | 1.28                   |                         |
| 24   |             | II/5     | 80                   | 80      | 64      | 1.0%    | 32.9           | 2.7              | 0.117             | 1.72                | 1.41                    | 1.18                    | 1.72                     | 1.23                    | 1.66                   |                         |
| 25   |             | II/6     | 80                   | 80      | 64      | 1.0%    | 33.9           | 2.8              | 0.105             | 1.53                | 1.25                    | 1.02                    | 1.53                     | 1.09                    | 1.47                   |                         |
| 26   |             | II/7     | 80                   | 80      | 64      | 1.0%    | 35.7           | 2.9              | 0.105             | 1.50                | 1.23                    | 0.98                    | 1.50                     | 1.07                    | 1.43                   |                         |



| Poz. | Autorius | Šaltinis | Bandinio pavadinimas | c, (mm) | h, (mm) | d, (mm) | $\rho$ , (%) | $f_{ck}$ , (MPa) | $f_{ctk}$ , (MPa) | $V_{Rd,Exp}$ , (MN) | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,STR}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,EC2}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,SNiP}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,DIN}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,BS}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,ACI}$ |
|------|----------|----------|----------------------|---------|---------|---------|--------------|------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| 27   | Regan    | [26]     | III/1                | 150     | 120     | 95      | 0.8%         | 22.9             | 1.9               | 0.197               | 1.46                    | 1.22                    | 1.11                     | 1.46                    | 1.17                   | 1.33                    |
| 28   |          |          | III/3                | 150     | 120     | 95      | 0.8%         | 37.4             | 3                 | 0.214               | 1.35                    | 1.12                    | 0.77                     | 1.35                    | 1.08                   | 1.13                    |
| 29   |          |          | III/4                | 150     | 120     | 93      | 1.5%         | 11.8             | 0.8               | 0.154               | 1.20                    | 1.00                    | 1.13                     | 1.20                    | 0.95                   | 1.49                    |
| 30   |          |          | III/5                | 150     | 120     | 93      | 1.5%         | 26.5             | 2.2               | 0.214               | 1.27                    | 1.06                    | 1.08                     | 1.27                    | 1.01                   | 1.38                    |
| 31   |          |          | III/6                | 150     | 120     | 93      | 1.5%         | 42.1             | 3.3               | 0.248               | 1.26                    | 1.05                    | 0.83                     | 1.26                    | 1.00                   | 1.27                    |
| 32   |          |          | V/1                  | 54      | 150     | 118     | 0.8%         | 33.9             | 2.8               | 0.17                | 1.00                    | 0.78                    | 0.75                     | 1.20                    | 0.80                   | 1.08                    |
| 33   |          |          | V/2                  | 170     | 150     | 118     | 0.8%         | 31.8             | 2.6               | 0.28                | 1.25                    | 1.04                    | 0.79                     | 1.25                    | 1.05                   | 1.10                    |
| 34   |          |          | V/3                  | 110     | 150     | 118     | 0.8%         | 32               | 2.6               | 0.265               | 1.36                    | 1.10                    | 0.95                     | 1.40                    | 1.12                   | 1.31                    |
| 35   |          |          | V/4                  | 102     | 150     | 118     | 0.8%         | 35.8             | 2.9               | 0.285               | 1.44                    | 1.16                    | 0.95                     | 1.53                    | 1.18                   | 1.38                    |
| 36   |          |          | Manterola            | P1-S1   | 100     | 125     | 107          | 1.1%             | 24.3              | 2                   | 0.216                   | 1.33                    | 1.07                     | 1.22                    | 1.37                   | 1.07                    |
| 37   | P3-S1    |          |                      | 450     | 125     | 107     | 1.1%         | 28.2             | 2.3               | 0.301               | 0.89                    | 0.79                    | 0.55                     | 0.89                    | 0.77                   | 0.73                    |
| 38   | P1-S2    |          |                      | 100     | 125     | 107     | 1.1%         | 23               | 1.9               | 0.196               | 1.23                    | 0.99                    | 1.16                     | 1.26                    | 0.99                   | 1.38                    |
| 39   | P2-S2    |          |                      | 250     | 125     | 107     | 1.1%         | 31.4             | 2.6               | 0.283               | 1.12                    | 0.96                    | 0.71                     | 1.12                    | 0.95                   | 0.99                    |
| 40   | P3-S2    |          |                      | 450     | 125     | 107     | 1.1%         | 30.3             | 2.5               | 0.397               | 1.14                    | 1.02                    | 0.67                     | 1.14                    | 1.00                   | 0.93                    |
| 41   | P1-S3    |          |                      | 100     | 125     | 107     | 1.1%         | 37.7             | 3                 | 0.184               | 0.98                    | 0.79                    | 0.69                     | 1.01                    | 0.79                   | 1.01                    |
| 42   | P2-S3    |          |                      | 100     | 125     | 107     | 1.4%         | 34               | 2.8               | 0.211               | 1.07                    | 0.87                    | 0.85                     | 1.10                    | 0.86                   | 1.23                    |
| 43   | P3-S3    |          |                      | 100     | 125     | 107     | 0.5%         | 37.2             | 3                 | 0.165               | 1.15                    | 0.93                    | 0.62                     | 1.18                    | 0.92                   | 0.92                    |
| 44   | P1-S3    |          |                      | 100     | 125     | 107     | 0.5%         | 25.1             | 2.1               | 0.175               | 1.39                    | 1.12                    | 0.94                     | 1.43                    | 1.11                   | 1.18                    |
| 45   | P2-S3    |          |                      | 250     | 125     | 107     | 0.5%         | 29.7             | 2.5               | 0.246               | 1.29                    | 1.11                    | 0.64                     | 1.29                    | 1.09                   | 0.89                    |
| 46   | Moe      |          | S1-60                | 254     | 152     | 114     | 1.1%         | 22.1             | 1.9               | 0.389               | 1.57                    | 1.34                    | 1.22                     | 1.57                    | 1.34                   | 1.48                    |
| 47   |          |          | S2-60                | 254     | 152     | 114     | 1.5%         | 21               | 1.8               | 0.356               | 1.31                    | 1.12                    | 1.18                     | 1.31                    | 1.12                   | 1.39                    |
| 48   |          |          | S3-60                | 254     | 152     | 114     | 2.0%         | 21.5             | 1.8               | 0.364               | 1.21                    | 1.03                    | 1.21                     | 1.21                    | 1.03                   | 1.40                    |
| 49   |          |          | S4-60                | 254     | 152     | 114     | 2.6%         | 22.6             | 1.9               | 0.334               | 1.00                    | 0.85                    | 0.86                     | 1.00                    | 0.86                   | 1.26                    |
| 50   |          |          | S1-70                | 254     | 152     | 114     | 1.1%         | 23.3             | 2                 | 0.393               | 1.55                    | 1.33                    | 1.17                     | 1.55                    | 1.33                   | 1.46                    |
| 51   |          |          | S3-70                | 254     | 152     | 114     | 2.0%         | 24.1             | 2                 | 0.378               | 1.21                    | 1.03                    | 1.13                     | 1.21                    | 1.03                   | 1.38                    |
| 52   |          |          | S4-70                | 254     | 152     | 114     | 2.6%         | 33.4             | 2.7               | 0.374               | 0.98                    | 0.84                    | 0.83                     | 0.98                    | 0.84                   | 1.16                    |
| 53   |          |          | S4-70A               | 254     | 152     | 114     | 2.6%         | 19.5             | 1.6               | 0.312               | 0.98                    | 0.84                    | 1.16                     | 0.98                    | 0.84                   | 1.26                    |
| 54   |          |          | S5-60                | 203     | 152     | 114     | 1.1%         | 21.1             | 1.8               | 0.343               | 1.55                    | 1.31                    | 1.32                     | 1.55                    | 1.31                   | 1.55                    |

| Poz. | Autorius             | Šaltinis | Bandinio pavadinimas | c, (mm) | h, (mm) | d, (mm) | $\rho_1$ , (%) | $f_{ck}$ , (MPa) | $f_{ctk}$ , (MPa) | $V_{Rd,Exp}$ , (MN) | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,STR}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,EC2}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,SNiP}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,DIN}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,BS}$ | $V_{Rd,Exp}/V_{Rd,ACI}$ |
|------|----------------------|----------|----------------------|---------|---------|---------|----------------|------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| 55   | Elstner ir Hognestad | [26]     | S5-70                | 203     | 152     | 114     | 1.1%           | 21.9             | 1.8               | 0.378               | 1.69                    | 1.42                    | 1.45                     | 1.69                    | 1.43                   | 1.68                    |
| 56   |                      |          | R1                   | 152     | 152     | 114     | 1.4%           | 25.3             | 2.1               | 0.312               | 1.38                    | 1.13                    | 1.22                     | 1.38                    | 1.14                   | 1.53                    |
| 57   |                      |          | R2                   | 254     | 152     | 114     | 1.4%           | 26.2             | 2.2               | 0.394               | 1.38                    | 1.18                    | 1.07                     | 1.38                    | 1.18                   | 1.38                    |
| 58   |                      |          | H1                   | 264     | 152     | 114     | 1.1%           | 24.8             | 2.1               | 0.372               | 1.41                    | 1.21                    | 1.03                     | 1.41                    | 1.21                   | 1.30                    |
| 59   |                      |          | M1A                  | 305     | 152     | 114     | 1.5%           | 19.8             | 1.7               | 0.433               | 1.48                    | 1.28                    | 1.33                     | 1.48                    | 1.28                   | 1.53                    |
| 60   |                      |          | I A-1b               | 254     | 152     | 118     | 1.2%           | 19.9             | 1.7               | 0.365               | 1.40                    | 1.19                    | 1.22                     | 1.40                    | 1.21                   | 1.40                    |
| 61   |                      |          | I A-1c               | 254     | 152     | 118     | 1.2%           | 22.9             | 1.9               | 0.356               | 1.30                    | 1.11                    | 1.07                     | 1.30                    | 1.12                   | 1.27                    |
| 62   |                      |          | I A-1d               | 254     | 152     | 118     | 1.2%           | 29.1             | 2.4               | 0.351               | 1.19                    | 1.01                    | 0.83                     | 1.19                    | 1.02                   | 1.11                    |
| 63   |                      |          | I A-1e               | 254     | 152     | 118     | 1.2%           | 16               | 1.3               | 0.356               | 1.47                    | 1.25                    | 1.56                     | 1.47                    | 1.26                   | 1.52                    |
| 64   |                      |          | I A-2c               | 254     | 152     | 114     | 2.5%           | 29.5             | 2.4               | 0.467               | 1.30                    | 1.11                    | 1.16                     | 1.30                    | 1.11                   | 1.54                    |
| 65   |                      |          | I A-7b               | 254     | 152     | 114     | 2.5%           | 22               | 1.9               | 0.512               | 1.57                    | 1.34                    | 1.61                     | 1.57                    | 1.34                   | 1.95                    |
| 66   |                      |          | I A-3b               | 254     | 152     | 114     | 3.7%           | 17.9             | 1.5               | 0.445               | 1.28                    | 1.09                    | 1.77                     | 1.28                    | 1.10                   | 1.88                    |
| 67   |                      |          | I A-3c               | 254     | 152     | 114     | 3.7%           | 20.9             | 1.8               | 0.534               | 1.46                    | 1.25                    | 1.77                     | 1.46                    | 1.25                   | 2.09                    |
| 68   |                      |          | I A-3d               | 254     | 152     | 114     | 3.7%           | 27.3             | 2.3               | 0.547               | 1.37                    | 1.17                    | 1.42                     | 1.37                    | 1.17                   | 1.87                    |
| 69   |                      |          | II A-4               | 356     | 152     | 118     | 1.2%           | 20.6             | 1.7               | 0.4                 | 1.27                    | 1.11                    | 1.05                     | 1.27                    | 1.12                   | 1.18                    |
| 70   |                      |          | II A-5               | 356     | 152     | 114     | 2.5%           | 22               | 1.8               | 0.534               | 1.37                    | 1.20                    | 1.38                     | 1.37                    | 1.19                   | 1.59                    |
| 71   |                      |          | VII A-13             | 356     | 152     | 121     | 0.5%           | 20.7             | 1.7               | 0.236               | 0.97                    | 0.84                    | 0.60                     | 0.97                    | 0.85                   | 0.67                    |
| 72   |                      |          | VIII B-1             | 254     | 152     | 114     | 0.5%           | 11.2             | 0.7               | 0.178               | 1.17                    | 1.00                    | 1.52                     | 1.17                    | 1.00                   | 0.95                    |
| 73   |                      |          | VIII B-4             | 254     | 152     | 114     | 0.9%           | 37.7             | 3                 | 0.334               | 1.20                    | 1.03                    | 0.66                     | 1.20                    | 1.03                   | 0.97                    |
| 74   |                      |          | VIII B-9             | 254     | 152     | 114     | 2.0%           | 34.7             | 2.8               | 0.505               | 1.43                    | 1.22                    | 1.07                     | 1.43                    | 1.22                   | 1.53                    |
| 75   | VIII B-14            | 254      | 152                  | 114     | 3.0%    | 39.9    | 3.2            | 0.578            | 1.37              | 1.17                | 1.08                    | 1.37                    | 1.17                     | 1.64                    |                        |                         |
| 76   | Lips                 | [32]     | PL1                  | 130     | 250     | 193     | 1.6%           | 32.2             | 2.33              | 0.682               | 1.12                    | 0.89                    | 1.17                     | 1.29                    | 1.03                   | 1.45                    |
| 77   |                      |          | PV1                  | 260     | 250     | 210     | 1.5%           | 34               | 2.41              | 0.974               | 1.16                    | 0.96                    | 1.02                     | 1.16                    | 1.11                   | 1.27                    |
| 78   |                      |          | PL3                  | 520     | 250     | 197     | 1.6%           | 36.5             | 2.53              | 1.324               | 1.22                    | 1.06                    | 0.93                     | 1.22                    | 1.21                   | 1.16                    |
| 79   |                      |          | PL4                  | 340     | 320     | 267     | 1.6%           | 30.5             | 2.25              | 1.625               | 1.28                    | 1.06                    | 1.12                     | 1.28                    | 1.23                   | 1.36                    |
| 80   |                      |          | PL5                  | 440     | 400     | 353     | 1.5%           | 31.9             | 2.31              | 2.491               | 1.21                    | 0.99                    | 0.96                     | 1.21                    | 1.16                   | 1.18                    |

Lentelėje taikomų parametų paaiškinimai: *c* – kolonos karštinės ilgis; *h* – perdangos plokštės aukštis; *d* – perdangos plokštės efektyvusis aukštis;  $\rho_1$  – armavimo intensyvumas.

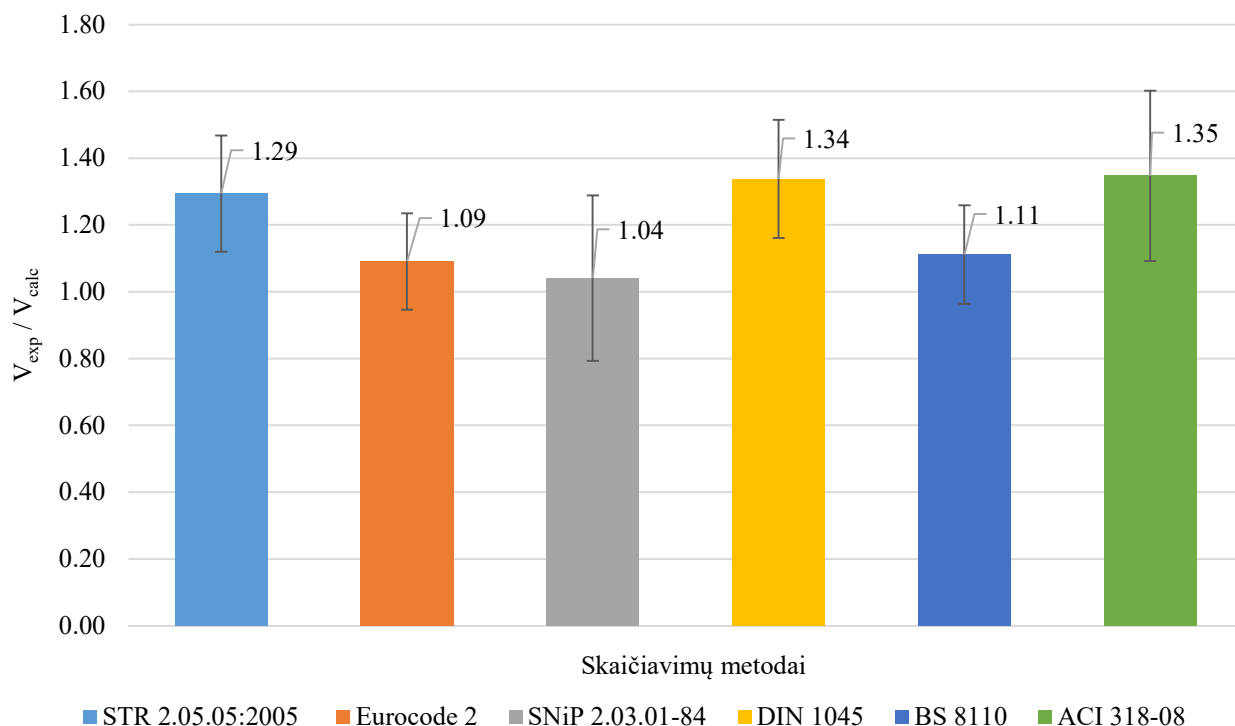
### 2.1.4. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas, kai perdangos plokštė be skersinio armavimo

Kadangi nagrinėjamų bandinių charakteristikos buvo skirtingos, projektavimo normos analizuojamos per eksperimentinių ir teorinių rezultatų santykį. Projektavimo normų tikslumui analizuoti buvo taikomi du kriterijai: reikšmių vidurkis ir variacijos koeficientas (COV) išreikštas procentais.

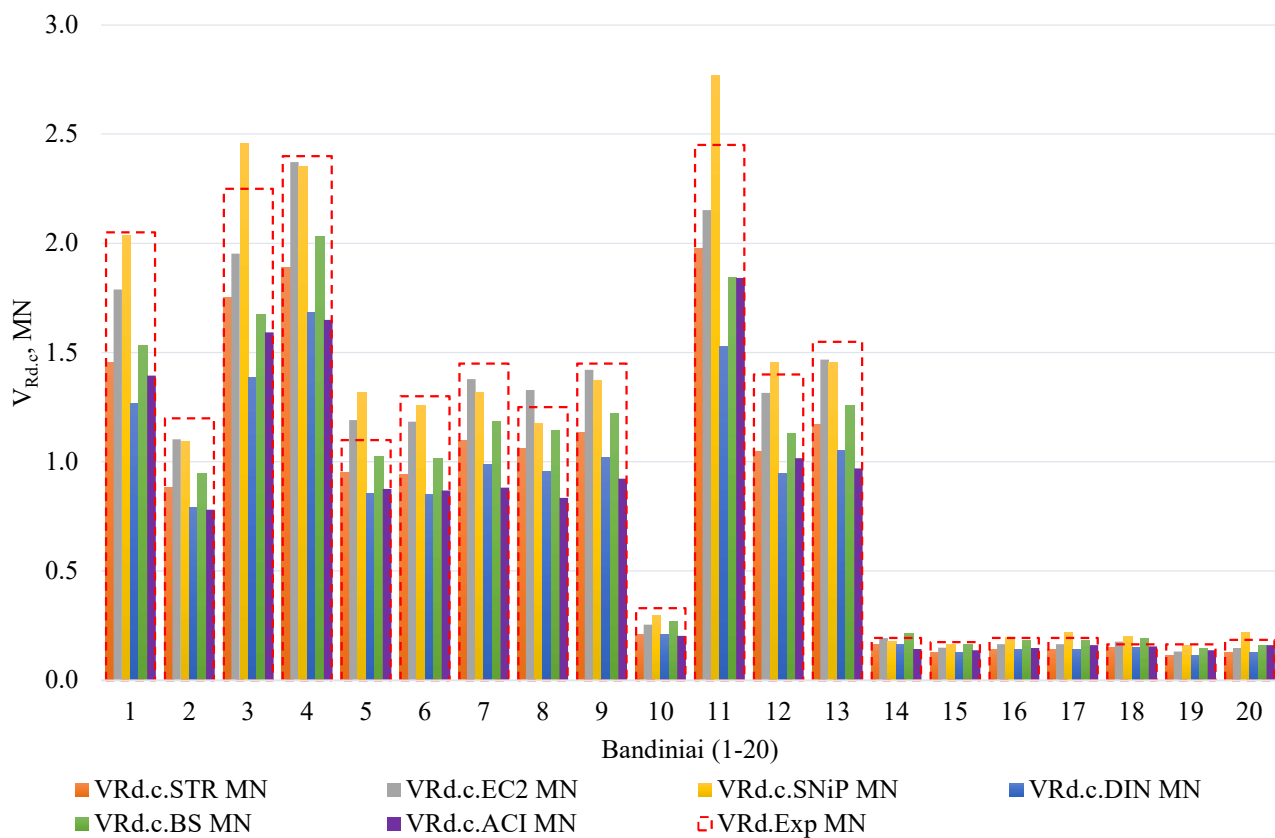
**2 lentelė.** Projektavimo normų tikslumo analizė, skaičiuojant praspaudimą be skersio armavimo

| Parametrai pagal ( $V_{exp}/V_{calc}$ ) | STR 2.05.05:2005 | Eurocode 2 | SNiP 2.03.01-84 | DIN 1045 | BS 8110 | ACI 318-08 |
|---|------------------|------------|-----------------|----------|---------|------------|
| Reikšmių vidurkis                       | 1.29             | 1.09       | 1.04            | 1.34     | 1.11    | 1.35       |
| Standartinis nuokrypis                  | 0.17             | 0.14       | 0.25            | 0.18     | 0.15    | 0.25       |
| Variacijos koeficientas                 | 13.5%            | 13.2%      | 23.8%           | 13.2%    | 13.3%   | 18.9%      |

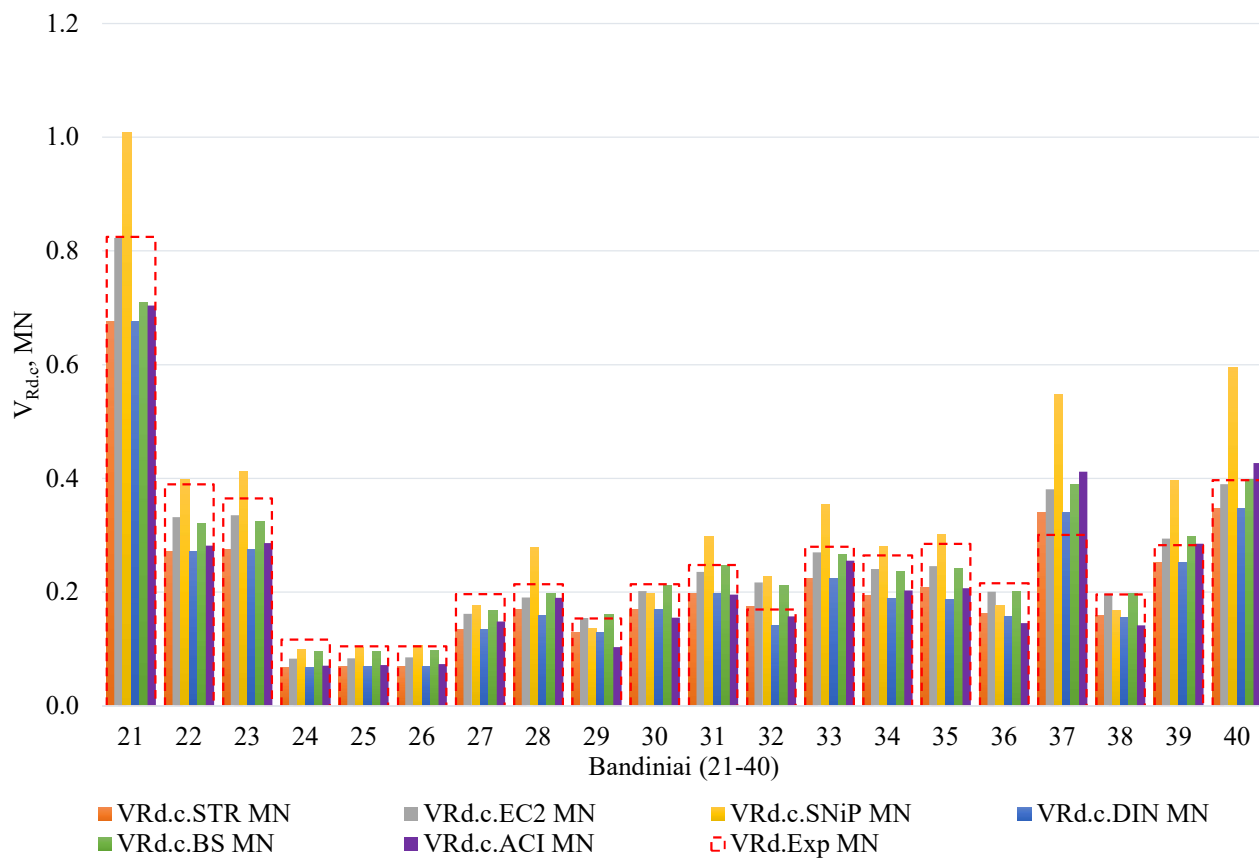
Rezultatų suvestinėje galima matyti kiekvienos projektavimo normos eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių palyginimą, kai skaičiuojamas praspaudimas be skersinės armatūros (žr. 2 lentelę ir 21 pav.). Šie duomenys taip pat pateikiami grafiškai 22–25 paveikslėliuose, kiekvienam bandiniui atskirai. Paveikslėliuose raudona spalva pažymėta linija nurodo idealų eksperimentinių ir teorinių rezultatų santykį ( $V_{exp}/V_{calc} = 1$ ). Tuo tarpu žalios spalvos linija atspindi realią visų bandinių vidutinę santykinę vertę (žr. 2 lentelę, „Reikšmių vidurkis“), o juoda punktyrinė linija nurodo rezultatų nuokrypį nuo vidutinės vertės (žr. 2 lentelę, „Standartinis nuokrypis“). Kiekvieno bandinio eksperimentinės ir teorinės praspaudimo laikomosios galios paskaičiuotos pagal skirtingas projektavimo normas, kai perdangos plokštė be skersinio armavimo, pateikiamos 1 priede. Remiantis šiais duomenimis, toliau atliekama tiksliausios projektavimo normos analizė.



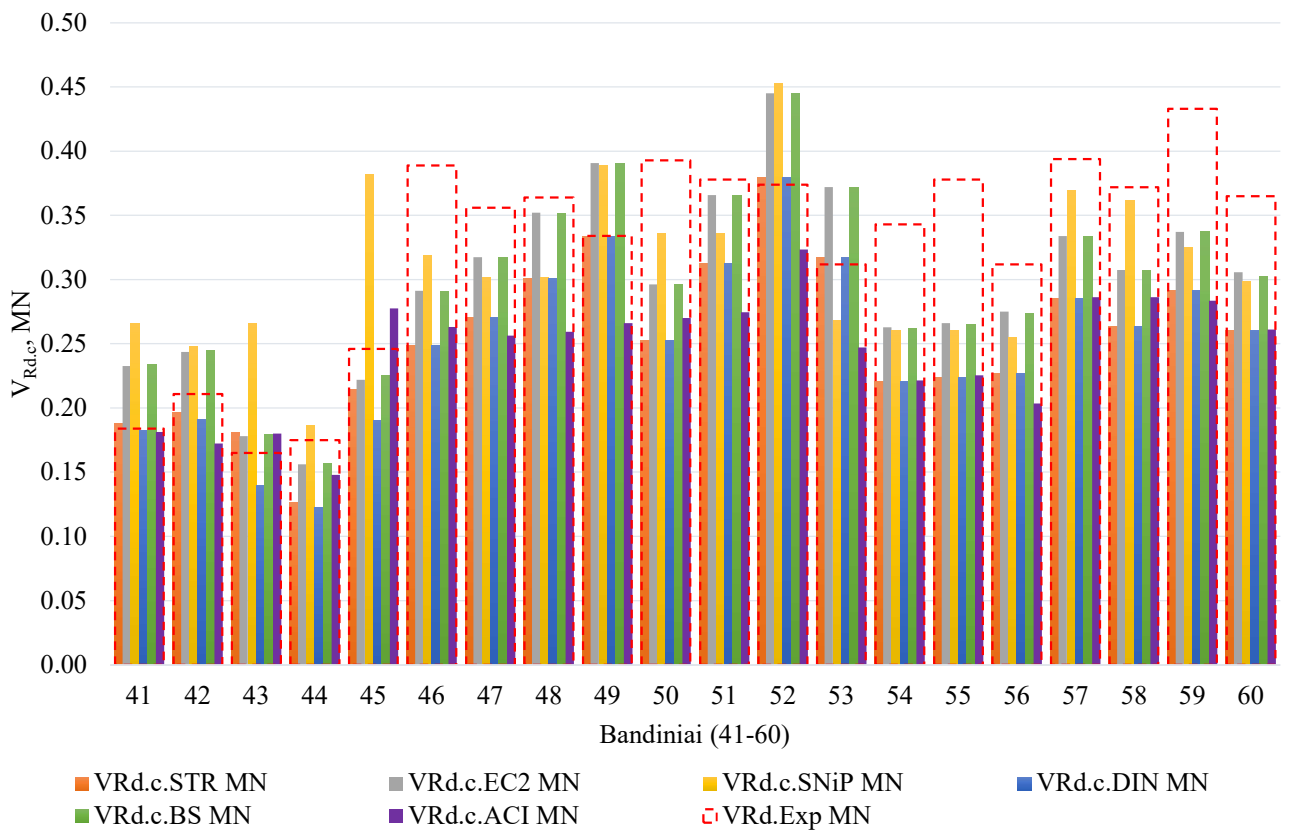
**21 pav.** Projektavimo normų reikšmių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai, kai skaičiuojamas praspaudimas be skersinės armatūros



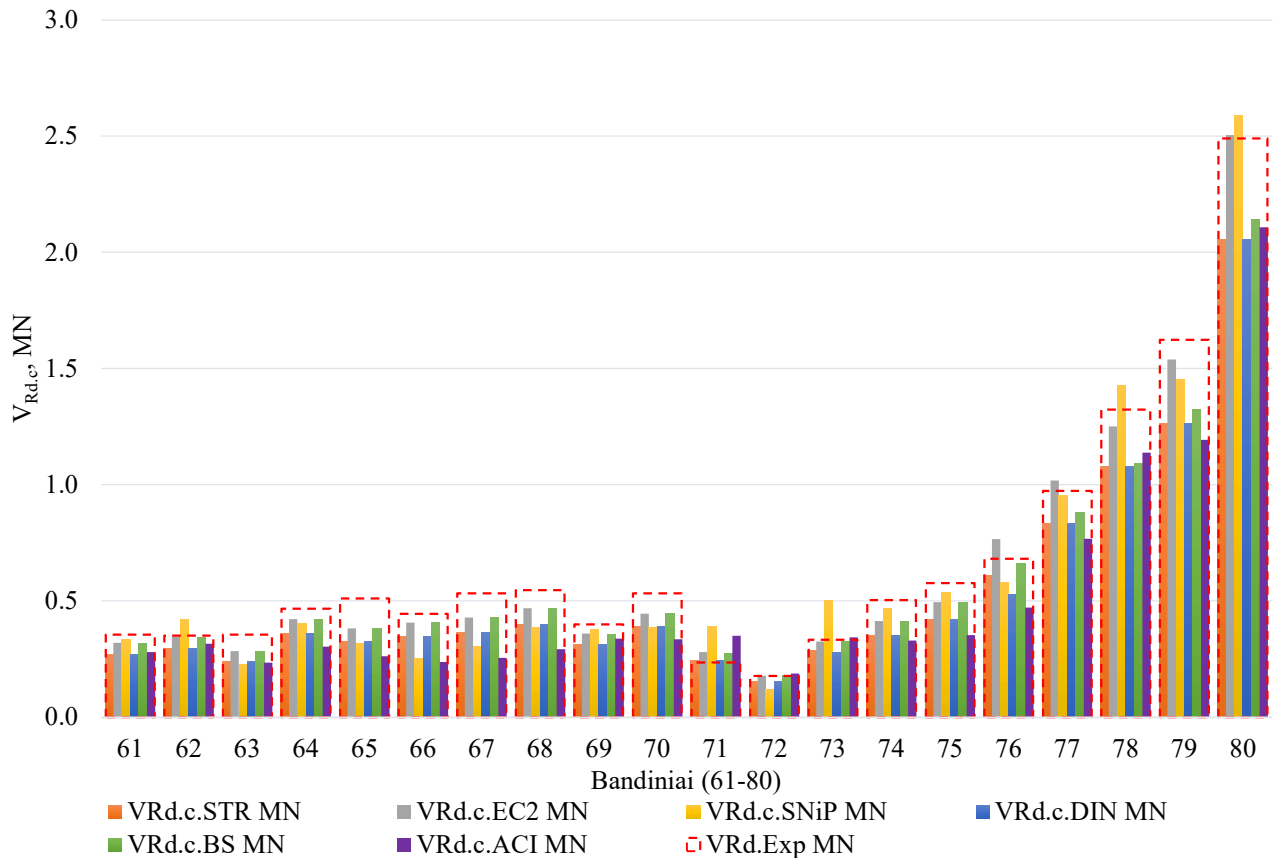
**22 pav.** Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas (1-20 bandiniai)



**23 pav.** Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas (21-40 bandiniai)



**24 pav.** Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas (41-60 bandiniai)

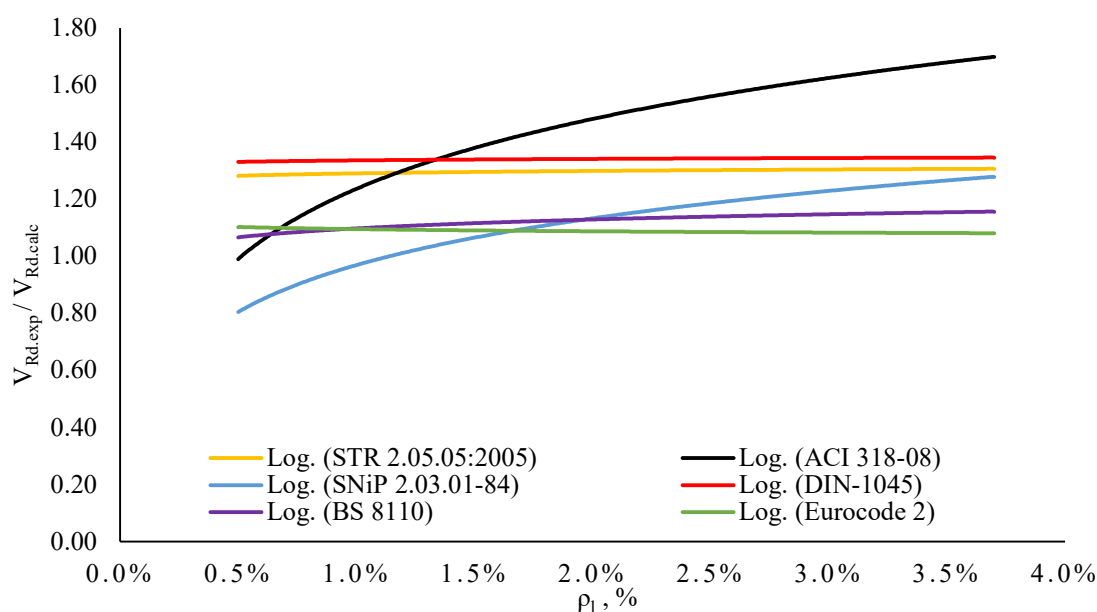


**25 pav.** Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas (61-80 bandiniai)

Iš gautų rezultatų galima matyti, kad vertinant reikšmių vidurkius artimiausios eksperimentinėms yra SNIIP 2.03.01-84 projektavimo normos, kurių vidurkis yra 1,04. Tačiau atsižvelgiant į tai, kad pagal šias projektavimo normas gautų rezultatų sklaida buvo labai didelė (variacijos koeficientas – 23,8 %), jų negalima laikyti tiksliais. Didele rezultatų sklaida pasižymėjo ir ACI 318-08 siūloma skaičiavimo metodika, pagal kurią variacijos koeficientas buvo gautas 18,9 %, o vidurkis siekė 1,35. Dėl šios priežasties, šių projektavimo normų taip pat negalima laikyti tiksliais. Žemiausios variacijos koeficientų vertės gautos pagal STR 2.05.05:2005, *Eurocode 2*, DIN 1045 ir BS 8110 projektavimo normas, jos kito nuo 13,2 % iki 13,5 %. Tačiau atsižvelgiant į šių skaičiavimo metodikų reikšmių vidurkius, jų skirtumai yra didesni ir kinta nuo 1,09 iki 1,34. Iš jų, artimiausios eksperimentinėms laikomosios galios gautos pagal *Eurocode 2* skaičiavimo metodiką (vidurkis – 1,09), dėl šios priežasties, šias projektavimo normas galima laikyti tiksliausiomis iš nagrinėjamų šešių. Būtina atkreipti dėmesį į tai, kad šiuo atveju tikslumas buvo nagrinėjamas bandiniams, kurių geometrinėms savybėms bei medžiagų charakteristikoms nebuvo taikomi jokie ribojimai.

### 2.1.5. Projektavimo normų tikslumas, priklausomai nuo armavimo intensyvumo

Galima pastebėti tendenciją, kad tarp projektavimo normų, kuriose vertinamas išilginis armavimas (STR 2.05.05:2005, *Eurocode 2*, DIN 1045 ir BS 8110), variacijos koeficientų vertės kinta neženkliai. Tačiau kai išilginio armavimo įtaka nėra vertinama (SNIIP 2.03.01-84 ir ACI 318-08), rezultatų sklaida būna didesnė (žr. 26 pav.). Iš 26 paveikslėlyje pateiktos diagramos galima matyti, kad teorinių laikomųjų galių tikslumas pagal skirtingas projektavimo normas keičiasi didėjant armavimo intensyvumui (ši informacija pateikiama kiekvienai projektavimo normai atskirai 1 Priede). Skaičiavimo metodikose, kuriose vertinamas išilginis armavimas, nepriklausomai nuo armavimo intensyvumo, vidutinių reikšminių pokytis yra neženklius. Kai išilginio armavimo įtaka nevertinama (SNIIP 2.03.01-84 ir ACI 318-08), galima matyti, kad esant žemam armavimo intensyvumui kiekiui, teorinės laikomosios galios gali būti didesnės už eksperimentines. Tuo tarpu, kai armavimo intensyvumas yra aukštas, teorinės laikomosios galios gali būti gaunamos ženkliai mažesnės, lyginant su eksperimentinėmis. Šie duomenis parodo, kad armavimo intensyvumo vertinimas skaičiavimuose yra svarbus kriterijus siekiant nustatyti tikslias laikomųjų galių vertes.



26 pav. Eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykio priklausomybė nuo armavimo intensyvumo pagal skirtingas projektavimo normas, kai nenaudojamas skersinis armavimas

Tyrimo metu buvo siekiama surasti ribas, kuriose pagal skirtingas projektavimo normas apskaičiuotos vertės pasižymėtų kuo mažesne rezultatų sklaida (žr. 4 lentelę). Atsižvelgiant į armavimo intensyvumą, buvo išskiriamos trys ribos: kai armavimo intensyvumas yra mažesnis nei 1,2 %, kai jis yra tarp 1,2 % ir 2 % bei kai jis yra didesnis nei 2 %. Į kiekvieną intervalą pateko skirtingas bandinių skaičius, tačiau jis buvo nemažesnis nei 16 (detali informacija pateikiama 3 lentelėje). Analizės metu buvo nustatyta, kad tiksliausi rezultatai gaunami, kai armavimo intensyvumas yra tarp 1,2 % ir 2 %. Šiuo atveju, projektavo normose kuriose vertinama išilginės armatūros įtaka (STR 2.05.05:2005, Eurocode 2, DIN 1045 ir BS 8110) variacijos koeficientas svyravo nuo 9,2 % iki 11,4 %. Kita vertus, kai armavimo intensyvumas buvo mažesnis nei 1,2 %, variacijos koeficientas svyravo tarp 14,7 % ir 17,2 %. Galiausiai, kai armavimo intensyvumas buvo didesnis nei 2 %, variacijos koeficientas svyravo nuo 13,2 % iki 14,3 %. Taigi, skaičiavimo metodikose, kuriose vertinama išilginės armatūros įtaka ir armavimo intensyvumas yra 1,2–2 % ribose, rezultatų sklaida vidutiniškai sumažėjo 3,4 %. Didžiausias pokytis rezultatų tikslume buvo stebimas projektavimo normose, kuriose nebuvo vertinama išilginio armavimo įtaka. Pagal SNiP 2.03.01-84, kai armavimo intensyvumas buvo 1,2–2 % ribose, variacijos koeficientas buvo 15,4 %, tuo tarpu už šių ribų jis pakilo iki 27 %, kai  $\rho_1 < 1.2\%$ , ir 24 %, kai  $\rho_1 > 2\%$ . Tai parodo, kad rezultatų sklaida sumažėjo net 8,6 %. Pagal ACI 318-08 projektavimo normas, kai armavimo intensyvumas buvo tarp 1,2 % ir 2 %, variacijos koeficientas buvo tik 10,2 % ir, lyginant su gautomis vertėmis už šių ribų, rezultatų sklaida sumažėjo net 6,4 %. Atsižvelgiant į vidutines vertes galima matyti, kad kaip ir 26 paveikslėlyje esančioje diagramoje, taip ir 3 lentelėje, didėjant armavimo intensyvumui, pagal SNiP 2.03.01-84 ir ACI 318-08 projektavimo normas, reikšmių vidurkiai taip pat išauga. Tačiau pagal STR 2.05.05:2005, Eurocode 2, DIN 1045 ir BS 8110 projektavimo normas, nepriklausomai nuo armavimo intensyvumo, vidutinių verčių pokyčiai yra neženklūs.

**3 lentelė.** Projektavimo normų tikslumas, esant skirtingam išilginio armavimo intensyvumui

| Parametrai pagal ( $V_{exp}/V_{calc}$ ) | Intervalas                   | Bandinių sk. | STR 2.05.05:2005 | Eurocode 2 | SNiP 2.03.01-84 | DIN 1045 | BS 8110 | ACI 318-08 |
|---|------------------------------|--------------|------------------|------------|-----------------|----------|---------|------------|
| Reikšmių vidurkis                       | $\rho_1 < 1.2\%$             | 31           | 1.31             | 1.11       | 0.94            | 1.34     | 1.09    | 1.21       |
| Standartinis nuokrypis                  |                              |              | 0.22             | 0.18       | 0.25            | 0.20     | 0.16    | 0.26       |
| Variacijos koeficientas                 |                              |              | 17.2%            | 15.9%      | 27.0%           | 15.1%    | 14.7%   | 21.4%      |
| Reikšmių vidurkis                       | $1.2\% \leq \rho_1 \leq 2\%$ | 33           | 1.30             | 1.09       | 1.05            | 1.35     | 1.14    | 1.36       |
| Standartinis nuokrypis                  |                              |              | 0.12             | 0.11       | 0.16            | 0.15     | 0.13    | 0.14       |
| Variacijos koeficientas                 |                              |              | 9.2%             | 9.9%       | 15.4%           | 11.1%    | 11.4%   | 10.2%      |
| Reikšmių vidurkis                       | $\rho_1 > 2\%$               | 16           | 1.26             | 1.06       | 1.21            | 1.31     | 1.11    | 1.58       |
| Standartinis nuokrypis                  |                              |              | 0.17             | 0.15       | 0.29            | 0.18     | 0.16    | 0.26       |
| Variacijos koeficientas                 |                              |              | 13.2%            | 13.8%      | 24.0%           | 14.0%    | 14.3%   | 16.6%      |

## 2.1.6. Projektavimo normų tikslumas, priklausomai nuo betono stiprio gniuždant

Betono stiprio gniuždant įtaka vertinama visose projektavimo normose, tačiau ne visos jos numato ribojimus, kuriems esant skaičiavimo metodikos nėra tinkamos taikyti. Analizuojant projektavimo normų tikslumą, buvo pasirinktos trys atkarpos: kai betono stipris gniuždant yra iki 25 MPa, kai jis yra tarp 25 ir 40 MPa ir kai jis yra didesnis kaip 40 MPa. Informacija su reikšmių vidurkiais ir variacijos koeficientais ties kiekviena riba pateikiama 4 lentelėje, o diagramos, kuriose stebimas teorinių verčių tikslumas didėjant betono stipriui gniuždant, nurodytos 2 priede. Į kiekvieną intervalą pateko skirtingas bandinių skaičius, mažiausiai jų pateko į dalį, kurioje betono stipris gniuždant buvo didesnis kaip 40 MPa. Viso į šią dalį pateko 14 bandinių, iš kurių 13 buvo iš autoriaus Tomaszewicz atlikto tyrimo, kas galėjo turėti įtakos variacijos koeficientui, kadangi nagrinėjamų bandinių charakteristikos buvo panašios. Tarp skirtingų projektavimo normų, kai  $f_{ck} > 40$  MPa, variacijos koeficientas svyravo tik nuo 8 % iki 9,7 %. Kai betono stipris gniuždant buvo iki 25 MPa ir kai jis buvo tarp 25 MPa ir 40 MPa, ženklų pokyčių atsižvelgiant į rezultatų sklaidą nebuvo. Tačiau pagal STR 2.05.05:2005, Eurocode 2, SNiP 2.03.01-84, DIN 1045, BS 8110 ir ACI 318-08 projektavimo normas, teorinės laikomosios galios buvo artimesnės eksperimentinėms, kai betono stipris gniuždant kito nuo 25 MPa iki 40 MPa.

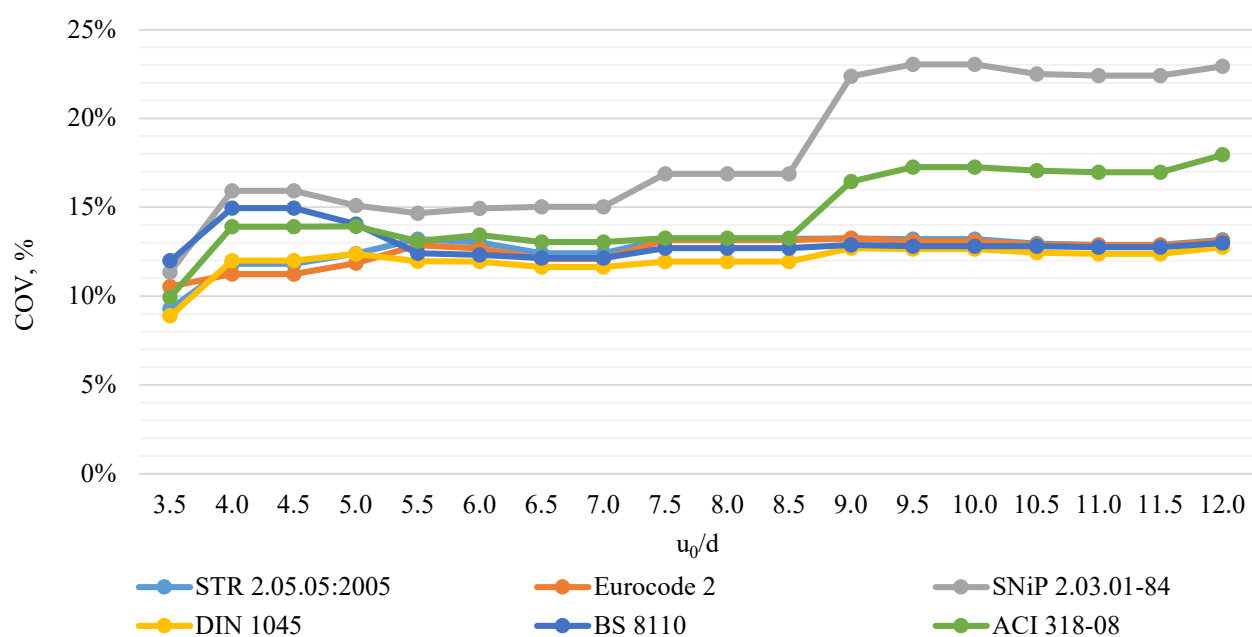
**4 lentelė.** Projektavimo normų tikslumas, esant skirtingam betono stipriui gniuždant

| Parametrai pagal ( $V_{exp}/V_{calc}$ ) | Intervalas                               | Bandinių sk. | STR 2.05.05:2005 | Eurocode 2 | SNiP 2.03.01-84 | DIN 1045 | BS 8110 | ACI 318-08 |
|---|--|--------------|------------------|------------|-----------------|----------|---------|------------|
| Reikšmių vidurkis                       | $f_{ck} < 25$ MPa                        | 27           | 1.34             | 1.14       | 1.24            | 1.35     | 1.13    | 1.42       |
| Standartinis nuokrypis                  |  |              | 0.19             | 0.16       | 0.26            | 0.18     | 0.16    | 0.28       |
| Variacijos koeficientas                 |  |              | 13.8%            | 13.8%      | 20.9%           | 13.7%    | 13.9%   | 19.9%      |
| Reikšmių vidurkis                       | $25 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 40$ MPa | 39           | 1.25             | 1.06       | 0.92            | 1.28     | 1.06    | 1.25       |
| Standartinis nuokrypis                  |  |              | 0.18             | 0.14       | 0.19            | 0.16     | 0.13    | 0.24       |
| Variacijos koeficientas                 |  |              | 14.3%            | 13.4%      | 20.6%           | 12.8%    | 12.4%   | 18.9%      |
| Reikšmių vidurkis                       | $f_{ck} > 40$ MPa                        | 14           | 1.31             | 1.07       | 1.00            | 1.47     | 1.22    | 1.47       |
| Standartinis nuokrypis                  |  |              | 0.11             | 0.09       | 0.10            | 0.12     | 0.10    | 0.13       |
| Variacijos koeficientas                 |  |              | 8.0%             | 8.7%       | 9.7%            | 8.2%     | 8.3%    | 8.5%       |



### 2.1.7. Projektavimo normų tikslumas, priklausomai nuo kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykio

Kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykis *Eurocode 2* ir DIN 1045 projektavimo normose yra vertinamas per koeficientą  $C_{RD,C}$ , o pagal STR 2.5.05:2005, tai įvertinama per papildomą daugiklį  $0,18/\gamma_C$ . Kiekvienos projektavimo normos variacijos koeficiento priklausomybė nuo kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykio pateikiama 27 paveikslėlyje. Iš šios diagramos galima matyti, kad santykiui pasiekus 8,5 ribą pagal SNiP 2.03.01-84 ir ACI 318-08 projektavimo normas, variacijos koeficientas ženkliai išauga, tačiau pagal kitas nagrinėjamas projektavimo normas ši tendencija nepasireiškia. Diagramos kiekvienai projektavimo normai, kuriose galima matyti kaip keičiasi eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė, didėjant kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykiui, pateikiamos 3 priede.



**27 pav.** Variacijos koeficiento priklausomybė nuo kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykio

Vertinant kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykio įtaką rezultatų tikslumui, buvo išskirtos dvi ribos:  $u_0/d < 8$  ir  $u_0/d \geq 8$ . Bandinių pasiskirstymas abiem atvejais buvo tolygus, atitinkamai po 41 ir 39 bandinius. Informacija su reikšmių vidurkiais ir variacijos koeficientais ties numatytomis ribomis pateikiama 5 lentelėje. Pagal STR 2.05.05:2005, *Eurocode 2*, DIN 1045 ir BS 8110 projektavimo normas, gauti rezultatai tarp skirtingų ribų išsiskyrė neženkliai, kadangi šiose skaičiavimo metodikose ši dedamoji jau yra įvertinta. Tačiau pagal SNiP 2.03.01-84 ir ACI 318-08 projektavimo normas, pastebimas ženklus skirtumas. Kai nagrinėjami bandiniai buvo  $u_0/d \geq 8$  ribose, pagal Rusijos skaičiavimo metodiką gautas variacijos koeficientas siekė 28,3 %, o įvedus  $u_0/d < 8$  ribojimą, variacijos koeficientas nukrito iki 16,9 %. Taigi, galima matyti, kad gaunamų rezultatų sklaida sumažėjo net 11,4 %. Vadovaujanti Jungtinių Amerikos Valstijų skaičiavimo metodika, esant sąlygai  $u_0/d \geq 8$ , variacijos koeficientas buvo 23,8 %, o įvedus  $u_0/d < 8$  ribojimą, variacijos koeficientas nukrito iki 13,3 %. Šiuo atveju rezultatų sklaida sumažėjo 10,5 %.

**5 lentelė.** Projektavimo normų tikslumas, esant skirtingam kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščių santykiui

| Parametrai pagal ( $V_{exp}/V_{calc}$ ) | Intervalas     | Bandinių sk. | STR 2.05.05:2005 | Eurocode 2 | SNiP 2.03.01-84 | DIN 1045 | BS 8110 | ACI 318-08 |
|---|----------------|--------------|------------------|------------|-----------------|----------|---------|------------|
| Reikšmių vidurkis                       | $u_0/d < 8$    | 41           | 1.31             | 1.08       | 1.00            | 1.39     | 1.13    | 1.37       |
| Standartinis nuokrypis                  |                |              | 0.17             | 0.14       | 0.17            | 0.17     | 0.14    | 0.18       |
| Variacijos koeficientas                 |                |              | 13.2%            | 13.2%      | 16.9%           | 11.9%    | 12.7%   | 13.3%      |
| Reikšmių vidurkis                       | $u_0/d \geq 8$ | 39           | 1.28             | 1.10       | 1.08            | 1.29     | 1.09    | 1.32       |
| Standartinis nuokrypis                  |                |              | 0.18             | 0.15       | 0.31            | 0.18     | 0.15    | 0.31       |
| Variacijos koeficientas                 |                |              | 13.8%            | 13.4%      | 28.3%           | 13.6%    | 13.7%   | 23.8%      |

### 2.1.8. Apribojimų įvedimas projektavimo normoms, skaičiuojant praspaudimą be skersinės armatūros

Išanalizavus armavimo intensyvumo ( $\rho_1$ ), betono stiprio gniuždant ( $f_{ck}$ ) ir kolonos perimetro su efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykiu ( $u_0/d$ ) įtaką rezultatų tikslumui, buvo identifikuotos sąlygos, kurioms esant gaunami rezultatai yra tiksliausi. Suvestinė informacija su kiekvienai projektavimo normai priimtais ribojimais pateikiama 6 lentelėje. Siekiant išsiaiškinti kokią įtaką gaunamų rezultatų tikslumui turi naujai įvesti ribojimai, kiekvienai projektavimo normai buvo išrenkami jas atitinkantys bandiniai. Vadovaujanti STR 2.05.05:2005 ir *Eurocode 2* projektavimo normomis, tiksliausi rezultatai gaunami pritaikius tik armavimo intensyvumui skirtus ribojimus, o kiti nagrinėti parametrai reikšmingos įtakos rezultatams neturėjo arba buvo jau įtraukti į skaičiavimų formules. Įvedus armavimo intensyvumo ribojimus pagal STR 2.05.05:2005, gautų rezultatų sklaida sumažėjo 4,3 %, o pagal *Eurocode 2* – 3,3 %. SNiP 2.03.01-84 ir ACI 318-08 skaičiavimų metodikoms siūloma taikyti numatytus ribojimus visiems nagrinėtiems parametrams, kadangi tokiu atveju rezultatų sklaida sumažėja daugiausiai. Įvedus numatomus ribojimus šioms projektavimo normoms, variacijos koeficientas pagal SNiP 2.03.01-84 sumažėjo 11,7 %, o pagal ACI 318-08 – 9,6 %. Vadovaujantis DIN 1045 ir BS 8110 praspaudimo laikomosios galios skaičiavimo metodikomis, tiksliausi rezultatai gaunami įvedant ribojimus armavimo intensyvumui ir betono stipriui gniuždant. Kolonos perimetro su efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykiu įtaka jau yra įvertinta skaičiavimų formulėse. Pagal DIN 1045, variacijos koeficientas sumažėjo 4,6 %, o pagal BS 8110 – 2%.

**6 lentelė.** Rezultatų suvestinė, įvedus numatytus ribojimus projektavimo normoms

| Parametrai   | STR<br>2.05.05:2005 | Eurocode 2 | SNiP<br>2.03.01-84 | DIN<br>1045 | BS<br>8110 | ACI<br>318-08 |
|--|---------------------|------------|--------------------|-------------|------------|---------------|
| Armavimo intensyvumas<br>$1.2 \% \leq \rho_1 \leq 2 \%$  | +                   | +          | +                  | +           | +          | +             |
| Betono stipris gniuždant<br>$25 \text{ MPa} < f_{ck} < 40 \text{ MPa}$                                       | -                   | -          | +                  | +           | +          | +             |
| Kolonos perimetro ir efektyvaus<br>aukščio santykis<br>$u_0/d < 8$   | -                   | -          | +                  | -           | -          | +             |
| <b>Rezultatų suvestinė neįvedus ribojimų skaičiavimo metodikoms (bandinių skaičiaus – 80)</b>                |                     |            |                    |             |            |               |
| Reikšmių vidurkis  | 1.29                | 1.09       | 1.04               | 1.34        | 1.11       | 1.35          |
| Standartinis nuokrypis   | 0.17                | 0.14       | 0.25               | 0.18        | 0.15       | 0.25          |
| Variacijos koeficientas  | 13.5%               | 13.2%      | 23.8%              | 13.2%       | 13.3%      | 18.9%         |
| <b>Rezultatų suvestinė įvedus ribojimus skaičiavimo metodikoms atitinkamam nagrinėjamų bandinių skaičiui</b> |                     |            |                    |             |            |               |
| Nagrinėjamų bandinių skaičius  | 33                  | 33         | 7                  | 14          | 14         | 7             |
| Reikšmių vidurkis  | 1.30                | 1.09       | 1.06               | 1.27        | 1.08       | 1.34          |
| Standartinis nuokrypis   | 0.12                | 0.11       | 0.13               | 0.11        | 0.12       | 0.13          |
| Variacijos koeficientas  | 9.2%                | 9.9%       | 12.1%              | 8.6%        | 11.3%      | 9.3%          |

## 2.2. Praspaudimo analizė su skersiniu armavimu

Šiame skyriuje analizuojama skersinės armatūros įtaka praspaudimo laikomajai galiai, pagal skirtingas skaičiavimų metodikas, siekiant išsiaiškinti tiksliausią ir patikimiausią skaičiavimų metodą. Tyrimui atlikti buvo pasirinkti du skersinės armatūros tipai: įprasti armatūros strypai ir strypai su galvutėmis abejuose galuose. Analizei buvo pasirinktos septynios skaičiavimų metodikos, iš kurių viena (EOTA TR60) pritaikyta skaičiuoti praspaudimo laikomąją galią tik strypams su galvutėmis abejuose galuose:

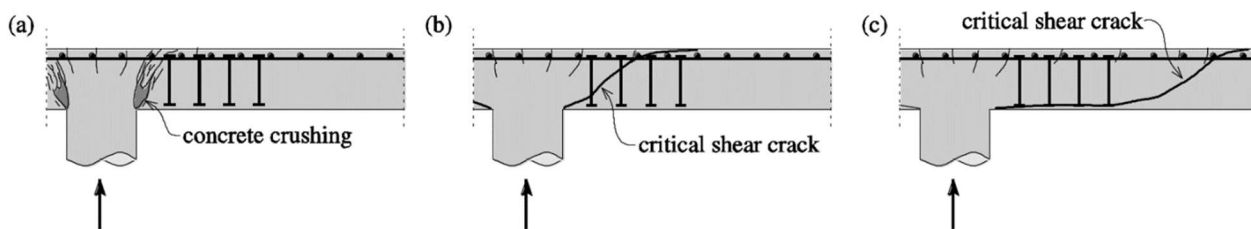
- Europos – *Eurocode 2 (EC2)* [11];
- Lietuvos – *STR 2.05.05:2005* [20];
- Rusijos – *SNiP 2.03.01-84* [14];
- Europos techninio vertinimo organizacijos – *EOTA TR60* [37];
- Didžiosios Britanijos – *BS 8110* [12];
- Vokietijos – *DIN-1045* [18];
- Jungtinių Amerikos Valstijų – *ACI 318-08* [13].

### 2.2.1. Praspaudžiamosios galios su skersiniu armavimu skaičiavimų metodikų analizė

Praspaudimo laikomoji galia su skersiniu armavimu projektavimo normose nustatoma pagal tris suirimo sąlygas, priimant silpniausią iš jų (žr. 2.2.1.1 formulę): maksimali gniuždomojo spyrio laikomoji galia ( $V_{Rd,max}$ ) (žr. 28 pav., a), stipris praspaudimui ties skersine armatūra ( $V_{Rd,cs}$ )

(žr. 28 pav., b), zonoje kurioje skersinis armavimas nebenaudojamas ( $V_{Rd,out}$ ) (žr. 28 pav., c). Žemiau aprašomos nagrinėjamos skaičiavimų metodikos bei sąlygos, kurioms esant jos gali būti taikomos.

$$V_{Rd,cs} = \min \{V_{Rd,max}; V_{Rd,cs}; V_{Rd,out}\} \quad (2.2.1.1)$$



**28 pav.** Praspaudimo laikomosios galios skaičiavimuose vertinamos suirimo sąlygos, kai perdangos plokštėje naudojamas skersinis armavimas [39]

### *Eurocode 2*

Pagal *Eurocode 2*, praspaudimas su skersiniu armavimu vertinamas sumuojant perdangos plokštės laikomąją galią be skersinio armavimo kartu su skersinės armatūros stiprumu. Betono laikomosios galios įtaka apskaičiuojama pagal 2.1.1.9 formulę, sumažinant jos vertę 25 %. Skersinės armatūros įtaką besijinės perdangos plokštės laikomajai galiai nulemia šios dedamosios: žingsnis tarp armatūros strypų ( $s_r$ ) (ne didesnis kaip  $0,75d$ ); suminis skersinės armatūros plotas vienam perimetrui aplink koloną ( $A_{sw}$ ); efektyvusis skaičiuotinis armatūros stipris tempiant ( $f_{yw,eff}$ ); skersinės armatūros posvyrio kampas ( $\sin \alpha$ ). Taip pat būtina atkreipti dėmesį į tai, kad *Eurocode 2* projektavimo normose pateikta metodika neišskiria skersinės armatūros tipų ir nurodo laikomąją galią skaičiuoti vienodai.

Perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui pagal *Eurocode 2*, ties skersiniu armavimu:

$$V_{Rd,cs,EC2} = \frac{v_{Rd,cs,EC2} \cdot u_{1,EC2} \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.2)$$

$$v_{Rd,cs,EC2} = 0,75 \cdot v_{Rd,c,EC2} + 1,5 \cdot \left(\frac{d}{s_r}\right) \cdot \left(\frac{1}{u_{1,EC2} \cdot d}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,eff} \cdot \sin \alpha; \quad (2.2.1.3)$$

čia  $s_r$  – spindulinis žingsnis tarp skersinės armatūros strypų perimetru (mm);

$A_{sw}$  – vieno skersinės armatūros perimetro aplink koloną plotas (mm<sup>2</sup>);

$\sin \alpha$  – skersinės armatūros posvyrio kampas;

$f_{yw,eff}$  – efektyvusis skersinės armatūros stipris tempiant pagal takumo ribą (MPa):

$$f_{yw,eff} = (250 - 0,25 \cdot d) \leq f_{ywd}; \quad (2.2.1.4)$$

$f_{ywd}$  – skaičiuotinis skersinės armatūros stipris tempiant pagal takumo ribą (MPa):

$$f_{ywd} = \frac{f_{yw,k}}{\gamma_s}; \quad (2.2.1.5)$$

$f_{yw,k}$  – charakteristinis skersinės armatūros stipris tempiant pagal takumo ribą (MPa).

Didžiausia laikomoji galia praspaudimui pagal *Eurocode 2* ties gniuždomu betono spyriu:

$$V_{Rd,max,EC2} = \frac{k_{max,EC2} \cdot v_{Rd,c,EC2} \cdot u_1 \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.6)$$

čia  $k_{max,EC}$  – koeficientas, numatantis maksimalią laikomąją galią praspaudimui su skersiniu armavimu pagal *Eurocode 2* ( $k_{max,EC2} = 1,5$ ).

Laikomoji galia praspaudimui pagal *Eurocode 2* išoriniame perimetre:

$$V_{Rd,out,EC2} = \frac{v_{Rd,c,EC2} \cdot u_{out,EC2} \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.7)$$

čia  $u_{out,EC2}$  – išorinis tikrinamasis perimetras  $1,5d$  atstumu nuo paskutinio skersinės armatūros strypo (mm).

### STR 2.05.05:2005

Laikomoji galia praspaudimui, pagal STR 2.05.05:2005 projektavimo normas, ties skersiniu armavimu ir už skersinio armavimo ribų skaičiuojama taikant tas pačias formules kaip ir *Eurocode 2* projektavimo normose. Tačiau skaičiuojant gniuždomojo spyrio laikomąją galią praspaudimui, nevertinamas  $k_{max}$  koeficientas, numatantis padidintą praspaudimo laikomąją galią be skersinio armavimo. Tam vertinamas betono stipris gniuždant, kolonos perimetras ir efektyvusis darbo aukštis (žr. 2.2.1.10 formulę). Taip pat, STR 2.05.05:2005 projektavimo normos nenumato pakeitimų skaičiavimuose, kai naudojami skersinės armatūros strypai su galvutėmis abėjuose galuose.

Perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui pagal STR 2.05.05:2005, ties skersiniu armavimu:

$$V_{Rd,cs,STR} = \frac{v_{Rd,cs,STR} \cdot u_{1,STR} \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.8)$$

$$v_{Rd,cs,STR} = 0,75 \cdot v_{Rd,c,STR} + 1,5 \cdot \left(\frac{d}{s_r}\right) \cdot \left(\frac{1}{u_{1,STR} \cdot d}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,eff} \cdot \sin \alpha. \quad (2.2.1.9)$$

Didžiausia galima laikomoji galia praspaudimui pagal STR 2.05.05:2005 ties gniuždomu spyriu:

$$V_{Rd,max,STR} = \frac{0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot u_0 \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.10)$$

čia  $v$  – supleišėjusio įstrižajame pjūvyje betono stiprio mažinamasis koeficientas:

$$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right). \quad (2.2.1.11)$$

Laikomoji galia praspaudimui pagal STR 2.05.05:2005 išoriniame perimetre:

$$V_{Rd,out,STR} = \frac{v_{Rd,c,STR} \cdot u_{out,STR} \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.12)$$

čia  $u_{out,STR}$  – išorinis tikrinamasis perimetras  $1,5d$  atstumu nuo paskutinio skersinės armatūros strypo (mm).

## SNiP 2.03.01-84

Laikomoji galia praspaudimui su skersiniu armavimu pagal SNiP 2.03.01-84 projektavimo normas taip pat skaičiuojama sumuojant perdangos plokštės stiprumą be skersinio armavimo kartu su skersinės armatūros stiprumu. Tačiau šiuo atveju laikomosios galios mažinimas numatomas ne betono dedamajai, o skersinei armatūrai, sumažinat ją 20 %. Kitaip nei anksčiau nagrinėtose skaičiavimų metodikose, skersinės armatūros plotas pagal SNiP 2.03.01-84 vertinamas ne vieno skersinės armatūros perimetro aplink koloną, o visų strypų esančių 0,5d atstumu nuo kolonos krašto. Taip pat, šiose projektavimo normose nenumatomi pakeitimai skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią naudojant armatūros strypus su galvutėmis abėjuose galuose.

Perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui pagal SNiP 2.03.01-84, ties skersiniu armavimu:

$$V_{Rd,cs,SNiP} = F_{Rd,c,SNiP} + 0,8 \cdot F_{Sw}; \quad (2.2.1.13)$$

čia  $F_{Rd,c,SNiP}$  – laikomoji galia praspaudimui be skersinės armatūros pagal SNiP 2.03.01-84 projektavimo normas (žr. 2.1.1.23 formulę) (MPa);

$F_{Sw}$  – skersinės armatūros indelis į laikomąją galią praspaudimui (MPa):

$$F_{Sw} = \max(R_{Sw} \cdot A_{Sw,SNiP}; 0,5 \cdot F_{Rd,c,SNiP}); \quad (2.2.1.14)$$

$A_{Sw,SNiP}$  – suminis skersinės armatūros plotas vertinant strypus patenkančius į zoną 0,5d atstumu nuo kolos krašto (pagal tikrinamąjį perimetrą –  $u_{1,SNiP}$ , 20 paveikslėlyje) (mm<sup>2</sup>);

$R_{Sw}$  – skaičiuotinis skersinės armatūros stipris tempiant (MPa):

$$R_{Sw} = \gamma_{s1} \cdot \frac{R_s}{\gamma_{s,SNiP}}; \quad (2.2.1.15)$$

$\gamma_{s1}$  – koeficientas įvertinantis netolygų įtempių pasiskirstymą skersinėje armatūroje;

$R_s = f_{ywk}$  – charakteristinis skersinės armatūros stipris tempiant pagal takumo ribą (MPa);

$\gamma_{s,SNiP}$  – armatūros dalinis patikimumo koeficientas pagal SNiP 2.03.01-84, kuris priklausomai nuo armatūros klasės gali kisti nuo 1,1 iki 1,2.

Skaičiuotinis skersinės armatūros stipris tempiant ( $R_{Sw}$ ) pagal SNiP 2.03.01-84 negali būti didesnis kaip A-I klasės armatūros, kurios stipris 175 MPa.

Didžiausia galima laikomoji galia praspaudimui pagal SNiP 2.03.01-84 ties gniuždomu spyriu:

$$V_{Rd,max,SNiP} = 2 \cdot F_{Rd,c,SNiP}. \quad (2.2.1.16)$$

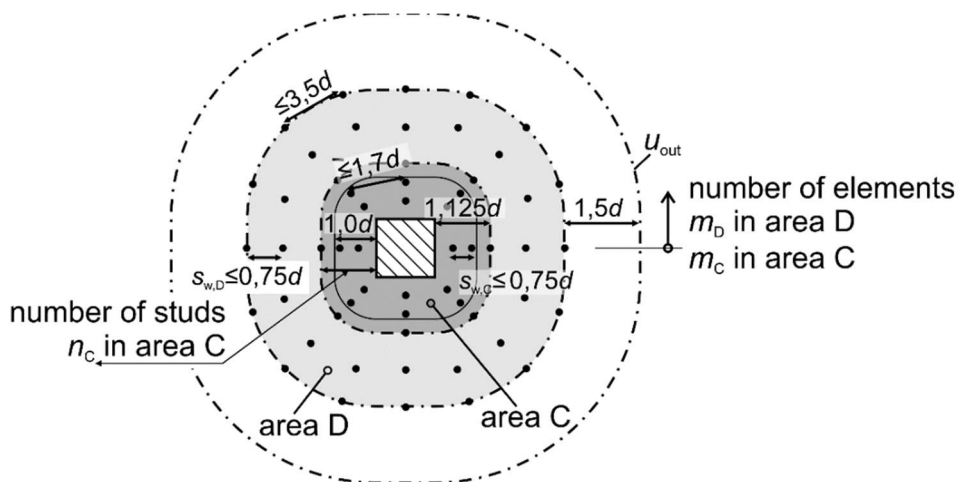
Laikomoji galia parsraudimui pagal SNiP 2.03.01-84 išoriniame perimetre:

$$V_{Rd,out,SNiP} = \alpha \cdot R_{bt} \cdot u_{out,SNiP} \cdot h_0; \quad (2.2.1.17)$$

čia  $u_{out,SNiP}$  – išorinis tikrinamasis perimetras 0,5d atstumu nuo paskutinio skersinės armatūros strypo (mm).

## EOTA TR60

Ši metodika pritaikyta skaičiuoti praspaudimo laikomąją galią, tik kai naudojami skersinės armatūros strypai su galvutėmis abejuose galuose. Kitaip nei prieš tai nagrinėtose metodikose, siekiant paskaičiuoti laikomąją galią su skersiniu armavimu, nėra sumuojamos betono ir skersinės armatūros dedamosios. Tam skaičiuojama tik skersinio armavimo įtaka, vertinant visų strypų laikomąją galią zonoje esančioje  $1,125d$  atstumu nuo kolonos (žr. 29 pav., *area C*).



29 pav. Zonų paskirstymas pagal EOTA TR60 ir didžiausi galimi atstumai tarp strypų [37]

Perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui pagal EOTA TR60, ties skersiniu armavimu:

$$V_{Rd,cs,EOTA} = n_c \cdot m_c \cdot \frac{d_A^2 \cdot \pi \cdot f_{ywk}}{4 \cdot \gamma_s \cdot \eta}; \quad (2.2.1.18)$$

čia  $n_c$  – strypų patenkančių į C zoną skaičius vienoje eilėje;

$m_c$  – eilių skaičius patenkantis į C zoną;

$d_A$  – armatūros strypų su suformuotomis galvutėmis abejuose galuose skersmuo (mm);

$\eta$  – koeficientas vertinantis armatūros darbo aukščio įtaką (tarpinės vertės randamos interpoliuojant):

$$\eta = \begin{cases} 1, & \text{kai } d \leq 200 \text{ mm} \\ 1,6, & \text{kai } d \geq 800 \text{ mm} \end{cases}$$

Didžiausia galima laikomoji galia praspaudimui pagal EOTA TR60 ties gniuždomu spyriu:

$$V_{Rd,max,EOTA} = k_{max,EOTA} \cdot V_{Rd,c,EOTA}; \quad (2.2.1.19)$$

čia  $k_{max,EOTA}$  – koeficientas, nusakantis didžiausią galimą jėgos prieaugį naudojant skersinį armavimą, kuris kiekvienam gamintojui nustatomas individualiai atliekant bandymus (įprastai priimama, kad  $k_{max,EOTA} = 1,96$ );

$V_{Rd,c,EOTA}$  – laikomoji galia praspaudimui be skersino armavimo pagal EOTA TR60:

$$V_{Rd,c,EOTA} = \frac{V_{Rd,c,EOTA} \cdot u_{1,EOTA} \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.20)$$

$u_{1,EOTA} = u_{1,EC2}$  – tikrinamasis perimetras aplink koloną vertinamas taip pat, kaip ir pagal *Eurocode 2* (žr. 16 pav.) (mm);

$v_{Rd,c,EOTA}$  – laikomoji galia praspaudimui į kvadratinį metrą pagal EOTA TR60 projektavimo normas, kai perdangos plokštė be skersinio armavimo (MPa):

$$v_{Rd,c,EOTA} = \max \left\{ C_{Rd,c,EOTA} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}}; v_{min,EOTA} \right\}; \quad (2.2.1.21)$$

$C_{Rd,c,EOTA}$  – koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$C_{Rd,c,EOTA} = \begin{cases} \frac{u_0}{d} \geq 4 \rightarrow C_{Rd,c,EOTA} = \frac{0,18}{\gamma_c} \\ \frac{u_0}{d} < 4 \rightarrow C_{Rd,c,EOTA} = \max \left( \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot \left( 0,1 \cdot \frac{u_0}{d} + 0,6 \right), \frac{0,15}{\gamma_c} \right); \end{cases} \quad (2.2.1.22)$$

$\rho_1$  – išilginio armavimo intensyvumas, skaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho_1 = \min \left( \sqrt{\rho_{1y} \cdot \rho_{1z}}; 0,02; 0,5 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right); \quad (2.2.1.23)$$

$v_{min,EOTA}$  – mažiausia galima laikomoji galia praspaudimui pagal EOTA TR60 skaičiavimo metodiką, kai perdangos plokštė be skersinio armavimo (MPa):

$$v_{min,EOTA} = \begin{cases} d \leq 600 \text{ mm} \rightarrow \frac{0,0375}{\gamma_c} \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \\ d > 800 \text{ mm} \rightarrow \frac{0,0525}{\gamma_c} \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2.2.1.24)$$

Laikomoji galia praspaudimui išoriniame perimetre pagal EOTA TR60 skaičiuojama  $1,5d$  atstumu nuo paskutinio skersinės armatūros strypo:

$$V_{Rd,out,EOTA} = \frac{v_{Rd,c,EOTA} \cdot u_{out,EOTA} \cdot d}{\beta_{red}}; \quad (2.2.1.25)$$

čia  $u_{out,EOTA}$  – išorinis tikrinamasis perimetras (mm) (žr. 29 pav.);

$$u_{out,EOTA} = 2 \cdot \pi \cdot (l_s + 1,5 \cdot d) + 2 \cdot (a + b); \quad (2.2.1.26)$$

$l_s$  – atstumas nuo kolonos krašto iki tolimiausio armatūros strypo (mm);

$\beta_{red}$  – redukuotas koeficientas, priklausantis nuo kolonos padėtis (pateikta formulė skirta vidinei kolonai):

$$\beta_{red} = \frac{\beta}{1,2 + \frac{\beta}{15} \cdot \frac{l_s}{d}} \quad (2.2.1.27)$$



## ACI 318-08

Pagal ACI 318-08 projektavimo normas, praspaudimas skaičiuojamas tuo pačiu principu kaip ir *Eurocode 2*. Sumažinta laikomosios galios betono įtaka yra sumuojama su skersinę jėgą laikančios armatūros įtaka. Tačiau šios projektavimo normos išskiria dvi skaičiavimo metodikas: kai naudojami įprasti armatūros strypai ir strypai su galvutėmis abejuose galuose.

Perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui ties skersine armatūra pagal ACI 318-08, naudojant įprastus armatūros strypus:

$$V_{Rd,st,ACI} = 0,17 \cdot b_0 \cdot d \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} + A_{sw} \cdot f_{ywk} \cdot \frac{d}{s_r} \quad (2.2.1.28)$$

Perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui ties skersine armatūra pagal ACI 318-08, naudojant strypus su galvutėmis abejuose galuose:

$$V_{Rd,hd,ACI} = 0,25 \cdot b_0 \cdot d \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} + A_{sw} \cdot f_{ywk} \cdot \frac{d}{s_r} \quad (2.2.1.29)$$

Skaičiuojant praspaudimo laikomąją galią ties skersine armatūra, kai naudojami armatūros strypai su galvutėmis abejuose galuose, privalo būti tikrinama sąlyga:

$$\frac{A_{sw}}{s_r} \geq 0,17 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}} \cdot b_0}{f_{ywk}} \quad (2.2.1.30)$$

Didžiausia galima laikomoji galia praspaudimui ties gniuždomu spyriu pagal ACI 318-08, naudojant įprastus armatūros strypus:

$$V_{Rd,st,max,ACI} = \Phi \cdot 0,5 \cdot b_0 \cdot d \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (2.2.1.31)$$

Didžiausia galima laikomoji galia praspaudimui ties gniuždomu spyriu pagal ACI 318-08, naudojant strypus su galvutėmis abejuose galuose:

$$V_{Rd,hd,max,ACI} = \Phi \cdot \frac{2}{3} \cdot b_0 \cdot d \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}}; \quad (2.2.1.32)$$

čia  $\Phi$  – praspaudimo laikomosios galios mažinamasis koeficientas (normose numatoma šio koeficiento vertė:  $\Phi = 0,75$ ).

Perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui išoriniame perimetre pagal ACI 318-08 nepriklauso nuo armatūros tipo ir skaičiuojama pagal formulę:

$$V_{Rd,out,ACI} = 0,17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_{0,out} \cdot d; \quad (2.2.1.33)$$

čia  $b_{0,out}$  – išorinis tikrinamasis perimetras, skaičiuojamas  $0,5d$  atstumu nuo paskutinio skersinės armatūros strypo.

Pagal šias projektavimo normas skersinis armavimas gali būti taikomas, kai efektyvusis darbo aukštis ( $d$ ) yra didesnis kaip 150 mm arba  $16 \cdot \emptyset_{sw}$ , kur  $\emptyset_{sw}$  yra skersinės armatūros skersmuo.

## BS 8110

Pagal BS 8110 projektavimo normas, praspaudimo laikomoji galia su skersiniu armavimu skaičiuojama sumuojant praspaudimo laikomąją galią be skersinio armavimo kartu su skersinio armavimo įtaka praspaudimo laikomajai galiai. Tačiau šiuo atveju skaičiavimo metodika priklauso nuo perdangą veikiančios praspaudimo jėgos. Kaip ir *Eurocode 2*, BS 8110 neišskiria skersinės armatūros tipų, todėl laikomoji galia praspaudimui skaičiuojama vienodai. Taip pat, pagal šias projektavimo normas numatoma rekomendacija skersinės armatūros strypus išdėlioti tikrinamojo perimetro forma.

Perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui pagal BS 8110, ties skersiniu armavimu:

$$V_{Rd,cs,BS} = \frac{v_{Rd,cs,BS} \cdot u_{1,BS} \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.34)$$

čia  $v_{Rd,cs,BS}$  – laikomoji galia praspaudimui į kvadratinį metrą pagal BS 8110 projektavimo normas (MPa). Apskaičiuojama priklausomai nuo žemiau nurodytų sąlygų:

Jei  $v \leq 1,6 \cdot V_{Rd,c,BS}$ , tuomet:

$$v_{Rd,cs,BS} = v_{Rd,c,BS} + 0,95 \cdot \left( \frac{1}{u_{1,BS} \cdot d} \right) \cdot f_{ywd} \cdot A_{sw} \cdot \sin \alpha; \quad (2.2.1.35)$$

Jei  $1,6 \cdot V_{Rd,c,BS} \leq v \leq 2 \cdot V_{Rd,c,BS}$ , tuomet:

$$v_{Rd,cs,BS} = \frac{1}{0,7} \cdot (v_{Rd,c,BS} + 0,95 \cdot \left( \frac{1}{5 \cdot u_{1,BS} \cdot d} \right) \cdot f_{ywd} \cdot A_{sw} \cdot \sin \alpha); \quad (2.2.1.36)$$

$v$  – veikiančioji praspaudimo galia (MPa), skaičiuojama pagal formulę:

$$v = \frac{V_{Ed} \cdot \beta}{u_{1,BS} \cdot d}; \quad (2.2.1.37)$$

Formulėse 2.2.1.35 ir 2.2.1.36 taikoma  $A_{sw} \cdot \sin \alpha$  reikšmė turi tenkinti sąlygą:

$$A_{sw} \cdot \sin \alpha \geq \frac{0,4 \cdot u_{1,BS} \cdot d}{0,95 \cdot f_{ywd}}. \quad (2.2.1.38)$$

Jei šios sąlygos netenkina, tuomet  $A_{sw} \cdot \sin \alpha$  pakeičiama į  $0,4 \cdot u_{1,BS} \cdot d / 0,95 \cdot f_{ywd}$ .

Didžiausia laikomoji galia praspaudimui pagal BS 8110, ties gniuždomu spyriu:

$$V_{Rd,max,BS} = k_{max,BS} \cdot V_{Rd,c,BS}; \quad (2.2.1.39)$$

čia  $k_{max,BS}$  – koeficientas nusakantis galimą didžiausią jėgos prieaugį naudojant skersinį armavimą, kuris pagal BS 8110 priimamas  $k_{max,BS} = 2$ .

Laikomoji galia parsraudimui pagal BS 8110 išoriniame perimetre:

$$V_{Rd,out,BS} = \frac{v_{Rd,c,BS} \cdot u_{out,BS} \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.40)$$

čia  $u_{out.BS}$  – išorinis tikrinamasis perimetras, pagal BS 8110 projektavimo normas skaičiuojamas  $0,75d$  atstumu nuo paskutinio skersinės armatūros strypo.

Skaičiavimuose taikomas skersinės armatūros stipris ( $f_{ywd}$ ) negali viršyti 460 MPa.

## DIN 1045

Pagal DIN 1045 projektavimo normas, skaičiavimo metodika praspaudimo laikomajai galiai su skersiniu armavimu rasti, yra paremta bendrinėmis Europos projektavimo normomis (*Eurocode 2*), todėl skaičiavimo formulės yra labai panašios. Pagrindinis skirtumas tas, kad šioje skaičiavimų metodikoje didžiausia laikomoji galia apibrėžiama mažesniu  $k_{max}$  koeficientu.

Perdangos plokštės laikomoji galia praspaudimui pagal DIN 1045, ties skersiniu armavimu:

$$V_{Rd,cs,DIN} = \frac{v_{Rd,cs,DIN} \cdot u_{1,DIN} \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.41)$$

$$v_{Rd,cs,DIN} = 0,75 \cdot v_{Rd,c,DIN} + 1,5 \cdot \left(\frac{d}{s_r}\right) \cdot \left(\frac{1}{u_{1,DIN} \cdot d}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,eff} \cdot \sin \alpha. \quad (2.2.1.42)$$

Didžiausia galima laikomoji galia praspaudimui pagal DIN 1045 ties gniuždomu spyriu:

$$V_{Rd,max,DIN} = k_{max,DIN} \cdot V_{Rd,c,DIN}; \quad (2.2.1.43)$$

čia  $k_{max,DIN}$  – koeficientas nusakantis galima didžiausią jėgos prieaugį naudojant skersinį armavimą, kuris pagal DIN 1045 priimamas  $k_{max,DIN} = 1,4$ .

Laikomoji galia praspaudimui pagal DIN 1045 išoriniame perimetre:

$$V_{Rd,out,DIN} = \frac{v_{Rd,c,DIN} \cdot u_{out,DIN} \cdot d}{\beta}; \quad (2.2.1.44)$$

čia  $u_{out,DIN}$  – išorinis tikrinamasis perimetras  $1,5d$  atstumu nuo paskutinio skersinės armatūros strypo (mm).

Kai parinkinėjamas reikalingas skersinės armatūros kiekis pirmuosiuose dviejuose perimetruose aplink koloną, DIN 1045 projektavimo normos numato papildomus koeficientus skersinės armatūros plotams padidinti. Pirmasis ir antrasis skersinės armatūros perimetrai atitinkamai turi būti didinami padauginant juos iš  $k_{sw,1} = 2,5$  ir  $k_{sw,1} = 1,4$  koeficientų.

### 2.2.2. Perdangos su skersine armatūra teorinių praspaudimo laikomųjų galių skaičiavimas

Projektavimo normų praspaudimo laikomosios galios tikslumo analizė su skersiniu armavimu atliekama lyginant eksperimentines realių bandinių laikomasias galias su teorinėmis, paskaičiuotomis pagal skirtingas projektavimo normas. Teorinės laikomosios galios skaičiuojamos neatsižvelgiant į laikomųjų galių mažinimo koeficientus. Sąlygos, priimtose analizuojant praspaudimą be skersinės armatūros (žr. 2.1.2 skyrių), šiuo atveju taip pat taikomos, tačiau atsižvelgiant į skersinio armavimo indelį, numatomos ir papildomos sąlygos. Tyrimo metu nebuvo atsižvelgiama į reikalavimus, keliamus skersinės armatūros strypų išdėliojimui perdangos plokštėje, tačiau kadangi bandiniuose nepasireiškė suirimas tarp skersinės armatūros strypų (žr. 12 pav., e), tai neturėjo reikšmingos įtakos analizuojamai informacijai. Atliekant skaičiavimus pagal Jungtinių Amerikos Valstijų normas (ACI 318-08), į numatomus minimalius reikalavimus skersinės armatūros aukščiui nebuvo atsižvelgiama. Taip pat, skaičiuojant efektyvųjų skersinės armatūros stiprį tempiant pagal

*Eurocode 2*, STR 2.05.05:2005 ir DIN-1045 projektavimo normas, dalinis armatūros patikimumo koeficientas yra integruotas į formulę, todėl 2.2.1.4 formulė yra keičiama į žemiau nurodytą:

$$f_{yw,eff} = 1,15 \cdot (250 - 0,25 \cdot d) \leq f_{ywk}. \quad (2.2.2.1)$$

Teorinių laikomųjų galių skaičiavimo pavyzdžiai pagal kiekvieną nagrinėjamą projektavimo normą pateikiami 6 Priede (skaičiavimai atliekami PL9 bandiniui iš 7 lentelės).

### 2.2.3. Perdangos plokščių su skersine armatūra eksperimentiniai duomenys

Teorinėms skaičiavimų metodikoms analizuoti, iš skirtingų mokslinių šaltinių buvo surinkta informacija apie 36 eksperimentinius bandinius su skersiniu armavimu. Tarp šių bandinių, 19 buvo su skersiniais armatūros strypais ir 17 su armatūros strypais su galvutėmis abėjuose galuose. Visuose nagrinėjamuose baniniuose skersinės armatūros strypai buvo išdėlioti statmenai perdangos plokštei ( $\alpha = 90^\circ$ ). Analizei buvo pasitelkiama šių autorių atliktų bandymų duomenys: Lips [32], Einpaul [40],[34], Ferreira [21], Beutel [35], Regan [41], Birkle [1], Jang [42] ir Schmidt [33]. Visų bandinių charakteristikos, reikalingos teorinėms praspaudimo laikomosioms galioms paskaičiuoti, pateiktos 7 lentelėje. Lips [32] tyrime buvo nagrinėjami bandiniai, kuriuose skersinė armatūra išdėliota iki bandinio kraštinių atramų, siekiant užtikrinti, kad suirimas įvyktų tik ties gniuždomu spyriu arba ties skersine armatūra. Atliekant teorinių skaičiavimų analizę 1–9 bandiniams, pateiktiems 7 lentelėje, suirimas už skersinės armatūros ribų nebuvo vertinamas. Toje pačioje lentelėje taip pat nurodomos jėgos, kurias pasiekus bandiniuose įvyko praspaudimas ( $V_{Rd,Exp}$ ), o šalia jų esančios raidės indikuoja suirimo pobūdį (B – suirimas įvyko ties betonu; A – suirimas įvyko ties skersinės armatūros strypais; I – suirimas įvyko zonoje kur skersinis armavimas buvo nebenaudojamas). Ne visuose literatūros šaltiniuose buvo nurodomas skersinės armatūros skerspjūvio dydis arba strypų kiekis viename perimetre (parametrai reikalingi apskaičiuoti skersinės armatūros kiekį viename perimetre). Esant tokiam atvejui, skersinės armatūros plotas buvo išskaičiuojamas iš skersinio armavimo intensyvumo ( $\rho_{sw}$ ), numatyto  $0,5d$  atstumu nuo kolonos krašto pagal 2.2.3.1 formulę:

$$A_{sw} = \rho_{sw} \cdot \max\left(s_0 + \frac{s_1}{2}; s_1\right) \cdot (4c + \pi d); \quad (2.2.3.1)$$

čia  $c$  – kolonos kraštinės ilgis (mm);

$$s_1 = s_r - \text{žingsnis tarp skersinės armatūros strypų (mm)}.$$

Žemiau pateikiamos analizuojamų bandinių (žr. 7 lentelę) pagrindinių charakteristikų minimalios ir maksimalios vertės:

- Betono stipris gniuždant ( $f_{ck}$ ): 23,2–49,4 MPa;
- Armavimo intensyvumas ( $\rho_1$ ): 0,7–2,01 %;
- Kolonų matmenys ( $c$ ): 130–520 mm (visų bandinių kolonos kvadratinės);
- Perdangos plokštės storis ( $h$ ): 160–400 mm;
- Skersinės armatūros stipris tempiant pagal takumo ribą ( $f_{ywk}$ ): 422–597 MPa;
- Skersinės armatūros armavimo intensyvumas ( $\rho_{sw}$ ): 0,23–1,15 %.

7 lentelė. Eksperimentinių bandinių su skersiniu armavimu parametrai reikalingi teorinėms praspaudimo laikomosioms galioms apskaičiuoti

| Poz. | Autorius          | Šaltinis     | Bandinys | c,<br>(mm) | h,<br>(mm) | d,<br>(mm) | $\rho_l$ ,<br>(%) | $f_{ck}$ ,<br>(MPa) | SAT | $f_{yk}$ ,<br>(MPa) | $\phi_{sw}$ ,<br>(mm) | $s_0$ ,<br>(mm) | $s_1$ ,<br>(mm) | m  | n | $\rho_{sw}$ ,<br>(%) | $V_{Rd,Exp}$ ,<br>(MN) |   |
|------|-------------------|--------------|----------|------------|------------|------------|-------------------|---------------------|-----|---------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|----|---|----------------------|------------------------|---|
| 1    | Lips              | [32]         | PL7      | 260        | 250        | 197        | 1.59              | 35.9                | HD  | 519                 | 14                    | 80              | 160             | 16 | 7 | 0.93                 | 1.77                   | B |
| 2    |                   |              | PL9      | 340        | 320        | 266        | 1.59              | 32.1                | HD  | 516                 | 18                    | 100             | 200             | 16 | 6 | 0.93                 | 3.13                   | B |
| 3    |                   |              | PL10     | 440        | 400        | 343        | 1.55              | 33.0                | HD  | 563                 | 22                    | 130             | 260             | 16 | 5 | 0.82                 | 5.19                   | B |
| 4    |                   |              | PL12     | 260        | 250        | 201        | 1.56              | 34.6                | HD  | 592                 | 10                    | 80              | 160             | 16 | 7 | 0.47                 | 1.63                   | A |
| 5    |                   |              | PF1      | 130        | 250        | 209        | 1.50              | 31.1                | ST  | 536                 | 10                    | 50              | 100             | 13 | - | 0.79                 | 1.04                   | A |
| 6    |                   |              | PF2      | 260        | 250        | 208        | 1.51              | 30.4                | ST  | 536                 | 10                    | 50              | 100             | 18 | - | 0.79                 | 1.57                   | A |
| 7    |                   |              | PF3      | 520        | 250        | 209        | 1.50              | 37.1                | ST  | 536                 | 10                    | 50              | 100             | 29 | - | 0.79                 | 2.24                   | A |
| 8    |                   |              | PF4      | 340        | 320        | 274        | 1.54              | 32.5                | ST  | 550                 | 10                    | 50              | 100             | 24 | - | 0.79                 | 2.67                   | A |
| 9    |                   |              | PF5      | 440        | 400        | 354        | 1.50              | 33.4                | ST  | 550                 | 10                    | 50              | 100             | 31 | - | 0.79                 | 4.72                   | A |
| 10   | Einpaul           | [40]<br>[34] | PR1      | 260        | 250        | 210        | 1.50              | 31.0                | HD  | 580                 | 14                    | 120             | 105             | 12 | 5 | 0.63                 | 1.65                   | B |
| 11   |                   |              | PL7      | 260        | 250        | 197        | 1.59              | 35.9                | HD  | 550                 | 14                    | 80              | 160             | 16 | 7 | 0.93                 | 1.77                   | B |
| 12   |                   |              | PE1      | 260        | 250        | 200        | 1.57              | 36.0                | HD  | 500                 | 16                    | 80              | 105             | 8  | 9 | 0.73                 | 1.86                   | B |
| 13   |                   |              | PB2      | 260        | 250        | 197        | 1.53              | 34.9                | ST  | 533                 | 10                    | 50              | 100             | -  | - | 0.79                 | 1.80                   | B |
| 14   |                   |              | PF2      | 260        | 250        | 208        | 1.50              | 30.4                | ST  | 536                 | 10                    | 50              | 100             | -  | - | 0.79                 | 1.57                   | B |
| 15   | Ferreira          | [21]         | SR1      | 400        | 210        | 157        | 2.01              | 29.8                | HD  | 509                 | 16                    | 80              | 100             | 12 | 8 | 1.15                 | 1.58                   | A |
| 16   |                   |              | S2       | 300        | 180        | 143        | 1.48              | 49.4                | HD  | 535                 | 10                    | 70              | 100             | 12 | 4 | 0.65                 | 1.13                   | B |
| 17   |                   |              | S7       | 300        | 180        | 143        | 1.48              | 48.9                | HD  | 518                 | 12.5                  | 70              | 100             | 12 | 4 | 1.02                 | 1.20                   | I |
| 18   | Beutel            | [35]         | P3-I     | 320        | 270        | 220        | 1.15              | 23.2                | ST  | 597                 | -                     | 85              | 189             | -  | 5 | 0.33                 | 1.62                   | A |
| 19   |                   |              | P5-I     | 320        | 270        | 220        | 1.35              | 45.3                | ST  | 596                 | -                     | 115             | 255             | -  | 5 | 0.55                 | 1.94                   | A |
| 20   |                   |              | P6-I     | 320        | 273        | 223        | 1.75              | 46.3                | ST  | 563                 | -                     | 100             | 268             | -  | 5 | 0.93                 | 2.35                   | A |
| 21   |                   |              | P7-I     | 320        | 275        | 229        | 1.30              | 40.0                | ST  | 596                 | -                     | 145             | 285             | -  | 5 | 0.79                 | 2.12                   | A |
| 22   | Regan ir Samadian | [41]         | R3       | 200        | 200        | 164        | 1.26              | 33.0                | HD  | 422                 | 12                    | 80              | 120             | 8  | 4 | 0.49                 | 0.85                   | B |
| 23   |                   |              | R4       | 200        | 200        | 164        | 1.26              | 39.0                | HD  | 422                 | 12                    | 80              | 80              | 8  | 6 | 0.57                 | 0.95                   | B |
| 24   | Birkle            | [1]          | S2       | 250        | 160        | 124        | 1.51              | 29.0                | HD  | 393                 | 9.5                   | 45              | 90              | 8  | 6 | 0.63                 | 0.57                   | B |
| 25   |                   |              | S3       | 250        | 160        | 124        | 1.51              | 31.6                | HD  | 393                 | 9.5                   | 45              | 90              | 8  | 6 | 0.63                 | 0.57                   | B |
| 26   |                   |              | S4       | 250        | 160        | 124        | 1.51              | 38.0                | HD  | 465                 | 9.5                   | 30              | 60              | 8  | 5 | 0.95                 | 0.63                   | I |

| Poz. | Autorius | Šaltinis | Bandinys | c,<br>(mm) | h,<br>(mm) | d,<br>(mm) | $\rho_l$ ,<br>(%) | $f_{ck}$ ,<br>(MPa) | SAT | $f_{yw}$ ,<br>(MPa) | $\varnothing_{sw}$ ,<br>(mm) | $s_0$ ,<br>(mm) | $s_1$ ,<br>(mm) | m  | n | $\rho_{sw}$ ,<br>(%) | $V_{Rd,Exp}$ ,<br>(MN) |   |
|------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|-------------------|---------------------|-----|---------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|----|---|----------------------|------------------------|---|
| 27   | Birkle   | [1]      | S5       | 250        | 160        | 124        | 1.51              | 36.3                | HD  | 465                 | 9.5                          | 30              | 60              | 8  | 7 | 0.95                 | 0.62                   | A |
| 28   |          |          | S6       | 250        | 160        | 124        | 1.51              | 33.4                | HD  | 465                 | 9.5                          | 30              | 60              | 8  | 7 | 0.95                 | 0.62                   | A |
| 29   | Jang     | [42]     | SP-2     | 450        | 210        | 174        | 0.70              | 29.5                | ST  | 538                 | 10                           | 85              | 85              | 8  | 8 | 0.21                 | 1.03                   | A |
| 30   |          |          | SP-5     | 450        | 210        | 174        | 1.40              | 43.6                | ST  | 427                 | 10                           | 85              | 85              | 8  | 8 | 0.21                 | 1.43                   | A |
| 31   |          |          | SP-6     | 450        | 210        | 174        | 1.40              | 44.4                | ST  | 468                 | 10                           | 85              | 85              | 16 | 8 | 0.42                 | 1.71                   | B |
| 32   | Schmidt  | [33]     | A1-8     | 280        | 280        | 225        | 1.40              | 32.5                | ST  | 520                 | 8                            | 110             | 170             | 16 | 6 | 0.26                 | 1.60                   | A |
| 33   |          |          | A2-8     | 280        | 280        | 225        | 1.40              | 32.4                | ST  | 523                 | 8                            | 110             | 170             | 16 | 6 | 0.26                 | 1.50                   | A |
| 34   |          |          | A2-10    | 280        | 280        | 224        | 1.40              | 32.9                | ST  | 505                 | 10                           | 110             | 170             | 16 | 6 | 0.41                 | 1.64                   | A |
| 35   |          |          | A3-12    | 400        | 380        | 321        | 1.39              | 32.9                | ST  | 538                 | 12                           | 160             | 240             | 16 | 6 | 0.29                 | 2.78                   | A |
| 36   |          |          | A3-14    | 400        | 380        | 320        | 1.39              | 34.8                | ST  | 523                 | 14                           | 160             | 240             | 16 | 6 | 0.39                 | 3.01                   | B |

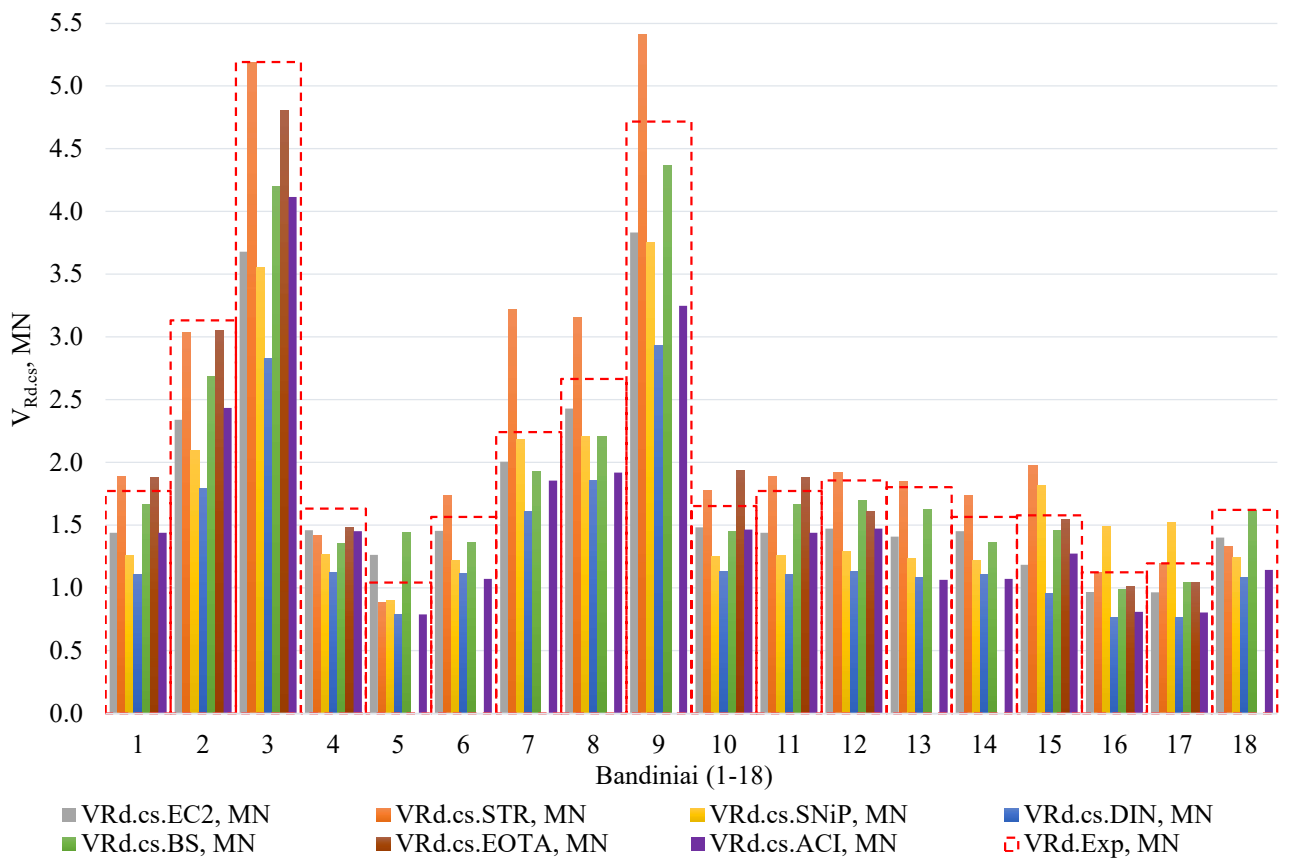
Lentelėje taikomų parametru paaiškinimai: **c** – kolonos karštinės ilgis; **h** – perdangos plokštės aukštis; **d** – perdangos plokštės efektyvusis aukštis;  **$\rho_l$**  – armavimo intensyvumas; **SAT** – Skersinės armatūros tipas (**HD** – armatūros strypai su galvutėmis abėjuose galuose, **ST** – armatūros strypai);  **$\varnothing_{sw}$**  – skersinės armatūros skersmuo;  **$s_0$**  – atstumas nuo kolonos krašto iki pirmo skersinės armatūros strypo;  **$s_1$**  – atstumas tarp skersinės armatūros strypų; **m** – skersines armatūros strypų skaičius viename perimetre; **n** – skersinės armatūros perimetrų skaičius;  **$\rho_{sw}$**  – skersinio armavimo intensyvumas  $0,5d$  atstumu nuo kolonos krašto.

## 2.2.4. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas, kai perdangos plokštė su skersiniu armavimu

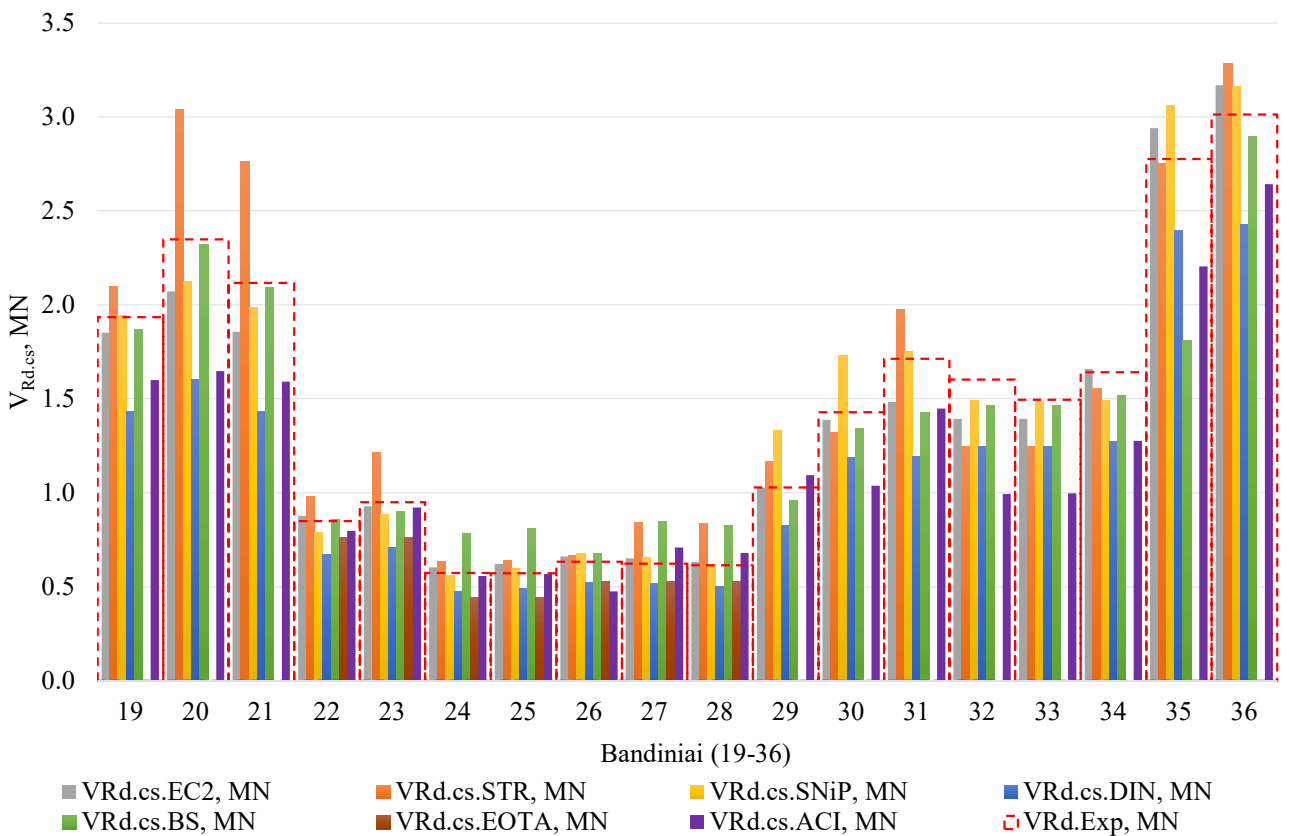
Eksperimentinės laikomosios galios buvo lyginamos su teorinėmis, apskaičiuotomis pagal skirtingas projektavimo normas: 8 lentelėje, šalia laikomųjų galių palyginimo, pateikiamas numatomas suirimo pobūdis pagal kiekvieną skaičiavimo metodiką. Kiekvieno bandinio eksperimentinės ir teorinės praspaudimo laikomosios galios paskaičiuotos pagal skirtingas projektavimo normas, kai perdangos plokštėje naudojamas skersinis armavimas, pateikiamos 30 ir 31 paveikslėliuose.

**8 lentelė.** Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas atsižvelgiant į suirimo pobūdį

| Poz.                               | Bandinys | V <sub>Rd.Exp</sub> ,<br>(MN) |   | V <sub>Rd.Exp</sub> /<br>V <sub>Rd.EC2</sub> |   | V <sub>Rd.Exp</sub> /<br>V <sub>Rd.STR</sub> |   | V <sub>Rd.Exp</sub> /<br>V <sub>Rd.SNiP</sub> |   | V <sub>Rd.Exp</sub> /<br>V <sub>Rd.DIN</sub> |   | V <sub>Rd.Exp</sub> /<br>V <sub>Rd.BS</sub> |   | V <sub>Rd.Exp</sub> /<br>V <sub>Rd.EOTA</sub> |   | V <sub>Rd.Exp</sub> /<br>V <sub>Rd.ACI</sub> |   |
|------------------------------------|----------|-------------------------------|---|--|---|--|---|---|---|--|---|---|---|---|---|--|---|
|                                    |          |                               |   |  |   |  |   |   |   |  |   |   |   |   |   |  |   |
| 1                                  | PL7      | 1.77                          | B | 1.23   | B | 0.94   | B | 1.41  | A | 1.60   | B | 1.07  | B | 0.94  | B | 1.23   | B |
| 2                                  | PL9      | 3.13                          | B | 1.34   | B | 1.03   | B | 1.49  | A | 1.74   | B | 1.17  | B | 1.02  | B | 1.29   | B |
| 3                                  | PL10     | 5.19                          | B | 1.41   | B | 1.00   | B | 1.46  | A | 1.84   | B | 1.24  | B | 1.08  | B | 1.26   | B |
| 4                                  | PL12     | 1.63                          | A | 1.12   | B | 1.15   | A | 1.29  | A | 1.46   | B | 1.20  | A | 1.10  | A | 1.12   | B |
| 5                                  | PF1      | 1.04                          | A | 0.82   | B | 1.17   | B | 1.16  | A | 1.32   | B | 0.72  | B | -   | - | 1.32   | B |
| 6                                  | PF2      | 1.57                          | A | 1.08   | B | 0.90   | B | 1.28  | A | 1.41   | B | 1.15  | A | -   | - | 1.46   | B |
| 7                                  | PF3      | 2.24                          | A | 1.12   | B | 0.70   | A | 1.03  | A | 1.39   | B | 1.16  | A | -   | - | 1.21   | B |
| 8                                  | PF4      | 2.67                          | A | 1.10   | B | 0.84   | B | 1.21  | A | 1.43   | B | 1.21  | A | -   | - | 1.39   | B |
| 9                                  | PF5      | 4.72                          | A | 1.23   | B | 0.87   | B | 1.26  | A | 1.61   | B | 1.08  | B | -   | - | 1.45   | B |
| 10                                 | PR1      | 1.65                          | B | 1.12   | B | 0.93   | B | 1.32  | A | 1.46   | B | 1.14  | A | 0.96  | B | 1.34   | B |
| 11                                 | PL7      | 1.77                          | B | 1.23   | B | 0.94   | B | 1.41  | A | 1.60   | B | 1.07  | B | 0.94  | B | 1.23   | B |
| 12                                 | PE1      | 1.86                          | B | 1.26   | B | 0.97   | B | 1.44  | A | 1.64   | B | 1.10  | B | 1.15  | A | 1.26   | B |
| 13                                 | PB2      | 1.80                          | B | 1.28   | B | 0.98   | B | 1.46  | A | 1.66   | B | 1.11  | B | -   | - | 1.70   | B |
| 14                                 | PF2      | 1.57                          | B | 1.08   | B | 0.90   | B | 1.28  | A | 1.41   | B | 1.15  | A | -   | - | 1.46   | B |
| 15                                 | SR1      | 1.58                          | A | 1.33   | B | 0.80   | B | 0.87  | A | 1.66   | B | 1.08  | B | 1.02  | B | 1.24   | B |
| 16                                 | S2       | 1.13                          | B | 1.16   | B | 1.00   | A | 0.76  | A | 1.47   | B | 1.14  | A | 1.12  | A | 1.39   | I |
| 17                                 | S7       | 1.20                          | I | 1.24   | B | 1.00   | I | 0.78  | A | 1.56   | B | 1.15  | I | 1.15  | I | 1.49   | I |
| 18                                 | P3-I     | 1.62                          | A | 1.16   | B | 1.22   | A | 1.30  | A | 1.50   | B | 1.01  | B | -   | - | 1.42   | B |
| 19                                 | P5-I     | 1.94                          | A | 1.05   | B | 0.92   | A | 1.00  | A | 1.35   | B | 1.04  | A | -   | - | 1.21   | B |
| 20                                 | P6-I     | 2.35                          | A | 1.13   | B | 0.77   | A | 1.10  | A | 1.47   | B | 1.01  | A | -   | - | 1.43   | B |
| 21                                 | P7-I     | 2.12                          | A | 1.14   | B | 0.77   | A | 1.06  | A | 1.48   | B | 1.01  | A | -   | - | 1.33   | B |
| 22                                 | R3       | 0.85                          | B | 0.97   | B | 0.87   | A | 1.07  | A | 1.27   | B | 0.99  | A | 1.11  | A | 1.07   | I |
| 23                                 | R4       | 0.95                          | B | 1.02   | B | 0.78   | I | 1.07  | A | 1.34   | B | 1.05  | A | 1.24  | A | 1.03   | I |
| 24                                 | S2       | 0.57                          | B | 0.95   | B | 0.90   | A | 1.02  | A | 1.20   | B | 0.73  | B | 1.29  | A | 1.03   | A |
| 25                                 | S3       | 0.57                          | B | 0.92   | B | 0.89   | A | 0.96  | A | 1.16   | B | 0.71  | B | 1.28  | A | 1.01   | A |
| 26                                 | S4       | 0.63                          | I | 0.96   | B | 0.95   | I | 0.94  | A | 1.21   | B | 0.94  | I | 1.20  | A | 1.33   | I |
| 27                                 | S5       | 0.62                          | A | 0.96   | B | 0.74   | A | 0.95  | A | 1.21   | B | 0.74  | B | 1.18  | A | 0.88   | I |
| 28                                 | S6       | 0.62                          | A | 0.97   | B | 0.74   | A | 0.99  | A | 1.23   | B | 0.75  | B | 1.17  | A | 0.91   | I |
| 29                                 | SP-2     | 1.03                          | A | 1.00   | B | 0.88   | A | 0.77  | A | 1.24   | B | 1.07  | A | -   | - | 0.94   | A |
| 30                                 | SP-5     | 1.43                          | A | 1.03   | A | 1.08   | A | 0.82  | A | 1.20   | B | 1.06  | A | -   | - | 1.38   | A |
| 31                                 | SP-6     | 1.71                          | B | 1.15   | B | 0.87   | A | 0.98  | A | 1.43   | B | 1.20  | A | -   | - | 1.18   | B |
| 32                                 | A1-8     | 1.60                          | A | 1.15   | A | 1.29   | A | 1.08  | A | 1.29   | A | 1.09  | A | -   | - | 1.61   | A |
| 33                                 | A2-8     | 1.50                          | A | 1.07   | A | 1.20   | A | 1.01  | A | 1.20   | A | 1.02  | A | -   | - | 1.50   | A |
| 34                                 | A2-10    | 1.64                          | A | 0.99   | B | 1.06   | A | 1.10  | A | 1.29   | B | 1.08  | A | -   | - | 1.29   | A |
| 35                                 | A3-12    | 2.78                          | A | 0.94   | A | 1.01   | A | 0.91  | A | 1.16   | B | 1.53  | A | -   | - | 1.26   | A |
| 36                                 | A3-14    | 3.01                          | B | 0.95   | B | 0.92   | A | 0.95  | A | 1.24   | B | 1.04  | A | -   | - | 1.14   | A |
| <b>Surimo pobūdžio sutaptis %:</b> |          |                               |   | 53%  |   | 67%  |   | 53%   |   | 47%  |   | 64%   |   | 53%   |   | 47%  |   |



**30 pav.** Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai naudojamas skersinis armavimas (1-18 bandiniai)



**31 pav.** Kiekvieno bandinio eksperimentinių laikomųjų galių palyginimas su teorinėmis, gautomis pagal skirtingas projektavimo normas, kai naudojamas skersinis armavimas (19-36 bandiniai)



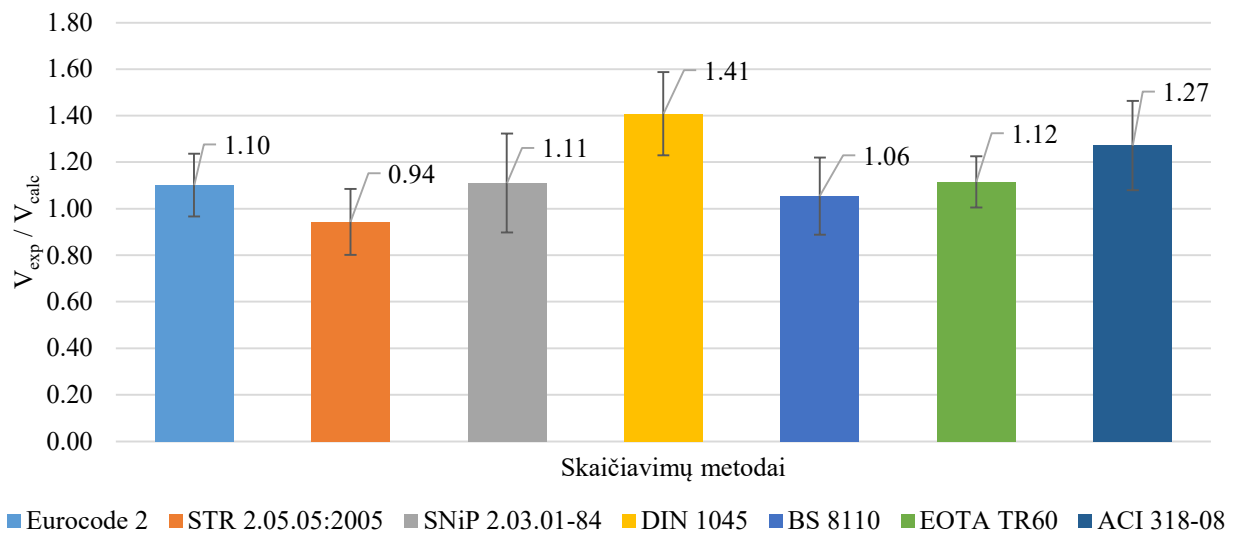
Atsižvelgiant į numatomus suirimo pobūdžius, realią situaciją geriausiai atspindėjo STR 2.05.05:2005 skaičiavimo metodika, pagal kurią 67 % teorinių duomenų atitiko eksperimentinius. Kai normose vertinami abu armatūros tipai, prasčiausiais rezultatai pasižymėjo DIN-1045 ir ACI 318-08 projektavimo normos, kurių suirimo pobūdžio sutaptis buvo 47 %. Iš suirimo pobūdžio palyginimo taip pat galima matyti, kad pagal SNIIP 2.03.01-84 ir DIN-1045 atiliktus skaičiavimus dominuoja vienas suirimo pobūdis. Rusijos projektavimo normose buvo numatomas suirimas ties skersine armatūra, tai nulėmė skersinės armatūros maksimalaus stiprio ribojimas, kuris yra 175 MPa. Vokietijos projektavimo normose buvo numatomas suirimas ties betono gniuždomu spyriu, o tai nulėmė maksimalią laikomąją galią ribojantis  $k_{max}$  koeficientas, kuris yra 1,4.

Kaip ir praspaudime be skersinio armavimo, skaičiavimų metodikų patikimumas nustatomas pagal du pagrindinius kriterijus: reikšmių vidurkį ir variacijos koeficientą išreikštą procentais. Šie parametrai pateikiami 9 lentelėje kiekvienai projektavimo normai atskirai, kai vertinami visi armatūros tipai kartu ir atskirai. Grafinė lentelės informacija pateikiama kiekvienai projektavimo normai 32–34 paveikslėliuose, kuriuose atspindimi reikšmių vidurkiai ir variacijos koeficientai, išskiriant skirtingus skersinės armatūros tipus.

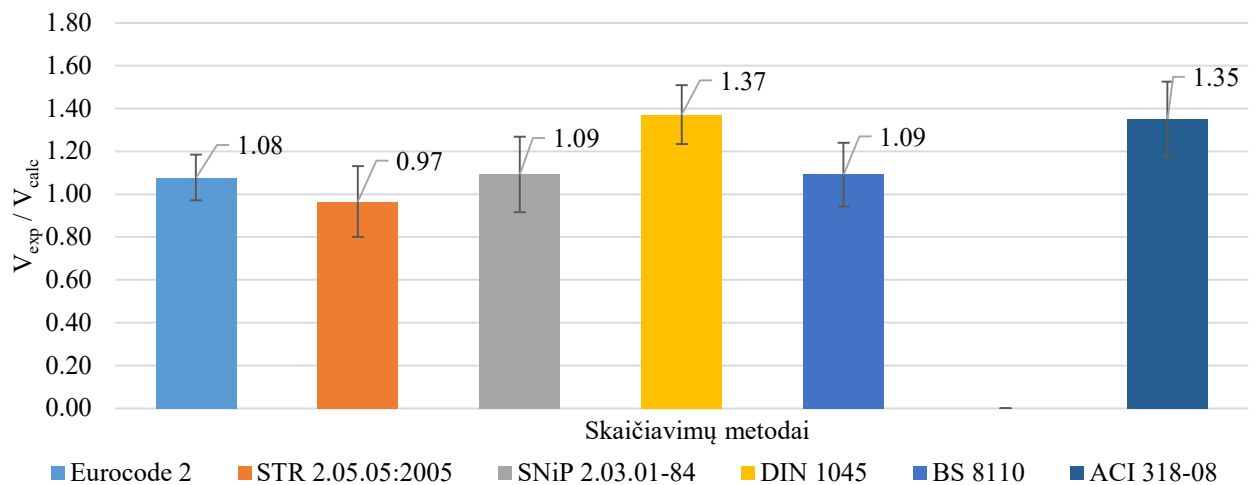
**9 lentelė.** Projektavimo normų tikslumo analizė, skaičiuojant praspaudimą su skersiniu armavimu

| Parametrai pagal<br>( $V_{exp}/V_{calc}$ )  | Eurocode 2 | STR<br>2.05.05:2005 | SNIIP<br>2.03.01-84 | DIN<br>1045 | BS<br>8110 | EOTA<br>TR60 | ACI<br>318-08 |
|---|------------|---------------------|---------------------|-------------|------------|--------------|---------------|
| <b>Kai vertinami visi skersinės armatūros tipai kartu (36 bandiniai)</b>                          |            |                     |                     |             |            |              |               |
| Reikšmių vidurkis   | 1.10       | 0.94                | 1.11                | 1.41        | 1.06       | 1.12         | 1.27          |
| Standartinis nuokrypis  | 0.14       | 0.14                | 0.21                | 0.18        | 0.17       | 0.11         | 0.19          |
| Variacijos koeficientas   | 12.3%      | 15.0%               | 19.1%               | 12.7%       | 15.7%      | 9.9%         | 15.0%         |
| <b>Kai vertinami tik skersinės armatūros strypai (19 bandinių)</b>                                |            |                     |                     |             |            |              |               |
| Reikšmių vidurkis   | 1.08       | 0.97                | 1.09                | 1.37        | 1.09       | -            | 1.35          |
| Standartinis nuokrypis  | 0.11       | 0.17                | 0.18                | 0.14        | 0.15       | -            | 0.17          |
| Variacijos koeficientas   | 9.9%       | 17.1%               | 16.1%               | 10.0%       | 13.7%      | -            | 12.9%         |
| <b>Kai vertinami tik skersinės armatūros strypai su galvutėmis abejuose galuose (17 bandinių)</b> |            |                     |                     |             |            |              |               |
| Reikšmių vidurkis   | 1.13       | 0.92                | 1.13                | 1.45        | 1.01       | 1.12         | 1.18          |
| Standartinis nuokrypis  | 0.16       | 0.11                | 0.25                | 0.21        | 0.18       | 0.11         | 0.17          |
| Variacijos koeficientas   | 14.2%      | 12.0%               | 22.2%               | 14.7%       | 17.6%      | 9.9%         | 14.6%         |

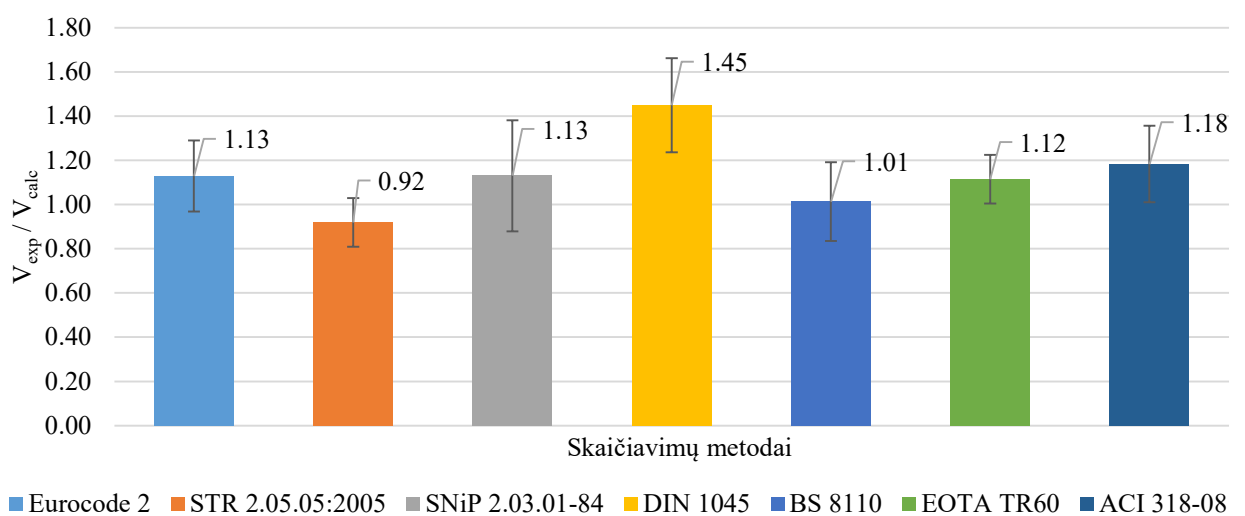
Atsižvelgiant į reikšmių vidurkius, geriausiais rezultatais pasižymėjo BS 8110 projektavimo normos, kurių vidurkis buvo 1,06, tačiau rezultatų sklaida buvo labai didelė ir variacijos koeficientas siekė 15,7 %. Kai gaunamų rezultatų sklaida didelė ir vidurkio vertė yra artima vienetui, paskaičiuotos teorinės laikomosios galios laikomos nepatikimomis. Pagal Lietuvos (STR 2.05.05:2005) skaičiavimo metodiką, laikomųjų galių vertės taip pat buvo artimos teorinėms (reikšmių vidurkis – 0,94), tačiau kadangi vidurkis yra žemesnis nei vienetą, tai reiškia, kad teorinės laikomųjų galių vertės yra aukštesnės už eksperimentines. Tiksliausios ir patikimiausios projektavimo normos, neatsižvelgiant į skersinės armatūros tipą, buvo *Eurocode 2* (šiuo atveju, EOTA TR60 normos nevertinamos, kadangi jos skirtos tik vienam armatūros tipui), pagal kurias reikšmių vidurkis buvo 1,10, o variacijos koeficientas – 12,3 %. Teorinės praspaudimo laikomosios galios buvo toliausiai nuo eksperimentinių pagal Vokietijos projektavimo normas (DIN 1045), pagal kurias reikšmių vidurkis siekė 1,41. Tačiau atsižvelgiant į rezultatų sklaidą, blogiausiais rezultatai pasižymėjo Rusijos projektavimo normos (SNIIP 2.03.01-84), pagal kurias variacijos koeficientas siekė 19,1 %.



**32 pav.** Projektavimo normų reikšmių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai, kai vertinami visi skersinės armatūros tipai kartu



**33 pav.** Projektavimo normų reikšmių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai, kai vertinami tik skersinės armatūros strypai



**34 pav.** Projektavimo normų reikšmių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai, kai vertinami tik skersinės armatūros strypai su galvutėmis abejuose galuose

Išskiriant skersinės armatūros tipus į armatūros strypus ir strypus su galvutėmis abejuose galuose, galima pastebėti, kad pagal daugelį projektavimo normų variacijos koeficientai yra mažesni tada, kai taikomas skersinis armavimas su skersinės armatūros strypais. Tiksliausias projektavimo normos naudojant skersinės armatūros strypus buvo *Eurocode 2*, pagal kurias reikšmių vidurkis buvo 1,08, o variacijos koeficientas siekė 9,9 %. Kai buvo vertinamas skersinis armavimas iš armatūros strypų su galvutėmis abejuose galuose, geriausiai rezultatais pasižymėjo EOTA TR60 siūloma skaičiavimo metodika, pagal kurią reikšmių vidurkis buvo 1,12, o rezultatų sklaida tik 9,9 %.

## 2.2.5. Skersinės armatūros intensyvumo įtaka projektavimo normų tikslumui

Skersinio armavimo indelis į praspaudimo laikomąją galią gali būti vertinamas atsižvelgiant į skersinio armavimo intensyvumo rodiklį. Kiekvieno bandinio skersinio armavimo kiekis  $0,5d$  atstumu nuo kolonos ( $\rho_{sw}$ ) pateikiamas 7 lentelėje. Kiekvieno bandinio eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė nuo skersinio armavimo intensyvumo pagal skirtingas projektavimo normas pateikiama 4 priede.

**10 lentelė.** Projektavimo normų tikslumas, esant skirtingam skersinio armavimo intensyvumui

| Parametrai pagal ( $V_{exp}/V_{calc}$ ) | Ribojimai                | Bandinių sk.                 | EC 2  | STR   | SNiP  | DIN   | BS    | EOTA | ACI   |
|---|--------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Reikšmių vidurkis                       | $\rho_{sw} < 0,75 \%$    | Viso 18<br>ST – 10<br>HD – 8 | 1.06  | 1.00  | 1.05  | 1.33  | 1.07  | 1.16 | 1.23  |
| Standartinis nuokrypis                  |                          |                              | 0.10  | 0.14  | 0.19  | 0.14  | 0.18  | 0.11 | 0.19  |
| Variacijos koeficientas                 |                          |                              | 9.2%  | 14.2% | 18.1% | 10.3% | 16.5% | 9.6% | 15.0% |
| Reikšmių vidurkis                       | $\rho_{sw} \geq 0,75 \%$ | Viso 18<br>ST – 9<br>HD – 9  | 1.15  | 0.89  | 1.17  | 1.49  | 1.04  | 1.08 | 1.31  |
| Standartinis nuokrypis                  |                          |                              | 0.15  | 0.13  | 0.22  | 0.18  | 0.16  | 0.10 | 0.19  |
| Variacijos koeficientas                 |                          |                              | 13.5% | 14.0% | 18.7% | 12.3% | 15.3% | 9.4% | 14.8% |

Tyrimo metu skersinio armavimo intensyvumas buvo nagrinėjamas dvejose ribose, kai jis yra iki 0,75 % ir kai jis yra didesnis (žr. 10 lentelę). Bandinių skaičius abiem atvejais buvo pasiskirstęs tolygiai, po 18 bandinių. Atsižvelgiant į variacijos koeficientą, galima matyti, kad pagal STR 2.05.05:2005, SNiP 2.03.01-84, BS 8110, EOTA TR60 ir ACI 318-08, gautos vertės ženkliai nesiskyrė. Tačiau pagal *Eurocode 2* ir DIN-1045 projektavimo normas, rezultatų sklaida sumažėjo atitinkamai po 4,3 % ir 2 %. Įvedus ribojimus skersinės armatūros intensyvumui, ryškiausias skirtumas pastebimas reikšmių vidurkiuose. Galima matyti, kad pagal *Eurocode 2*, STR 2.05.05:2005, SNiP 2.03.01-84 ir ACI 318-08 projektavimo normas, teorinės vertės tapo artimesnės eksperimentinėms esant sąlygai  $\rho_{sw} < 0,75 \%$ . Tuo tarpu, EOTA TR60 skaičiavimo metodika buvo tikslesnė, kai skersinio armavimo intensyvumas buvo didesnis nei 0,75 %. Nagrinėjamų bandinių skaičius nebuvo didelis, todėl norint įvesti ribojimus skersinio armavimo intensyvumui, reikėtų atlikti analizę su didesne bandinių imtimi. Tačiau šio tyrimo metu gauti rezultatai parodė, kad tai gali būti tikslinga kryptis skaičiavimo metodikų patikimumui gerinti.

## 2.2.6. Praspaudimo laikomųjų galių prieaugis naudojant skersinį armavimą.

Maksimalus praspaudimo laikomosios galios prieaugis pagal daugelį projektavimo normų yra ribojamas papildomo koeficiento  $k_{max}$ , kuris yra dauginamas iš praspaudimo laikomosios galios be skersinio armavimo. Nagrinėjamosiose projektavimo normose šio koeficiento dydis yra skirtingas ir svyruoja nuo 1,4 iki 2 (žr. 11 lentelę). Tačiau STR 2.05.05:2005 skaičiavimo metodikoje koeficientas, ribojantis maksimalią laikomąją galią praspaudimui, nenumatomas ir tam taikoma 2.2.1.10 formulė. Apibendrinta informacija apie projektavimo normų maksimalią laikomąją galią pateikiama 11 lentelėje, o detalūs kiekvieno bandinio rodikliai nurodomi 5 priede. Atsižvelgiant į laikomųjų galių prieaugį, lyginant perdangos plokštės praspaudžiamą stiprį su skersiniu armavimu ir be skersinio armavimo, galima matyti, kad gautos vidutinės reikšmės neviršijo koeficientų reikšmių, numatančių maksimalią laikomąją galią. Pagal STR 2.05.05:2005, laikomųjų galių prieaugis buvo gautas didžiausias, naudojant skersinės armatūros strypus jis siekė 1,97, o naudojant armatūros strypus galvutėmis abėjuose galuose – 2,17. Šios vidutinės reikšmės yra didžiausios iš visų palygintų projektavimo normų.

**11 lentelė.** Praspaudimo laikomosios galios prieaugio analizė pagal skirtingas projektavimo normas

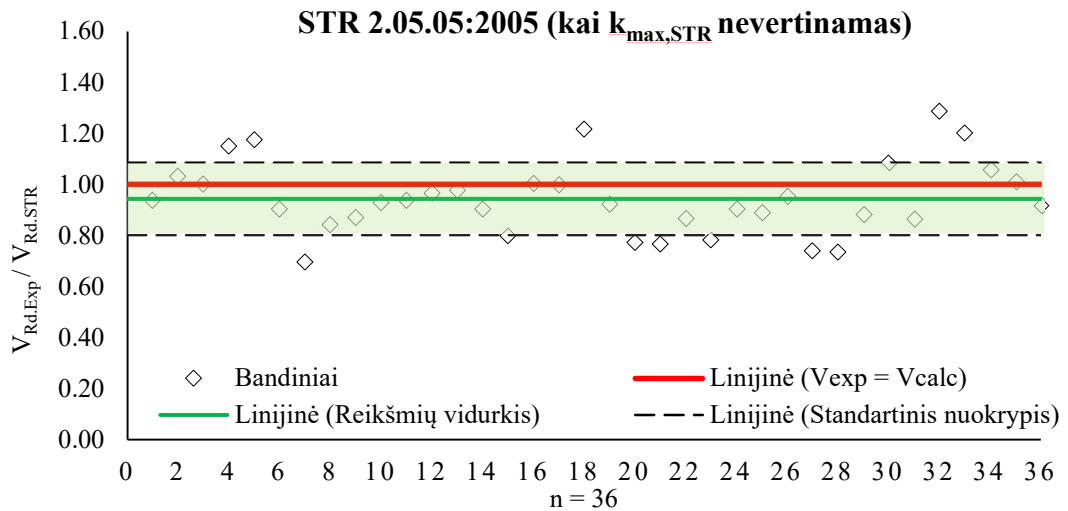
|   | Eurocode 2 | STR<br>2.05.05:2005 | SNiP<br>2.03.01-84 | DIN<br>1045 | BS<br>8110 | EOTA<br>TR60 | ACI<br>318-08 |
|---|------------|---------------------|--------------------|-------------|------------|--------------|---------------|
| <b>Koeficiento reikšmės numatančios maksimalią laikomąją galią praspaudimui</b>   |            |                     |                    |             |            |              |               |
| Armatūros strypai (ST)  | 1,5        | -                   | 2                  | 1,4         | 2          | -            | 1,52          |
| Strypai su galvutėmis abėjuose galuose (HD)   | 1,5        | -                   | 2                  | 1,4         | 2          | 1,96         | 2             |
| <b>Laikomosios galios prieaugis lyginant perdangos plokštę su skersiniu armavimu ir be jo (<math>V_{Rd,cs}/V_{Rd,c}</math>)</b> |            |                     |                    |             |            |              |               |
| Armatūros strypai (ST)  | 1.47       | 1.97                | 1.41               | 1.40        | 1.69       | -            | 1.42          |
| Strypai su galvutėmis abėjuose galuose (HD)   | 1.50       | 2.17                | 1.40               | 1.40        | 1.85       | 1.56         | 1.80          |

Nagrinėjant projektavimo normų tikslumą naudojant skersinį armavimą (žr. 9 lentelę), buvo nustatyta, kad nepriklausomai nuo skersinės armatūros tipo, pagal STR 2.05.05:2005 projektavimo normas paskaičiuotos laikomųjų galių vertės yra aukštesnės už eksperimentines. Siekiant sumažinti teorinę praspaudžiamojo stiprio galią, šiai skaičiavimo metodikai taip pat būtina įvesti koeficientą, kuris apribotų maksimalią praspaudimo laikomąją galią. Atsižvelgiant į nagrinėjamus bandinius, tiksliausi rezultatai gaunami numatant  $k_{max,STR}$  koeficiento reikšmę 1,85.

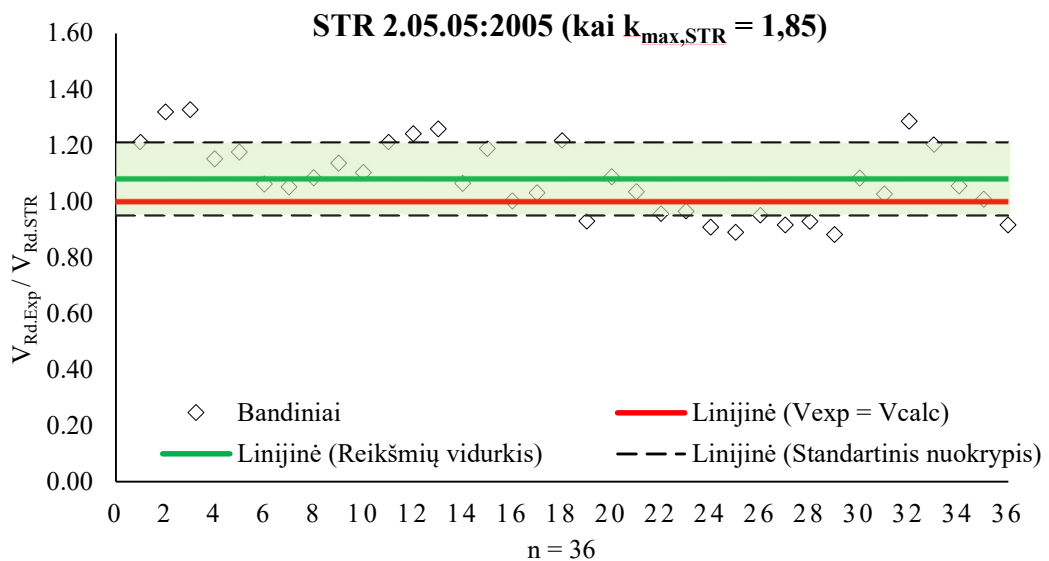
**12 lentelė.**  $k_{max,STR}$  koeficiento įtaka STR 2.05.05:2005 skaičiavimo metodikos tikslumui

| Parametrai pagal<br>( $V_{exp}/V_{calc}$ )  | STR 2.05.05:2005<br>(Kai $k_{max,STR}$ nevertinamas) | STR 2.05.05:2005<br>(Kai $k_{max,STR} = 1,85$ ) |
|---|--|---|
| <b>Kai vertinami visi skersinės armatūros tipai kartu (36 bandiniai)</b>                          |  |   |
| Reikšmių vidurkis   | 0.94   | 1.08  |
| Standartinis nuokrypis  | 0.14   | 0.13  |
| Variacijos koeficientas   | 15.0%  | 12.0%   |
| <b>Kai vertinami tik skersinės armatūros strypai (19 bandinių)</b>                                |  |   |
| Reikšmių vidurkis   | 0.97   | 1.08  |
| Standartinis nuokrypis  | 0.17   | 0.11  |
| Variacijos koeficientas   | 17.1%  | 10.2%   |
| <b>Kai vertinami tik skersinės armatūros strypai su galvutėmis abėjuose galuose (17 bandinių)</b> |  |   |
| Reikšmių vidurkis   | 0.92   | 1.08  |
| Standartinis nuokrypis  | 0.11   | 0.15  |
| Variacijos koeficientas   | 12.0%  | 14.0%   |

Koeficiento įtakos rodikliai skaičiavimų tikslui pateikiami 12 lentelėje bei iliustruojami 35–36 paveikslėliuose. Galima matyti, kad įvedus  $k_{max,STR}$  koeficientą, reikšmių vidurkiai buvo aukštesni už vienetą, kas reiškia, jog teorinės laikomosios galios daugelyje bandinių buvo žemesnės už eksperimentines. Nepriklausomai nuo skersinės armatūros tipo, vidutinės reikšmės buvo vienodos – 1,08. Tuo tarpu, atsižvelgiant į variacijos koeficientą, kai buvo vertinamas praspaudimas su armatūros strypais, rezultatų sklaida sumažėjo iki 10,2 %, tačiau vertinant armatūros strypus su galvutėmis, išaugo iki 14 %.



35 pav. STR 2.05.05:2005 skaičiavimo metodikos tikslumas, kai nevertinamas  $k_{max,STR}$  koeficientas



36 pav. STR 2.05.05:2005 skaičiavimo metodikos tikslumas, kai vertinamas  $k_{max,STR}$  koeficientas

Atitinkamai, STR 2.05.05:2005 taikoma skaičiavimo metodika maksimaliai praspaudimo laikomajai galiai nustatyti pakoreguojama keičiant 2.2.1.10 formulę į 2.2.6.1 formulę:

$$V_{Rd,max,STR} = \min \left\{ \frac{k_{max,STR} \cdot v_{Rd,c,STR} \cdot u_{1,STR} \cdot d}{\beta}, \frac{0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot u_0 \cdot d}{\beta} \right\} \quad (2.2.6.1)$$

## Išvados

1. Pagrindinės charakteristikos, nulemiančios besijinės perdangos plokštės praspaudžiamąją galią, kai skersinis armavimas nenaudojamas yra: išilginio armavimo intensyvumas ( $\rho_1, \%$ ), betono gniuždomasis stipris ( $f_{ck}, MPa$ ), efektyvusis perdangos plokštės skerspjūvio aukštis ( $d, mm$ ), pagrindinis tikrinamasis perimetras ( $u_1, mm$ ). Kai naudojamas skersinis armavimas, papildomai vertinamos šios dedamosios: skersinės armatūros tipas, skersinės armatūros strypų išdėliojimas ( $s_0, s_r, mm$ ), skersinės armatūros plotas nagrinėjamame pjūvyje ( $A_{sw}, mm^2$ ), skersinės armatūros stipris tempiant ( $f_{ywk}, MPa$ ) ir skersinės armatūros posvyrio kampas ( $\alpha, ^\circ$ ).
2. Atlikus eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių palyginimą nagrinėjamiems bandiniams be skersinės armatūros buvo nustatyta, kad patikimiausios ir tiksliausios skaičiavimo metodikos yra *Eurocode 2* ir BS 8110. Šių projektavimo normų reikšmių vidurkiai buvo: 1,09 (*Eurocode 2*) ir 1,11 (BS 8110), o variacijos koeficientai atitinkamai siekė 13,2 % ir 13,3 %. Nepatikimiausia skaičiavimo metodika buvo SNiP 2.03.01-84, pagal kurią reikšmių vidurkis buvo 1,04, o variacijos koeficientas siekė 23,8 %. Konservatyviausia skaičiavimo metodika buvo ACI 318-08, pagal kurią reikšmių vidurkis buvo 1,35, o variacijos koeficientas – 18,9 %. Nustatyta, kad mažiausia rezultatų sklaida pasižymėjo normos, kuriose vertinama išilginio armavimo įtaka.
3. Praspaudimo skaičiavimo metodikoms be skersinio armavimo yra siūlomi šie ribojimai: išilginio armavimo intensyvumui  $1.2 \% \leq \rho_1 \leq 2 \%$  (taikytina visoms nagrinėtoms projektavimo normoms), betono stipriui gniuždant  $25 MPa < f_{ck} < 40 MPa$  (taikytina DIN 1045, BS 8110, SNiP 2.03.01-84 ir ACI 318-08), kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykiui  $u_0/d < 8$  (taikytina SNiP 2.03.01-84 ir ACI 318-08). Įvedus numatytus ribojimus projektavimo normoms, reikšmių vidurkiai ženkliai nepakito, tačiau reikšmingai sumažėjo variacijos koeficientų vertės: STR 2.05.05:2005 – 4,3 %; *Eurocode 2* – 3,3 %; SNiP 2.03.01-84 – 11,7 %; DIN 1045 – 4,6 %; BS 8110 – 2 %; ACI 318-08 – 9,6 %.
4. Besijinės perdangos plokštės suirimo pobūdis, kai naudojamas skersinis armavimas, tiksliausiai identifikuojamas pagal STR 2.05.05:2005 projektavimo normas, pagal kurias sutapo 67 % nagrinėjamų bandinių, tačiau pasižymėjo žemu reikšmių vidurkiu – 0,94. Tiksliausios ir patikimiausios projektavimo normos, neatsižvelgiant į skersinės armatūros tipą, buvo *Eurocode 2*, pagal kurias reikšmių vidurkis buvo 1,10, o variacijos koeficientas – 12,3 %. Vertinant praspaudimą su armatūros strypais, tiksliausios buvo *Eurocode 2* normos (reikšmių vidurkis – 1,08, o variacijos koeficientas – 9,9 %). Tiksliausios ir patikimiausios projektavimo normos, kai naudojami armatūros strypai su galvutėmis abėjuose galuose, buvo EOTA TR60, pagal kurias reikšmių vidurkis buvo 1,12, o variacijos koeficientas – 9,9 %.
5. Įvedus ribojimus skersinės armatūros intensyvumui ( $\rho_{sw} < 0,75 \%$ ), rezultatų sklaida išliko nepakitusi, tačiau teorinės praspaudžiamosios galios vertės tapo artimesnės eksperimentinėms. Lietuvos projektavimo normoms (STR 2.05.05:2005) pritaikius  $k_{max} = 1,85$  koeficientą, pavyko gauti mažesnes teorines laikomųjų galių vertes lyginant su eksperimentinėmis (reikšmių vidurkis – 1,08) ir taip sumažinti rezultatų sklaidą 3 %.

## Literatūros sąrašas

1. BIRKLE, Gerd. Punching of Flat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layout. PhD Thesis. [interaktyvus] *University of Calgary, Department of civil engineering*, 2004. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.11575/PRISM/20112>
2. SAADOON, Ahmed Sagban, Abdunnasser Mohammed ABBAS, Haleem K. A. HUSSAIN. Review on Flat Slab Punching Shear Reinforcement. [interaktyvus] *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 44-58. ISSN: 2312-8135. Prieiga per: <https://www.journalofbabylon.com/index.php/JUBES/article/view/2494>
3. BARTOLAC, Marko, Domagoj DAMJANOVIĆ, Ivan DUVNJAK. Punching strength of flat slabs with and without shear reinforcement. [interaktyvus] *Građevinar*, 2015, vol. 67, no. 08, pp. 771-786. ISSN 1333-9095. Prieiga per: <https://doi.org/10.14256/JCE.1361.2015>
4. HALVONÍK, Jaroslav, Lucia MAJTANOVÁ. Experimental investigation of the maximum punching resistance of slab-column connections. [interaktyvus] *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 22-28. ISSN 1210-3896. Prieiga per: <https://doi.org/10.2478/sjce-2018-0017>
5. WOOD, Jonathan G. M. Pipers Row Car Park, Wolverhampton. PhD Thesis. [interaktyvus] *Quantitative Study of the Causes of the Partial Collapse on 20th March*, 1997. Prieiga per: [www.hse.gov.uk/research/misc/pipersrowpt1.pdf](http://www.hse.gov.uk/research/misc/pipersrowpt1.pdf)
6. KING, Suzanne, Norbert J. DELATTE. Collapse of 2000 commonwealth avenue: Punching shear case study. [interaktyvus] *Journal of Performance of constructed facilities*, 2004, vol. 18, no.1, pp. 54-61. ISSN 1943-5509. Prieiga per: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2004\)18:1\(54\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2004)18:1(54))
7. GARDNER, N. J., H. JUNGSUCK, L. CHUNG, Lessons from the Sampoong department store collapse. [interaktyvus] *Cement and Concrete Composites*, 2002, vol. 24, no. 6, pp. 523-529. ISSN: 0958-9465 Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00068-3)
8. ŠAKINIS, Dainius, Povilas VAINIŪNAS. Influence of longitudinal reinforcement on the punching shear resistance of reinforced concrete slabs. [interaktyvus] *Engineering Structures and Technologies*, 2009, vol. 1, no. 2, pp. 73-79. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/skt.2009.09>
9. ZAGHLOUL, Ashraf. Punching shear strength of interior and edge column-slab connections in CFRP reinforced flat plate structures transferring shear and moment. [interaktyvus] PhD Thesis. *Carleton University*, 2007. Prieiga per: <https://doi.org/10.22215/etd/2007-06626>
10. MARÍ, Antonio, et al. A punching shear mechanical model for reinforced concrete flat slabs with and without shear reinforcement. [interaktyvus] *Engineering Structures*, 2018, vol. 166 pp. 413-426. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.079>
11. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių Konstruktijų Projektavimas. 1-1 Dalis. Bendrosios Ir Pastatų Taisyklės*. 2005-04-15; Lietuviška versija: 2007-09-29 ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
12. BS 8110-1: 1997 Structural Use of Concrete – Part 1: Code of Practice for Design and Construction. British Standards Institution, London, 2002. ISBN 0 580 26208 1
13. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary. American Concrete Institute, 2008. ISBN 978-0-87031-283-0
14. *Concrete and Reinforced Concrete Structures – SNIP 2.03.01-84*. National Building Codes of Russia, 1997. ISBN 1-57937-049-7

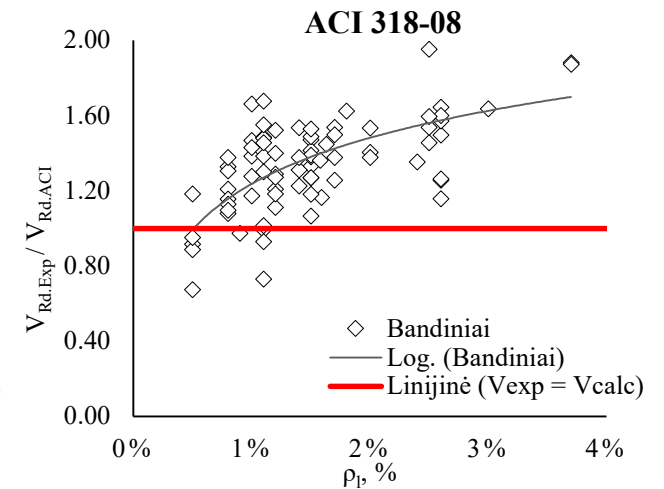
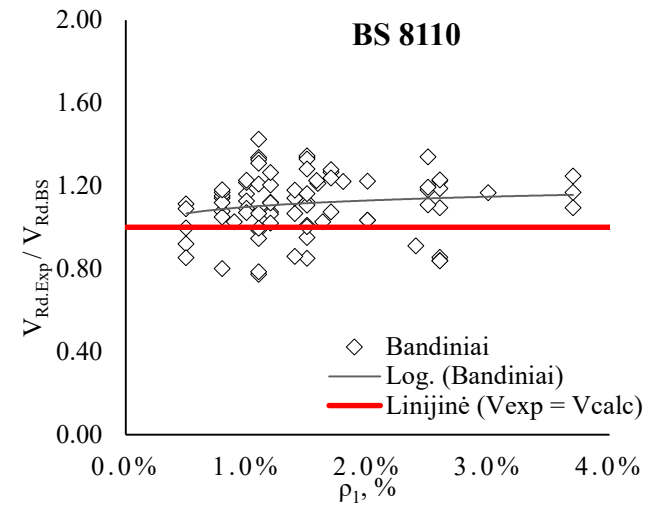
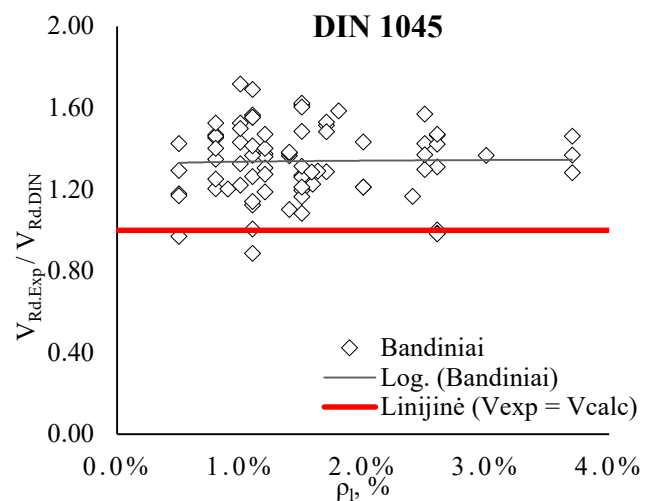
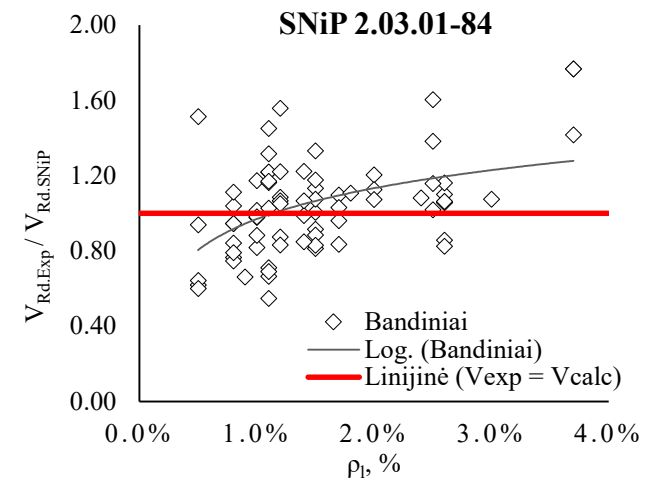
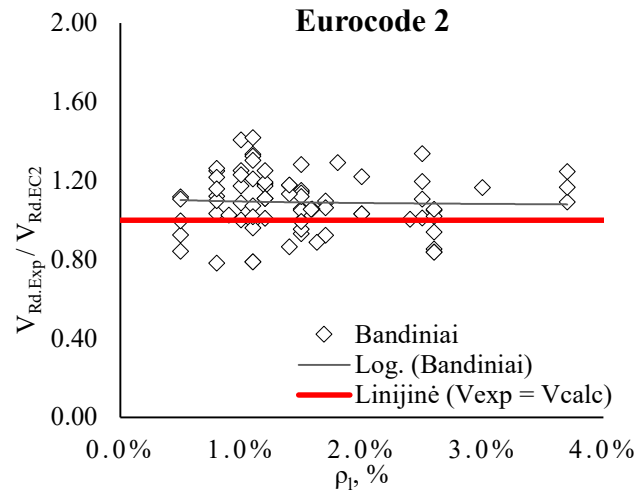
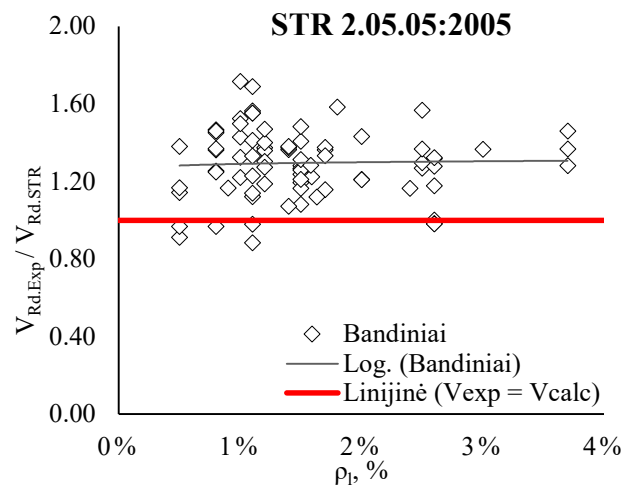
15. MUTTONI, Aurelio. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. [interaktyvus] *ACI structural Journal*, 2008. vol. 105 pp. 440-450. Prieiga per: <https://doi.org/10.14359/19858>
16. INÁCIO, Micael M. G., et al. Punching of high strength concrete flat slabs without shear reinforcement. [interaktyvus] *Engineering Structures*, 2015, vol. 103 pp. 275-284. ISSN 0141-0296 Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.010>
17. METWALLY, Ibrahim M., Mohamed S. ISSA, Sameh A. EL-BETAR. Punching shear resistance of normal and high strength reinforced concrete flat slabs. [interaktyvus] *Civ Eng Res Mag*, 2008, vol. 30, no. 3, pp. 982-1003. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/284689030>
18. DIN 1045-1 (2005): Concrete, reinforced and pre-stressed concrete structures part 1: design and construction. DIN, Berlin, Germany.
19. DÖNMEZ, Abdullah, Zdeněk P. BAŽANT. Size effect on punching strength of reinforced concrete slabs with and without shear reinforcement. [interaktyvus] *ACI Structural Journal*, 2017, vol. 114, no. 4, pp. 875-886. Prieiga per: <https://doi.org/10.14359/51689719>
20. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.05.05:2005, *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. [interaktyvus] Vilnius, 2005 Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.C8C4EF7FF7AE/rTLfZhDSux>
21. FERREIRA, Mauricio P., et al. Experimental resistance of slab-column connections with prefabricated truss bars as punching shear reinforcement. [interaktyvus] *Engineering Structures*, 2021, vol. 233, no. 111903. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111903>
22. VAINIŪNAS, Povilas. Gelžbetoninių plokščių praspaudžiamojo stiprio skaičiavimo pagal projektavimo normas analizė. [interaktyvus] *Ūkio technologinis ir ekonominis vystymas*, 2006, vol. 12, no. 2 pp. 84-90. ISSN 1392-8619 Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/13928619.2006.9637727>
23. EDER, Martin A. Inelastic behaviour of hybrid steel/concrete column-to-flat slab assemblages. PhD Thesis. [interaktyvus] *Imperial College London*, 2011. Prieiga per: <https://doi.org/10.25560/7017>
24. SAID, Aly M., Ying TIAN, A. HUSSEIN. Evaluating punching shear strength of slabs without shear reinforcement using artificial neural networks. [interaktyvus] *Special Publication*, 2012, vol. 287 pp. 1-18. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/289061608>
25. MARČIUKAITIS, Gediminas, Remigijus ŠALNA. Gelžbetoninių Besijų Perdangos Plokščių Praspaudimo Tyrimo Ir Skaičiavimo Modelių Analizė. [interaktyvus] *Statybinės Konstrukcijos ir Technologijos*, 2010, vol. 2, no. 3 pp. 93-100. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/skt.2010.13>
26. fib Bulletin No. 12 Punching of Structural Concrete Slabs: Technical Report. *International Federation for Structural Concrete*, 2001. ISBN 978-2-88394-052-9 Prieiga per: <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0012>
27. THUY, Andreas, Mario RINKE. The mushroom column: Origins, concepts and differences. Iš: *Building Knowledge, Constructing Histories*. CRC Press, 2018. pp. 1271-1278. ISBN 9780429446719
28. AMMASH, Haider K., Safa S. KADHIM. Effect of Reinforced Concrete Column Capital on Punching Shear Strength of Flat Slab. [interaktyvus] *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, vol. 54, no. 5. ISSN 0258 2724. Prieiga per: <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.54.5.5>



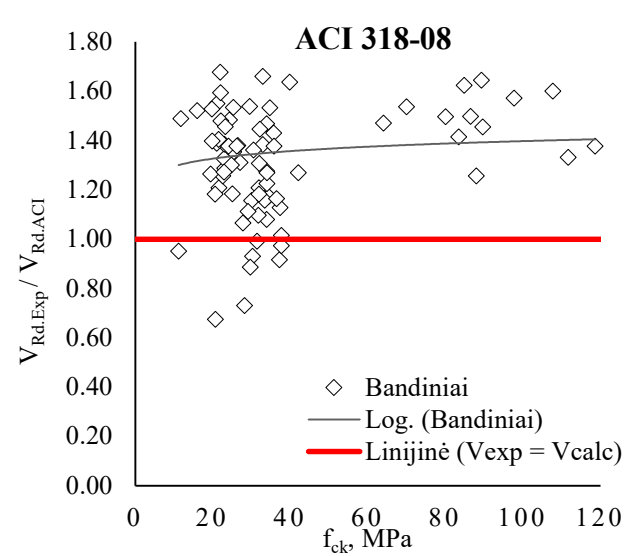
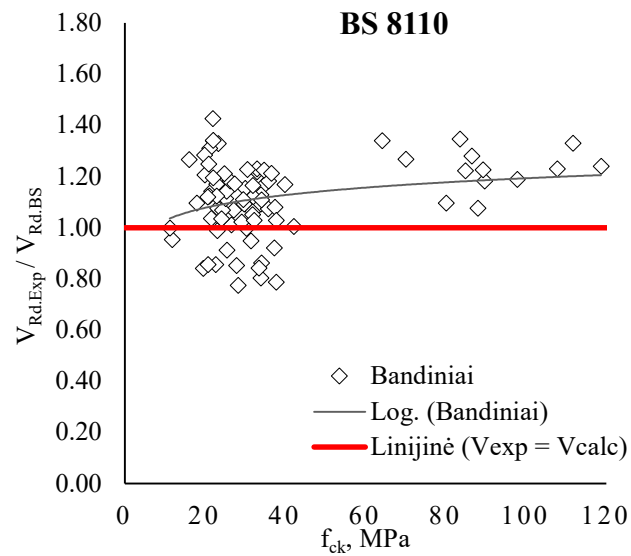
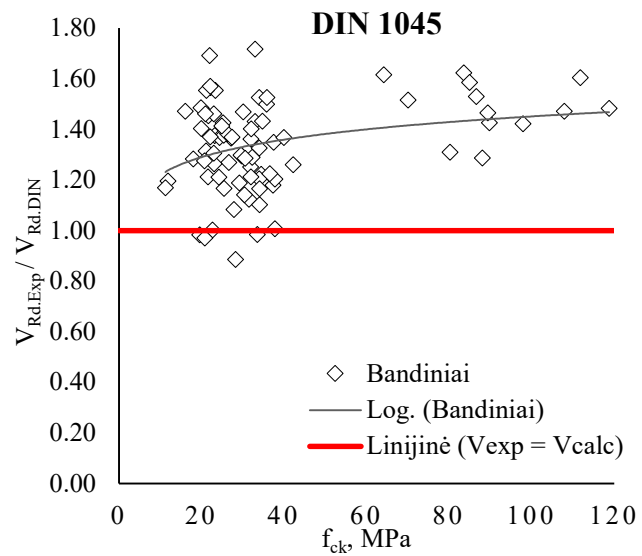
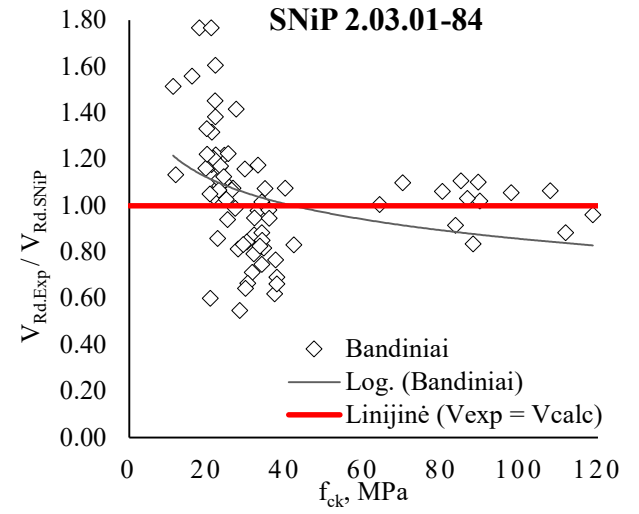
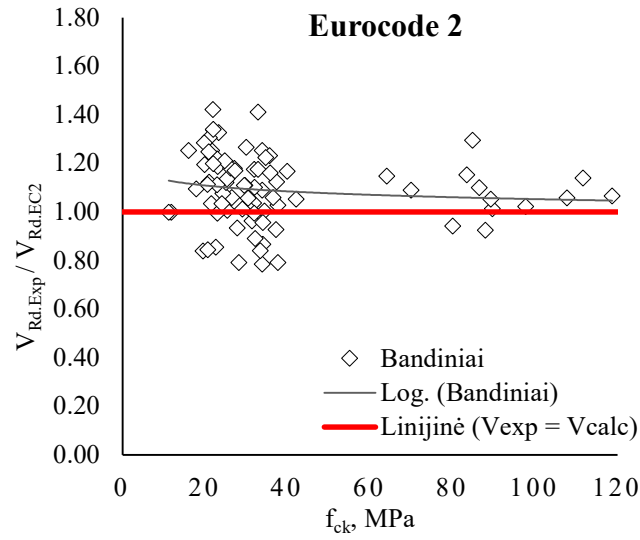
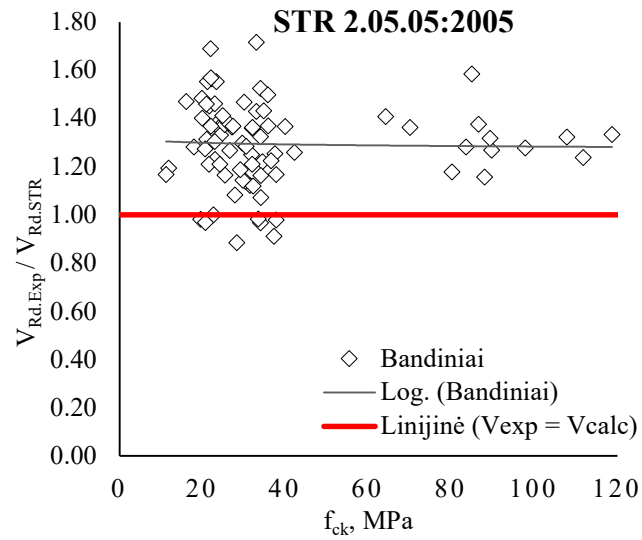
29. KIERDORF, Alexander. Early Mushroom Slab Construction in Switzerland, Russia and the USA-A Study in Parallel Technological Development. iš: *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*. Cambridge Construction History Society Cambridge University, 2006. pp. 1793-1807.
30. OLIVEIRA, M. H., et al. Punching resistance of internal slab-column connections with double-headed shear studs. [interaktyvus] *IBRACON Structures and Materials*, 2013. Vol. 6, no. 5 pp. 681-714. ISSN 1983-4195. Prieiga per: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000500002>
31. PEIKKO GROUP. *PSB Reinforcement Against Punching Failure of Slabs*, [interaktyvus] 2020. Ver. 5. [žiūrėta: 2021-11-20] Prieiga per: <https://www.peikko.com/products/product/psb-reinforcement-system/>
32. LIPS, Stefan, Miguel FERNÁNDEZ RUIZ, Aurelio MUTTONI. Experimental investigation on punching strength and deformation capacity of shear-reinforced slabs. [interaktyvus] *ACI Structural Journal*, 2012, 109. pp. 889-900. Prieiga per: <https://doi.org/10.14359/51684132>
33. SCHMIDT, Philipp, Dominik KUERES, Josef HEGGER. Punching shear behavior of reinforced concrete flat slabs with a varying amount of shear reinforcement. [interaktyvus] *Structural Concrete*, 2020, vol. 21, no.1, pp. 235-246. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/suco.201900017>
34. DE PINA FERREIRA, Maurício, Marcos Honorato OLIVEIRA, Guilherme Sales S. A. MELO. Tests on the punching resistance of flat slabs with unbalanced moments. [interaktyvus] *Engineering Structures*, 2019, vol. 196. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109311>
35. BEUTEL, Rüdiger, Josef HEGGER. The effect of anchorage on the effectiveness of the shear reinforcement in the punching zone. [interaktyvus] *Cement and Concrete Composites*, 2002, vol. 24, no. 6 pp. 539-549. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00070-1)
36. RICKER, Marcus, Frank HÄUSLER. European punching design provisions for double-headed studs. [interaktyvus] *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2014, vol. 167, no. 8, pp. 495-506. Prieiga per: <https://doi.org/10.1680/stbu.13.00047>
37. EOTA Technical Report 060: Increase of punching shear resistance of flat slabs or footings and ground slabs – double headed studs – Calculation Methods. Brussels, Belgium, 2017. [interaktyvus] [žiūrėta: 2021-11-25] Prieiga per: <https://www.eota.eu/technical-reports>
38. DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04: Concrete, reinforced and pre-stressed concrete structures part 1: design and construction. DIN, Berlin, Germany.
39. FERNÁNDEZ RUIZ, Miguel, Aurelio MUTTONI. Applications of the critical shear crack theory to punching of R/C slabs with transverse reinforcement. [interaktyvus] *ACI Structural Journal*, 2009, vol. 106. no. 6, pp. 485-494. Prieiga per: <https://doi.org/10.14359/56614>
40. EINPAUL, Jürgen, et al. Performance of punching shear reinforcement under gravity loading: influence of type and detailing. [interaktyvus] *ACI Structural Journal*, 2016, vol. 113, pp. 827-838. Prieiga per: <https://doi.org/10.14359/56614>
41. REGAN, P. E., F. SAMADIAN. Shear reinforcement against punching in reinforced concrete flat slabs. [interaktyvus] *Structural Engineer*, 2001, vol. 79, no. 10, pp. 24-31. ISSN: 1466-5123. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/279896432>
42. JANG, Jae-Ick, Su-Min KANG. Punching Shear Behavior of Shear Reinforced Slab–Column Connection with Varying Flexural Reinforcement. [interaktyvus] *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 1-14. Prieiga per: <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0341-4>

## Priedai

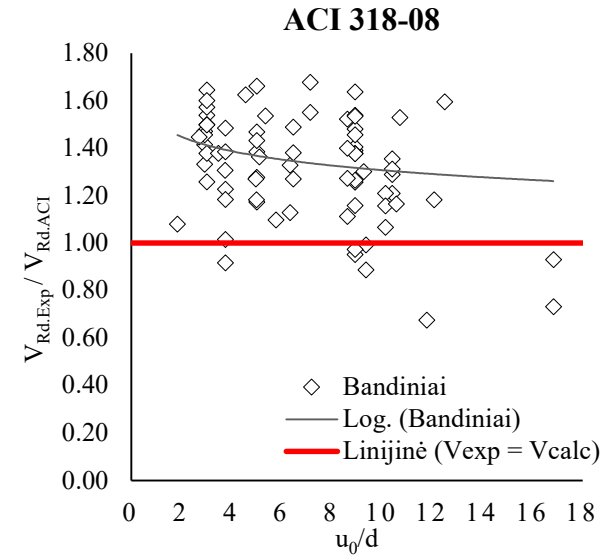
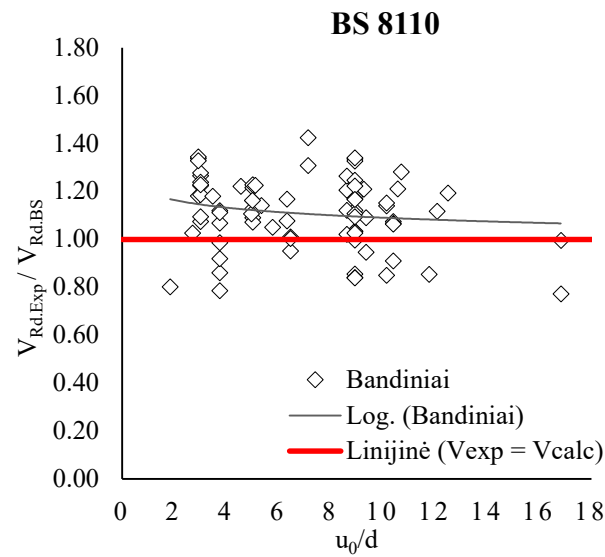
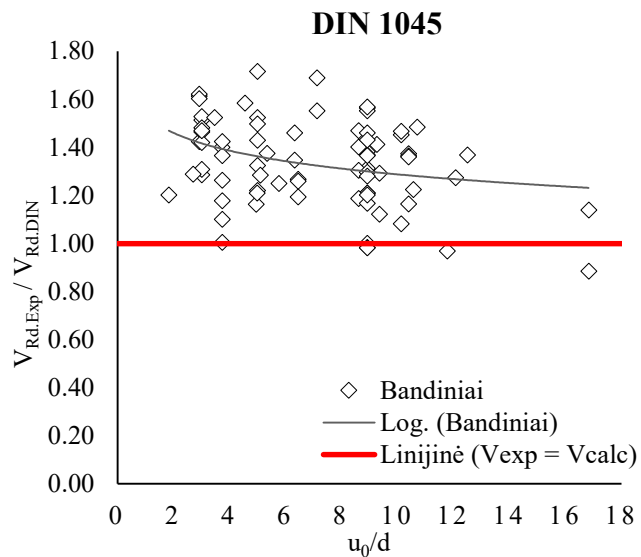
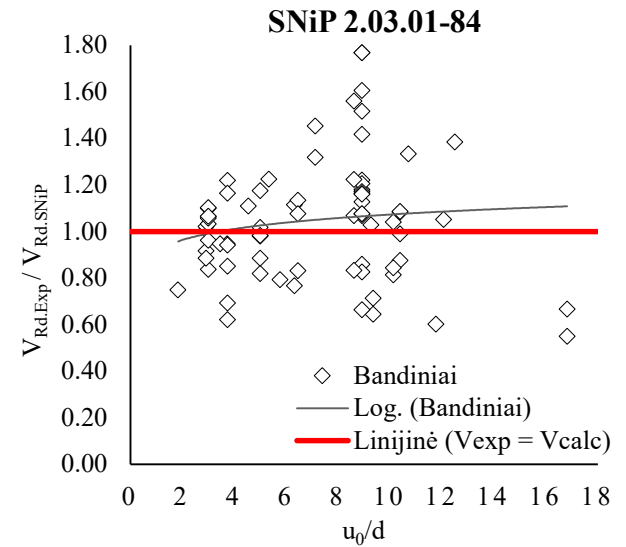
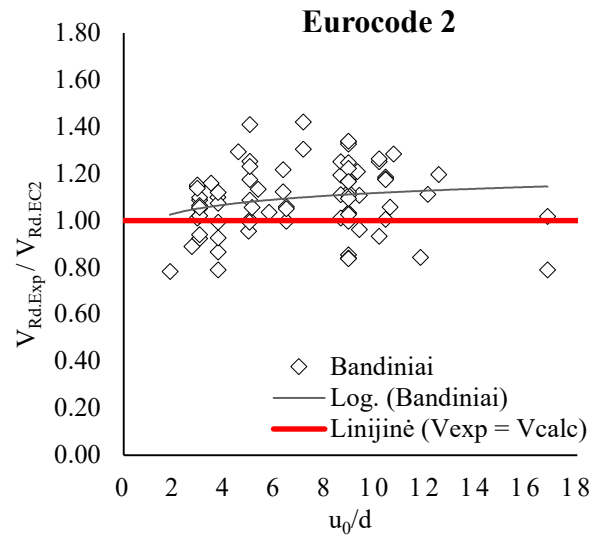
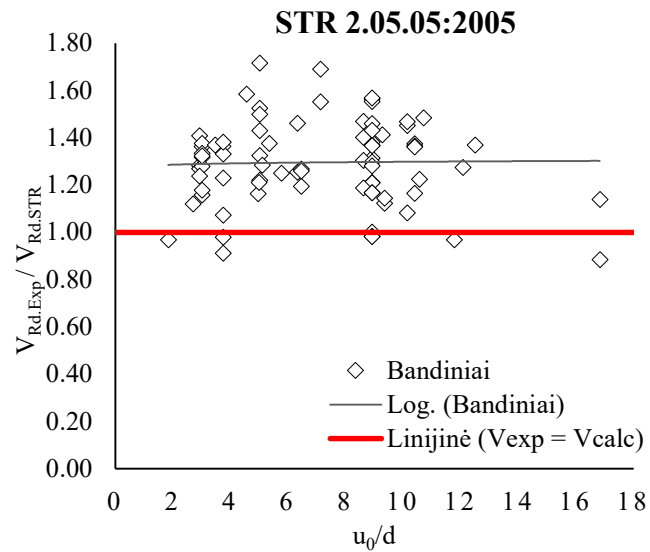
### 1 priedas. Kiekvieno bandinio eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė nuo armavimo intensyvumo pagal skirtingas projektavimo normas



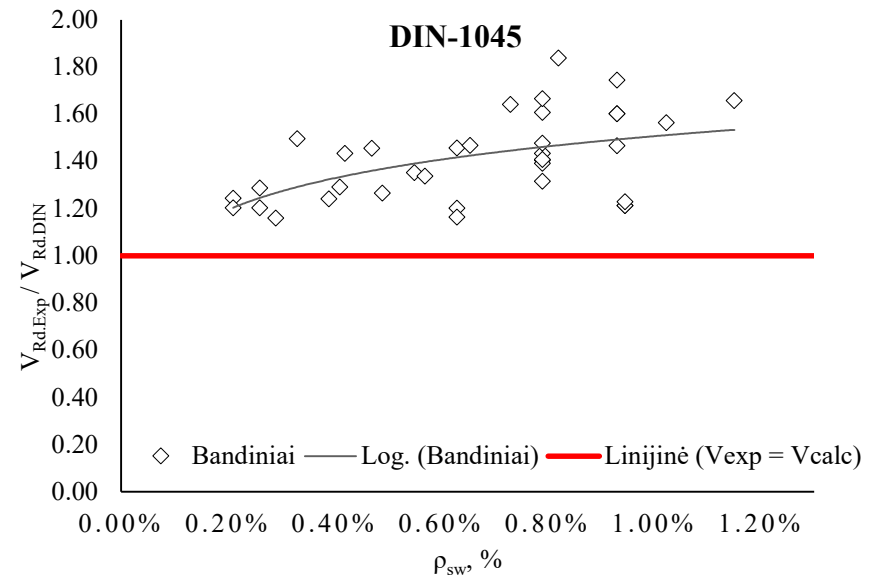
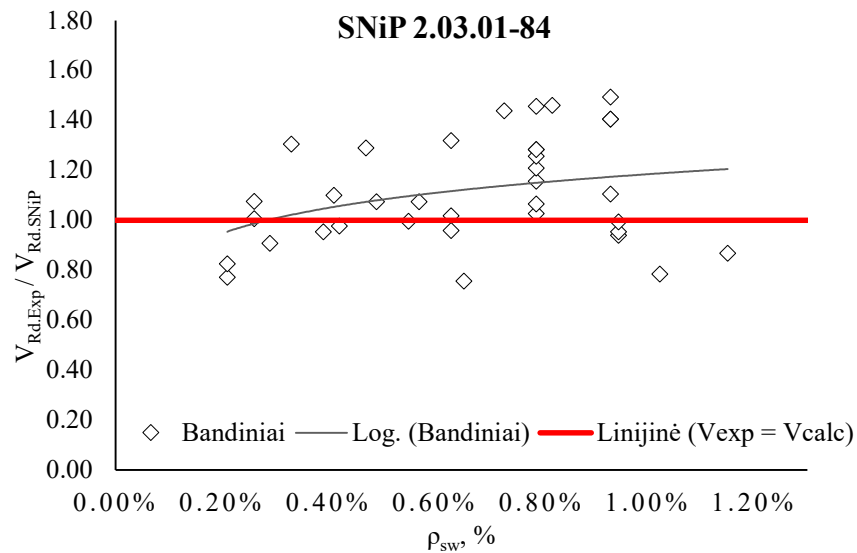
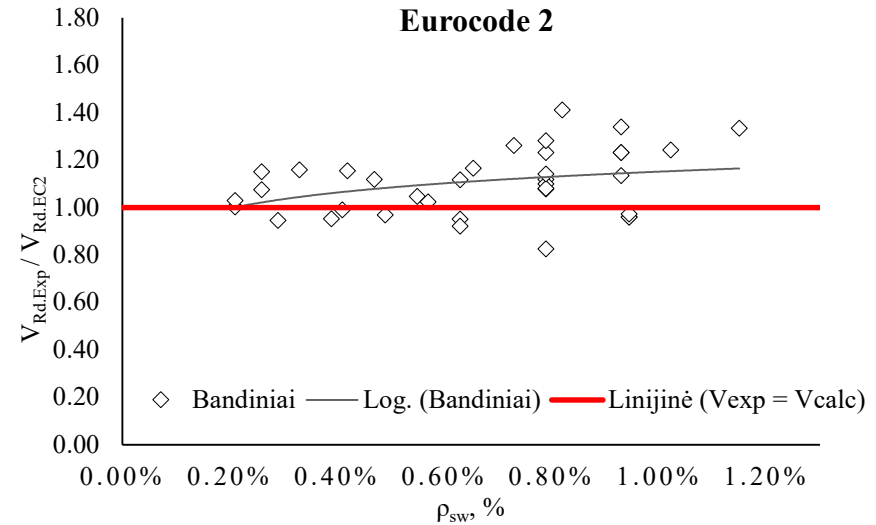
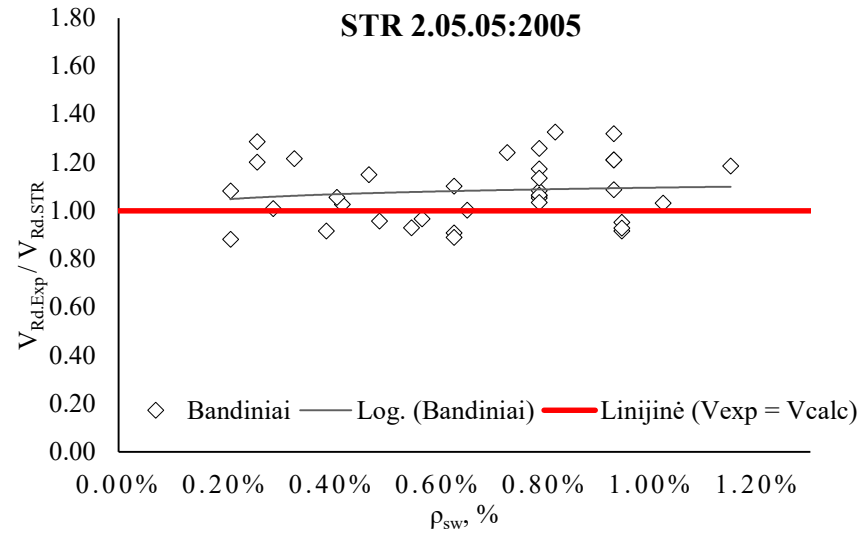
**2 priedas. Kiekvieno bandinio eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė nuo betono stiprio gniuždant pagal skirtingas projektavimo normas**

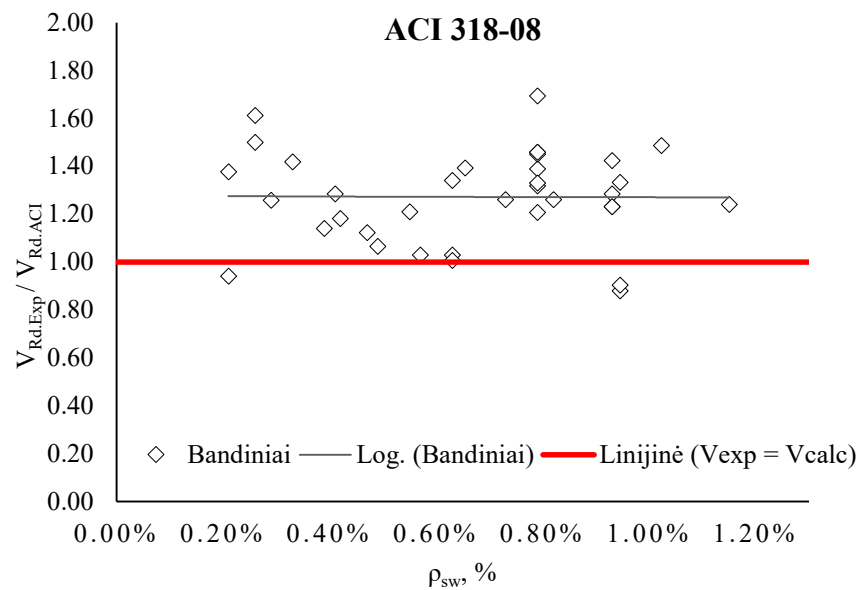
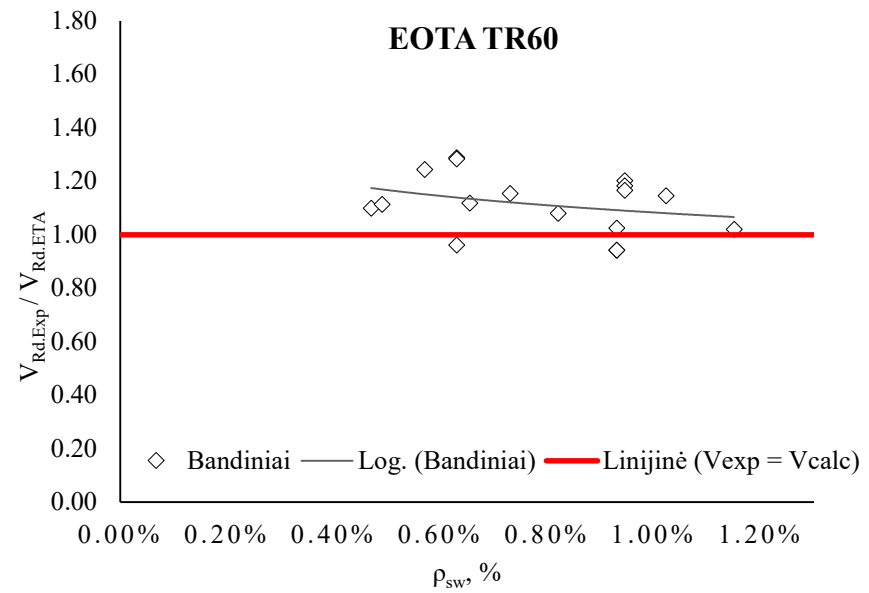
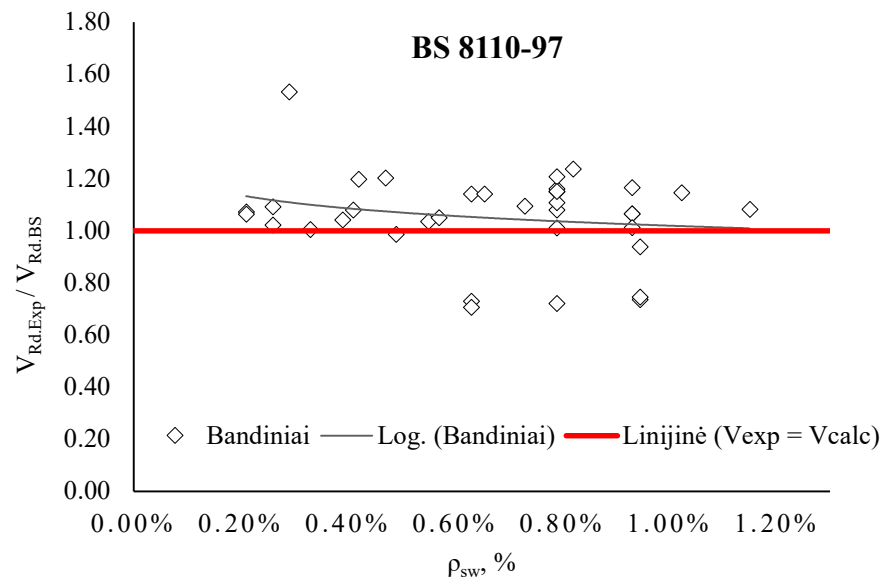


**3 priedas. Kiekvieno bandinio eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė nuo kolonos perimetro ir efektyvaus perdangos plokštės aukščio santykio pagal skirtingas projektavimo normas**



**4 priedas. Kiekvieno bandinio eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių santykių priklausomybė nuo skersinio armavimo intensyvumo pagal skirtingas projektavimo normas**





**5 priedas. Kiekvieno bandinio teorinių praspaudimo laikomųjų galių palyginimas, kai perdangos plokštė su skersiniu armavimu ir be skersinio armavimo pagal skirtingas projektavimo normas**

| Poz. | Bandinys | SAT | $\frac{V_{Rd.cs.EC2}}{V_{Rd.c.EC2}}$ | $\frac{V_{Rd.cs.STR}}{V_{Rd.c.STR}}$ | $\frac{V_{Rd.cs.SNIP}}{V_{Rd.c.SNIP}}$ | $\frac{V_{Rd.cs.DIN}}{V_{Rd.c.DIN}}$ | $\frac{V_{Rd.cs.BS}}{V_{Rd.c.BS}}$ | $\frac{V_{Rd.cs.EOTA}}{V_{Rd.c.EOTA}}$ | $\frac{V_{Rd.cs.ACI}}{V_{Rd.c.ACI}}$ |
|------|----------|-----|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 1    | PL7      | HD  | 1.50                                 | 2.39                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.96                                   | 2.00                                 |
| 2    | PL9      | HD  | 1.50                                 | 2.37                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.96                                   | 2.00                                 |
| 3    | PL10     | HD  | 1.50                                 | 2.45                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.96                                   | 2.00                                 |
| 4    | PL12     | HD  | 1.50                                 | 1.77                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.62                               | 1.53                                   | 2.00                                 |
| 5    | PF1      | ST  | 1.50                                 | 1.33                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | -                                      | 1.50                                 |
| 6    | PF2      | ST  | 1.50                                 | 2.18                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.63                               | -                                      | 1.50                                 |
| 7    | PF3      | ST  | 1.50                                 | 2.80                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.66                               | -                                      | 1.50                                 |
| 8    | PF4      | ST  | 1.50                                 | 2.38                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.59                               | -                                      | 1.50                                 |
| 9    | PF5      | ST  | 1.50                                 | 2.41                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | -                                      | 1.50                                 |
| 10   | PR1      | HD  | 1.50                                 | 2.19                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.70                               | 1.96                                   | 2.00                                 |
| 11   | PL7      | HD  | 1.50                                 | 2.39                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.96                                   | 2.00                                 |
| 12   | PE1      | HD  | 1.50                                 | 2.38                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.64                                   | 2.00                                 |
| 13   | PB2      | ST  | 1.50                                 | 2.39                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | -                                      | 1.50                                 |
| 14   | PF2      | ST  | 1.50                                 | 2.18                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.63                               | -                                      | 1.50                                 |
| 15   | SR1      | HD  | 1.50                                 | 2.75                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.96                                   | 2.00                                 |
| 16   | S2       | HD  | 1.50                                 | 1.84                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.62                               | 1.56                                   | 1.36                                 |
| 17   | S7       | HD  | 1.50                                 | 1.91                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.72                               | 1.63                                   | 1.36                                 |
| 18   | P3-I     | ST  | 1.50                                 | 1.72                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | -                                      | 1.50                                 |
| 19   | P5-I     | ST  | 1.50                                 | 1.87                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.75                               | -                                      | 1.50                                 |
| 20   | P6-I     | ST  | 1.50                                 | 2.61                                 | 1.48                                   | 1.40                                 | 1.94                               | -                                      | 1.50                                 |
| 21   | P7-I     | ST  | 1.50                                 | 2.50                                 | 1.47                                   | 1.40                                 | 1.96                               | -                                      | 1.50                                 |
| 22   | R3       | HD  | 1.50                                 | 2.04                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.62                               | 1.30                                   | 1.74                                 |
| 23   | R4       | HD  | 1.50                                 | 2.29                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.61                               | 1.23                                   | 1.86                                 |
| 24   | S2       | HD  | 1.50                                 | 1.86                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.11                                   | 1.67                                 |
| 25   | S3       | HD  | 1.50                                 | 1.83                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.08                                   | 1.63                                 |
| 26   | S4       | HD  | 1.50                                 | 1.78                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.57                               | 1.20                                   | 1.25                                 |
| 27   | S5       | HD  | 1.50                                 | 2.29                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.22                                   | 1.90                                 |
| 28   | S6       | HD  | 1.50                                 | 2.34                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 2.00                               | 1.25                                   | 1.90                                 |
| 29   | SP-2     | ST  | 1.50                                 | 1.70                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.56                               | -                                      | 1.39                                 |
| 30   | SP-5     | ST  | 1.41                                 | 1.48                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.52                               | -                                      | 1.08                                 |
| 31   | SP-6     | ST  | 1.50                                 | 2.20                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.60                               | -                                      | 1.50                                 |
| 32   | A1-8     | ST  | 1.26                                 | 1.37                                 | 1.40                                   | 1.37                                 | 1.53                               | -                                      | 1.15                                 |
| 33   | A2-8     | ST  | 1.26                                 | 1.37                                 | 1.40                                   | 1.37                                 | 1.53                               | -                                      | 1.16                                 |
| 34   | A2-10    | ST  | 1.50                                 | 1.71                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.59                               | -                                      | 1.48                                 |
| 35   | A3-12    | ST  | 1.41                                 | 1.50                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.01                               | -                                      | 1.25                                 |
| 36   | A3-14    | ST  | 1.50                                 | 1.74                                 | 1.40                                   | 1.40                                 | 1.60                               | -                                      | 1.46                                 |

## 6 priedas. Projektavimo normų palyginimas, skaičiuojant PL9 bandinį

### PL9 bandinio praspaudimo laikomoji galia pagal STR 2.05.05:2005

#### 1. Pradiniai bandinio duomenys

|  |  |
|--|--|
| Kolonos matmenys:                          | $c := 340 \text{ mm}$                          |
| Perdangos aukštis:                         | $h := 320 \text{ mm}$                          |
| Charakteristinis betono stipris gniuždant: | $f_{ck} := 32.1 \text{ MPa}$                   |
| Betono dalinis patikimumo koeficientas:    | $\gamma_c := 1$ (koeficiento reikšmė pakeista) |

|  |   |
|--|---|
| Skaičiuotinis betono stipris gniuždant:      | $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 32.1 \text{ MPa}$  |
| Charakteristinis betono tempiamasis stipris: | $f_{ctm} := 0.3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{3}} = 3.03 \text{ MPa}$ |

|   |  |
|---|--|
| Skaičiuotinis betono tempiamasis stipris: | $f_{ctd} := \frac{f_{ctm}}{\gamma_c} = 3.03 \text{ MPa}$ |
|---|--|

Skaičiuotinis betono stipris tempiant skaičiuojamas nevertinant  $f_{ctk,0.05}$ , nes eksperimento metu buvo nustatoma tiksli betono stiprio gniuždant reikšmė.

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Efektyvusis perdangos plokštės aukštis: | $d := 266 \text{ mm}$            |
| Plokštės armavimo koeficientas:         | $\rho_1 := 1.59\%$               |
| Jėga prie kurios įvyko suirimas:        | $V_{Rd,Exp} := 3.132 \text{ MN}$ |

#### 2. Laikomoji galia praspaudimui, be skersinio armavimo

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Apkrovos padidėjimo koeficientas: | $\beta := 1$ (koeficiento reikšmė pakeista) |
|-----------------------------------|---|

|               |  |
|---------------|--|
| Koeficientas: | $k := \min \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{\frac{d}{\text{mm}}}}, 2 \right) = 1.867$ |
|---------------|--|

Pagrindinis tikrinamasis perimetras:

$$u_1 := 2 \cdot \pi \cdot 1.5 \cdot d + 4 \cdot c = 3.867 \text{ m}$$

Kolonos perimetras:

$$u_0 := 4 \cdot c = 1.36 \text{ m}$$

Praspaudžiamoji jėga kurią atlaiko perdangos plokštė pavojingame pjūvyje:

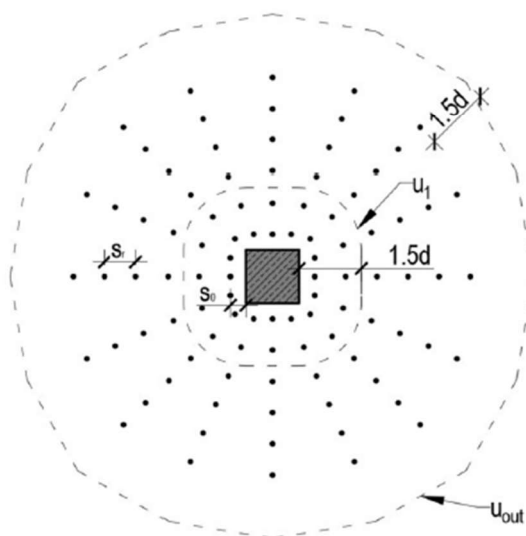
$$v_{Rd,c.1} := \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa}^{\frac{2}{3}} = 1.247 \text{ MPa}$$

$$v_{Rd,c.min} := 0.4 \cdot f_{ctd} = 1.212 \text{ MPa}$$

$$v_{Rd,c} := \max(v_{Rd,c.1}, v_{Rd,c.min}) = 1.247 \text{ MPa}$$

Perdangos plokštės stiprumas praspaudimui:

$$V_{Rd,c.STR} := \frac{v_{Rd,c} \cdot u_1 \cdot d}{\beta} = 1.282 \text{ MN}$$



Tikrinamieji perimetrai ir skersinės armatūros išdėliojimas



### 3. Laikomoji galia su skersiniu armavimu

|   |  |
|---|--|
| Skersinės armatūros skersmuo:                             | $\varnothing_{sw} := 18 \text{ mm}$  |
| Armatūros kiekis viename perimetre:                       | $m := 16$  |
| Skersinės armatūros perimetrų skaičius aplink koloną:     | $n := 6$   |
| Kampas tarp skersinės armatūros ir plokštės plokštumos:   | $\alpha := 90$   |
| Vieno perimetro aplink koloną skersinės armatūros plotas: | $A_{sw} := m \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing_{sw}^2}{4} = (4.072 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$ |
| Spindulinis tarpas tarp skersinės armatūros perimetrų:    | $s_r := 200 \text{ mm}$  |
| Tarpas tarp skersinės armatūros ir kolonos:               | $s_0 := 100 \text{ mm}$  |
| Išorinis tikrinamasis perimetras:                         | $u_{out} := 10683 \text{ mm}$  |
| Charakteristinis skersinės armatūros stipris tempiant:    | $f_{ywk} := 516 \text{ MPa}$   |
| Armatūros dalinis patikimumo koef.:                       | $\gamma_s := 1$ (koeficiento reikšmė pakeista)   |
| Skaičiuotinis armatūros stipris tempiant:                 | $f_{ywd} := \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} = 516 \text{ MPa}$                                      |

Skersinės armatūros efektyvusis skaičiuotinis praspaudžiamasis stipris:

$$f_{ywd,ef} := \min\left(1.15 \cdot \left(250 + 0.25 \cdot \frac{d}{\text{mm}}\right) \cdot \text{MPa}, f_{ywd}\right) = 363.975 \text{ MPa} \quad (\text{pataisyta formulė})$$

Praspaudžiamoji jėga kurią atlaiko perdangos plokštė pavojingame pjūvyje:

$$v_{Rd.cs} := 0.75 \cdot v_{Rd.c} + 1.5 \cdot \left(\frac{d}{s_r}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd,ef} \cdot \left(\frac{1}{u_l \cdot d}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) = 3809.168 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Skaičiuotinė praspaudžiamoji galia ties skersine armatūra:

$$V_{Rd.cs} := \frac{v_{Rd.cs} \cdot u_l \cdot d}{\beta} = (3.918 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Supleišėjusio įstrižajame pjūvyje betono stiprio mažinamasis koeficientas:

$$v := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \cdot \text{MPa}}\right) = 0.523$$

Didžiausia praspaudžiamosios galios vertė:

$$v_{Rd,max} := 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} = (8.394 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Didžiausia galima laikomoji galia:

$$V_{Rd,max} := \frac{v_{Rd,max} \cdot u_0 \cdot d}{\beta} = (3.036 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Praspaudimo laikomoji galia išoriniame perimetre:

$$V_{Rd.out} := \frac{v_{Rd.c} \cdot u_{out} \cdot d}{\beta} = (3.543 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Praspaudimo laikomoji galia su skersiniu armavimu, silpniausioje dalyje:

$$V_{Rd.cs.STR} := \min(V_{Rd.cs}, V_{Rd.max}, V_{Rd.out}) = (3.036 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Tikrinamas skaičiavimo metodikos tikslumas:

$$Patikra := \frac{V_{Rd.Exp}}{V_{Rd.cs.STR}} = 103.1\%$$

## PL9 bandinio praspaudimo laikomoji galia pagal *Eurocode 2*

### 1. Pradiniai bandinio duomenys

|  |  |
|--|--|
| Kolonos matmenys:                          | $c := 340 \text{ mm}$                                  |
| Perdangos aukštis:                         | $h := 320 \text{ mm}$                                  |
| Charakteristinis betono stipris gniuždant: | $f_{ck} := 32.1 \text{ MPa}$                           |
| Betono dalinis patikimumo koeficientas:    | $\gamma_c := 1$ (koeficiento reikšmė pakeista)         |
| Skaičiuotinis betono stipris gniuždant:    | $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 32.1 \text{ MPa}$ |
| Efektyvusis perdangos plokštės aukštis:    | $d := 266 \text{ mm}$                                  |
| Plokštės armavimo koeficientas:            | $\rho_1 := 1.59\%$                                     |
| Jėga prie kurios įvyko suirimas:           | $V_{Rd,Exp} := 3.132 \text{ MN}$                       |

### 2. Laikomoji galia praspaudimui, be skersinio armavimo

Apkrovos padidėjimo koeficientas:  $\beta := 1$  (koeficiento reikšmė pakeista)

Koeficientai:  $k := \min\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, 2\right) = 1.867$   $C_{Rd,c} := \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.18$

Pagrindinis tikrinamasis perimetras:

$$u_1 := 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d + 4 \cdot c = 4.703 \text{ m}$$

Kolonos perimetras:

$$u_0 := 4 \cdot c = 1.36 \text{ m}$$

Praspaudžiamoji jėga kurią atlaiko perdangos plokštė pavojingame pjūvyje:

$$v_{Rd,c.1} := C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa}^{\frac{2}{3}} = 1.247 \text{ MPa}$$

$$v_{Rd,c.min} := \frac{0.035}{\gamma_c} k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} = 0.506 \text{ MPa}$$

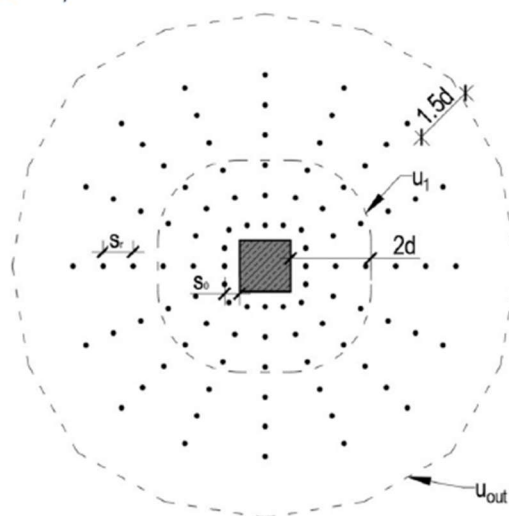
$$v_{Rd,c} := \max(v_{Rd,c.1}, v_{Rd,c.min}) = 1.247 \text{ MPa}$$

Perdangos plokštės stiprumas praspaudimui:

$$V_{Rd,c.EC2} := \frac{v_{Rd,c} \cdot u_1 \cdot d}{\beta} = 1.559 \text{ MN}$$

### 3. Laikomoji galia su skersiniu armavimu

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Skersinės armatūros skersmuo:                           | $\varnothing_{sw} := 18 \text{ mm}$ |
| Armatūros kiekis viename perimetre:                     | $m := 16$                           |
| Skersinės armatūros perimetrų skaičius aplink koloną:   | $n := 6$                            |
| Kampas tarp skersinės armatūros ir plokštės plokštumos: | $\alpha := 90$                      |



Tikrinamieji perimetrai ir skersinės armatūros išdėliojimas

Vieno perimetro aplink koloną skersinės armatūros plotas:  $A_{sw} := m \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing_{sw}^2}{4} = (4.072 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$

Spindulinis tarpas tarp skersinės armatūros perimetrų:

$$s_r := 200 \text{ mm}$$

Tarpas tarp skersinės armatūros ir kolonos:

$$s_o := 100 \text{ mm}$$

Išorinis tikrinamasis perimetras:

$$u_{out} := 10683 \text{ mm}$$

Charakteristinis skersinės armatūros stipris tempiant:

$$f_{ywk} := 516 \text{ MPa}$$

Armatūros dalinis patikimumo koef.:

$$\gamma_s := 1 \quad (\text{koeficiento reikšmė pakeista})$$

Maksimalios laikomosios galios koef.:

$$k_{max} := 1.5$$

Skaičiuotinis armatūros stipris tempiant:

$$f_{ywd} := \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} = 516 \text{ MPa}$$

Skersinės armatūros efektyvusis skaičiuotinis praspaudžiamasis stipris:

$$f_{ywd,ef} := \min \left( 1.15 \cdot \left( 250 + 0.25 \cdot \frac{d}{\text{mm}} \right) \cdot \text{MPa}, f_{ywd} \right) = 363.975 \text{ MPa} \quad (\text{pataisyta formulė})$$

Praspaudžiamoji jėga kurią atlaiko perdangos plokštė pavojingame pjūvyje:

$$v_{Rd.cs} := 0.75 \cdot v_{Rd.c} + 1.5 \cdot \left( \frac{d}{s_r} \right) \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd,ef} \cdot \left( \frac{1}{u_1 \cdot d} \right) \cdot \sin \left( \frac{\alpha \cdot \pi}{180} \right) = 3.298 \text{ MPa}$$

Skaičiuotinė praspaudžiamoji galia ties skersine armatūra:

$$V_{Rd.cs} := \frac{v_{Rd.cs} \cdot u_1 \cdot d}{\beta} = 4.126 \text{ MN}$$

Didžiausia praspaudžiamosios galios vertė:

$$v_{Rd,max} := k_{max} \cdot v_{Rd.c} = 1.87 \text{ MPa}$$

Didžiausia galima laikomoji galia:

$$V_{Rd,max} := \frac{v_{Rd,max} \cdot u_1 \cdot d}{\beta} = 2.339 \text{ MN}$$

Praspaudimo laikomoji galia išoriniame perimetre:

$$V_{Rd,out} := \frac{v_{Rd.c} \cdot u_{out} \cdot d}{\beta} = 3.543 \text{ MN}$$

Praspaudimo laikomoji galia su skersiniu armavimu, silpniausioje dalyje:

$$V_{Rd.cs,EC2} := \min (V_{Rd.cs}, V_{Rd,max}, V_{Rd,out}) = 2.339 \text{ MN}$$

Tikrinamas skaičiavimo metodikos tikslumas:

$$\text{Patikra} := \frac{V_{Rd,Exp}}{V_{Rd.cs,EC2}} = 133.9\%$$

## PL9 bandinio praspaudimo laikomoji galia pagal SNIp 2.03.01-84

### 1. Pradiniai bandinio duomenys

Kolonos matmenys:

$$c := 340 \text{ mm}$$

Perdangos aukštis:

$$h_0 := 320 \text{ mm}$$

Charakteristinis betono stipris gniuždant:

$$R_{b,n} := 32.1 \text{ MPa}$$

Betono dalinis patikimumo koeficientas:

$$\gamma_b := 1 \quad (\text{koeficiento reikšmė pakeista})$$

Betono dalinis patikimumo koeficientas:

$$\gamma_{bt} := 1 \quad (\text{koeficiento reikšmė pakeista})$$

Skaičiuotinis betono stipris gniuždant:

$$R_b := \frac{R_{b,n}}{\gamma_b} = 32.1 \text{ MPa}$$

Charakteristinis betono tempiamasis stipris:

$$R_{bt,n} := 0.23 \cdot R_{b,n}^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{3}} = 2.323 \text{ MPa}$$

Skaičiuotinis betono tempiamasis stipris:

$$R_{bt} := \frac{R_{bt,n}}{\gamma_{bt}} = 2.323 \text{ MPa}$$

Efektyvusis perdangos plokštės aukštis:

$$d := 266 \text{ mm}$$

Jėga prie kurios įvyko suirimas:

$$V_{Rd,Exp} := 3.132 \text{ MN}$$

### 2. Laikomoji galia praspaudimui, be skersinio armavimo

Pagrindinis tikrinamasis perimetras:

$$u_m := 4 \cdot (d + c) = 2.424 \text{ m}$$

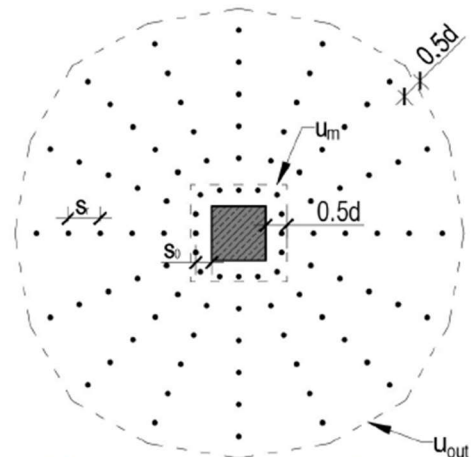
Kolonos perimetras:

$$u_0 := 4 \cdot c = 1.36 \text{ m}$$

Koeficientas:  $\alpha := 1$  (normalaus svorio betonui)

Perdangos plokštės stiprumas praspaudimui:

$$F_{Rd,c} := \alpha \cdot R_{bt} \cdot u_m \cdot d = 1.498 \text{ MN}$$



Tikrinamieji perimetrai ir skersinės armatūros išdėliojimas

### 3. Laikomoji galia su skersiniu armavimu

Skersinės armatūros skersmuo:

$$\varnothing_{sw} := 18 \text{ mm}$$

Armatūros kiekis viename perimetre:

$$m := 16$$

Skersinės armatūros perimetrų skaičius aplink koloną:

$$n := 6$$

Vieno perimetro aplink koloną skersinės armatūros plotas:

$$A_{sw} := m \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing_{sw}^2}{4} = (4.072 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

Spindulinis tarpas tarp skersinės armatūros perimetrų:

$$s_r := 200 \text{ mm}$$

Tarpas tarp skersinės armatūros ir kolonos:

$$s_0 := 100 \text{ mm}$$

Išorinis tikrinamasis perimetras:

$$u_{out} := 8985 \text{ mm}$$

Charakteristinis skersinės armatūros stipris tempiant:

$$R_s := 516 \text{ MPa}$$

Armatūros dalinis patikimumo koef.:

$$\gamma_s := 1 \quad (\text{koeficiento reikšmė pakeista})$$

Koeficientas įvertinantis netolygų įtempių pasiskirstymą skersinėje armatūroje:

$$\gamma_{s1} := 0.8$$

Skersinės armatūros stipris tempiant (nemažesnis kaip A-I armatūros klasės):

$$R_{sw} := \min \left( 175 \text{ MPa}, \gamma_{sl} \cdot \frac{R_s}{\gamma_s} \right) = 175 \text{ MPa}$$

Patikrinimas kiek perimetrų armatūros patenka į tikrinamąjį perimetrą:

$$n_c := \frac{0.5 \cdot d - s_0}{s_r} + 1 = 1.165 \quad \text{priimama, kad } n_c := 1$$

Skersinės armatūros indelis į laikomąją galią praspaudimui:

$$F_{sw} := \max (n_c \cdot R_{sw} \cdot A_{sw}, 0.5 \cdot F_{Rd,c}) = 0.749 \text{ MN}$$

Skaičiuotinė praspaudžiamoji galia ties skersine armatūra:

$$F_{Rd,cs} := F_{Rd,c} + 0.8 \cdot F_{sw} = 2.097 \text{ MN}$$

Didžiausia galima laikomoji galia su skersiniu armavimu:

$$F_{Rd,max} := 2 \cdot F_{Rd,c} = 2.996 \text{ MN}$$

Praspaudimo laikomoji galia išoriniame perimetre:

$$F_{Rd,out} := \alpha \cdot R_{bt} \cdot u_{out} \cdot d = 5.552 \text{ MN}$$

Praspaudimo laikomoji galia su skersiniu armavimu, silpniausioje dalyje:

$$F_{Rd,cs.SNiP} := \min (F_{Rd,cs}, F_{Rd,max}, F_{Rd,out}) = 2.097 \text{ MN}$$

$$V_{Rd,cs.SNiP} := F_{Rd,cs.SNiP}$$

Tikrinamas skaičiavimo metodikos tikslumas:

$$Patikra := \frac{V_{Rd,Exp}}{V_{Rd,cs.SNiP}} = 149.4\%$$

## PL9 bandinio praspaudimo laikomoji galia pagal DIN 1045

### 1. Pradiniai bandinio duomenys

|  |  |
|--|--|
| Kolonos matmenys:                          | $c := 340 \text{ mm}$                                  |
| Perdangos aukštis:                         | $h := 320 \text{ mm}$                                  |
| Charakteristinis betono stipris gniuždant: | $f_{ck} := 32.1 \text{ MPa}$                           |
| Betono dalinis patikimumo koeficientas:    | $\gamma_c := 1$ (koeficiento reikšmė pakeista)         |
| Skaičiuotinis betono stipris gniuždant:    | $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 32.1 \text{ MPa}$ |
| Efektyvusis perdangos plokštės aukštis:    | $d := 266 \text{ mm}$                                  |
| Plokštės armavimo koeficientas:            | $\rho_l := 1.59\%$                                     |
| Jėga prie kurios įvyko suirimas:           | $V_{Rd,Exp} := 3.132 \text{ MN}$                       |

### 2. Laikomoji galia praspaudimui, be skersinio armavimo

Apkrovos padidėjimo koeficientas:  $\beta := 1$  (koeficiento reikšmė pakeista)

Pagrindinis tikrinamasis perimetras:

$$u_l := 2 \cdot \pi \cdot 1.5 \cdot d + 4 \cdot c = 3.867 \text{ m}$$

Kolonos perimetras:

$$u_0 := 4 \cdot c = 1.36 \text{ m}$$

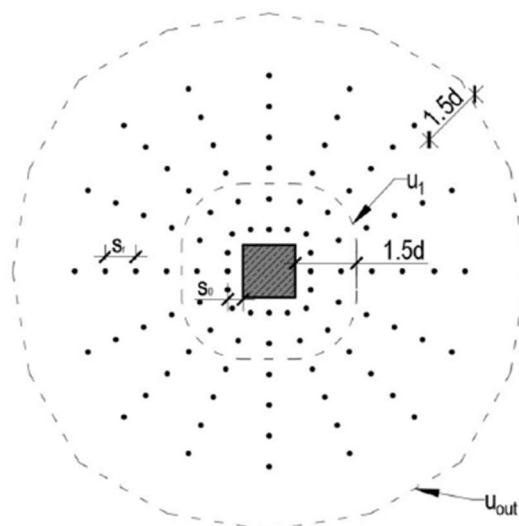
Koeficientai:

$$C_{Rd,c} := \begin{cases} \text{if } \frac{u_0}{d} < 4 \\ \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot \left(0.1 \cdot \frac{u_0}{d} + 0.6\right) \\ \text{else} \\ \frac{0.18}{\gamma_c} \end{cases} = 0.18$$

$$k := \min \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \cdot \frac{1}{\text{mm}}, 2 \right) = 1.867$$

Praspaudžiamoji jėga kurią atlaiko perdangos plokštė pavojingame pjūvyje:

$$v_{Rd,c.1} := C_{Rd,c} \cdot k \cdot \left( 100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa}^{\frac{2}{3}} = 1.247 \text{ MPa}$$



Tikrinamieji perimetrai ir skersinės armatūros išdėliojimas

$$v_{Rd.c.min} := \begin{cases} \text{if } d \leq 600 \text{ mm} \\ \left| \frac{0.0375}{\gamma_c} k^2 \cdot f_{ck}^{\frac{3}{2}} \cdot MPa^{\frac{1}{2}} \right| = 0.542 \text{ MPa} \\ \text{else} \\ \text{if } d > 800 \text{ mm} \\ \left| \frac{0.0525}{\gamma_c} k^2 \cdot f_{ck}^{\frac{3}{2}} \cdot MPa^{\frac{1}{2}} \right| = 0.759 \text{ MPa} \\ \text{else} \\ \left| \text{"INTERPOLIUOTI"} \right| \end{cases}$$

$$v_{Rd.c} := \max(v_{Rd.c.1}, v_{Rd.c.min}) = 1.247 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd.c.DIN} := \frac{v_{Rd.c} \cdot u_1 \cdot d}{\beta} = 1.282 \text{ MN}$$

### 3. Laikomoji galia su skersiniu armavimu

Skersinės armatūros skersmuo:  $\varnothing_{sw} := 18 \text{ mm}$   
 Armatūros kiekis viename perimetre:  $m := 16$   
 Skersinės armatūros perimetrų skaičius aplink koloną:  $n := 6$   
 Kampas tarp skersinės armatūros ir plokštės plokštumos:  $\alpha := 90$

Vieno perimetro aplink koloną skersinės armatūros plotas:  $A_{sw} := m \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing_{sw}^2}{4} = (4.072 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$

Spindulinis tarpas tarp skersinės armatūros perimetrų:  $s_r := 200 \text{ mm}$   
 Tarpas tarp skersinės armatūros ir kolonos:  $s_0 := 100 \text{ mm}$   
 Išorinis tikrinamasis perimetras:  $u_{out} := 10683 \text{ mm}$   
 Charakteristinis skersinės armatūros stipris tempiant:  $f_{ywk} := 516 \text{ MPa}$   
 Armatūros dalinis patikimumo koef.:  $\gamma_s := 1$  (koeficiento reikšmė pakeista)  
 Maksimalios laikomosios galios koef.:  $k_{max} := 1.4$

Skaičiuotinis armatūros stipris tempiant:  $f_{ywd} := \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} = 516 \text{ MPa}$

Skersinės armatūros efektyvusis skaičiuotinis praspaudžiamasis stipris:

$$f_{ywd.ef} := \min\left(1.15 \cdot \left(250 + 0.25 \cdot \frac{d}{\text{mm}}\right) \cdot MPa, f_{ywd}\right) = 363.975 \text{ MPa} \quad (\text{pataisyta formulė})$$

Skaičiuotinė praspaudžiamoji galia su skersine armatūra:

$$v_{Rd.cs} := 0.75 \cdot v_{Rd.c} + 1.5 \cdot \left(\frac{d}{s_r}\right) \cdot \left(\frac{1}{u_1 \cdot d}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd.ef} \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) = 3.809 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd.cs} := \frac{v_{Rd.cs} \cdot u_1 \cdot d}{\beta} = 3.918 \text{ MN}$$



Didžiausia praspaudžiamosios galios vertė:

$$v_{Rd,max} := k_{max} \cdot v_{Rd,c} = 1.745 \text{ MPa}$$

Didžiausia galima laikomoji galia:

$$V_{Rd,max} := \frac{v_{Rd,max} \cdot u_l \cdot d}{\beta} = 1.795 \text{ MN}$$

Praspaudimo laikomoji galia išoriniame perimetre:

$$V_{Rd,out} := \frac{v_{Rd,c} \cdot u_{out} \cdot d}{\beta} = 3.543 \text{ MN}$$

Praspaudimo laikomoji galia su skersiniu armavimu, silpniausioje dalyje:

$$V_{Rd.cs,DIN} := \min(V_{Rd.cs}, V_{Rd,max}, V_{Rd,out}) = 1.795 \text{ MN}$$

Tikrinamas skaičiavimo metodikos tikslumas:

$$Patikra := \frac{V_{Rd,Exp}}{V_{Rd.cs,DIN}} = 174.5\%$$

## PL9 bandinio praspaudimo laikomoji galia pagal BS 8110

### 1. Pradiniai bandinio duomenys

|  |  |
|--|--|
| Kolonos matmenys:                          | $c := 340 \text{ mm}$                          |
| Perdangos aukštis:                         | $h := 320 \text{ mm}$                          |
| Charakteristinis betono stipris gniuždant: | $f_{ck} := 32.1 \text{ MPa}$                   |
| Betono dalinis patikimumo koeficientas:    | $\gamma_m := 1$ (koeficiento reikšmė pakeista) |
| Efektyvusis perdangos plokštės aukštis:    | $d := 266 \text{ mm}$                          |
| Plokštės armavimo koeficientas:            | $\rho_l := 1.59\%$                             |
| Jėga prie kurios įvyko suirimas:           | $V_{Rd,Exp} := 3.132 \text{ MN}$               |

### 2. Laikomoji galia praspaudimui, be skersinio armavimo

Apkrovos padidėjimo koeficientas:

$$\beta := 1 \quad (\text{koeficiento reikšmė pakeista})$$

Pagrindinis tikrinamasis perimetras:

$$u_l := 8 \cdot 1.5 \cdot d + 4 \cdot c = 4.552 \text{ m}$$

Kolonos perimetras:

$$u_0 := 4 \cdot c = 1.36 \text{ m}$$

Praspaudžiamoji jėga kurią atlaiko perdangos plokštė pavojingame pjūvyje:

$$v_{Rd,c.1} := 0.79 \cdot (100 \cdot \rho_l)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa}^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{400 \text{ mm}}{d}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{25}\right)^{\frac{1}{3}} = 1.11 \text{ MPa}$$

$$v_{Rd,c.min} := 0.8 \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ MPa}^{\frac{1}{2}} = 4.533 \text{ MPa}$$

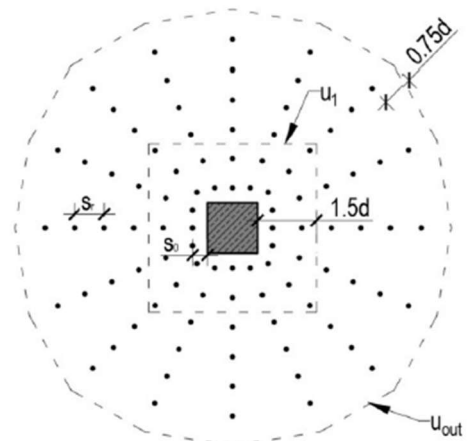
$$v_{Rd,c} := \min(v_{Rd,c.1}, v_{Rd,c.min}, 5 \text{ MPa}) = 1.11 \text{ MPa}$$

Tikrinamos sąlygos:

$$\text{Patikra1} := \begin{cases} \text{if } 100 \cdot \rho_l \leq 3 \\ \quad \parallel \text{ "Sąlygą tenkina" } \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Sąlygos netenkina" } \end{cases} = \text{"Sąlygą tenkina"}$$

(Atliekant skaičiavimus į šiuos ribojimus nebuvo atsižvelgiama)

$$\text{Patikra2} := \begin{cases} \text{if } \frac{400 \text{ mm}}{d} \geq 1 \\ \quad \parallel \text{ "Sąlygą tenkina" } \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Sąlygos netenkina" } \end{cases} = \text{"Sąlygą tenkina"}$$



Tikrinamieji perimetrai ir skersinės armatūros išdėliojimas

Perdangos plokštės stiprumas praspaudimui:

$$V_{Rd.c.BS} := v_{Rd.c} \cdot u_1 \cdot d = 1.344 \text{ MN}$$

### 3. Laikomoji galia su skersiniu armavimu

Skersinės armatūros skersmuo:  $\varnothing_{sw} := 18 \text{ mm}$

Armatūros kiekis viename perimetre:  $m := 16$

Skersinės armatūros perimetrų skaičius aplink koloną:  $n := 6$

Kampas tarp skersinės armatūros ir plokštės plokštumos:  $\alpha := 90$

Vieno perimetro aplink koloną skersinės armatūros plotas:  $A_{sw} := m \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing_{sw}^2}{4} = (4.072 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$

Spindulinis tarpas tarp skersinės armatūros perimetrų:  $s_r := 200 \text{ mm}$

Tarpas tarp skersinės armatūros ir kolonos:  $s_o := 100 \text{ mm}$

Išorinis tikrinamasis perimetras:  $u_{out} := 9410 \text{ mm}$

Charakteristinis skersinės armatūros stipris tempiant:  $f_{ywk} := 516 \text{ MPa}$

Armatūros dalinis patikimumo koef.:  $\gamma_s := 1$  (koeficiento reikšmė pakeista)

Maksimalios laikomosios galios koef.:  $k_{max} := 2$

Skaičiuotinis armatūros stipris tempiant:  $f_{ywd} := \min\left(460 \text{ MPa}, \frac{f_{ywk}}{\gamma_s}\right) = 460 \text{ MPa}$

Praspaudimo galia:

$$v := \frac{V_{Rd.Exp} \cdot \beta}{u_1 \cdot d} = 2.587 \text{ MPa}$$

$$x := \max\left(A_{sw} \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right), \frac{0.4 \cdot u_1 \cdot d}{0.95 \cdot f_{ywd}} \cdot \text{MPa}\right) = (4.072 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

Skaičiuotinė praspaudžiamoji galia su skersine armatūra, kai  $v \leq 1.6 \cdot v_{Rd.c}$ :

$$v_{Rd.cs.1} := v_{Rd.c} + 0.95 \cdot \left(\frac{1}{u_1 \cdot d}\right) \cdot f_{ywd} \cdot x = 2.579 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd.cs.1} := \frac{v_{Rd.cs.1} \cdot u_1 \cdot d}{\beta} = (3.123 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Skaičiuotinė praspaudžiamoji galia su skersine armatūra, kai  $1.6 \cdot v_{Rd.c} \leq v \leq 2 \cdot v_{Rd.c}$ :

$$v_{Rd.cs.2} := \frac{1}{0.7} \cdot \left(v_{Rd.c} + 0.95 \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot u_1 \cdot d}\right) \cdot x \cdot f_{ywd}\right) = 2.005 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd.cs.2} := \frac{v_{Rd.cs.2} \cdot u_1 \cdot d}{\beta} = (2.428 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Kadangi  $v$  reikšmė buvo aukštesnė kaip  $2 \cdot v_{Rd.c}$ , todėl skaičiavimuose suirimas ties skersine armatūra neįvyks, o priklausys nuo gniuždomo spyrio stiprumo.

Didžiausia galima praspaudžiamoji galia su skersine armatūra:

$$v_{Rd.max} := k_{max} \cdot v_{Rd.c} = 2.22 \text{ MPa}$$

Didžiausia galima laikomoji galia:

$$V_{Rd.max} := \frac{v_{Rd.max} \cdot u_l \cdot d}{\beta} = 2.688 \text{ MN}$$

Praspaudimo laikomoji galia išoriniame perimetre:

$$V_{Rd.out} := \frac{v_{Rd.c} \cdot u_{out} \cdot d}{\beta} = 2.778 \text{ MN}$$

Praspaudimo laikomoji galia su skersiniu armavimu, silpniausioje dalyje:

$$V_{Rd.cs.BS} := \min(V_{Rd.max}, V_{Rd.out}) = 2.688 \text{ MN}$$

Tikrinamas skaičiavimo metodikos tikslumas:

$$Patikra := \frac{V_{Rd.Exp}}{V_{Rd.cs.BS}} = 116.5\%$$

## PL9 bandinio praspaudimo laikomoji galia pagal EOTA TR60

### 1. Pradiniai bandinio duomenys

|  |  |
|--|--|
| Kolonos matmenys:                          | $c := 340 \text{ mm}$                                  |
| Perdangos aukštis:                         | $h := 320 \text{ mm}$                                  |
| Charakteristinis betono stipris gniuždant: | $f_{ck} := 32.1 \text{ MPa}$                           |
| Betono dalinis patikimumo koeficientas:    | $\gamma_c := 1$ (koeficiento reikšmė pakeista)         |
| Skaičiuotinis betono stipris gniuždant:    | $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 32.1 \text{ MPa}$ |
| Efektyvusis perdangos plokštės aukštis:    | $d := 266 \text{ mm}$                                  |
| Plokštės armavimo koeficientas:            | $\rho_l := 1.59\%$                                     |
| Jėga prie kurios įvyko suirimas:           | $V_{Rd,Exp} := 3.132 \text{ MN}$                       |

### 2. Laikomoji galia praspaudimui, be skersinio armavimo

Apkrovos padidėjimo koeficientas:  $\beta := 1$  (koeficiento reikšmė pakeista)

Pagrindinis tikrinamasis perimetras:

$$u_l := 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d + 4 \cdot c = 4.703 \text{ m}$$

Kolonos perimetras:

$$u_0 := 4 \cdot c = 1.36 \text{ m}$$

Koeficientai:

$$k := \min \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{\frac{d}{\text{mm}}}}, 2 \right) = 1.867$$

$$C_{Rd,c} := \begin{cases} \text{if } \frac{u_0}{d} < 4 \\ \max \left( \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot \left( 0.1 \cdot \frac{u_0}{d} + 0.6 \right), \frac{0.15}{\gamma_c} \right) \\ \text{else} \\ \frac{0.18}{\gamma_c} \end{cases} = 0.18$$

Praspaudžiamoji jėga kurią atlaiko perdangos plokštė pavojingame pjūvyje:

$$v_{Rd,c,l} := C_{Rd,c} \cdot k \cdot \left( 100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa}^{\frac{2}{3}} = 1.247 \text{ MPa}$$

$$v_{Rd,c,min} := \begin{cases} \text{if } h \leq 600 \text{ mm} \\ \frac{0.0525}{\gamma_c} k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} \\ \text{else} \\ \frac{0.0375}{\gamma_c} k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} \end{cases} = 0.759 \text{ MPa}$$

$$v_{Rd.c} := \max(v_{Rd.c.1}, v_{Rd.c.min}) = 1.247 \text{ MPa}$$

Perdangos plokštės stiprumas praspaudimui:

$$V_{Rd.c} := \frac{v_{Rd.c} \cdot u_1 \cdot d}{\beta} = 1.559 \text{ MN}$$

### 3. Laikomoji galia su skersiniu armavimu

Skersinės armatūros skersmuo:

$$d_A := 18 \text{ mm}$$

Armatūros kiekis viename perimetre:

$$m := 16$$

Armatūros eilių skaičius patenkantis į C zoną:

$$m_c := m = 16$$

Skersinės armatūros perimetrų skaičius aplink koloną:

$$n := 6$$

Spindulinis tarpas tarp skersinės armatūros perimetrų:

$$s_r := 200 \text{ mm}$$

Tarpas tarp skersinės armatūros ir kolonos:

$$s_0 := 100 \text{ mm}$$

Charakteristinis skersinės armatūros stipris tempiant:

$$f_{ywk} := 516 \text{ MPa}$$

Armatūros dalinis patikimumo koef.:

$$\gamma_s := 1 \quad (\text{koeficiento reikšmė pakeista})$$

Maksimalios laikomosios galios koef.:

$$k_{max} := 1.96$$

Skaičiuotinis armatūros stipris tempiant:

$$f_{ywd} := \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} = 516 \text{ MPa}$$

Skersinės armatūros perimetrų skaičius aplink kolona patenkančių į C zoną:

$$n_c := 1 + \frac{1.125 \cdot d}{s_0 + s_r} = 1.998 \quad \text{Priimama, kad į C zoną patenka: } n_c := 2$$

Koeficientas įvertinantis darbo aukščio įtaką:

$$\eta := \begin{cases} 1 & \text{if } d \leq 200 \text{ mm} \\ \text{else} \\ \begin{cases} 1.6 & \text{if } d \geq 800 \text{ mm} \\ \text{else} \\ 1 + 0.001 \cdot \left( \frac{d}{\text{mm}} - 200 \right) \end{cases} \end{cases} = 1.066$$

Skaičiuotinė praspaudžiamoji galia C zonoje ties skersine armatūra:

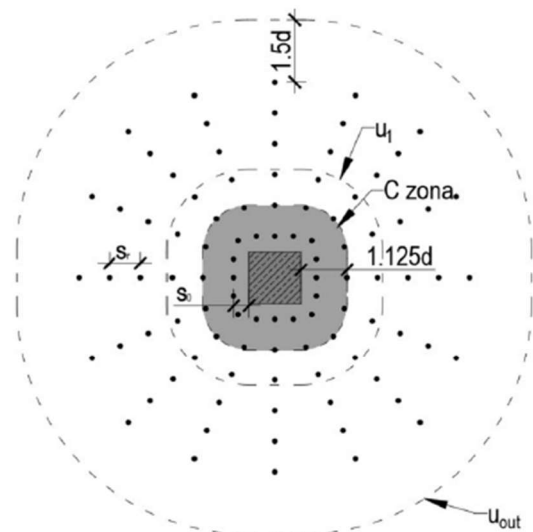
$$V_{Rd.cs} := n_c \cdot m_c \cdot \frac{d_A^2 \cdot \pi \cdot f_{ywk}}{4 \cdot \gamma_s \cdot \eta} = 3.942 \text{ MN}$$

Didžiausia praspaudžiamosios galios vertė:

$$v_{Rd.max} := k_{max} \cdot v_{Rd.c} = 2.443 \text{ MPa}$$

Didžiausia galima laikomoji galia:

$$V_{Rd.max} := v_{Rd.max} \cdot u_1 \cdot d = 3.056 \text{ MN}$$



Tikrinamieji perimetrai ir skersinės armatūros išdėliojimas

Atstumas nuo kolonos krašto iki tolimiausio armatūros strypo:

$$l_s := s_0 + (n-1) \cdot s_r = 1.1 \text{ m}$$

Pakoreguota  $\beta_{red}$  vertė išorinio perimetro skaičiavimui

$$\beta_{red} := \text{if } \frac{\beta}{1.2 + \frac{\beta}{15} \cdot \frac{l_s}{d}} \leq 1.15 = 1.15 \quad \beta_{red} := 1 \quad (\text{koeficiento reikšmė pakeista})$$

$$\left. \begin{array}{l} \parallel 1.15 \\ \text{else} \\ \parallel \frac{\beta}{1.2 + \frac{\beta}{15} \cdot \frac{l_s}{d}} \end{array} \right|$$

Išorinis tikrinamasis perimetras:

$$u_{out} := 2 \cdot \pi \cdot (l_s + 1.5 d) + 4 \cdot c = 10.778 \text{ m}$$

Praspaudimo laikomoji galia išoriniame perimetre:

$$V_{Rd.out} := \frac{v_{Rd.c} \cdot u_{out} \cdot d}{\beta_{red}} = 3.574 \text{ MN}$$

Praspaudimo laikomoji galia su skersiniu armavimu, silpniausioje dalyje:

$$V_{Rd.cs.EOTA} := \min(V_{Rd.cs}, V_{Rd.max}, V_{Rd.out}) = 3.056 \text{ MN}$$

Tikrinamas skaičiavimo metodikos tikslumas:

$$Patikra := \frac{V_{Rd.Exp}}{V_{Rd.cs.EOTA}} = 102.5\%$$

## PL9 bandinio praspaudimo laikomoji galia pagal ACI 318-08

### 1. Pradiniai bandinio duomenys

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| Kolonos matmenys:                          | $c := 340 \text{ mm}$            |
| Perdangos aukštis:                         | $h := 320 \text{ mm}$            |
| Charakteristinis betono stipris gniuždant: | $f_{ck} := 32.1 \text{ MPa}$     |
| Efektyvusis perdangos plokštės aukštis:    | $d := 266 \text{ mm}$            |
| Plokštės armavimo koeficientas:            | $\rho_l := 1.59\%$               |
| Jėga prie kurios įvyko suirimas:           | $V_{Rd,Exp} := 3.132 \text{ MN}$ |

### 2. Laikomoji galia praspaudimui, be skersinio armavimo

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Betono modifikacijos koeficientas:                          | $\lambda := 1$                   |
| Koeficientas priklausantis nuo kolonos padėties perdangoje: | $\alpha_s := 40$ (vidinė kolona) |
| koeficientas įvertinantis kolonos kraštinių santykį:        | $\beta := 1$                     |

Pagrindinis tikrinamasis perimetras:

$$b_0 := 4 \cdot (d + c) = 2.424 \text{ m}$$

Kolonos perimetras:

$$u_0 := 4 \cdot c = 1.36 \text{ m}$$

Praspaudžiamoji jėga kurią atlaiko perdangos plokštė pavojingame pjūvyje:

$$V_{Rd,c.1} := \frac{1}{3} \cdot b_0 \cdot d \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} = 1.218 \text{ MN}$$

$$V_{Rd,c.2} := 0.17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot b_0 \cdot d \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} = 1.863 \text{ MN}$$

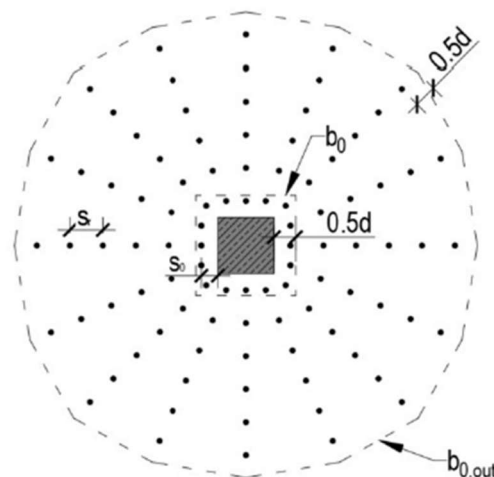
$$V_{Rd,c.3} := 0.083 \cdot \left(2 + \frac{\alpha_s \cdot d}{b_0}\right) \cdot b_0 \cdot d \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} = 1.937 \text{ MN}$$

$$V_{Rd,c.ACI} := \min(V_{Rd,c.1}, V_{Rd,c.2}, V_{Rd,c.3}) = 1.218 \text{ MN}$$

### 3. Laikomoji galia su skersiniu armavimu

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Skersinės armatūros skersmuo:                         | $\varnothing_{sw} := 18 \text{ mm}$ |
| Armatūros kiekis viename perimetre:                   | $m := 16$                           |
| Skersinės armatūros perimetrų skaičius aplink koloną: | $n := 6$                            |

Vieno perimetro aplink koloną skersinės armatūros plotas:  $A_{sw} := m \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing_{sw}^2}{4} = (4.072 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$



Tikrinamieji perimetrai ir skersinės armatūros išdėliojimas



|  |  |
|--|--|
| Spindulinis tarpas tarp skersinės armatūros perimetrų:   | $s_r := 200 \text{ mm}$                    |
| Tarpas tarp skersinės armatūros ir kolonos:              | $s_0 := 100 \text{ mm}$                    |
| Išorinis tikrinamasis perimetras:                        | $b_{0,out} := 8985 \text{ mm}$             |
| Charakteristinis skersinės armatūros stipris tempiant:   | $f_{ywk} := 516 \text{ MPa}$               |
| Praspaudimo laikomosios galios mažinamasis koeficientas: | $\Phi := 1$ (koeficiento reikšmė pakeista) |

Betono stiprumas kai naudojami armatūros strypai su galvutėmis abejuose galuose:

$$v_{Rd.c.hd} := 0.25 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} = 1.416 \text{ MPa}$$

Skersinės armatūros stiprumas:

$$v_s := \frac{A_{sw} \cdot f_{ywk}}{b_0 \cdot s_r} = 4.334 \text{ MPa}$$

$$Patikra := \text{if } \frac{A_{sw}}{s_r} \geq 0.17 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}} \cdot b_0}{f_{ywk}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} = \text{“Sąlygą tenkina”}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{“Sąlygą tenkina”} \\ \text{else} \\ \text{“Sąlygos netenkina”} \end{array} \right\}$$

Skaičiuotinė praspaudžiamoji galia naudojant armatūros strypus su galvutėmis abejuose galuose:

$$v_{u.hd} := v_{Rd.c.hd} + v_s = 5.75 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd.hd} := v_{u.hd} \cdot b_0 \cdot d = 3.707 \text{ MN}$$

Didžiausia galima laikomoji galia naudojant armatūros strypus su galvutėmis abejuose galuose:

$$V_{Rd.hd,max} := \Phi \cdot \frac{2}{3} \cdot b_0 \cdot d \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} = 2.435 \text{ MN}$$

Laikomoji gali išoriniame perimetre:

$$V_{Rd.out} := 0.17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_{0,out} \cdot d \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} = 2.302 \text{ MN}$$

Laikomoji galia praspaudimui naudojant armatūros strypus su galvutėmis abejuose galuose:

$$V_{Rd.cs.ACI} := \min(V_{Rd.hd}, V_{Rd.hd,max}, V_{Rd.out}) = 2.302 \text{ MN}$$

Stefan Lips atliktame tyrime buvo nagrinėjamos perdangos plokštės kuriose suirimas galėjo įvykti tik ties gniuždomu spyriu ( $V_{Rd.hd,max}$ ) arba ties skersinė armatūra ( $V_{Rd.hd}$ ), todėl priimama, kad suirimas įvyko ties betonu.  $V_{Rd.cs.ACI} := V_{Rd.hd,max} = 2.435 \text{ MN}$

Tikrinamas skaičiavimo metodikos tikslumas:

$$Patikra := \frac{V_{Rd.Exp}}{V_{Rd.cs.ACI}} = 128.6\%$$