



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Gvidas Bitinas

**IŠ ANKSTO ĮTEMPŲ TRIJŲ IR SEPTYNIŲ VIJŲ LYNŲ ĮTEMPIŲ
PERDAVIMO ILGIO BETONE ANALIZĖ**
**ANALYSIS OF TRANSFER LENGTH OF THREE WIRE AND SEVEN WIRE
STRANDS IN PRESTRESSED CONCRETE**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Gvidas Bitinas

IŠ ANKSTO ĮTEMPŲ TRIJŲ IR SEPTYNIŲ VIJŲ LYNŲ ĮTEMPIŲ
PERDAVIMO ILGIO BETONE ANALIZĖ
ANALYSIS OF TRANSFER LENGTH OF THREE WIRE AND SEVEN WIRE
STRANDS IN PRESTRESSED CONCRETE

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programos, valstybinis kodas 6211EX040

Pastatų konstrukcijų specializacijos

Statybos inžinerijos 02T studijų (mokslo) kryptis

Vadovas

dr. lekt. Aidas Joksėkaitis 2019-06-03
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Nina Gutkūnė 2019-06-03
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Technologijos mokslų sritis
Statybos inžinerijos studijų kryptis
Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001
Pastatų konstrukcijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas


(parašas)

Juozas Valivonis
(vardas, pavardė)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

Nr.
Vilnius

Studentui (ei) Gvidui Bitinui

(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema „Iš anksto įtemptų trijų ir septynių vijų lynų įtempių perdavimo ilgio betone analizė”

patvirtinta 2019 m. kovo 12 d. dekanų įsakymu Nr. 105ST


Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. gegužės 27 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS: baigiamajame magistro darbe atlikti iš anksto įtemptų plieninių lynų sukibies ir įtempių perdavimo ilgio literatūros apžvalgą. Nustatyti faktorius labiausiai lemiančius įtempių perdavimo ilgį, išanalizuoti ir pateikti galiojančių projektavimo normų bei kitų autorių pasiūlytus įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo metodus ir surinkti plieninių lynų įtempių perdavimo ilgio eksperimentinę duomenų bazę. Atlikti surinktų eksperimentinių duomenų ir teorinių skaičiavimo metodų palyginamąją analizę. Atlikti trijų ir septynių vijų plieninių lynų įtempių perdavimo ilgio ir slinkties eksperimentinius tyrimus. Pateikti atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatų analizę bei palyginti juos su teoriniais skaičiavimais. Atlikti projektavimo normose pateiktų plieninių lynų sukibtį, armatūros tipą ir įtempių perdavimo ilgį aprašančių koeficientų kalibravimą remiantis gautais eksperimentiniais rezultatais.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

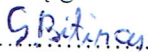
Vadovas


(parašas)

..... dr. Aidis Jokūbaitis

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Užduotį gavau


.....
(parašas)

Gvidas Bitinas
(vardas, pavardė)

2017-09-28
(data)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Gvidas Bitinas, 20132390

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, PKfm-17

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2019 m. birželio 03 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Iš anksto įtemptų trijų ir septynių vijų lynų įtempių perdavimo ilgio betone analizė“ patvirtintas 2019 m. kovo 12 d. dekanų potvarkiu Nr. 105st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Lina Rutkienė. Mano darbo vadovas daktaras Aidas Jokūbaitis.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

G. Bitinas

(Parašas)

Gvidas Bitinas

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Iš anksto įtemptų trijų ir septynių vijų lynų įtempių perdavimo ilgio betone analizė**

Autorius **Gvidas Bitinas**

Vadovas **Aidas Jokūbaitis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Skaičiuojant įtempių perdavimo ilgį pagal Europos Sąjungos projektavimo normų nurodymus, armatūros skerspjūvis išskiriamas į: apvalius strypus bei lynus iš trijų ir septynių vijų. Projektavimo normose neišskiriami trijų ir septynių vijų lynai skirtingais koeficientais, todėl darbo tikslas: nustatyti, kokia armatūrinio lyno skerspjūvio formos įtaka įtempių perdavimo ilgiui.

Baigiamasis darbas sudarytas iš trijų dalių: įtempių perdavimo ilgį lemiančių veiksnių analizė bei literatūroje randamų eksperimentinių tyrimų apžvalga, eksperimentinis tyrimas su trijų ir septynių vijų lynų bandiniais ir eksperimentinių bei teorinių rezultatų palyginimas. Pirmoje dalyje apžvelgtas teorinis betono ir armatūros sukibties mechanizmas, išnagrinėtos aktualios mokslinės publikacijos siekiant nustatyti įtempių perdavimo į betoną principus. Antroje dalyje aprašyta atlikto eksperimento metodika bei gauti rezultatai. Trečioje dalyje pagal eksperimentinius duomenis nustatomi teoriniams skaičiavimams reikalingi koeficientai, siekiant išryškinti trijų ir septynių vijų lynų skirtumus.

Darbą sudaro įvadas, trys pagrindinės dalys su poskyriais ir skyreliais, išvados, naudota literatūra. Darbo apimtis - 53 p. teksto bei priedų, 38 iliustr., 19 lent., 31 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedamas vienas darbo priedas.

Prasminiai žodžiai: įtempių perdavimo ilgis, trijų, septynių vijų lynai

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Analysis of transfer length of three wire and seven wire strands in prestressed concrete**

Author **Gvidas Bitinas**

Academic supervisor **Aidas Jokūbaitis**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

According to European design standards, there are circular reinforcement sections and tendons of three or seven wires considered in determination of transfer length of the prestressed concrete structures. Purpose of this Master's thesis is to determine what are the differences between three and seven wire strands in transfer length, since there is no distinction between those type of tendons according to design standards.

This thesis consists of three main chapters: analysis of factors affecting transfer length and a review of experimental studies found in the literature, experimental determination of transfer length using three and seven wire strands and a comparison of experimental and theoretical results. In the first chapter there is provided a review of concrete and reinforcement bond mechanism and analysis of various studies in order to clear the principles of stress transfer into concrete. Experimental study of transfer length using three and seven wire strands is provided in the second chapter and evaluation of various coefficients that may differ in three and seven wire tendons according to experimental results are provided in the third.

Thesis consists of introduction, three main chapters, conclusions and references. Overall 53 pages of text without appendix, 38 figures, 19 tables and 31 references. Appendix A is added separately.

Keywords: prestress transfer length, three, seven wire strands

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS.....	10
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	11
1.1. Armatūros sukibties su betonu mechanizmas.....	11
1.2. Inkaravimo ilgis.....	15
1.2.1. Įtempių perdavimo ilgis	17
1.2.2. Papildomas inkaravimo ilgis.....	18
1.3. Faktoriai, lemiantys įtempių perdavimo ilgį	20
1.3.1. Euronormų išskiriami faktoriai.....	20
1.3.2. Kiti autorių minimi veiksniai.....	20
1.4. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo metodikos	22
1.4.1. Projektavimo normų metodikos.....	22
1.4.2. Įvairių autorių siūlomos metodikos.....	24
1.5. Įtempių perdavimo ilgio eksperimentinių tyrimų apžvalga.....	25
1.5.1. Įtempių perdavimo ilgio nustatymo metodai.....	25
1.5.2. Literatūroje randamų bandymų rezultatų analizė.....	29
2. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	34
2.1. Bandymo medžiagos ir schema	34
2.2. Bandymo eiga.....	35
2.3. Atlikto eksperimento rezultatai	38
3. EKSPERIMENTINIŲ IR TEORINIŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS	44
3.1. Įtempių perdavimo ilgio ir slinkties priklausomybė.....	44
3.2. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas pagal įvairias projektavimo normas	45
3.3. α koeficiento reikšmės nustatymas remiantis eksperimentų rezultatais	46
3.4. η_{p1} koeficiento reikšmės nustatymas	47
3.5. α_2 ir α_{p3} koeficientų reikšmių nustatymas	49
IŠVADOS	52
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	54
PRIEDAS	57

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Hoyerio efektas (Briere et al., 2012).....	12
1.2 pav. Plyšiai betone aplink lyną (Briere et al., 2012).....	13
1.3 pav. Mechaninio spraustelio armatūroje pavyzdys	13
1.4 pav. Mechaninio spraustelio pavyzdys: a) trijų ir b) septynių vijų lynuose	13
1.5 pav. Mechaninio spraustelio veikimo schema (Derkowski, Dyba, 2017)	14
1.6 pav. Principinė įstūmimo bandymo schema (Keuning et al., 1962)	14
1.7 pav. Sukibties įtempių – slinkties priklausomybė (Herrero et al., 2013).....	15
1.8 pav. Idealizuotas jėgos veikiančios lyno ir elemento ilgio grafikas.....	16
1.9. pav. Idealizuotas ašinių jėgų betone po išankstinio įtempimo grafikas.....	17
1.10. pav. Idealizuota įtemptosios armatūros lyno įtempių inkaravimo zonoje schema.....	19
1.11 pav. Deformacijų matavimo taškai (Staton et al., 2009).....	26
1.12 pav. Pavyzdinis deformacijų profilis (Oh, Kim, 2000).....	27
1.13 pav. Lyno slinkties nustatymo bandymas (Marti-Vargas et al., 2013)	28
1.14 pav. Tenzometrinis jutiklis (Qu, Li & Chen, 2018).....	28
1.15 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė.....	30
1.16 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė.....	30
1.17 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė.....	31
1.18 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė.....	31
1.19 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė.....	32
1.20 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė.....	32
2.1 pav. Trijų vijų bandinio schema	35
2.2 pav. Septynių vijų bandinio schema	35
2.3 pav. Bandymo schema	35
2.4 pav. Rėmai po įtempimo operacijos.....	36
2.5 pav. Įtempimo fiksavimas: a) vaizdas bendroje schemoje ir b) padidintas vaizdas.....	36
2.6 pav. Deformacijų matavimo taškai	37
2.7 pav. Slinkties matavimo jutikliai: a) vaizdas bendroje schemoje ir b) padidintas vaizdas	37
2.8 pav. Bandiniai įtempių atleidimo operacijos metu	38
2.9 pav. Bandinių su trijų vijų lynais deformacijų profilis	39
2.10 pav. Bandinių su septynių vijų lynais deformacijų profilis	39
2.11 pav. Visų bandinių deformacijų profiliai	40
2.12 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir armatūros skersmens santykio priklausomybė nuo betono gniuždomojo stiprio.....	41
2.13 pav. Bandinių su trijų vijų lynais slinkties nuo jėgos priklausomybė.....	41
2.14 pav. Bandinių su septynių vijų slinkties nuo jėgos priklausomybė	42
2.15 pav. Visų bandinių slinkties nuo jėgos priklausomybė.....	42
2.16 pav. Lynų skerspjūvių skersmuo ir perimetras	43

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Projektavimo normų metodikos	22
1.2 lentelė. 1.1 lentelėje pateiktų formulių nariai	23
1.3 lentelė. Įvairių autorių siūlytos metodikos.....	24
1.4 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo formulių nariai.....	25
2.1 lentelė. Armatūros mechaninės savybės	34
2.2 lentelė. Įtempimo jėgos ir nuostoliai.....	38
2.3 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio rezultatai.....	40
2.4 lentelė. Slinkties bandymo rezultatai	42
3.1 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas iš slinkties duomenų.....	44
3.2 lentelė. Susisteminti įtempių perdavimo ilgio skaičiavimai pagal LST EN 1992-1-1.....	45
3.3 lentelė. Susisteminti įtempių perdavimo ilgio skaičiavimai pagal MC 2010 normas.....	45
3.4 lentelė. Susisteminti įtempių perdavimo ilgio skaičiavimai pagal ACI318 normas	45
3.5 lentelė. Eksperimento rezultatų palyginimas su normomis	46
3.6 lentelė. Koeficiento α nustatymas	46
3.7 lentelė. ηp_1 koeficiento skaičiavimas LST EN 1992-1-1 normoms.....	47
3.8 lentelė. ηp_1 koeficiento skaičiavimas MC normoms	48
3.9 lentelė. α_2 koeficiento skaičiavimas.....	49
3.10 lentelė. αp_3 koeficiento skaičiavimas	50
3.11 lentelė. Rezultatų suvestinė.....	50
3.12 lentelė. Rezultatų vidurkiai	50
3.13 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas naudojant gautus koeficientus.....	51
3.14 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas naudojant gautus koeficientus.....	51

IVADAS

Armatūra su betonu turi būti tinkamai sukibusi, tik tuomet galioja priimtose gelžbetonio projektavimo taisyklės ir prielaidos. Siekiant tinkamai nuspėti gelžbetoninio elemento irties pobūdį, būtina suprasti armatūros sąveiką su ją supančiu betonu, žinoti ypatumus, nuo kurių priklauso plieno ir betono bendras darbas konstrukcijoje.

Inžineriniu požiūriu pagrindinis parametras, užtikrinantis bendrą betono ir armatūros darbą, – inkaravimo ilgis. Tai dydis, nusakantis, kokio ilgio armatūros dalis turi būti betone, kad sukibtis būtų užtikrinta ir konstrukcija būtų vientisa.

Iš anksto įtemptose konstrukcijose įtempių perdavimo ilgis – tai inkaravimo ilgio sudedamoji dalis, apibūdinanti, kokio ilgio atkarpoje išankstinio įtempimo jėga perduodama betonui.

Įtempių perdavimo ilgis susijęs su betono ir armatūros sukibties mechanizmu. Skirtingoms armatūros skerspjūvių formoms būdingi ir skirtingi sukibties mechanizmai. Europoje galiojančios projektavimo normos ignoruoja šiuos skirtumus, dažniausiai naudojamus trijų ir septynių vijų armatūrinius lynus skaičiavimuose vertina tais pačiais koeficientais. Nemažai mokslininkų (J. R. Marti-Vargas, N. H. Burns, A. T. Ramirez-Garcia, R. W. Barnes ir kt.), tyrinėję įtempių perdavimo ilgio ypatumus, taip pat neišskiria skirtingos skerspjūvio formos, pabrėžia kitus parametrus, pavyzdžiui, betono stiprumo charakteristikas ar išankstinės jėgos atleidimo pobūdį, bet šių dviejų populiariausių lynų tipų nesugretina.

Tinkamai išnagrinėjus skirtingą sukibties mechanizmą ir įvertinus tai įtempių perdavimo ilgio skaičiavimuose, pateiktuose projektavimo normose, būtų galima tiksliau projektuoti konstrukcijas.

Šiame darbe bus nagrinėjami įvairių autorių publikuoti įtempių perdavimo ilgio nustatymo eksperimentų bei atlikto eksperimento su bandiniais, armuotais trijų ir septynių vijų lynais, rezultatai. Iš mokslinės literatūros surinkti bei gauti eksperimentu, duomenys bus susisteminti ir analizuojami.

Baigiamojo magistro darbo tikslas – nustatyti, kokia armatūrinio lino skerspjūvio formos įtaka įtempių perdavimo ilgiui.

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

- Aptarti literatūroje randamas įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo metodikas.
- Apžvelgti publikuotus įtempių perdavimo ilgio nustatymo eksperimentus ir jų rezultatus.
- Atlikti eksperimentą su trijų ir septynių vijų lynais, nustatyti įtempių perdavimo ilgį ir slinktį.
- Palyginti eksperimentinius rezultatus su apskaičiuotaisiais pagal galiojančias projektavimo normas.
- Nustatyti, kokia vijų skaičiaus įtaka įtempių perdavimo ilgiui.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Šiame skyriuje glaustai apibūdinamas armatūros ir betono sukibties mechanizmas, apžvelgiamos inkaravimo ilgio bei įtempių perdavimo ilgio sąvokos, jų aktualumas projektuojant konstrukcijas. Aprašomi kitų autorių nagrinėti veiksniai, kurie yra svarbūs įtempių perdavimo ilgiui bei apžvelgiamos skirtingos skaičiavimo metodikos. Skyriaus antroje dalyje pateikiami įtempių perdavimo ilgio nustatymo eksperimentiniu būdu metodai ir literatūroje randami rezultatai.

1.1. Armatūros sukibties su betonu mechanizmas

Išankstinio įtempimo jėga suteikta armatūrai, į betoną perduodama per sukibtį. Kaip minėta C. Herrero, I. M. Lage 'o ir F. M. Abellos, *tam, kad tarp išorinių ir sukibties jėgų būtų pusiausvyra ir armatūrinis elementas betone būtų stabilus, turi galioti lygybė:*

$$d\sigma_p(x) \cdot A_p(x) - \tau(x) \cdot U(x)dx = 0, \quad (1)$$

čia $\sigma_p(x)$ – suteiktas išorinis įtempis;

$A_p(x)$ – lyno skerspjūvio plotas x pjūvyje;

$\tau(x)$ – sukibties įtempis x pjūvyje;

$U(x)$ – lyno perimetras x pjūvyje. (Herrero, Lage & Abella, 2013)

Bendruoju atveju sukibtis apibūdinama kaip įvairių faktorių rinkinys, apsaugantis kontakto zoną nuo suirimo. Svarbiausi faktoriai: adhezija, trinties jėgos, mechaninio sprauskelio reiškinys. Įtemptose konstrukcijose sukibtį papildomai padidina „Hoyerio“ efektas.

Adhezija

Adheziją gelžbetonyje apibūdina jėgos, veikiančios plieno – betono kontakto paviršiuje molekuliniam lygyje. Šias jėgas lemia sąveika, atsirandanti suartėjus susiliečiančių kūnų molekulėms, taip pat bendras pasipriešinimas dalelių judėjimui dėl mikroskopinio lygio armatūros ir cemento dalelių nelygumų. Adhezija efektyvi tik pačioje apkrovimo pradžioje, kai nėra susiformavę plyšiai kontakto zonoje. Palyginus su kitais veiksniais, adhezijos įtaka sukibties stipriui yra nedidelė, nes adhezijos veiksnys eliminuojamas atsiradus lyno praslydimui betono atžvilgiu. Svarbu paminėti, kad adhezinės savybės stiprėja, gerėjant betono stiprumo charakteristikoms.

Trintis

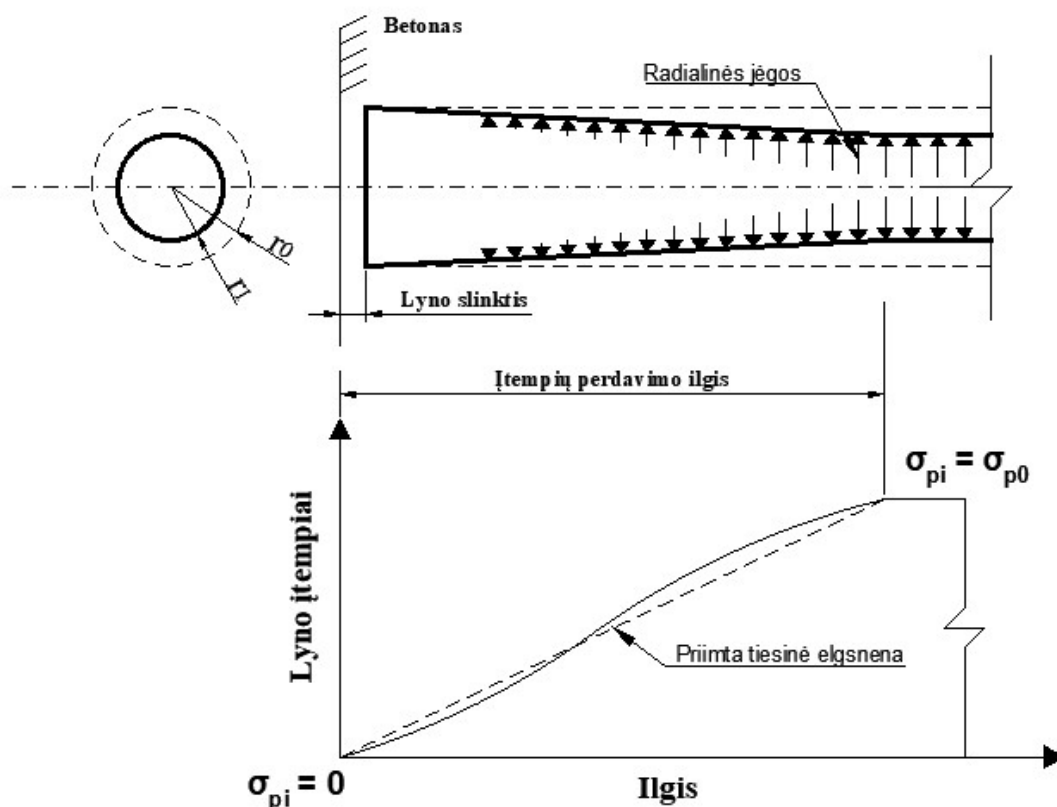
Trintis – tai jėga, nukreipta priešingai kūno judėjimo krypties. Įveikus adhezinės jėgas, trinties faktorius tampa labai svarbus betono – armatūros sukibčiai. Trinties sukibtis gerėja, didėjant gniuždomiesiems įtempiams armatūros ir betono kontakto vietoje. Literatūroje minimi keli šių įtempių atsiradimo šaltiniai, vienas jų paminėtas R. W. Barneso ir kt.: *Betono susitraukimo deformacijos lemia radialialinės krypties gniuždomuosius įtempius armatūroje. Toks apspaudimas stiprina trinties jėgą, kuri priešinasi elementų praslydimui vienas kito atžvilgiu* (Barnes, Grove &

Burns, 2003). Kitas faktorius, dėl kurio atsiranda gniuždomieji įtempiai radialine linkme, vadinamas Hoyerio efektu.

Hoyerio efektas

Skirtingai nei paprasto gelžbetonio atveju, iš anksto įtemptoje konstrukcijoje sukibties stiprį padidina Hoyerio efektas. Vykstant įtempimo procesui, lyno skerspjūvio plotas sumažėja dėl skersinių deformacijų. Jėgos atleidimo metu, ištemptas lynas ne tik trumpėja, taip apgniuždydamas betoną, bet ir lyno skerspjūvio formai būdingas pradinės formos atgavimas. Aplink sukietėjęs betonas suvaržo lyną nuo išsiplėtimo, todėl lyne atsiranda gniuždymo įtempiai skerspjūvio radialine kryptimi. Dėl to sustiprėja trinties jėga, kuri priešinasi plieno ir betono praslydimui. (Hoyer, Friedrich, 1939)

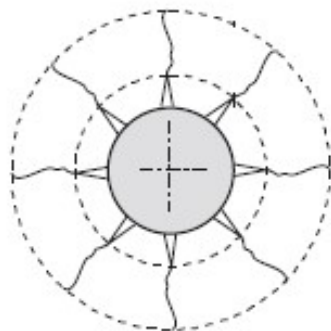
Šį efektą iliustruoja 1.1 paveikslas. Lyno skersmuo įtempių perdavimo zonoje kinta. Ties aktyviu gelžbetoninio elemento galu (ten, kur buvo suteiktas išankstinis įtempimas), perduodamos jėgos į betoną reikšmė lygi nuliui, ten lyno skersmuo grįžta į pradinį dydį. Ties įtempių perdavimo ilgio pabaiga sukibtis tarp betono ir armatūros neleidžia lynui deformuotis, lynas išlaiko maksimaliai deformuotą skerspjūvio formą, todėl nuo šios vietos Hoyerio efektas yra didžiausias. Įtempių perdavimo zonoje Hoyerio efekto įtaka sukibties stipriui didėja taip, kaip didėja perduodama jėga betonui.



1.1 pav. Hoyerio efektas (Briere et al., 2012)

V. Briere su bendraautoriais išskiria dar vieną Hoyerio efekto pasireiškimo formą, būdingą lynams: *lynams, sudarytiems iš kelių vijų, būdingas papildomas vijų tarpusavio apsigniuždymas įtempimo metu* (Briere et al., 2013). Analogiškai, kaip ir su skerspjūvio formos pasikeitimu dėl

skersinių deformacijų, atleidus lyną vijos viena kitos atžvilgiu atsilaisvina. Ši savybė yra taip pat priskiriama Hoyerio efektui, generuoja papildomas radialinės krypties jėgas, kurios sustiprina lyno ir betono sukibtį. Be to, išilgai lyno kintanti skerspjūvio forma suformuoja pleišto mechanizmą (žr. 1.1 pav.), kuris taip pat prisideda prie efektyvesnio įtempių perdavimo betonui. Verta paminėti, kad, esant nepakankamam apsauginiam sluoksniui ar tankiam lynų išdėstymui vienam šalia kito, yra rizika, kad atsiras radialiniai plyšiai dėl žiedine linkme atsiradusių tempimo jėgų betone (1.2 pav.).



1.2 pav. Plyšiai betone aplink lyną (Briere et al., 2012)

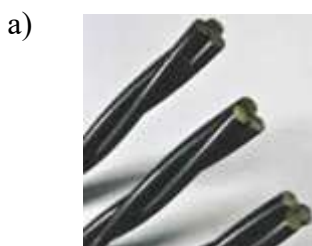
Tokie plyšiai silpnina įtempių perdavimo zoną, todėl būtina imtis konstrukcinių priemonių, tokių kaip visiško praslydimo zonų įvedimu, kad to būtų išvengta.

Mechaniniai sprausteliai

Mechaninė sukibtis atsiranda tuo metu, kai įveikiamos adhezijos ir trinties jėgos ir armatūrai atsiranda galimybė pasislinkti betono atžvilgiu. Mechaninė sukibtis užtikrinama armatūros strypuose formuojant rumbus (1.3 pav.), o lynuose – susukant vijas (1.4 pav.). Tokios formos palieka įspaudus aplink esančiame betone ir suformuoja spraustelius.

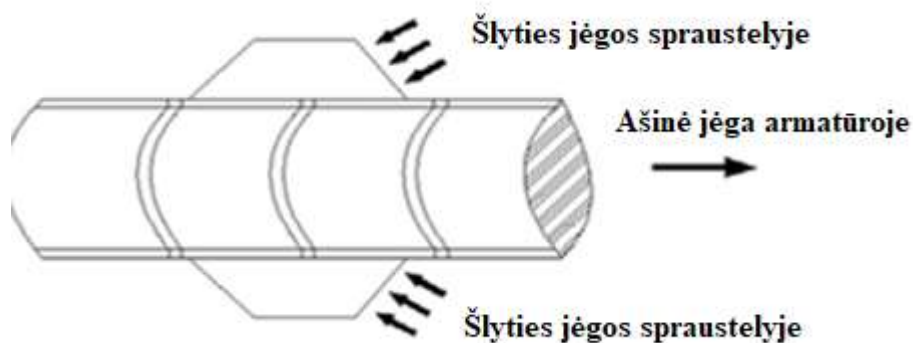


1.3 pav. Mechaninio spraustelio armatūroje pavyzdys („Ainscough Metals“, 2019)



1.4 pav. Mechaninio spraustelio pavyzdys: a) trijų ir b) septynių vijų lynuose („Concrete Welded Wire“, 2019)

Veikiant apkrovai, spraustelyje atsiranda šlyties jėgos (1.5 pav.). Pasiekus mazgo ribinius įtempius, betonas ties spraustelio vieta supleišėja, taip atsiranda praslydimas, kuris netrukus suvaržomas kito spraustelio.

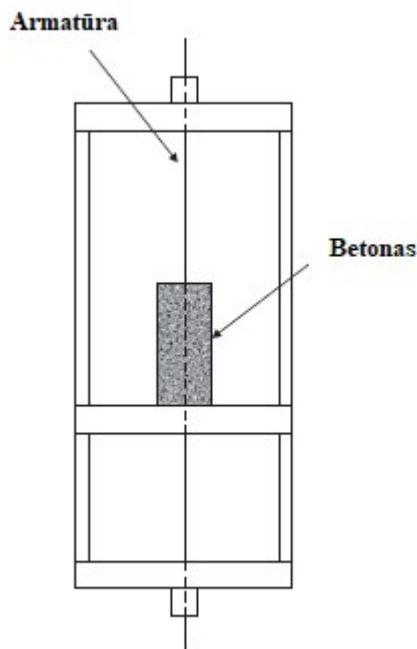


1.5 pav. Mechaninio spraustelio veikimo schema (Derkowski, Dyba, 2017)

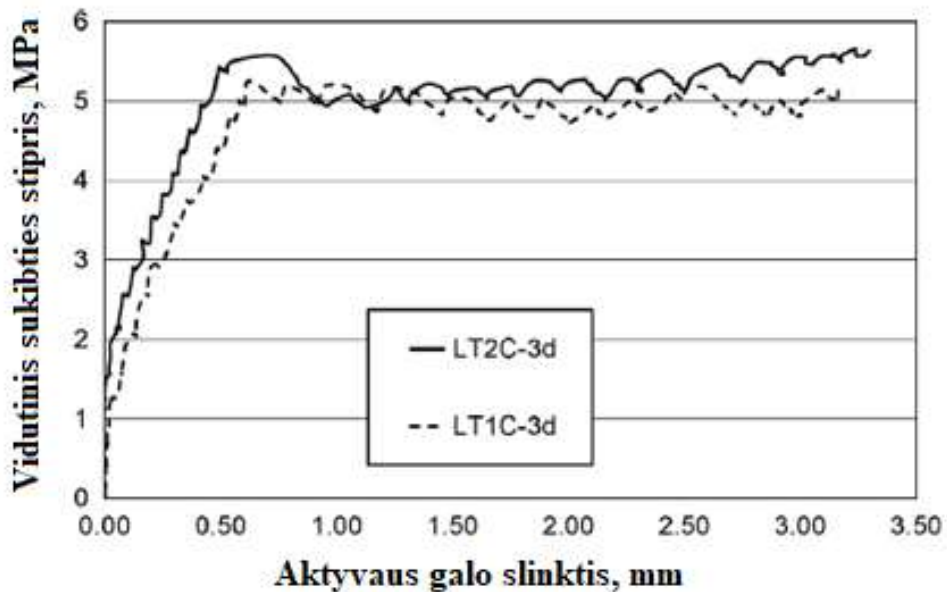
Mechaniniai sprausteliai turi didelę įtaką sukibties stipriui, be to, tai yra vienas iš efektyviausių būdų užtikrinti reikiamą armatūros inkaravimą.

Sukibties stiprio ir slinkties priklausomybė

Visų minėtų armatūros – betono sukibties veiksnių sąveika pastebima tipinėje sukibties įtempių – slinkties kreivėje, gautoje atlikus lino slinkties bandymą. 1.7 paveiksle vaizduojamas C. Herrero ir kt. publikacijoje pateiktas grafikas, gautas atlikus įstūmimo (*ang.* push in) bandymą su dviem identiškais septynių vijų lynais. 1.6 paveiksle pateikta principinė įstūmimo bandymo schema.



1.6 pav. Principinė įstūmimo bandymo schema (Keuning et al., 1962)



1.7 pav. Sukibties įtempių – slinkties priklausomybė (Herrero et al., 2013)

Šiame grafike matyti keletas charakteringų vietų, kurios apibūdina betono – armatūros sąveiką: pačioje pradžioje sukibties įtempiai didėja nepasireiškus slinkčiais. Tai aiškinama adhezijos reiškiniu, kuris veikia visame lyno ilgyje. Pasiekus tam tikrą sukibties įtempių reikšmę (šiuo atveju 1,0 bei 1,5 MPa), lokali adhezijos jėgos įveikiamos ir atsiranda pirmoji lynų slinktis. Pasireiškus pirmajai slinkčiai, grafike matoma tiesinė sukibties įtempių ir slinkties priklausomybė. Slinktis laipsniškai vystosi iš aktyvaus bandinio galo link pasyvaus. Pasiekus maksimalius sukibties įtempius, slinktis pastebima ir pasyviajame bandinio gale. Nuo šio momento slinktis pastebima per visą lyno ilgį, tai reiškia, kad adhezija visiškai pažeista. Vidutiniai sukibties įtempiai šiek tiek sumažėja, bet išlieka pastovūs nepriklausomai nuo slinkties.

Toliau pastebimas sukibties įtempių pastovumas ir slinkties „šuoliai“ apibūdinantys mechaninių spraustelių veikimo principą: įvykus vieno spraustelio pažeidimui, lynas pasislenka betono atžvilgiu ir netrukus sustoja ties nepažeistu sprausteliu.

Sukibties tarp betono ir armatūros stipris yra vienas pagrindinių parametų skaičiuojant inkaravimo ilgį, nuo kurio priklauso konstrukcijos stiprumas.

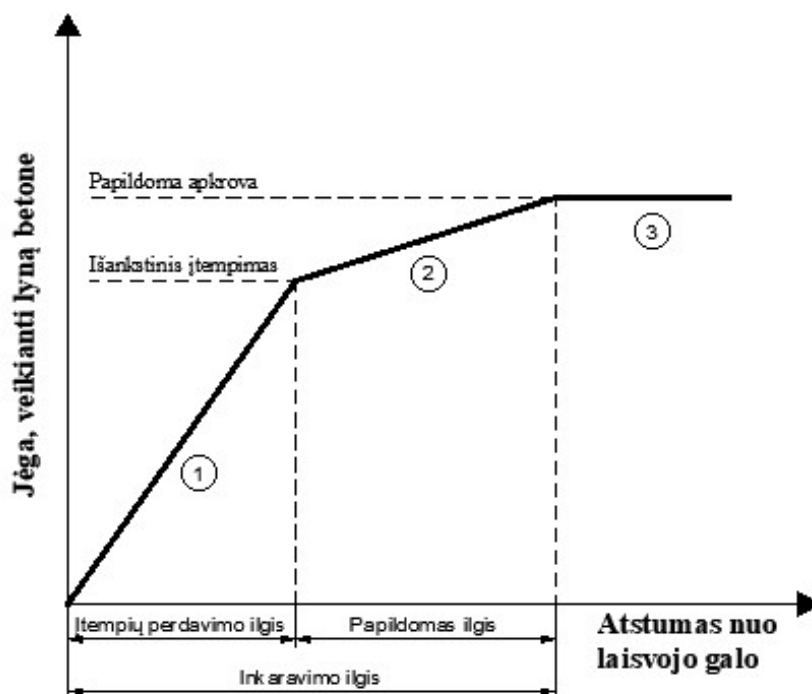
1.2. Inkaravimo ilgis

Inkaravimo ilgis inžineriniu požiūriu yra pagrindinis parametras, kuris leidžia nuspėti, ar apkrautos gelžbetoninės konstrukcijos komponentai (betonas ir armatūra) sąveikaus vienas su kitu ir atitiks gelžbetonio skaičiavimo teoriją, ar bus nepriklausomi vienas nuo kito. Šis parametras yra labai svarbus projektuojant konstrukcijas – jis užtikrina vieną iš pagrindinių gelžbetonio projektavimo teorijų – medžiaga yra kompozitinė, o atskiros jos komponentės sąveikauja kartu.

Inkaravimo ilgis išreiškiamas armatūrinio elemento apsupto betonu ilgiu, kurio užtenka, kad iki pat gelžbetoninės konstrukcijos irties armatūrinis elementas nuo betono neatsiskirtų. Iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijose, inkaravimo ilgis susideda iš dviejų komponentų:

1. Įtempių perdavimo ilgio;
2. Papildomo ilgio, reikalingo užtikrinti sukibties stiprį veikiant papildomai išorinei apkrovai.

Inkaravimo ilgį ir jo sudedamąsias dalis iliustruoja 1.8 paveiksle pateiktas idealizuotas lyną veikiančios jėgos ir elemento ilgio grafikas, kuriame išskiriamos trys dalys. Pirmoji (1) kreivės dalis atitinka išankstinio įtempio perdavimą į betoną. Ties elemento pradžia dėl menkos armatūrinio lyno ir betono sukibties įvyksta lyno įsislinkimas į betoną, todėl tame taške perduodama jėga betonui lygi nuliui. Kituose pjūviuose link elemento centro sukibties stipris didėja, taip pat didėja perduodama išankstinio įtempimo jėga, kol pasiekia maksimalią pastovią reikšmę. Antroji (2) kreivės dalis apibūdina reikiamą papildomą inkaravimo ilgį, kuris užtikrina sukibtį tarp lyno ir betono esant papildomoms išorinėms (sandėliavimo, transportavimo, eksploatacijos ir kt.) apkrovoms. Paskutinė (3) kreivės dalis žymi atkarpą, kurioje betono ir armatūros sukibtis yra visiškai užtikrinta, ir šie komponentai sąveikauja kartu, be jokio praslydimo vienas kito atžvilgiu. Kreivės (1) ir (2) dalių visuma vadinama inkaravimo ilgiu.



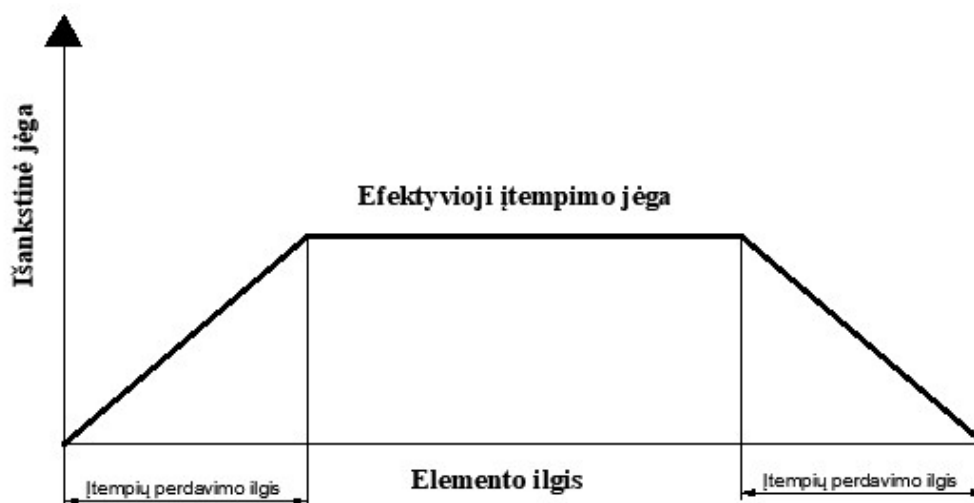
1.8 pav. Idealizuotas jėgos veikiančios lyno ir elemento ilgio grafikas (Marti-Vargas, Hale, Garcia-Toangua & Serna, 2013)

Projektuojant konstrukcijas, svarbu žinoti elementų ilgio atkarpas, kuriose armatūra nėra visiškai efektyvi, ir imtis konstrukcinių sprendimų, kaip nurodo projektavimo normos, arba

atitinkamai vertinti skaičiavimuose. Jeigu inkaravimo ilgis nėra užtikrintas, tempimo įtempiai sukibties vietoje lemia plyšių gelžbetoninėje konstrukcijoje atsiradimą ir apsauginio sluoksnio irtį aplink tempiamą strypą.

1.2.1. Įtempių perdavimo ilgis

Įtempimo jėga, veikianti lyną išankstinio įtempimo metu, į betoną perduodama per plieno ir betono sukibtį. Perduodama jėga kinta nuo nulio ties betoninio elemento galais iki maksimalios pastovios perduodamos jėgos reikšmės (efektyviosios įtempimo jėgos). Atkarpos ilgis, reikalingas pasiekti maksimaliai išankstinio įtempimo jėgai betone, vadinamas įtempių perdavimo ilgiu. 1.9 paveiksle pateikta idealizuota ašinės jėgos betone po atleidimo diagrama.



1.9. pav. Idealizuotas ašinių jėgų betone po išankstinio įtempimo grafikas (Marti-Vargas, Caro & Serna, 2013)

LST EN 1992-1-1 pateikiamos dvi įtempių perdavimo ilgio reikšmės. Mažesnioji skirta vietiniams įtempiams atleidimo metu patikrinti, o didesnioji – saugos ribiniams būviams:

$$l_{pt} = 0,8 \cdot l_{pt}, \quad (2)$$

$$l_{pt} = 1,2 \cdot l_{pt}, \quad (3)$$

čia l_{pt} – įtempių perdavimo ilgis. (LST EN 1992-1-1, 2007)

Tinkamas įtempių perdavimo ilgio ribų nustatymas yra reikalingas tiksliam skerspjūvio įtempių palyginimui su ribiniais pagal tinkamumo ribinį būvį tiek jėgos atleidimo, tiek eksploatacijos stadijose. Priimtas didesnis įtempių perdavimo ilgis nei realus, gali sąlygoti didesnius skerspjūvio įtempius, nei jie buvo numatyti projektavimo etape.

Tikslus įtempių perdavimo ilgio nustatymas taip pat svarbus skersinio pjūvio projektavime, nes paprastai pavojingiausi pjūviai yra įtempių perdavimo zonoje. LST EN 1992-1-1 pateikta formulė gelžbetoninio elemento skersinio pjūvio stiprumui apskaičiuoti:

$$V_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}}, \quad (4)$$

čia σ_{cp} – betono gniuždomieji įtempiai ties centrine ašimi dėl ašinės apkrovos ir (arba) išankstinio įtempimo;

α_1 – koeficientas, įvertinantis nagrinėjamo pjūvio vietą jėgos perdavimo atkarpos atžvilgiu, lygus:

$$\alpha_1 = \frac{l_x}{l_{pt2}}, \quad (5)$$

čia l_x – nagrinėjamo skerspjūvio atstumas nuo perdavimo atkarpos pradžios taško;

l_{pt2} – įtempių perdavimo ilgio didžiausioji reikšmė. (LST EN 1992-1-1, 2007)

Skersinio pjūvio stiprumui betono apgniuždymas turi teigiamos įtakos, tačiau gniuždymo jėgos dydis įtempių perdavimo zonoje nėra pastovus ir maksimalus. Įtempių perdavimo ilgis priimtas mažesnis nei realus, lemia nekonservatyvų skersinio pjūvio projektavimą.

Dar vieną pastebėjimą dėl įtempių perdavimo ilgio svarbos nurodo R.W. Barnesas su bendraautorais.: *kitas svarbus aspektas, parodantis įtempių perdavimo ilgio svarbą, atsiranda skaičiuojant bendrąjį inkaravimo ilgį, nes įtempių perdavimo ilgis yra sudėtinė jo dalis* (Barnes et al., 2003). Tai matyti ir 1.8 paveiksle. Įtempių perdavimo ilgis priimtas mažesnis nei realus, lemia nekonservatyvų visos inkaravimo zonos projektavimą, net jeigu ir papildomas inkaravimo ilgis buvo apskaičiuotas teisingai.

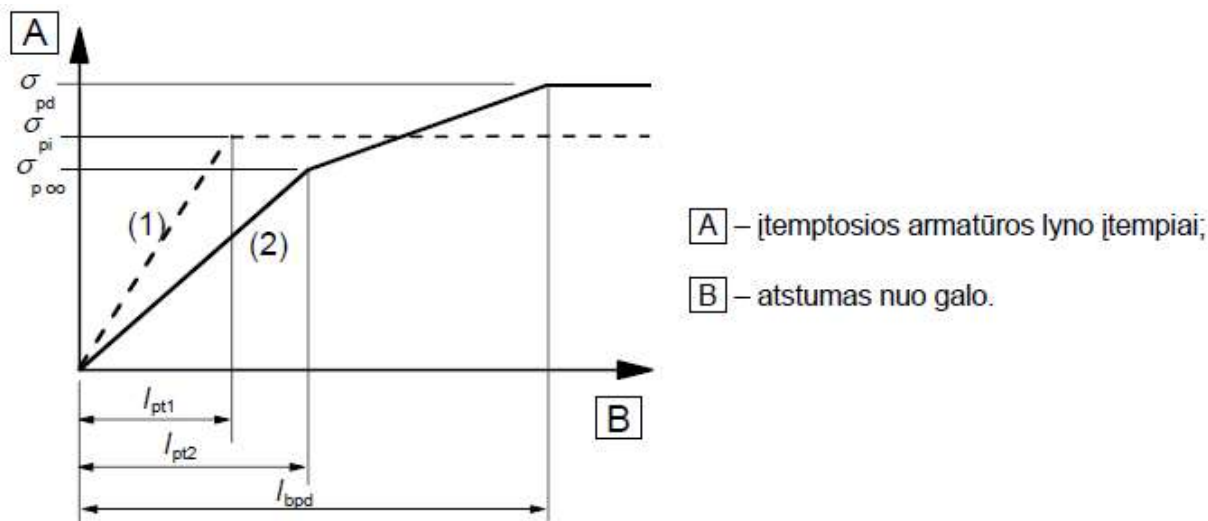
Kiti pastebėjimai, į kuriuos reikia atkreipti dėmesį, buvo paminėti J. R. Marti-Vargo bei W. M. Hale'io: *elementai, kuriuose įtempių perdavimo ilgio reikšmė maža, turi didesnę pleišėjimo riziką, o tai gali lemti visišką sukibties tarp betono ir armatūros suardymą, ypač, jeigu nėra papildomo armavimo. Kuo įtempių perdavimo ilgio reikšmė didesnė, tuo didesnė elemento dalis yra mažiau atspari lenkiamajam momentui ir skersinėms jėgoms, o tai didina konstrukcijos kainą.* (Marti-Vargas, Hale, 2013)

Apibendrinant galima teigti, kad įtempių perdavimo ilgis yra svarbus parametras iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijose nagrinėjant tiek saugos, tiek ribinį būvį.

1.2.2. Papildomas inkaravimo ilgis

Įtempių perdavimo ilgis yra inkaravimo ilgio dalis, reikalinga perduoti išankstinę apkrovą betonui. Ši operacija paprastai vyksta gamybos stadijoje. Kai konstrukcija yra veikiamą išorinių poveikių kitose stadijose (transportavimo, montavimo, eksploatacijos), armatūroje atsiranda papildomos išilginės jėgos. Tam, kad konstrukcija nuo apkrovos priaugio liktų vientisa, reikalingas papildomas inkaravimo ilgis, kuris prasideda nuo įtempių perdavimo ilgio pabaigos ir užtikrina, kad armatūros plienas pasieks takumo ribą anksčiau nei sukibties tarp betono ir armatūros įtempiai pasieks ribinę reikšmę.

LST EN 1992-1-1 pateikta idealizuota įtemptosios armatūros lyno įtempių inkaravimo zonoje schema (1.10 pav.). Čia l_{bpd} – bendrasis inkaravimo ilgis; σ_{pd} – projektuojami lyno įtempiai; σ_{pi} – įtempiai lyno po atleidimo; $\sigma_{p\infty}$ – įtempiai lyno po visų nuostolių.



1.10. pav. Idealizuota įtemptosios armatūros lyno įtempių inkaravimo zonoje schema (LST EN 1992-1-1, 2007)

Pateiktame 1.10 paveiksle papildomas inkaravimo ilgis yra kreivės horizontalioji projekcija, apibrėžiama $l_{bpd} - l_{pt2}$ dydžiu. Pastebima, kad ši kreivės dalis pasvirusi mažesniu kampu nuo horizontaliosios ašies, nei įtempių perdavimo ilgį žyminti kreivės dalis. Tai reiškia, kad nuo išorinių apkrovų sukeltiems papildomiems įtempiams lyno reikia santykinai didesnio inkaravimo ilgio nei nuo išankstinės apkrovos sukeltų įtempių. Tai akcentuojama ir LST EN 1992-1-1 pateiktose sukibties stiprio skaičiavimo išraiškose įtempių atleidimo ((6) formulė) ir eksploatacijos ((7) formulė) stadijose, kuomet sukibties sąlygos abiem atvejais vertinamos skirtingomis koeficientų reikšmėmis.

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{cta}, \quad (6)$$

$$f_{bpd} = \eta_{p2} \eta_1 f_{cta}, \quad (7)$$

čia η_{p1} – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į įtemptosios armatūros tipą ir sukibties sąlygas, atleidžiant armatūrą. η_{p1} lygus 2,7 arba 3,2 priklausomai nuo armatūros tipo;

η_{p2} – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į įtemptosios armatūros tipą ir sukibties sąlygas ties inkaravimo vieta. η_{p2} lygus 1,4 arba 1,2 priklausomai nuo armatūros tipo. (LST EN 1992-1-1, 2007)

Kuo didesnis sukibties stipris, tuo mažesnio inkaravimo ilgio reikia, kad tos pačios reikšmės įtempiai būtų saugiai perduodami į betoną. Pagal LST EN 1992-1-1 skaičiavimo metodiką, įtempių perdavimo stadijoje sukibties stipris gaunamas didesnis nei eksploatacijos stadijoje, tai paaiškina, kodėl 1.10 paveiksle pavaizduota įtempių perdavimo ilgio kreivės dalis yra statesnė už papildomo inkaravimo ilgio dalį.

1.3. Faktoriai, lemiantys įtempių perdavimo ilgį

Įtempių perdavimo ilgio reikšmė priklauso nuo daug kintamųjų. Literatūroje randama skirtingų projektavimo normų vertinimų, taip pat įvairių eksperimentų, kuriais grindžiami kiti parametrai, į kuriuos normos neatsižvelgia.

1.3.1. Euronormų išskiriami faktoriai

Kadangi Lietuvoje galioja Europos Sąjungos projektavimo normos, joms bus skirtas didesnis dėmesys nei kitoms. LST EN 1992-1-1 išskiriami šie parametrai skaičiuojant įtempių perdavimo ilgį:

- a) betono tempiamasis stipris;
- b) lyno tipas (dantytos vielos arba sudarytos iš trijų ir septynių vijų);
- c) sukibties sąlygos;
- d) įtempių atleidimo būdas (palaipsnis, staigus);
- e) lynų skerspjūvio tipas (apskritas ar sudarytas iš vijų);
- f) lyno skersmuo;
- g) įtemptosios armatūros įtempiai po atleidimo.

LST EN 1992-1-1 pateikta įtempių perdavimo ilgio išraiška:

$$l_{pt} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \emptyset \sigma_{pm0}}{\eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}}, \quad (8)$$

čia α_1 – koeficientas, lygus 1,0, jei atleidimas palaipsnis, 1,25 – jei atleidimas staigus;

α_2 – koeficientas, lygus 0,25, jei įtemptosios armatūros lynai yra apskritojo skerspjūvio, 0,19 – jei lyną sudaro 3 ar 7 vielos;

\emptyset – įtemptosios armatūros lyno vardinis skersmuo;

σ_{pm0} – įtemptosios armatūros įtempiai tuoj po atleidimo;

η_{p1} – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į įtemptosios armatūros tipą ir sukibties sąlygas atleidžiant armatūrą, lygus 2,7, jei vielos yra dantytos, 3,2 – jei lyną sudaro 3 arba 7 vielos;

η_1 – koeficientas, lygus 1,0, jei sukibties sąlygos geros, 0,7 kitais atvejais, nebent didesnę reikšmę pateisintų ypatingos darbų vykdymo aplinkybės;

f_{ctd} – skaičiuotinė betono tempiamojo stiprio reikšmė. (LST EN 1992-1-1, 2007)

1.3.2. Kiti autorių minimi veiksniai

J. Kimas, J. Yangas ir H. Yimas, atlikę eksperimentą su 28 gelžbetoniniais bandiniais, kurie buvo įtempti jėga, lygia 70 % lyno stiprumo ribos (skersmuo 15,2 mm), ir kurie skyrėsi lynų tempiamuoju stipriu (1860 MPa ir 2400 MPa), betono gniuždomuoju stipriu (49 ir 64 MPa), zonos, armuotos skersinės armatūros ilgiu (400, 800 ir 1200 mm) bei skersinės armatūros žingsniu (50 ir 100 mm), pateikė tokias išvadas:

- *Įtempių perdavimo ilgis ties aktyviuoju galu, esant staigiam atleidimui, buvo pastebimai didesnis nei pasyviajame gale. Gautas skirtumas apie 15 ir 22 % atitinkamai 1860 ir 2400 MPa stiprio lynų bandiniuose. Tą galima paaiškinti susiformavusiais mikroplyšiais ties aktyviuoju bandinio galu, kuriuos lėmė dinaminiai efektai atleidžiant įtempimą.*
- *Įtempių perdavimo ilgis mažėjo, didėjant betono gniuždomajam stipriui. Gautas pokytis: 9 % aktyviajame gale, naudojant 1860 MPa stiprio lynus, bei 7 %, naudojant 2400 MPa stiprio lynus.*
- *Didesnio stiprio armatūros lynų bandiniuose įtempių perdavimo ilgis gautas didesnis. Naudojant 49 MPa gniuždomojo stiprio betoną, gautas skirtumas lygus 6 ir 11 % aktyviajame ir pasyviajame gale, o naudojant 64 MPa stiprio betoną atitinkamai 11 ir 3 %.*
- *Bandiniuose su skersine armatūra, įtempių perdavimo ilgis aktyviajame gale gautas mažesnis, pasyviojo galo atžvilgiu. Skersinės armatūros žingsnis įtempių perdavimo ilgiui eksperimento sąlygomis įtakos neturėjo. (Kim et al., 2016)*

J. R. Marti-Vargas ir kt. savo atliktame bandyme siekė ištirti betono mišinio vandens – cemento (V/C) santykio įtaką įtempių perdavimo ilgiui. Bandymas atliktas naudojant dvylika skirtingų betono mišinių, kurių V/C santykis kito nuo 0,3 iki 0,5, cemento kiekis bandiniuose kito nuo 350 iki 500 kg/m³ bei betono gniuždomasis stipris 24 – 55 MPa. Bandymas atliktas septynių vijų, 1860 MPa stiprio lynais (skersmuo 12,9 mm), iš viso 12 bandinių. Autoriai pateikia tokią išvadą:

Mažiausia įtempių perdavimo ilgio reikšmė gauta bandinyje, kurio betono V/C santykis mažiausias – 0,30, o betono gniuždomasis stipris didžiausias – 54,8 MPa. Didžiausia įtempių perdavimo ilgio reikšmė gauta bandinyje, kurio V/C santykis didžiausias – 0,5, o betono gniuždomasis stipris mažiausias – 24,2 MPa. (Marti-Vargas et al., 2013)

R. W. Barneso ir kt. publikacijoje minimas bandymas su 36 gelžbetoniais bandiniais. Bandiniai skyrėsi įtempių perdavimo būdu, lynų (skersmuo 15,2 mm) paviršiaus šiurkštumu, inkaravimo vieta ir betono stipriu. Bandiniuose buvo formuojamos visiško praslydimo zonos, tam, kad būtų galima ištirti kuo unikalesnes inkaravimo sąlygas. Iš viso buvo išmatuotos 184 įtempių perdavimo zonos. Autoriai pateikia tokius pastebėjimus:

- *Nustatytas įtempių perdavimo ilgis didėjo vidutiniškai 10 – 20 %. Beveik visas pastebėtas didėjimas įvyko per 28 dienų laikotarpį nuo įtempių atleidimo.*
- *Aprūdijusių lynų bandiniuose vidutinis įtempių perdavimo ilgis buvo trumpesnis nei švariai nuvalytų lynų bandiniuose. Atkreiptinas dėmesys: pastebėta didelė bandinių su aprūdijusiais lynais įtempių perdavimo ilgio reikšmių sklaida, todėl paviršiaus šiurkštumo faktorių sudėtinga įvertinti skaičiavimuose.*
- *Bandiniuose, kurių betono stipris gautas didesnis nei 48 MPa, įtempių perdavimo būdas neturėjo pastebimos reikšmės įtempių perdavimo ilgiui bandiniuose, su švariai nuvalytais lynais. Tačiau,*

aprūdijusių lynų bandiniuose staigus įtempių atleidimo būdas sąlygojo 30 – 50 % didesnę įtempių perdavimo ilgį. (Barnes et al., 2003)

B. Ohas ir E. Kimas atlikę eksperimentą, kuriame kintamieji buvo betono gniuždomasis stipris (48,4 ir 63 MPa), lyno skersmuo (12,7 bei 15,2 mm) ir betono apsauginis sluoksnis (3; 4 ir 5 cm), pastebi:

- Įtempių perdavimo ilgis didėja, didinant lyno skersmenį. Įtempių perdavimo ilgio reikšmė skiriasi vidutiniškai 30 % lyginant 12,7 bei 15,2 mm skersmens lynų bandinius.
- Įtempių perdavimo ilgis mažėja, didinant apsauginį betono sluoksnį. (Autoriai siūlo šį faktorių vertinti projektavimo normose).
- Įtempių perdavimo ilgis mažėja, didėjant betono gniuždomajam stipriui. Didelio gniuždomojo stiprio betonai yra daug efektyvesni įtempių perdavimui. (Oh, Kim, 2014)

Atlikus literatūroje randamų eksperimentų apžvalgą, pastebima, kad minėti autoriai sutaria:

- didėjant betono gniuždomajam stipriui, įtempių perdavimo ilgio reikšmė mažėja;
- esant staigiam įtempių perdavimui, įtempių perdavimo ilgis didesnis, nei perduodant įtempius palaipsniui.

LST EN 1992-1-1 vertinamas betono tempiamasis stipris bei armatūros atleidimo būdas, tačiau į tokius veiksnius kaip armatūros paviršiaus šiurkštumas ar skersinė armatūra skaičiavimuose neatsižvelgiama.

1.4. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo metodikos

Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo metodikas galima sugrupuoti į dvi grupės: oficialios, valstybėse galiojančių projektavimo normų metodikos, kuriomis vadovaujasi inžinieriai projektavime ir įvairių mokslininkų siūlyti normų pakeitimai.

1.4.1. Projektavimo normų metodikos

„Model Code 2010“ (MC), o taip pat LST EN 1992-1-1 yra populiariausios projektavimo taisyklės Europoje. ACI 318 normos yra paplitusios JAV. Formulės bei narių paaiškinimai pateikti 1.1 bei 1.2 lentelėse.

1.1 lentelė. Projektavimo normų metodikos

Normų pavadinimas	Įtempių perdavimo ilgio išraiška	Nr.
LST EN 1992-1-1	$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \varnothing \frac{\sigma_{pm0}}{\eta_{p1} \eta_{p1} f_{cta}}$	(9)
MC 2010	$l_{pt} = \alpha_{p1} \alpha_{p2} \alpha_{p3} \frac{A_p}{\pi \varnothing} \frac{\sigma_{pi}}{\eta_{p1} \eta_{p2} f_{cta}}$	(10)
ACI 318	$l_t = \frac{f_{pe}}{20,7} \cdot d_b$	(11)

1.2 lentelė. 1.1 lentelėje pateiktų formulių nariai

Žymuo	Apibūdinimas
	LST EN 1992-1-1
α_1	Koeficientas, lygus 1,0, jei atleidimas palaipsnis, 1,25 – jei atleidimas staigus.
α_2	Koeficientas, lygus 0,25, jei įtemptosios armatūros lynai yra apskritojo skerspjūvio, 0,19 – jei lyną sudaro 3 ar 7 vielos.
η_{p1}	Koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į įtemptosios armatūros tipą ir sukibties sąlygas atleidžiant armatūrą, lygus 2,7, jei vielos yra dantytos, 3,2 – jei lyną sudaro 3 arba 7 vielos.
η_1	Koeficientas, lygus 1,0, jei sukibties sąlygos geros, 0,7 kitais atvejais, nebent didesnę reikšmę pateisintų ypatingos darbų vykdymo aplinkybės.
f_{ctd}	Betono tempiamasis stipris.
σ_{pm0}	Įtemptosios armatūros įtempiai tuoj po atleidimo.
\emptyset	Įtemptosios armatūros lyno vardinis skersmuo.
	MC
α_{p1}	Koeficientas, lygus 1,0, jei atleidimas palaipsnis, 1,25 – jei atleidimas staigus.
α_{p2}	Koeficientas, lygus 0,5, jeigu nevertinami išoriniai poveikiai.
α_{p3}	Koeficientas, įvertinantis sukibties pobūdį. 0,5 – vijoms, 0,7 – dantytoms vieloms.
η_{p1}	Koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į įtemptosios armatūros tipą, lygus 1,4, jei vielos yra dantytos; 1,2 – 7 vielų lynams.
η_{p2}	Koeficientas, įvertinantis lyno padėtį. Lygus 1,0, jei lynai pakreipti 45 – 90 laipsnių kampų, taip pat, kurie įtvirtinti bent 250 mm nuo apačios, ar bent jau 300 mm atstumu iki viršaus. Visais kitais atvejais – 0,7.
σ_{pi}	Įtemptosios armatūros įtempiai tuoj po atleidimo.
A_p	Įtemptosios armatūros lyno skerspjūvio plotas.
	ACI 318
f_{pe}	Efektyvieji įtemptosios armatūros įtempiai, įvertinti atėmus visus įtempių nuostolius.
d_b	Nominalusis lyno skersmuo.

Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas pagal MC ir LST EN 1992-1-1 metodikas yra panašus. Abejose metodikose vertinamas armatūros tipas, sukibties sąlygų kokybė bei 1.3.2 skyrelyje įvairių autorių siūlomi veiksniai: betono stipris, armatūros atleidimo būdas, betono apsauginis sluoksnis.

ACI 318 metodika, palyginus su prieš tai minėtomis, paprasčiausia. Joje tik du faktoriai: armatūros skersmuo bei efektyvieji įtempiai. Pagal JAV galiojančias projektavimo normas, įtempių perdavimo ilgis nustatomas iškart eksploatacijos stadijoje, tuo tarpu LST EN 1992-1-1 nurodyta įtempių perdavimo ilgį skaičiuoti su atleidimo metu esančiu betono stipriu bei įtempiais, o paskui naudoti papildomus koeficientus tinkamumo ir saugos ribiniams būviams (formulės (2) ir (3)).

1.4.2. Įvairių autorių siūlomos metodikos

Mokslinėje literatūroje taip pat nemažai autorių tyrinėjo šią temą, ypač siekdami pasiūlyti JAV projektavimo normų pakeitimus. 1.3 lentelėje pateikiami įvairių autorių siūlyti įtempių perdavimo ilgio skaičiavimai.

1.3 lentelė. Įvairių autorių siūlytos metodikos

Autorius	Įtempių perdavimo ilgis	Nr.
Zia & Mostafa, 1977	$L_t = 1,5 \frac{f_{si}}{f_{ci}} \cdot d_b - 117$	(12)
Cousins et al, 1990	$L_t = \frac{U_t \sqrt{f_{ci}}}{2B} + \frac{f_{se} A_s}{\pi d_b U_t \sqrt{f_{ci}}}$	(13)
Mitchell et al., 1993	$L_t = \frac{f_{si}}{20,7} d_b \sqrt{\frac{20,7}{f_{ci}}}$	(14)
Deatherage et al., 1994	$L_t = \frac{f_{si}}{20,7} d_b$	(15)
Buckner, 1995	$L_t = \frac{f_{si}}{20,7} d_b$	(16)
Lane, 1998	$L_t = 4 \frac{f_{si}}{f_c} d_b - 127$	(17)
Kose & Burkett, 2005	$L_t = 0,045 \frac{f_{si}}{\sqrt{f_c}} (25,4 - d_b)^2$	(18)
Ramirez & Russell, 2008	$L_t = \frac{315}{\sqrt{f_{ci}}} d_b \geq 40d_b$	(19)

1.4 lentelėje pateikiami įvairių autorių pasiūlytų įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo formulinių nariai.

1.4 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo formulių nariai

d_b	Nominalusis lyno skersmuo.
f_{ci}	Betono gniuždomasis stipris atleidimo metu.
f_c	Betono gniuždomasis stipris po 28 parų arba atleidimo metu.
f_{si}	Išankstiniai įtempiai atleidimo metu.
U_t	Plastinių sukibties įtempių koeficientas.
B	Sukibties modulis.
f_{se}	Koeficientas, įvertinantis lyno padėtį. Lygus 1,0, jei lynai pakreipti 45 – 90 laipsnių kampu, taip pat, kurie įtvirtinti bent 250 mm nuo apačios, ar bent jau 300 mm atstumu iki viršaus. Visais kitais atvejais – 0,7.
A_s	Įtemptosios armatūros lyno skerspjūvio plotas.

Dauguma autorių įžvelgė betono stiprio įtaką įtempių perdavimo ilgiui, taip pat siūlė vertinti išankstinius įtempius atleidimo metu, o ne po visų nuostolių (priešingai nei nurodoma JAV projektavimo normose). Nepaisant atliktų eksperimentų, ACI 318 normų rekomenduojama išraiška liko nepakitusi.

LST EN 1992-1-1 nurodyta įtempių perdavimo ilgio išraiška išlieka viena iš daugiausiai faktorių vertinančių išraiškų projektavimo pasaulyje, tačiau nemažai faktorių, tokių kaip sukibties sąlygos ar armatūros tipas, vertinami apytiksliais koeficientais, išskiriant vos kelis kraštutinius atvejus.

1.5. Įtempių perdavimo ilgio eksperimentinių tyrimų apžvalga

Šiame poskyryje bus apžvelgiamos įtempių perdavimo ilgio nustatymo metodikos eksperimentiniu būdu, taip pat atliekama literatūroje rastų bandymų rezultatų analizė.

1.5.1. Įtempių perdavimo ilgio nustatymo metodai

Įtempių perdavimo ilgį galima nustatyti tiesioginiais ir netiesioginiais metodais. Literatūroje populiariausi trys metodai: deformacijų matavimas betono paviršiuje, deformacijų matavimas armatūros paviršiuje ir įtempių perdavimo ilgio nustatymas iš slinkties bandymo rezultatų.

Deformacijų matavimas betono paviršiuje

Vienas iš populiariausių netiesioginių įtempių perdavimo ilgio nustatymo metodų – deformacijų matavimas betono paviršiuje. Šiam metodui būdinga deformacijų profilio betono paviršiuje nuo bandinio ilgio priklausomybės analizė. Glaustai pateikiama eksperimento eiga: prie gelžbetoninės konstrukcijos paviršiaus klijuojami tenzometriniai jutikliai arba deformacijų matavimo taškai – tai maži plieniniai diskai, su skylė viduryje, pritaikyta įstatyti deformacijų matavimo

prietaisui. Deformacijų matavimo taškai klijuojami tuo pačiu žingsniu, nustatytu pagal matavimo prietaiso bazę. 1.11 paveiksle pateiktas bandinys su priklijuotais deformacijų matavimo taškais.



1.11 pav. Deformacijų matavimo taškai (Staton et al., 2009)

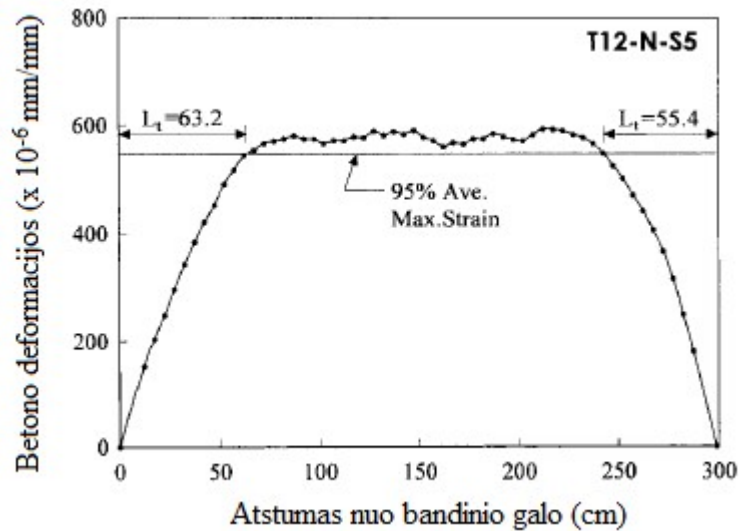
Prieš įtempių atleidimą matuojami atstumai tarp deformacijų matavimo taškų ir reikšmės fiksuojamos. Atlikus įtempių perdavimo betonui operaciją, atstumai tarp taškų išmatuojami antrą kartą. Iš reikšmių prieš atleidimą ir po skaičiuojamos deformacijos tarp taškų porų.

Gautos deformacijų reikšmės suapvalinamos, naudojant B. Oho ir E. Kimo minima metodiką:

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n + \varepsilon_{n+1}}{3}, \quad (20)$$

čia ε_n – deformacijos reikšmė skaičiuojamame taške;

ε_{n-1} , ε_{n+1} – deformacijų reikšmės taške prieš ir po skaičiuojamojo taško (Oh, Kim, 2000). 1.12 paveiksle pateikiamas pavyzdinis deformacijų profilis.



1.12 pav. Pavyzdinis deformacijų profilis (Oh, Kim, 2000)

Gavus deformacijų profilį, įtempių perdavimo ilgį galima nustatyti naudojant 95 % maksimalių vidutinių deformacijų metodą (AMS): deformacijų nusistovėjimo atkarpoje skaičiuojama vidutinė deformacija, jos 95 % reikšmė atidedama horizontalia linija. Deformacijų profilio ir šios atidėtos horizontalios linijos susikirtimas žymi įtempių perdavimo ilgį, parodytą 1.12 pav. *Deformacijų nusistovėjimo atkarpa galima laikyti vietą, kurioje deformacijos nesiskiria daugiau kaip 5 %.* (Kim et al., 2016)

Nustatinėjant įtempių perdavimo ilgį deformacijų matavimo betono paviršiuje būdu, sukibties tarp betono ir armatūros nepažeidžiama, tačiau gautas deformacijų profilis yra bandinio paviršiuje, o ne betono ir armatūros sukibties vietoje.

Įtempių perdavimo ilgio nustatymas iš slinkties bandymo

Kitas populiarus netiesioginis įtempių perdavimo ilgio nustatymo metodas yra iš slinkties bandymo rezultatų. Bandymas pagrįstas galiojančia slinkties – įtempių perdavimo ilgio priklausomybe, pasiūlyta Y. Guyono 1953 metais:

$$L_t = \alpha \cdot \frac{\delta}{\varepsilon_{pi}}, \quad (21)$$

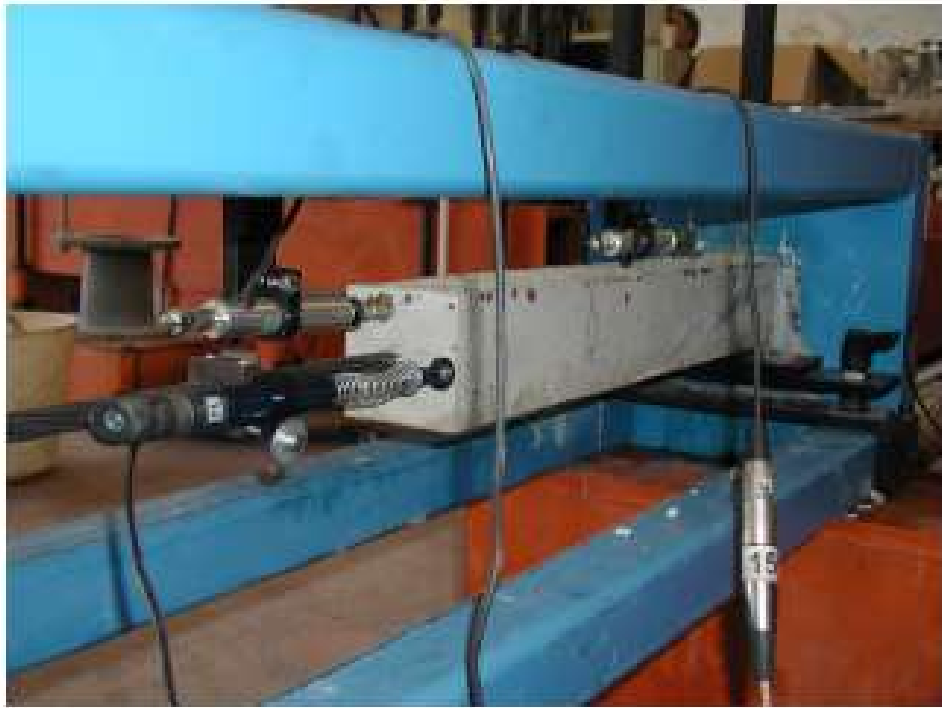
čia L_t – įtempių perdavimo ilgis;

δ – lyno įsislinkimo reikšmė;

ε_{pi} – pradinės lyno deformacijos prieš įtempių atleidimą;

α – sukibties įtempių pasiskirstymo koeficientas. (Guyon, 1953)

1.13 paveiksle pateiktas pavyzdinis lyno slinkties nustatymo bandymas.



1.13 pav. Lyno slinkties nustatymo bandymas (Marti-Vargas et al., 2013)

Prieš įtempių atleidimo operaciją, prie lyno ties bandinio galu pritvirtinami skaitmeniniai poslinkio jutikliai. Atleidimo metu, lynas slenkasi į betoną, o jutikliai užfiksuoja slinkties reikšmę. Taip gaunama įtempių perdavimo ilgio skaičiavimui reikalinga slinkties reikšmė.

Šiuo metodu įtempių perdavimo ilgis nustatomas nesudėtingai, tačiau α koeficiento reikšmė yra teorinė, todėl skaičiavimas yra apytikslis.

Lyno deformacijų matavimas

Tiesioginis įtempių perdavimo ilgio nustatymo būdas – lyno deformacijų matavimas. Prie lyno tvirtinami tenzometriniai jutikliai (1.14 pav.), išmatavus deformacijas braižomas deformacijų profilis.



1.14 pav. Tenzometrinis jutiklis (Qu, Li & Chen, 2018)

Šis metodas turi trūkumų: prie lyno pritvirtinti papildomi prietaisai pakeičia betono – armatūros sukibties mechanizmą, dėl to rezultatai neatitinka natūralių sąlygų. Taip pat tenzometriniai jutikliai

dažnai pažeidžiami betono liejimo, vibravimo stadijose bei įtempių atleidimo metu dėl armatūros ir betono deformacijų skirtumo.

Kiti įtempių perdavimo ilgio nustatymo metodai

Kiti įtempių perdavimo ilgio nustatymo būdai, kurie nepažeidžia betono – armatūros sukibties, tokie kaip rentgeno, fotoelektrinis, kontakto elektrinės varžos ar ultragarsinis dar tobulinami ir jų plataus taikymo literatūroje neaptikta.

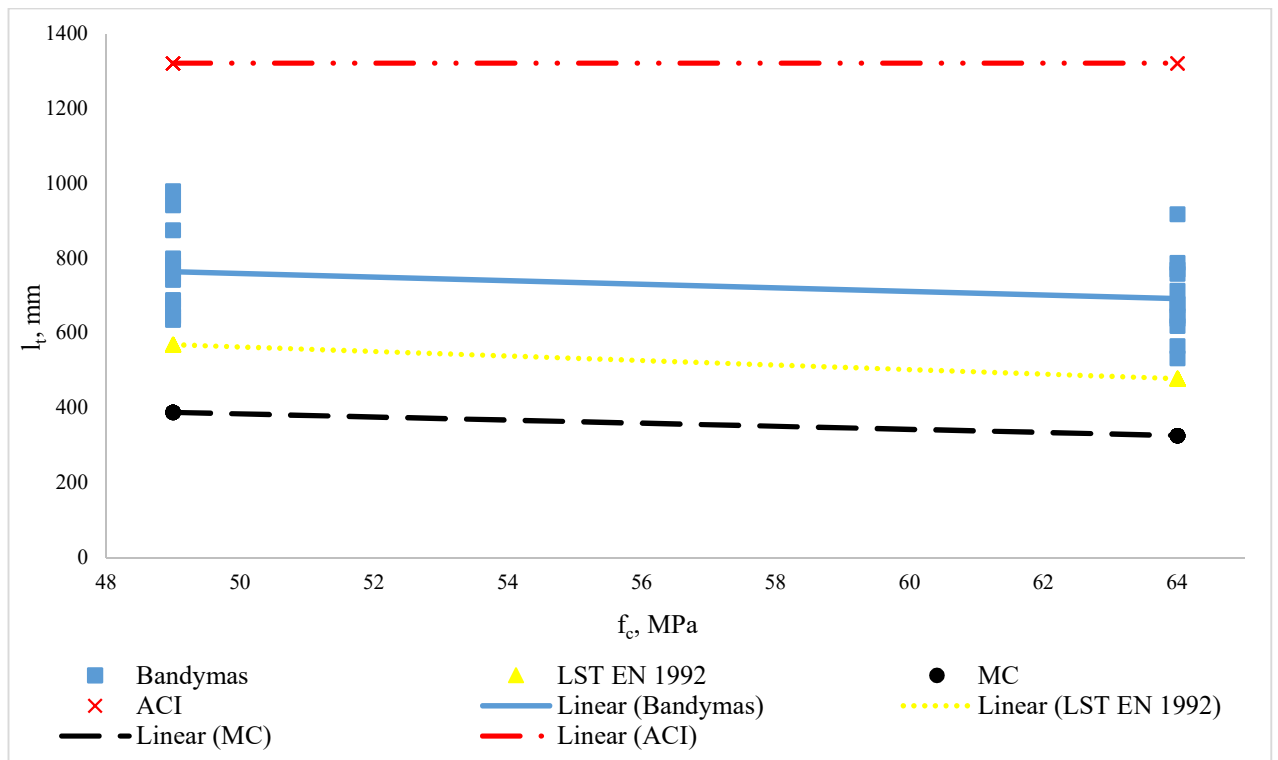
1.5.2. Literatūroje randamų bandymų rezultatų analizė

Pateikto priedo 1 lentelėje išrinkti literatūroje randamų bandymų įtempių perdavimo ilgiui nustatyti pagrindiniai duomenys ir rezultatai, iš viso išskirti 224 bandiniai. 1 lentelės žymos: \emptyset – lyno skersmuo; σ_{pi} – įtempiai lyne prieš pat atleidimą; f_c – betono gniuždomasis stipris atleidimo metu; f_{ct} – betono tempiamasis stipris; l_t – išmatuotas įtempių perdavimo ilgis; $l_{t,LST}$ – įtempių perdavimo ilgis, gautas apskaičiavus pagal LST EN 1992-1-1; $l_{t,MC}$ – įtempių perdavimo ilgis, gautas apskaičiavus pagal MC normas; $l_{t,ACI}$ – įtempių perdavimo ilgis, apskaičiuotas pagal ACI normas.

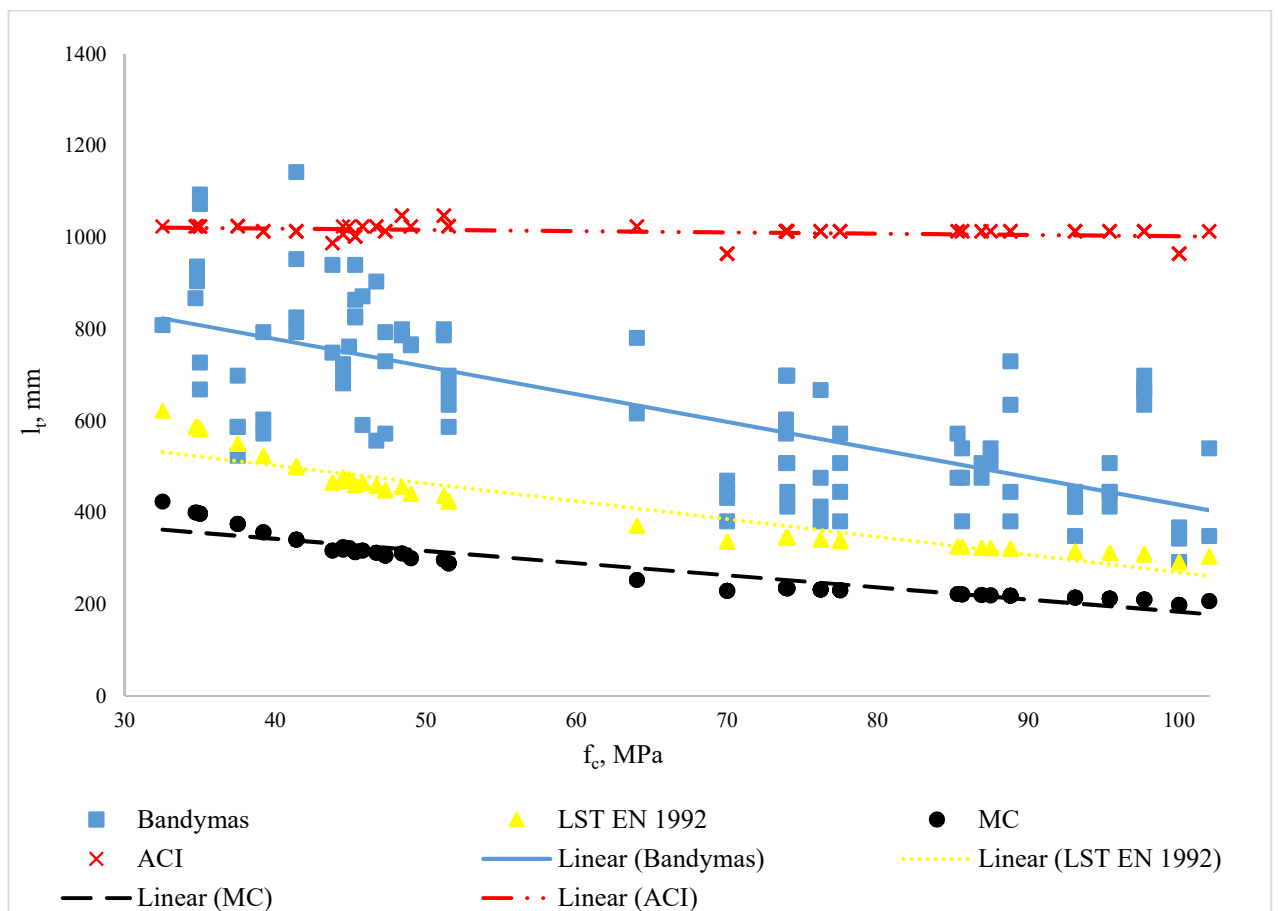
Bandinių betono gniuždomasis stipris kinta nuo 24,2 MPa iki 102 MPa; įtempiamų lynų skersmuo 6,8 – 15,2 mm; lynų stipris 1860 – 2400 MPa. Vidutiniai išankstiniai įtempiai lygūs 74 % lynų stiprumo ribos. Visų bandinių (išskyrus autoriaus) lynai sudaryti iš septynių vijų.

Visos lentelėje pateiktos įtempių perdavimo ilgio reikšmės gautos deformacijų matavimo betono paviršiuje metodu, visi bandiniai – betoninės prizmės, pateikta įtempių perdavimo ilgio reikšmė išmatuota aktyviajame bandinio gale.

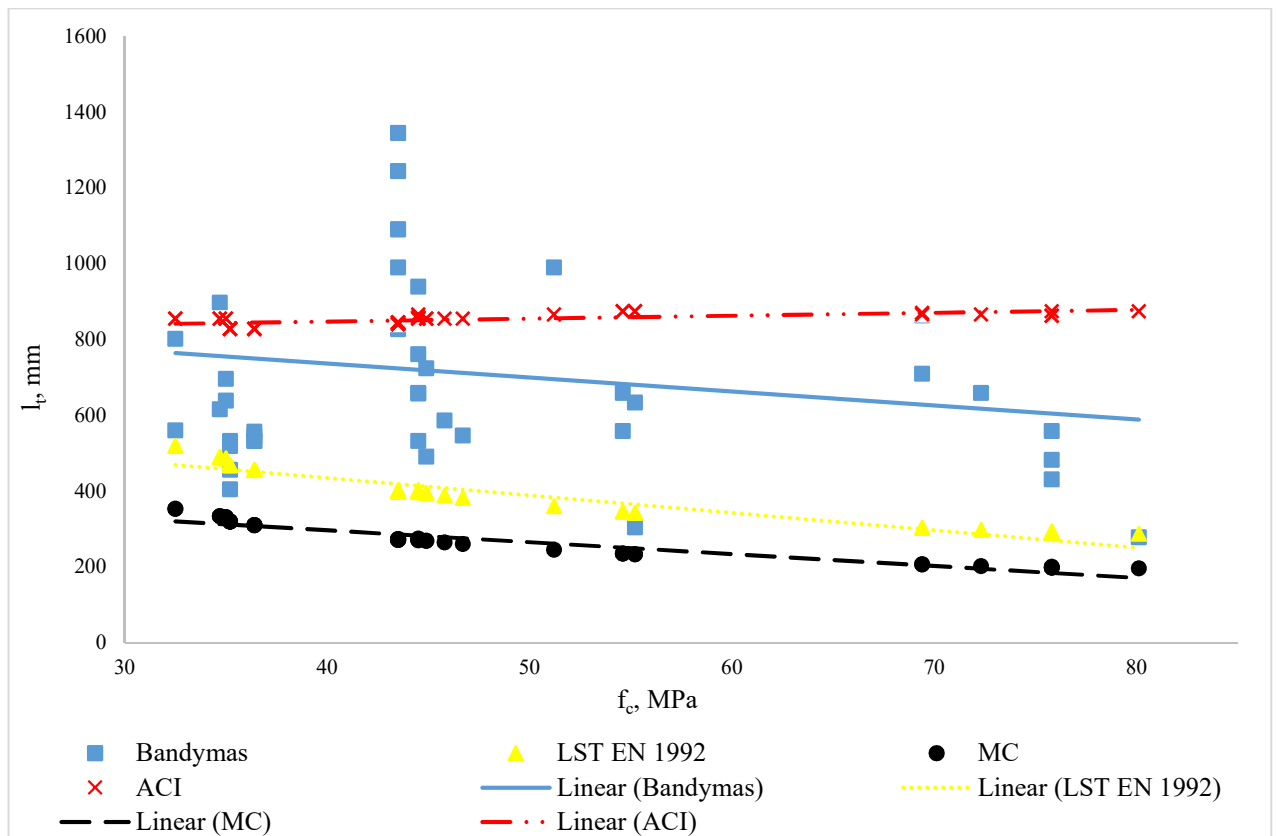
1.15–1.18 paveiksluose pateikiamos įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybės, esant įvairiems kitiems parametras. Priklausomybės gautos iš bandymo duomenų, lyginamos su atitinkamais rezultatais, gautais apskaičiuojant teoriniu būdu.



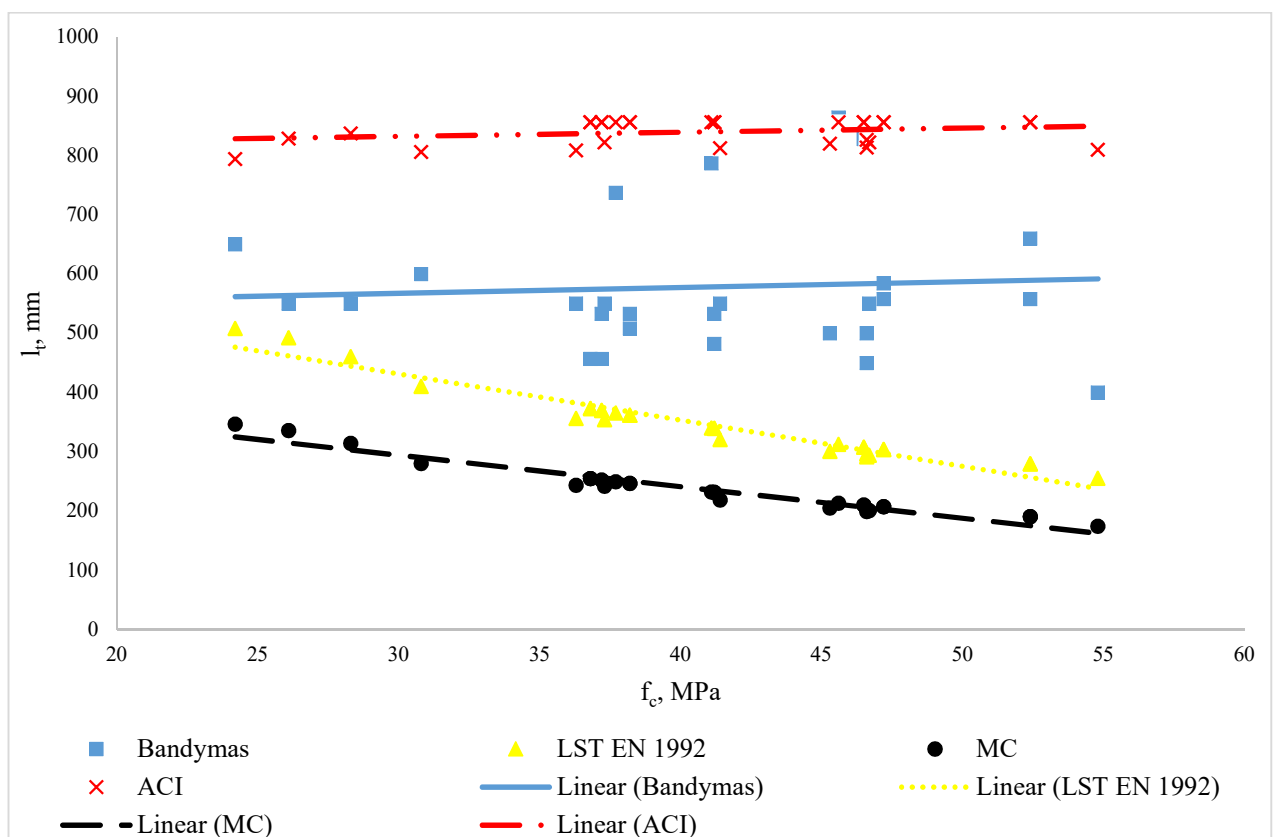
1.15 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė. $\varnothing = 15,2$ mm; $f_{pt} = 2400$ MPa; atleidimo tipas: staigus



1.16 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė. $\varnothing = 15,2$ mm; $f_{pt} = 1860$ MPa; atleidimo tipas: staigus



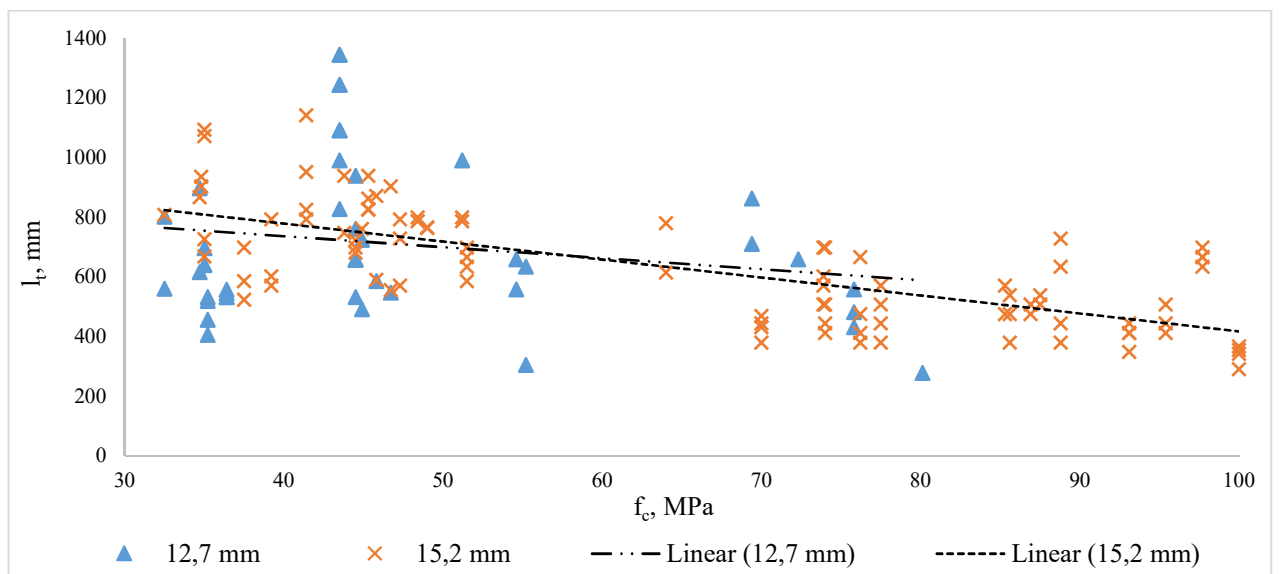
1.17 pav. Įtampių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė. $\varnothing = 12,7$ mm; $f_{pt} = 1860$ MPa; atleidimo tipas: staigus



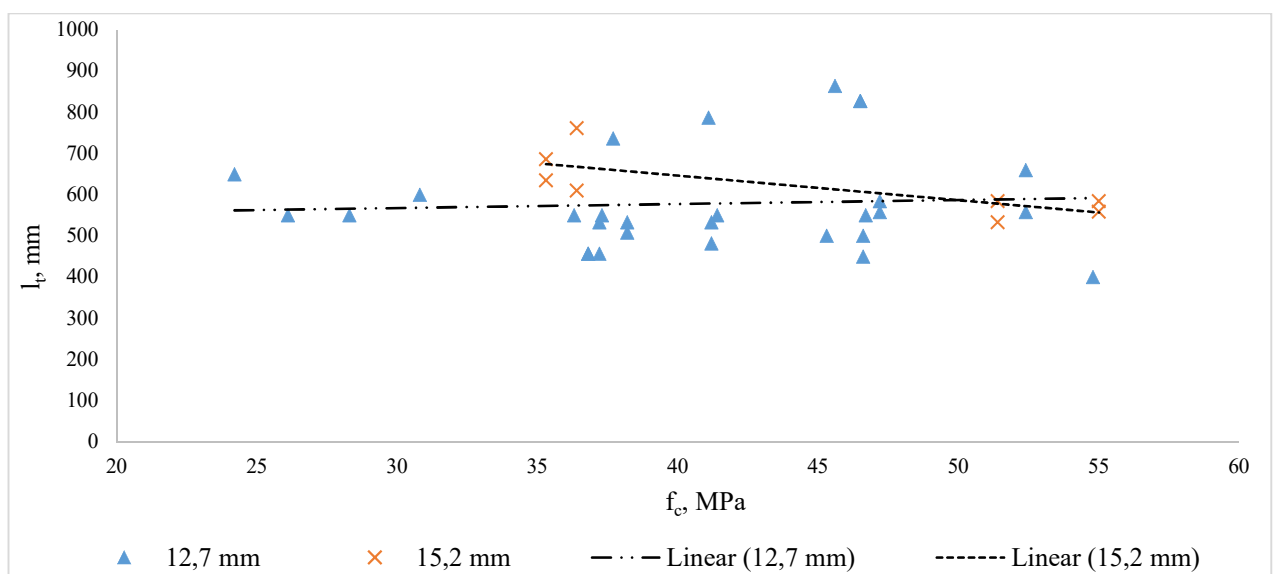
1.18 pav. Įtampių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė. $\varnothing = 12,7$ mm; $f_{pt} = 1860$ MPa; atleidimo tipas: palaipsnis

Iš regresinių kreivių matyti, kad visais atvejais įtempių perdavimo ilgio reikšmė gauta eksperimentiniu būdu yra didesnė už apskaičiuotą pagal LST EN 1992-1-1 bei MC metodikas. Skaičiavimai pagal ACI normas lėmė didžiausius įtempių perdavimo ilgio rezultatus. Didėjant betono stipriui, pastebimas vis mažesnis LST EN 1992-1-1 ir MC teorinių rezultatų skirtumas, tuo tarpu ACI normų regresinė kreivė išlieka horizontali, nes betono stipris skaičiavimuose nevertinamas. Eksperimentu nustatyta įtempių perdavimo ilgio reikšmė mažėja, didėjant betono gniuždomajam stipriui staigaus atleidimo metu. Esant palaiptiniam atleidimui, regresinė kreivė beveik horizontali.

1.19 bei 1.20 paveiksluose pateikiamos sugretintos 12,7 bei 15,2 mm skersmens lynų bandinių įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybės pagal eksperimentinius duomenis.



1.19 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė. $\emptyset = 12,7; 15,2$ mm; $f_{pt} = 1860$ MPa; atleidimo tipas: staigus



1.20 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė. $\emptyset = 12,7; 15,2$ mm; $f_{pt} = 1860$ MPa; atleidimo tipas: palaiptnis

Iš regresinių kreivių matyti, kad esant staigiam armatūros atleidimui, tiek 12,7 mm tiek 15,2 mm skersmens lynų bandinių įtempių perdavimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė panaši. Esant palaipsniui armatūros atleidimui, 15,2 mm skersmens lynų bandiniams betono gniuždomasis stipris turi didesnę įtaką įtempių perdavimo ilgiui.

Atlikta eksperimentinių tyrimų analizė patvirtina: didėjant betono gniuždomajam stipriui, įtempių perdavimo ilgis mažėja esant staigiam armatūros atleidimui. Kaip jau minėta: LST EN 1992-1-1 normose pateiktas įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas yra išsamus, palyginti su kitomis normomis, tačiau gautas teorinių ir eksperimentinių reikšmių neatitikimas patvirtina sukibties mechanizmo sudėtingumą.

Pirmajame skyriuje apžvelgus įvairias įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo metodikas pastebima, kad skaičiavimuose nėra vertinamas skirtingas vijų skaičius lynų skerspjuvyje. Taip pat literatūroje dominuojantys eksperimentai tik su septynių vijų lynais, patvirtina būtinybę nagrinėti skirtingo vijų skaičiaus lynuose įtaką įtempių perdavimo ilgiui.

2. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Antrajame skyriuje pateikiamas atlikto eksperimento su bandiniais armuotais trijų ir septynių vijų lynais aprašymas bei gauti įtempių perdavimo ilgio ir slinkties rezultatai.

2.1. Bandymo medžiagos ir schema

Nustatinėjant betono klasę, buvo išbandyti septyni betoniniai kubai, kurių matmenys 100x100x100 mm. Standartinis bandymas atliekamas su kubais 150x150x150 mm matmenimis, todėl buvo pritaikytas 0,95 mastelio faktorius gniuždomajam stipriui. Gautas vidutinis kubinis gniuždomasis betono stipris 35,96 MPa.

Nustatinėjant betono tempiamąjį stiprį, buvo išbandytos keturios betoninės prizmės lenkiant. Atstumas tarp atramų lygus 300 mm. Betono lenkiamasis stipris nustatomas pagal (22) formulę:

$$f_{cf,m} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (22)$$

čia $f_{cf,m}$ – betono lenkiamasis stipris;

F – ardančioji apkrova;

l – atstumas tarp atramų;

b ir h – bandinio skerspjūvio plotis ir aukštis.

Betono lenkiamasis stipris perskaičiuojamas į tempiamąjį pagal (23) formulę:

$$f_{ct,m} = f_{cf,m} \cdot \frac{1,5 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}}{1 + 1,5 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}} \quad (23)$$

čia: $h_0 = 100 \text{ mm}$.

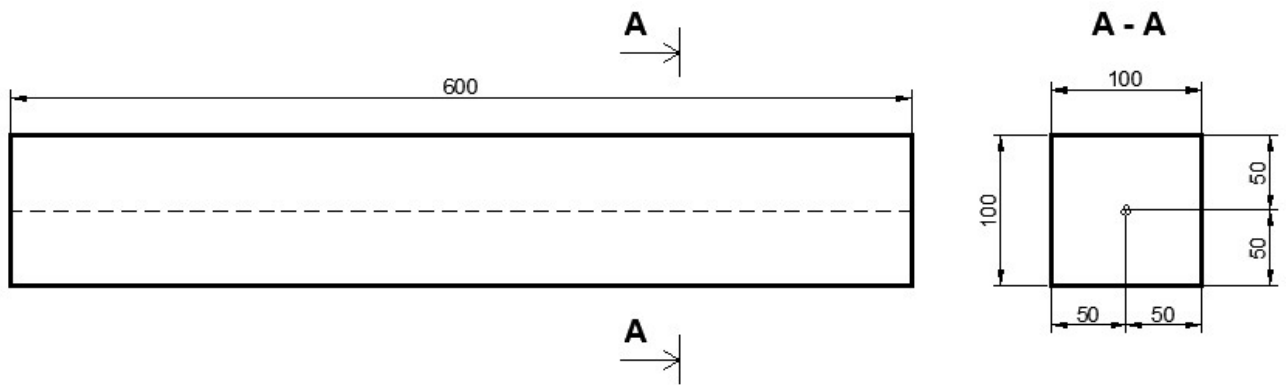
Gautas vidutinis betono tempiamasis stipris lygus 2,69 MPa.

Armatūrinių lynų, naudotų bandyme, charakteristikos pateiktos 2.1 lentelėje.

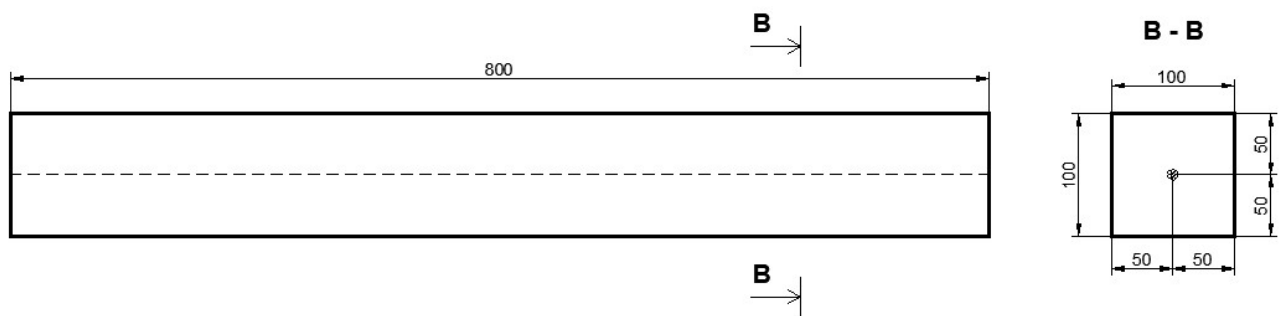
2.1 lentelė. Armatūros mechaninės savybės

f_p , MPa	$f_{p,0,1}$, MPa	E_p , GPa
1860	1640	200

Eksperimentas buvo atliktas su trimis bandiniais, armuotais trijų vijų lynais bei trimis bandiniais, armuotais septynių vijų lynais. Bandinių schemas pateiktos 2.1 bei 2.2 paveiksluose.

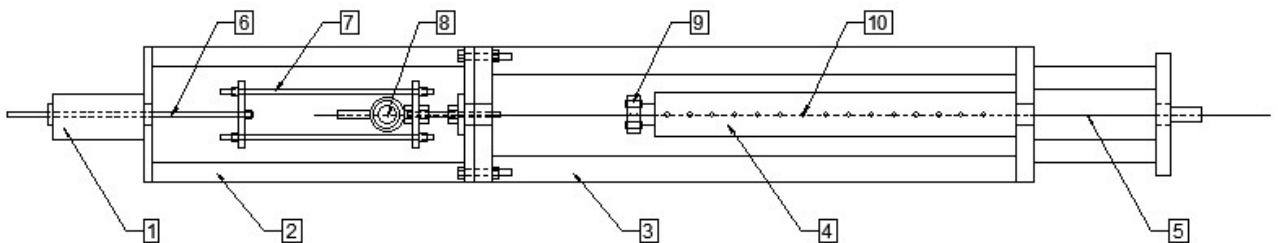


2.1 pav. Trijų vijų bandinio schema



2.2 pav. Septynių vijų bandinio schema

2.3 paveiksle pavaizduota bandymo schema.



2.3 pav. Bandymo schema: 1. hidraulinis domkratas; 2. kilnojamoji rėmo dalis; 3. stacionarioji rėmo dalis; 4. bandinys; 5. lynas; 6. jungiamasis strypas; 7. rėmas dinamometrui; 8. dinamometras; 9. skaitmeniniai poslinkio jutikliai; 10. deformacijų matavimo taškai

2.2. Bandymo eiga

Lynų paviršiai buvo nuvalyti, siekiant suvienodinti sukibties sąlygas, ir septyni stacionarūs rėmai paruošti įtempimo procesui. Kilnojamoji rėmo dalis buvo tvirtinama prie kiekvienos stacionarios rėmo dalies atskirai, atliekant įtempimo bei įtempių atleidimo operacijas (2.8 pav.). Lynai įtempiami iki $0,75f_p$ ribos, įtempimo jėga kontroliuojama dinaminiu domkratu, taip pat kontroliniai matavimai atliekami dinamometru. 2.4 paveiksle pavaizduoti rėmai po įtempimo operacijos.



2.4 pav. Rėmai po įtempimo operacijos

Atlikus įtempimą, jėga fiksuota pristūmus plokštelę prie rėmo plokštumos ir užveržus veržlę prie plokštelės (2.5 pav.).

a)

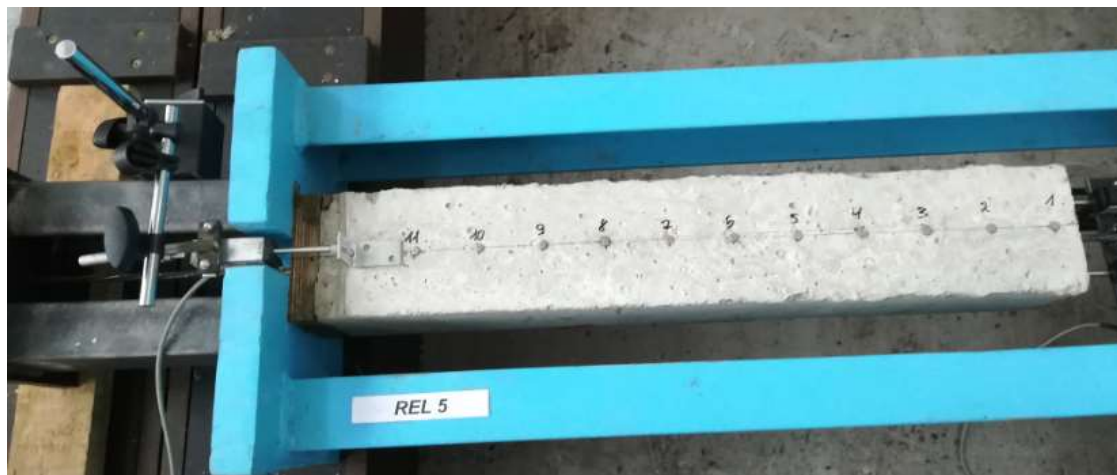


b)



2.5 pav. Įtempimo fiksavimas: a) vaizdas bendroje schemoje ir b) padidintas vaizdas

Atlikus betonavimą, po 28 parų DEMEC skaitmeniniu matuokliu matuojami atstumai tarp deformacijų matavimo taškų (2.6 pav.), prie lyno pritvirtinami slinkties matavimo jutikliai (2.7 pav.) ir įtempimas atleidžiamas dinaminio domkratu (2.8 pav.).



2.6 pav. Deformacijų matavimo taškai

a)



b)



2.7 pav. Slinkties matavimo jutikliai: a) vaizdas bendroje schemoje ir b) padidintas vaizdas



2.8 pav. Bandiniai įtampių atleidimo operacijos metu

2.2 lentelėje pateikiamos jėgos reikšmės įtempimo ir atleidimo metu.

2.2 lentelė. Įtempimo jėgos ir nuostoliai

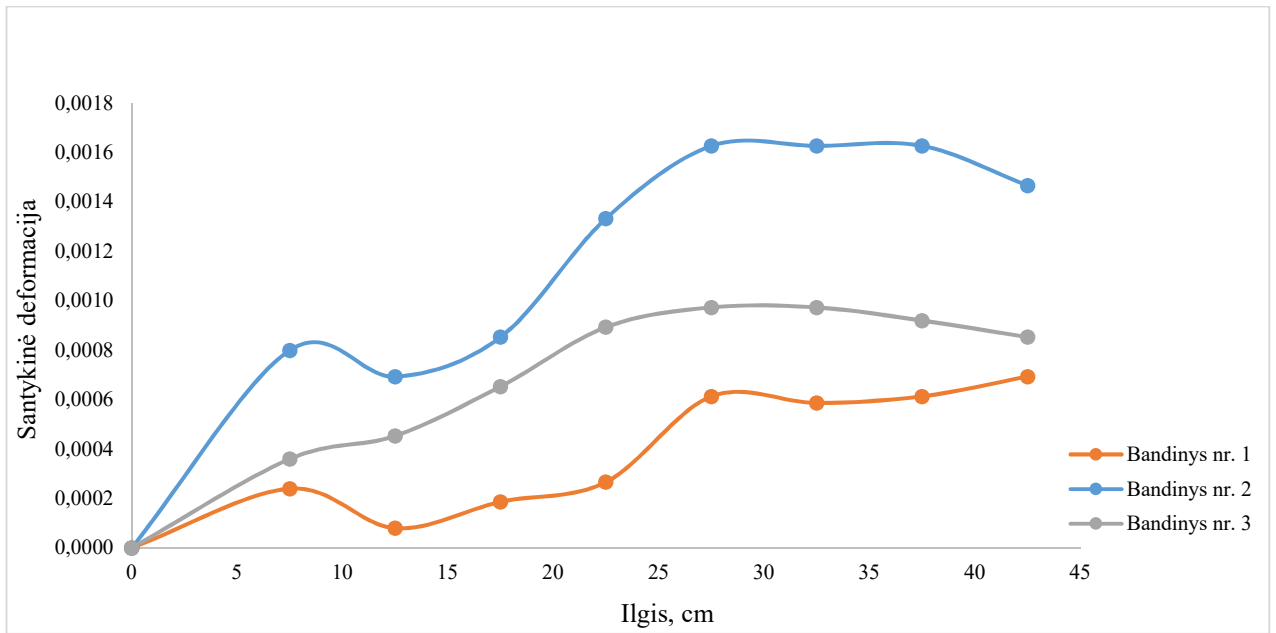
Nr.	Įtempimo jėga, kN	Atleidimo jėga, kN	Įtampių nuostoliai
1	32,5	30,9	4,9 %
2	32,5	30,2	7,1 %
3	32,5	30,5	6,2 %
5	72,5	66,0	9,0 %
6	72,5	66,0	9,0 %
7	72,5	68,3	5,8 %

Atlikus įtampių atleidimo operaciją, pakartotinai išmatuojami atstumai tarp deformacijų matavimo taškų. Gautų deformacijų suapvalinimas ir įtampių perdavimo ilgio nustatymas, panaudojant AMS 95 % metodiką, aprašytas 1.5.1 skyrelyje.

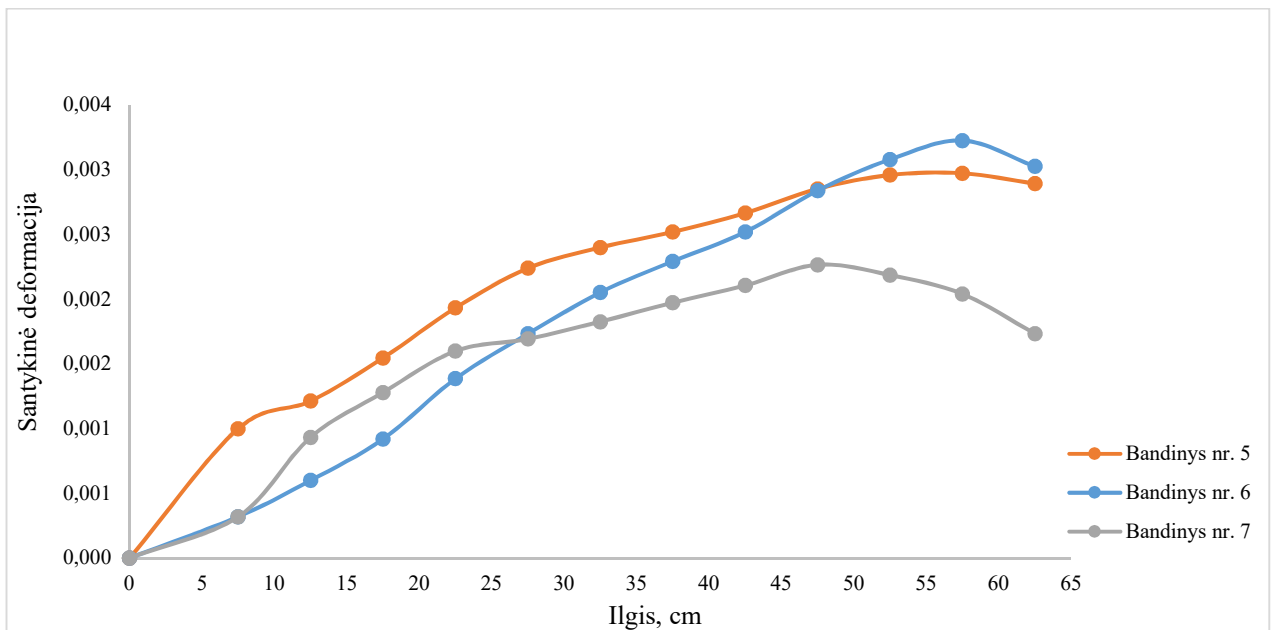
2.3. Atlikto eksperimento rezultatai

Įtampių perdavimo ilgio eksperimento rezultatai

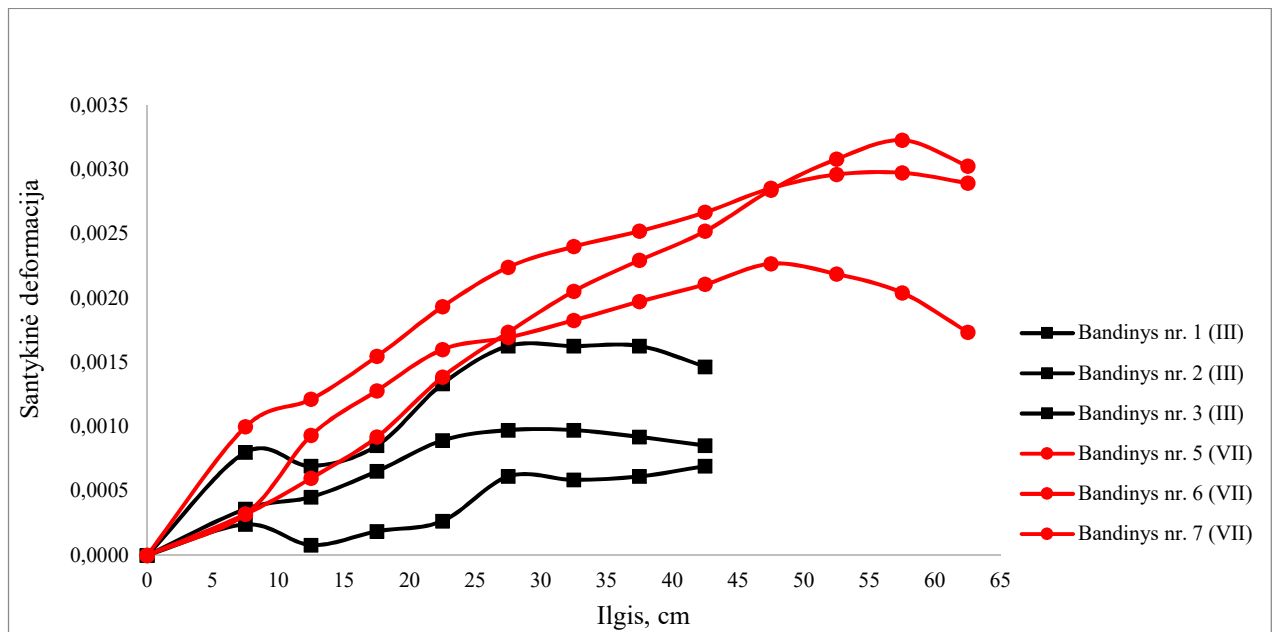
2.9–2.11 paveiksluose pateikti bandinių deformacijų – ilgio grafikai.



2.9 pav. Bandinių su trijų vijų lynais deformacijų profilis



2.10 pav. Bandinių su septynių vijų lynais deformacijų profilis



2.11 pav. Visų bandinių deformacijų profiliai

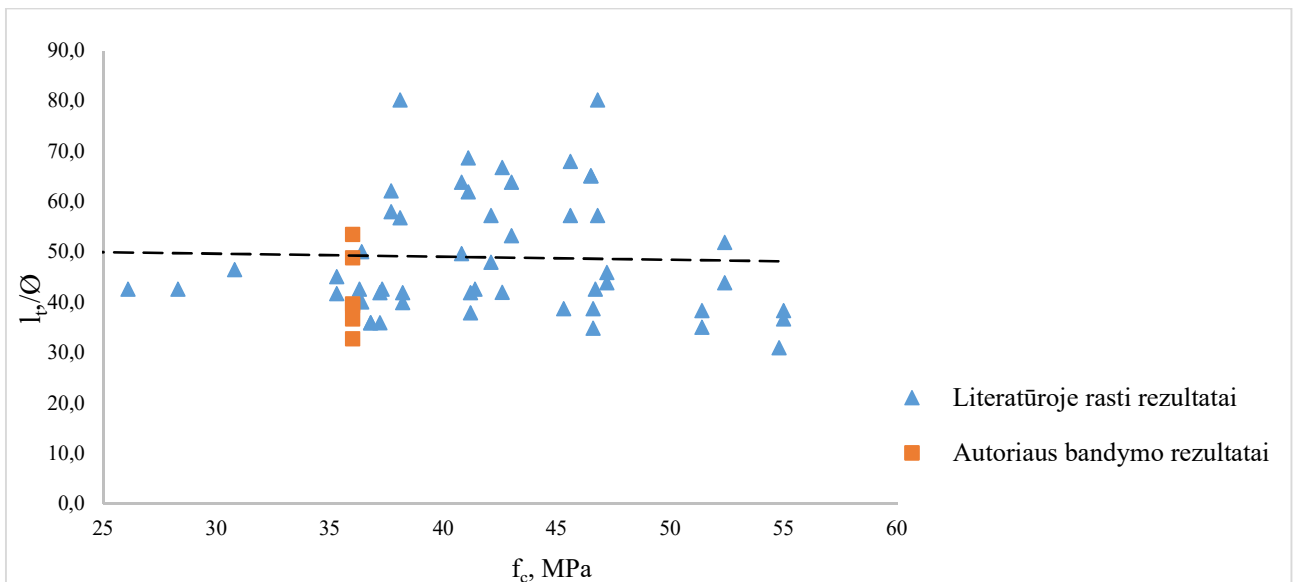
2.11 paveiksle ženklas (III) žymi bandinius su trijų vijų lynais, o (VII) – su septynių vijų lynais. Septynių vijų lynų bandiniai pasiekė didesnes deformacijas dėl didesnės įtempimo jėgos. Iš deformacijų profilių nustatytos (nustatymo tvarką žr. 1.5.1 skyrelyje) įtempių perdavimo ilgio reikšmės pateiktos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio rezultatai

Bandinio numeris	F , kN	F_{vid} , kN	Nustatytas įtempių perdavimo ilgis l_t , cm	$l_{t,vid}$, cm
1 (III vijos)	30,9	30,5	27,0	24,77
2 (III vijos)	30,2		25,0	
3 (III vijos)	30,5		22,3	
5 (VII vijos)	66,0	66,8	45,5	44,0
6 (VII vijos)	66,0		49,8	
7 (VII vijos)	68,3		36,7	

Bandinių su trijų vijų lynais vidutinis įtempių perdavimo ilgis gautas 1,8 karto mažesnis už bandinių su septynių vijų lynais. Didžiąja dalimi tą sąlygojo 2,2 karto mažesnė išankstinio įtempimo jėga.

2.12 paveiksle pateikta įtempių perdavimo ilgio ir armatūros skersmens santykio priklausomybė nuo betono gniuždomojo stiprio esant palaipsniui armatūros atleidimui.

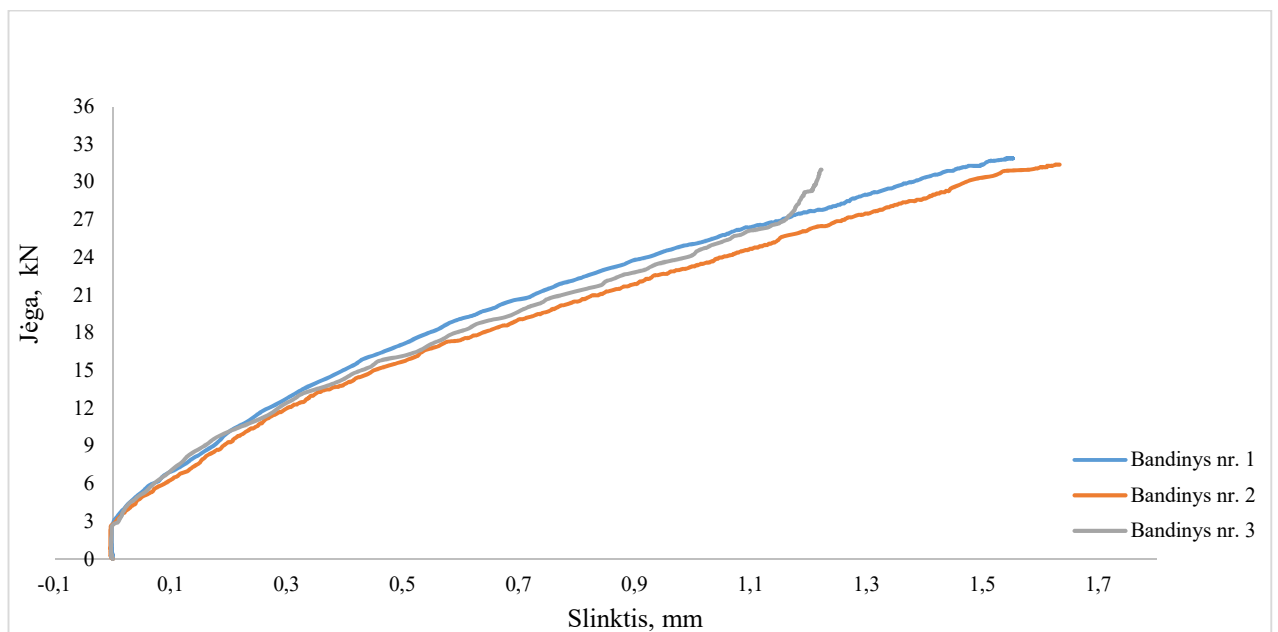


2.12 pav. Įtempių perdavimo ilgio ir armatūros skersmens santykio priklausomybė nuo betono gniuždomojo stiprio. Atleidimo tipas: palaipsnis

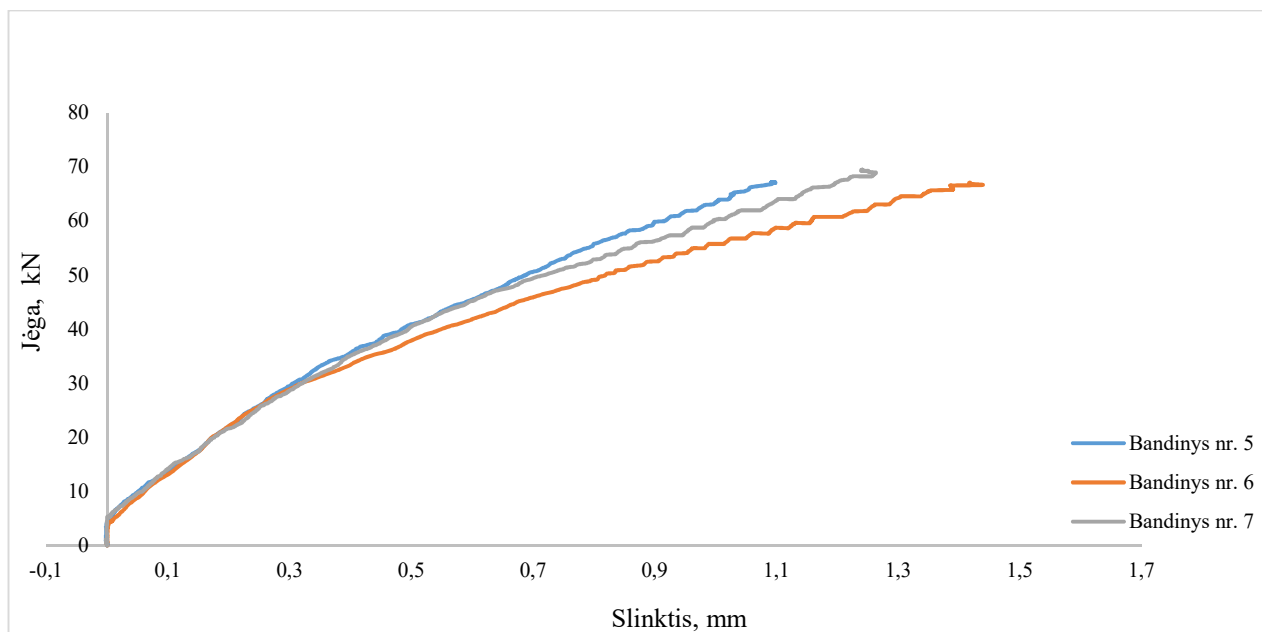
2.12 paveiksle matyti autoriaus bandymo rezultatai literatūroje rastų bandymų kontekste. Iš regresinės kreivės matyti, kad didėjant betono gniuždomajam stipriui, santykis tarp įtempių perdavimo ilgio ir armatūros skersmens išlieka pastovus.

Slinkties eksperimento rezultatai

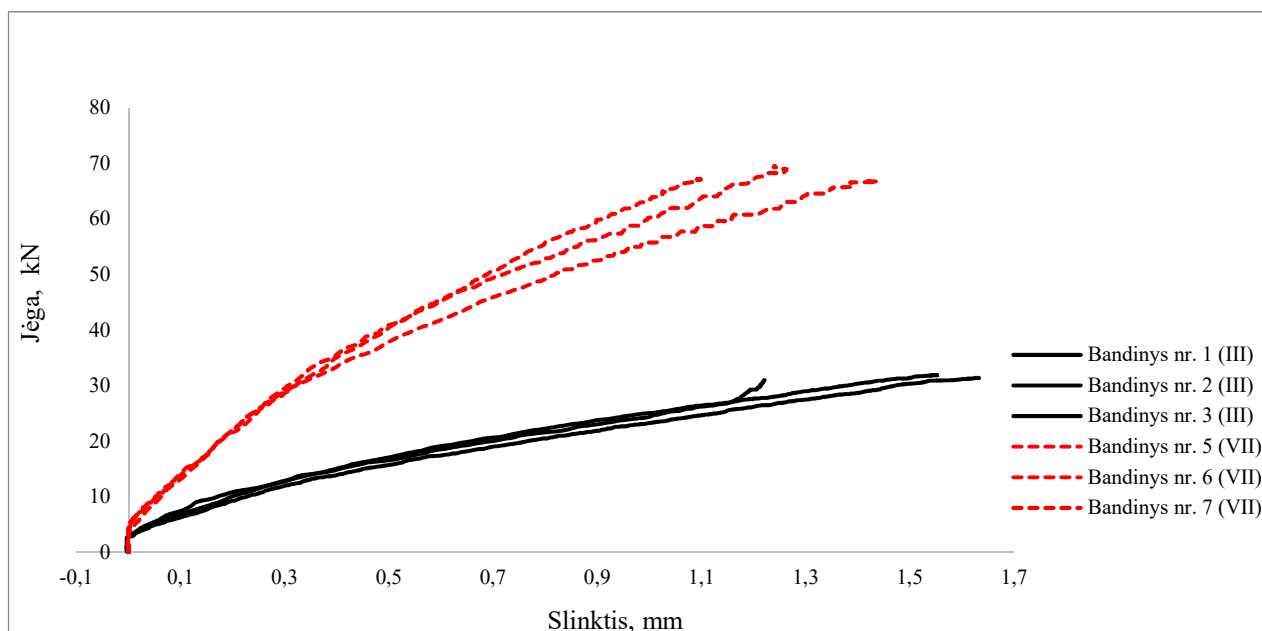
2.13–2.15 paveiksluose pateikiami bandinių lynų slinkties nuo jėgos priklausomybės grafikai, gauti skaitmeniniais poslinkio matuokliais.



2.13 pav. Bandinių su trijų vijų lynais slinkties nuo jėgos priklausomybė



2.14 pav. Bandinių su septynių vijų slinkties nuo jėgos priklausomybė



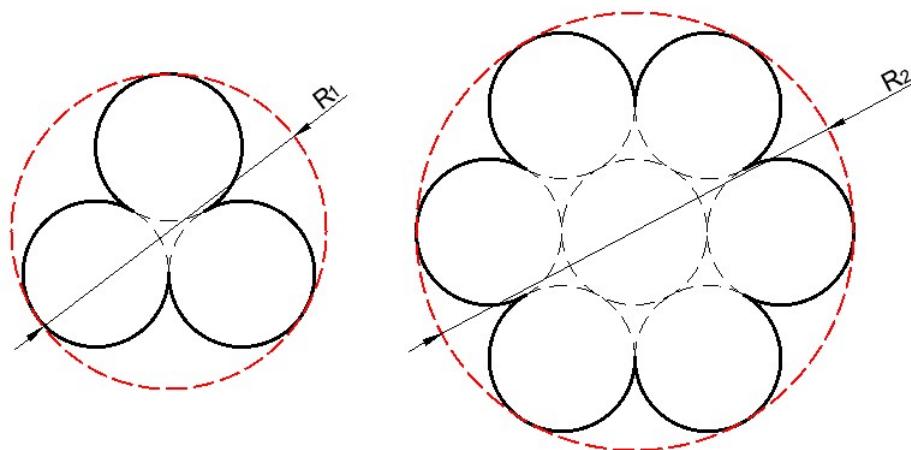
2.15 pav. Visų bandinių slinkties nuo jėgos priklausomybė

2.4 lentelėje pateikti slinkties matavimo rezultatai.

2.4 lentelė. Slinkties bandymo rezultatai

Bandinio numeris	F , kN	F_{vid} , kN	Slinktis s , mm	s_{vid} , mm
1 (III vijos)	30,9	30,5	1,55	1,47
2 (III vijos)	30,2		1,63	
3 (III vijos)	30,5		1,22	
5 (VII vijos)	66,0	66,8	1,10	1,25
6 (VII vijos)	66,0		1,42	
7 (VII vijos)	68,3		1,24	

Pastebima, kad trijų vijų lynai įsislinko į betoną 0,22 mm (1,2 karto) daugiau veikiant beveik du kartus mažesnei apkrovai. Geresnes septynių vijų lynų sukibties savybes galima paaikškinti didesniu skerspjūvio perimetro ir skersmens santykiu, kuris septynių vijų lynų atveju lygus 4,19, o trijų vijų – 3,65 (2.16 pav.). Tai reiškia, kad septynių vijų konfiguracija yra efektyvesnė dėl santykinai didesnio sukibties paviršiaus.



2.16 pav. Lynų skerspjūvių skersmuo ir perimetras

Antrajame skyriuje atliktas bandymas parodė, kad trijų ir septynių vijų lynų sukibties savybės skiriasi. Tai pagrindžia slinkties bandymo rezultatai, kurie parodė, kad septynių vijų lynai, veikiami beveik dvigubai didesnės jėgos, į betoną įsislinko mažiau už trijų vijų lynus.

3. EKSPERIMENTINIŲ IR TEORINIŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS

Trečiajame skyriuje eksperimentiniu būdu gautos įtempių perdavimo ilgio reikšmės palyginamos su gautomis apskaičiuojant pagal įvairias projektavimo normas, priimant bandymo pradinius duomenis. Iš bandymo duomenų apskaičiuojami α , η_{p1} , α_2 bei α_{p3} koeficientai, kurie išryškina trijų ir septynių vijų skirtumą sukibties stiprio ir įtempių perdavimo ilgio skaičiavime.

3.1. Įtempių perdavimo ilgio ir slinkties priklausomybė

Pasinaudojus Y. Guyono pasiūlyta priklausomybe, įtempių perdavimo ilgį galima apskaičiuoti iš slinkties bandymo rezultatų.

$$L_t = \alpha \cdot \frac{s \cdot E_p}{\sigma_p}, \quad (24)$$

čia α – koeficientas, priklausantis nuo sukibties įtempių diagramos formos. 2 – stačiakampė, 3 – trikampė;

s – lyno slinktis;

E_p – lyno plieno tamprumo modulis;

σ_p – įtempiai lynė po atleidimo. (Guyon, 1953)

Model Code 2010 projektavimo nurodymuose, α koeficiento reikšmė lygi 2,0, tai reiškia, kad sukibties įtempiai yra pastovūs. 3.1 lentelėje pateikiami įtempių perdavimo ilgio skaičiavimai iš slinkties bandymo, priėmus α koeficiento reikšmę lygią 2,0.

3.1 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas iš slinkties duomenų

Bandinio numeris	s , mm	α	E_p , GPa	σ_p , MPa	l_t , cm	$l_{t,vid}$, cm	$l_{t,vid,eks}$, cm
1 (III vijos)	1,55	2,0	200	1321	47,01	45,0	24,77
2 (III vijos)	1,63	2,0	200	1291	50,61		
3 (III vijos)	1,22	2,0	200	1303	37,50		
5 (VII vijos)	1,10	2,0	200	1269	34,67	39,0	44,0
6 (VII vijos)	1,42	2,0	200	1269	44,69		
7 (VII vijos)	1,24	2,0	200	1313	37,79		

3.1 lentelėje $l_{t,vid}$ reprezentuoja vidutinį įtempių perdavimo ilgį, apskaičiuotą iš slinkties bandymo, o $l_{t,vid,eks}$ – gautą iš deformacijų matavimo betono paviršiuje bandymo. Trijų vijų lynų bandinių vidutinis įtempių perdavimo ilgis nustatytas iš slinkties bandymo, lyginant su betono deformacijų matavimo metodu skyrėsi 20,2 cm (1,8 karto), o septynių vijų 5,0 cm (1,12 karto). Rezultatai rodo, kad normose taikomas sukibties įtempių modelis septynių vijų lynų bandiniams davė 13 % paklaidą, o trijų vijų lynų bandiniams net tris kartus didesnę – 45 % paklaidą.

3.2. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas pagal įvairias projektavimo normas

3.2–3.4 lentelėse pateikiami susisteminti įtempių perdavimo ilgio skaičiavimai pagal LST EN 1992-1-1, MC bei ACI 318 projektavimo normas, atitinkamai pagal (9), (10) ir (11) formules. Pradiniai duomenys skaičiavimams priimti pagal atliktą bandymą, koeficientų paaiškinimus žr. 1.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Susisteminti įtempių perdavimo ilgio skaičiavimai pagal LST EN 1992-1-1

Nr.	n	\emptyset , mm	F , kN	A , mm ²	f_{ct} , MPa	η_{p1}	η_1	α_1	α_2	σ_{pm0} , MPa	f_{bpt} , MPa	l_{pt} , cm	$l_{pt,vid}$, cm
1	3	6,8	30,9	23,4	2,69	3,2	1,0	1,0	0,19	1321	8,61	19,8	19,6
2	3	6,8	30,2	23,4	2,69	3,2	1,0	1,0	0,19	1291	8,61	19,4	
3	3	6,8	30,5	23,4	2,69	3,2	1,0	1,0	0,19	1303	8,61	19,6	
5	7	9,3	66	52	2,69	3,2	1,0	1,0	0,19	1269	8,61	26,1	26,4
6	7	9,3	66	52	2,69	3,2	1,0	1,0	0,19	1269	8,61	26,1	
7	7	9,3	68,3	52	2,69	3,2	1,0	1,0	0,19	1313	8,61	27,0	

3.3 lentelė. Susisteminti įtempių perdavimo ilgio skaičiavimai pagal MC 2010 normas

Nr.	n	\emptyset , mm	F , kN	A , mm ²	f_{ct} , MPa	η_{p1}	η_{p2}	α_{p1}	α_{p2}	α_{p3}	σ_{pi} , MPa	f_{bpd} , MPa	l_{bp} , cm	$l_{bp,vid}$, cm
1	3	6,8	30,9	23,4	2,69	1,2	1,0	1,0	0,5	0,5	1321	3,23	11,2	11,1
2	3	6,8	30,2	23,4	2,69	1,2	1,0	1,0	0,5	0,5	1291	3,23	11,0	
3	3	6,8	30,5	23,4	2,69	1,2	1,0	1,0	0,5	0,5	1303	3,23	11,1	
5	7	9,3	66	52	2,69	1,2	1,0	1,0	0,5	0,5	1269	3,23	17,8	18,0
6	7	9,3	66	52	2,69	1,2	1,0	1,0	0,5	0,5	1269	3,23	17,8	
7	7	9,3	68,3	52	2,69	1,2	1,0	1,0	0,5	0,5	1313	3,23	18,4	

3.4 lentelė. Susisteminti įtempių perdavimo ilgio skaičiavimai pagal ACI318 normas

Nr.	n	\emptyset , mm	F , kN	A , mm ²	σ_{pi} , MPa	l_t , cm	$l_{t,vid}$, cm
1	3	6,8	30,9	23,4	1321	43,4	42,9
2	3	6,8	30,2	23,4	1291	42,4	
3	3	6,8	30,5	23,4	1303	42,8	
5	7	9,3	66	52	1269	57,0	57,7
6	7	9,3	66	52	1269	57,0	
7	7	9,3	68,3	52	1313	59,0	

3.5 lentelė. Eksperimento rezultatų palyginimas su normomis

Rezultatai	Vijų skaičius		7	
	3	7	3	7
$l_{t,vid,eks}$, cm	24,77	-	44,0	-
$l_{t,vid(\alpha=2,0)}$, cm	45,0	82 %	39,0	-11 %
$l_{t,vid,LST}$, cm	19,6	-21 %	26,4	-40 %
$l_{t,vid,MC}$, cm	11,1	-55 %	18,0	-59 %
$l_{t,vid,ACI}$, cm	42,9	73 %	57,7	31 %

Lyginant su eksperimento rezultatais, įtempių perdavimo ilgis trijų vijų lynų bandiniuose tiksliausiai apskaičiuotas pagal LST EN 1992-1-1 metodiką (paklaida 21 %), o septynių vijų lynų – pagal skaičiavimą iš slinkties bandymo (paklaida 11 %). Tuo tarpu didžiausia paklaida skaičiuojant pagal slinkties bandymo rezultatus bei MC projektavimo normas atitinkamai 82 % ir 59 % trijų ir septynių vijų lynų bandiniuose. Teorinės reikšmės, apskaičiuotos pagal LST EN 1992-1-1 bei MC metodikas gautos mažesnės už eksperimentines, o pagal ACI normas – didesnės abiejų tipų bandiniuose, tai sutampa su regresinėmis kreivėmis 1.5.2 skyrelyje.

3.3. α koeficiento reikšmės nustatymas remiantis eksperimentų rezultatais

Koeficientas α , apibūdinantis sukibties įtempių diagramos formą, apskaičiuojamas pertvarkius (24) formulę. Galutinė išraiška:

$$\alpha = \frac{\sigma_p \cdot l_t}{s \cdot E_p} \quad (25)$$

3.6 lentelėje pateikti koeficiento α skaičiavimo rezultatai.

3.6 lentelė. Koeficiento α nustatymas

Bandinio numeris	s, mm	l_t , cm	E_p , GPa	σ_p , MPa	α	α_{vid}
1 (III vijos)	1,55	27,0	200	1321	1,15	1,11
2 (III vijos)	1,63	25,0	200	1291	0,99	
3 (III vijos)	1,22	22,3	200	1303	1,19	
5 (VII vijos)	1,10	45,5	200	1269	2,63	2,27
6 (VII vijos)	1,42	49,8	200	1269	2,23	
7 (VII vijos)	1,24	36,7	200	1313	1,94	

Vidutinė koeficiento α reikšmė, gauta bandiniams su septynių vijų lynais, atitinka literatūroje siūlomą reikšmę (2,0 – 3,0). Be to, nuo MC projektavimo normose siūlomos reikšmės (2,0) skiriasi 14 %. Apskaičiuota vidutinė α koeficiento reikšmė bandiniams su trijų vijų lynais nuo projektavimo normose siūlomos skiriasi 45 %. Galima teigti, kad projektavimo normų siūlomas stačiakampės

sukibties įtempių diagramos modelis yra pakankamai tikslus septynių vijų lynų atveju, tačiau trijų vijų lynų sukibties modelis turėtų būti nagrinėjamas atskirai, priimant kitą koeficiento α reikšmę.

3.4. η_{p1} koeficiento reikšmės nustatymas

Koeficientas η_{p1} , apibūdinantis armatūros tipą ir sukibties sąlygas, skaičiuojant sukibties stiprį įtempių atleidimo metu pagal LST EN 1992-1-1 metodiką, apskaičiuojamas pertvarkius (6) formulę. Galutinė išraiška:

$$\eta_{p1} = \frac{f_{bpt}}{\eta_1 f_{ctd}}, \quad (26)$$

čia f_{bpt} – sukibties stipris įtempių atleidimo metu.

Vidutiniai sukibties įtempiai, priėmus jų tolygaus pasiskirstymo prielaidą, gaunami pertvarkius (1) formulę:

$$\tau = \frac{\sigma \cdot A}{U \cdot L} = \frac{F_0}{\pi \phi L}. \quad (27)$$

Trijų vijų lyno skerspjūvio perimetras yra 1,16 karto didesnis už apibrėžtinio apskritimo perimetrą, o septynių vijų – 1,33 karto (2.16 pav.). Atsižvelgus į tai, gaunamos sukibties įtempių išraiškos trijų vijų atveju (28) bei septynių vijų atveju (29):

$$\tau_{n=3} = \frac{F_0}{1,16\pi\phi L'} \quad (28)$$

$$\tau_{n=7} = \frac{F_0}{1,33\pi\phi L}. \quad (29)$$

Vidutinius sukibties įtempius prilyginus sukibties stipriui ($\tau_{n=i} = f_{bpt}$) bei (28) ir (29) formules įsistačius į (26), gauta η_{p1} koeficiento išraiška trijų ir septynių vijų lynams:

$$\eta_{p1(n=3)} = \frac{F_0}{\eta_1 f_{ctd} (1,16\pi\phi) l_{pt}}, \quad (30)$$

$$\eta_{p1(n=7)} = \frac{F_0}{\eta_1 f_{ctd} (1,33\pi\phi) l_{pt}}. \quad (31)$$

3.7 lentelėje pateikti susisteminti koeficiento η_{p1} skaičiavimai.

3.7 lentelė. η_{p1} koeficiento skaičiavimas LST EN 1992-1-1 normoms

Nr.	n	F_0 , kN	η_1	f_{ct} , MPa	$\frac{C}{\phi}$	π	ϕ , mm	l_{pt} , cm	η_{p1}	$\eta_{p1,vid}$	$\eta_{p1,LST}$
1	3	30,9	1,0	2,69	1,16	3,14	6,8	27	1,72	1,86	3,2
2	3	30,2	1,0	2,69	1,16	3,14	6,8	25	1,81		3,2
3	3	30,5	1,0	2,69	1,16	3,14	6,8	22,3	2,05		3,2
5	7	66	1,0	2,69	1,33	3,14	9,3	45,5	1,39	1,48	3,2
6	7	66	1,0	2,69	1,33	3,14	9,3	49,8	1,27		3,2
7	7	68,3	1,0	2,69	1,33	3,14	9,3	36,7	1,78		3,2

Vidutinė η_{p1} koeficiento reikšmė trijų vijų lynų bandiniuose gauta 1,26 karto didesnė nei septynių vijų lynų atveju. Abiejų tipų bandinių koeficientai ženkliai skiriasi nuo siūlomų LST EN 1992-1-1 metodikoje, atitinkamai 1,72 ir 2,16 karto. η_{p1} koeficientas yra atvirkščiai proporcingas įtempių perdavimo ilgiui (žr. (9) formulę), todėl didesnis LST EN 1992-1-1 priimtas η_{p1} koeficientas sutampa su išvada, kad įtempių perdavimo ilgis apskaičiuotas pagal šią metodiką gautas mažesnis nei nustatytas bandymais, abiejų lynų tipų atveju.

Sukibties stipris nurodomas MC metodikoje, apskaičiuojamas pagal (32) išraišką, koeficientų paaiškinimus žr. 1.2 lentelėje.

$$f_{bpd} = \eta_{p1}\eta_{p2}f_{ctd}, \quad (32)$$

Koeficientas η_{p1} , apibūdinantis armatūros tipą skaičiuojant sukibties stiprį įtempių atleidimo metu pagal MC metodiką, apskaičiuojamas:

$$\eta_{p1} = \frac{f_{bpd}}{\eta_{p2}f_{ctd}}, \quad (33)$$

Analogiškai sukibties įtempius prilyginus sukibties stipriui ($\tau_{n=i} = f_{bpd}$) ir (28), (29) išraiškas įsistačius į (33), gauta η_{p1} koeficiento išraiška trijų ir septynių vijų lynams:

$$\eta_{p1(n=3)} = \frac{F_0}{\eta_{p2}f_{ctd}(1,16\pi\varnothing)l_{pt}}, \quad (34)$$

$$\eta_{p1(n=7)} = \frac{F_0}{\eta_{p2}f_{ctd}(1,33\pi\varnothing)l_{pt}}. \quad (35)$$

3.8 lentelėje pateikti susisteminti koeficiento η_{p1} skaičiavimai.

3.8 lentelė. η_{p1} koeficiento skaičiavimas MC normoms

Nr.	n	F_0 , kN	η_{p2}	f_{ct} , MPA	$\frac{C}{\varnothing}$	π	\varnothing , mm	l_{pt} , cm	η_{p1}	$\eta_{p1,vid}$	$\eta_{p1,MC}$
1	3	30,9	1,0	2,69	1,16	3,14	6,8	27	1,72	1,86	1,2
2	3	30,2	1,0	2,69	1,16	3,14	6,8	25	1,81		1,2
3	3	30,5	1,0	2,69	1,16	3,14	6,8	22,3	2,05		1,2
5	7	66	1,0	2,69	1,33	3,14	9,3	45,5	1,39	1,48	1,2
6	7	66	1,0	2,69	1,33	3,14	9,3	49,8	1,27		1,2
7	7	68,3	1,0	2,69	1,33	3,14	9,3	36,7	1,78		1,2

Gauti η_{p1} koeficientai abiejų tipų bandiniams skiriasi nuo siūlomų Model Code metodikoje, atitinkamai 1,55 ir 1,23 karto. MC normose nurodytas η_{p1} koeficientas tiksliau nei LST EN 1992-1-1 atitinka apskaičiuotuosius pagal bandymo rezultatus.

3.5. α_2 ir α_{p3} koeficientų reikšmių nustatymas

Koeficientas α_2 , apibūdinantis armatūros tipą, skaičiuojant įtempių perdavimo ilgį pagal LST EN 1992-1-1 metodiką, apskaičiuojamas pertvarkius (9) formulę ir vietoje η_{p1} koeficiento įsistačius (30) ir (31) išraiškas. Galutinės išraiškos:

$$\alpha_{2(n=3)} = \frac{F_0}{\alpha_1 \emptyset \sigma_{pm0} (1,16\pi \emptyset)} \quad (36)$$

$$\alpha_{2(n=7)} = \frac{F_0}{\alpha_1 \emptyset \sigma_{pm0} (1,33\pi \emptyset)} \quad (37)$$

3.9 lentelėje pateikti susisteminti α_2 koeficiento skaičiavimai.

3.9 lentelė. α_2 koeficiento skaičiavimas

Nr.	n	F_0 , kN	α_1	\emptyset , mm	σ_{pm0} , MPa	$\frac{C}{\emptyset}$	π	α_2	$\alpha_{2,vid}$	$\alpha_{2,EC2}$
1	3	30,9	1,0	6,8	1321	1,16	3,14	0,14	0,14	0,19
2	3	30,2	1,0	6,8	1291	1,16	3,14	0,14		0,19
3	3	30,5	1,0	6,8	1303	1,16	3,14	0,14		0,19
5	7	66	1,0	9,3	1269	1,33	3,14	0,14	0,14	0,19
6	7	66	1,0	9,3	1269	1,33	3,14	0,14		0,19
7	7	68,3	1,0	9,3	1313	1,33	3,14	0,14		0,19

Vidutinė α_2 koeficiento reikšmė abiejų tipų bandiniams gauta ta pati (0,14) ir nuo projektavimo normose siūlomos skiriasi 1,35 karto.

Koeficientas α_{p3} , apibūdinantis sukibties pobūdį, skaičiuojant įtempių perdavimo ilgį pagal MC metodiką, apskaičiuojamas pertvarkius (10) formulę ir vietoje η_{p1} koeficiento įsistačius (34) ir (35) išraiškas. Galutinės išraiškos:

$$\alpha_{p3(n=3)} = \frac{1}{1,16\alpha_{p1}\alpha_{p2}} \quad (38)$$

$$\alpha_{p3(n=7)} = \frac{1}{1,33\alpha_{p1}\alpha_{p2}} \quad (39)$$

3.10 lentelėje pateikti susisteminti α_2 koeficiento skaičiavimai.

3.10 lentelė. α_{p3} koeficiento skaičiavimas

Nr.	n	α_{p1}	α_{p2}	α_{p3}	$\alpha_{p3,vid}$	$\alpha_{p3,MC}$
1	3	1,0	0,5	1,72	1,72	0,5
2	3	1,0	0,5	1,72		0,5
3	3	1,0	0,5	1,72		0,5
5	7	1,0	0,5	1,5	1,5	0,5
6	7	1,0	0,5	1,5		0,5
7	7	1,0	0,5	1,5		0,5

Vidutinė α_{p3} koeficiento reikšmė gauta skirtinga trijų ir septynių vijų lynų atveju ir atitinkamai nuo MC normų siūlomos reikšmės skyrėsi 3,44 ir 3 karto. Nors η_{p1} koeficientas nurodomas MC projektavimo normų ir tiksliau atitinka bandymo rezultatus nei nurodomas LST EN 1992-1-1, tačiau α_{p3} koeficiento reikšmė gauta su didesne paklaida, nei gauta koeficiento α_2 .

Susisteminti rezultatai

3.11 lentelėje pateikti susisteminti skyriaus skaičiavimų ir bandymų rezultatai.

3.11 lentelė. Rezultatų suvestinė

Nr.	\emptyset , mm	σ_{pm0} MPa	s, mm	α	l_{pt} , cm	$l_{pt}(\alpha = 2)$, cm	$l_{pt,LST}$, cm	$l_{pt,MC}$, cm	$l_{pt,ACI}$, cm
1	6,8	1321	1,55	1,15	27,0	47,01	19,8	11,2	43,4
2	6,8	1291	1,63	0,99	25,0	50,61	19,4	11,0	42,4
3	6,8	1303	1,22	1,19	22,3	37,50	19,6	11,1	42,8
5	9,3	1269	1,10	2,63	45,5	34,67	26,1	17,8	57,0
6	9,3	1269	1,42	2,23	49,8	44,69	26,1	17,8	57,0
7	9,3	1313	1,24	1,94	36,7	37,79	27,0	18,4	59,0

3.12 lentelėje pateiktos pagrindinių rezultatų vidutinės reikšmės.

3.12 lentelė. Rezultatų vidurkiai

Vijų skaičius	σ_{pm0} , MPa	s, mm	l_{pt} , cm	$l_{pt,(LST)}$, cm	$l_{pt,(MC)}$, cm	$l_{pt,(ACI)}$, cm	α	$\eta_{p1,LST}$	$\eta_{p1,MC}$	α_2	α_{p3}
3	1305	1,47	24,8	19,6	11,1	42,9	1,11	1,86	1,86	0,14	1,72
7	1284	1,25	44,0	26,4	18,0	57,7	2,27	1,48	1,48	0,14	1,5

3.13 lentelėje pateiktas įtempių perdavimo ilgis, skaičiuotas pagal LST EN 1992-1-1 metodiką, pritaikius gautus koeficientus bei gautų reikšmių palyginimas su eksperimento rezultatais.

3.13 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas naudojant gautus koeficientus

Nr.	<i>n</i>	Ø, mm	σ_{pm0} , MPa	f_{ct} , MPa	η_{p1}	η_1	α_1	α_2	f_{bpt} , MPa	l_{pt} , cm	$l_{pt,vid}$, cm	$l_{t,vid,eks}$, cm
1	3	6,8	1321	2,69	1,86	1,0	1,0	0,14	5,00	25,1	24,8	24,77
2	3	6,8	1291	2,69	1,86	1,0	1,0	0,14	5,00	24,6		
3	3	6,8	1303	2,69	1,86	1,0	1,0	0,14	5,00	24,8		
5	7	9,3	1269	2,69	1,48	1,0	1,0	0,14	3,98	41,5	42,0	44,0
6	7	9,3	1269	2,69	1,48	1,0	1,0	0,14	3,98	41,5		
7	7	9,3	1313	2,69	1,48	1,0	1,0	0,14	3,98	43,0		

3.14 lentelėje pateiktas įtempių perdavimo ilgis, skaičiuotas pagal MC metodiką, pritaikius gautus koeficientus bei gautų reikšmių palyginimas su eksperimento rezultatais.

3.14 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio skaičiavimas naudojant gautus koeficientus

Nr.	<i>n</i>	Ø, mm	f_{ct} , MPa	η_{p1}	η_{p2}	α_{p1}	α_{p2}	α_{p3}	σ_{pt} , MPa	f_{bpd} , MPa	l_{bp} , cm	$l_{bp,vid}$, cm	$l_{t,vid,eks}$, cm
1	3	6,8	2,69	1,86	1,0	1,0	0,5	1,72	1321	5,00	24,9	24,6	24,77
2	3	6,8	2,69	1,86	1,0	1,0	0,5	1,72	1291	5,00	24,3		
3	3	6,8	2,69	1,86	1,0	1,0	0,5	1,72	1303	5,00	24,6		
5	7	9,3	2,69	1,48	1,0	1,0	0,5	1,5	1269	3,98	43,2	43,7	44,0
6	7	9,3	2,69	1,48	1,0	1,0	0,5	1,5	1269	3,98	43,2		
7	7	9,3	2,69	1,48	1,0	1,0	0,5	1,5	1313	3,98	44,7		

Trečiajame skyriuje analitiškai apskaičiuoti α , η_{p1} ir α_{p3} koeficientai išryškina trijų ir septynių vijų lynų sukibties modelio skirtumus. Nevienodas santykis tarp skersmens ir sukibties ploto ir skirtingas mechaninių spraustelių dydis ir kiekis tai tik dalis veiksnių, kurie šiuos skirtumus lemia. Norint tinkamai išanalizuoti skirtingų skerspjuvio formų lynų elgsenos betone skirtumus, būtina atlikti platesnius tyrimus, kuriuose lynai būtų gretinami.

IŠVADOS

1. Apžvelgus įvairių projektavimo normų ir kitų autorių siūlytas įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo metodikas, pastebima, kad nė viena jų nevertina skirtingos armatūrinių lynų skerspjūvio formos. Kintant vijų skaičiui skerspjūvyje, keičiasi jo perimetro ir skersmens santykis. LST EN 1992-1-1 pateiktoje įtempių perdavimo ilgio skaičiavimo metodikoje skirtingais koeficientais išskiriami tik apvalūs strypai ir lynai, bet tarp skirtingo vijų skaičiaus lynuose skirtumo nėra.
2. Atlikus įtempių perdavimo ilgio eksperimentinių tyrimų apžvalgą pastebima: literatūroje dominuoja bandymai tik su septynių vijų lynais. Eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė patvirtina daugelio autorių minėtą teiginį: didėjant betono gniuždomajam stipriui, įtempių perdavimo ilgis mažėja esant staigiam armatūros atleidimui. Eksperimentais nustatytas įtempių perdavimo ilgis buvo didesnis už analogiškai apskaičiuotus pagal LST EN 1992-1-1 ir MC normų nurodymus, tuo tarpu pagal ACI normas gautos reikšmės buvo didesnės už bandymo rezultatus.
3. Eksperimentiniu būdu išmatuotas vidutinis įtempių perdavimo ilgis bandiniuose su trijų vijų lynais gautas lygus 24,77 cm, bandiniuose su septynių vijų lynais – 44,0 cm. Įtempių perdavimo ilgis bandiniuose skiriasi 1,8 karto, tą sąlygoja 2,2 karto skirtumas tarp išankstinės įtempimo jėgos reikšmių. Taip pat lynuose iš septynių vijų skerspjūvio perimetro ir skersmens santykis lygus 4,19, lynuose iš trijų vijų – 3,65. Didesnis santykis lemia geresnes sukibties savybes, nes sukibtis tarp armatūros ir betono vyksta santykinai didesniu plotu.
4. Atlikus slinkties matavimo bandymą, vidutinė slinkties reikšmė bandiniuose su trijų vijų lynais išmatuota 1,47 mm, bandiniuose su septynių vijų lynais – 1,25 mm. Trijų vijų lynai įsislinko į betoną 1,2 karto daugiau už septynių vijų lynus, veikiant 2,2 karto mažesnei apkrovai. Šie rezultatai patvirtina trijų ir septynių vijų lynų sukibties skirtumus. Pagrindiniai skirtumai: skirtingas skerspjūvio perimetro ir skersmens santykis, taip pat skirtingas mechaninių sprautelių, kurie susiformuoja betone aplink lyną, skaičius ir dydis.
5. Apskaičiavus įtempių perdavimo ilgį iš slinkties bandymo duomenų, vidutinė reikšmė bandiniuose su trijų vijų lynais gauta 45,0 cm, o bandiniuose su septynių vijų lynais – 39 cm. Įtempių perdavimo ilgio reikšmės nustatymas iš slinkties bandymo turėjo 13 % paklaidą bandiniuose su septynių vijų lynais ir net 45 % paklaidą bandiniuose su trijų vijų lynais, lyginant su betono deformacijų matavimo bandymo rezultatais. Tokios išvados pagrindžia būtinybę trijų ir septynių vijų lynus skirti skirtingomis α koeficiento reikšmėmis dėl galimo skirtingo sukibties įtempių pasiskirstymo.
6. Atlikus α koeficiento skaičiavimą pagal betono deformacijų matavimo bandymo rezultatus, gautos reikšmės: bandiniuose su trijų vijų lynais – 1,11; bandiniuose su septynių vijų lynais – 2,27. Septynių vijų lynų atveju, gautas koeficientas sutampa su kitų autorių nurodytomis ribomis 2,0 –

3,0, tačiau trijų vijų lynų α koeficiento rezultatai patvirtinta būtinybę plačiau nagrinėti trijų vijų lynų sukibties mechanizmą ir sukibties įtempių pasiskirstymą.

7. Apskaičiavus η_{p1} koeficiento reikšmę pagal betono deformacijų matavimo bandymo rezultatus, gautos reikšmės: bandiniams su trijų vijų lynais – 1,86; bandiniams su septynių vijų lynais – 1,48. Skirtingas koeficientų reikšmes lemia nevienodas lynų skerspjūvio perimetro ir skersmens santykis. Gautos reikšmės tiksliau sutapo su MC siūloma reikšme (1,2) nei LST EN 1992-1-1 (3,2).
8. Atlikus α_2 koeficientų skaičiavimą pagal betono deformacijų matavimo bandymo rezultatus, gauta ta pati (0,14) reikšmė abiejų tipų bandiniams. LST EN 1992-1-1 šis koeficientas lygus 0,19. Galima daryti išvadą, kad šiam koeficientui vijų skaičius įtakos neturi.
9. Apskaičiavus α_{p3} koeficientus pagal betono deformacijų matavimo bandymo rezultatus, gautos reikšmės: bandiniams su trijų vijų lynais – 1,72; bandiniams su septynių vijų lynais – 1,5. Skirtingas koeficientų reikšmes lemia nevienodas lynų skerspjūvio perimetro ir skersmens santykis. Gautos reikšmės skyrėsi nuo MC siūlomos reikšmės, atitinkamai 3,44 ir 3 kartus.
10. Lyno vijų skaičiaus įtaka labiausiai išryškėja nagrinėjant lynų slinktį į betoną įtempių atleidimo metu. Įtempių perdavimo ilgio nustatymas pagal slinkties bandymą yra populiarus ir mažiau imlus darbui, lyginant su deformacijų matavimu betono paviršiuje. Skaičiavime taikant tą patį α koeficientą abiejų tipų lynams kaip nurodo projektavimo normos, trijų vijų lynų atveju gauta įtempių perdavimo ilgio reikšmė gali būti per daug konservatyvi (apskaičiuota – 45,0 cm, išmatuota – 24,77 cm), o tai atsiliepia konstrukcijos ekonomiškumui. Septynių vijų lynų atveju, įtempių perdavimo ilgio reikšmė apskaičiuojama pakankamai tiksliai lyginant su betono deformacijų matavimo bandymo rezultatais (paklaida 13 %).

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI

„Ainscough Metals“. (2019). Shop: Items. Prieiga per internetą:

[https://www.ainscoughmetals.co.uk/items/steel-rebar/5.550-32mm-mild-steel-rebar--\(reinforcing-bar\)/2057](https://www.ainscoughmetals.co.uk/items/steel-rebar/5.550-32mm-mild-steel-rebar--(reinforcing-bar)/2057)

ACI Committee 318. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11) and Commentary*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

Barnes, R. W., Grove, J. W. & Burns, N. H. (2003). Experimental Assessment of Factors Affecting Transfer Length. *ACI Structural Journal*, 100 – S76, 740–748.

Briere, V., Harries, K. A., Kasan, J., Hager, C. (2012). Dilation behavior of seven – wire prestressing strand – The Hoyer effect. *Construction and Building Materials*, 40, 650–658.

Buckner, C. D. (1995). A review of strand development length for pretensioned concrete members. *PCI Journal*, 40, 84–105.

Derkowski, W., Dyba, M. (2017). Behavior of end zone of pre – tensioned concrete elements. *Procedia Engineering*, 193, 19–26.

Deatherage, J. H., Burdette, E. G., Chew, C. K. (1994). Development length and lateral spacing requirements of prestressing strands for prestressed concrete bridge girders. *PCI Journal*, 39, 70–83.

„Concrete Welded Wire“. (2019). Concrete Reinforcing Products: Steel Reinforcing. Prieiga per internetą: <https://www.reinforcingmesh.net/reinforcing-steel/prestressed-concrete-steel-strand.html>

Cousins, T. E., Johnston, D. W., Zia, P. (1990). Transfer and development length of epoxy coated and uncoated prestressing strand. *PCI Journal*, 35, 92–103.

Cousins, T. E., Stallings, J. M., Simmons, M. B. (1994). Reduced strand spacing in pretensioned, prestressed members. *ACI Structural Journal*, 91(3), 277–86.

Guyon, Y. (1953). *Prestressed Concrete*. John Wiley and Sons, New York, N. Y.

Hoyer, E., Friedrich, E. (1939). *Beitrag Zur Frage der Haftspannung in Eisenbetonbauteilen (ang. Contribution to the Question of Bond Stress in Reinforced Concrete Elements)*. Beton und Eisen, V. 38.

International Federation for Structural Concrete (fib). (2010). *Model code 2010. First complete draft – Volume 1. FIB bulletin No. 55*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete.

Kahn, L. F., Dill, J. C., Reutlinger C. G. (2002). Transfer and development length of 15 – mm strand in high performance concrete girders. *Journal Structural Engineering*, 128(7), 913–21.

Keuning, R. W., Sozen, M. A., Siess, C. P. (1962). A study of Anchorage Bond in Prestressed Concrete. *Structural Research Series No. 251*, University of Illinois, Urbana – Champaign.

- Kim, J. K., Yang, J. M., Yim, H. J. (2016). Experimental Evaluation of Transfer Length in Pretensioned Concrete Beams Using 2,400 – MPa Prestressed Strands. *Journal of Structural Engineering*, 04016088, 1–10.
- Kose, M. M., Burkett, W. R. (2005). Formulation of new development length equation for 0,6 in. prestressing strand. *PCI Journal*, 50, 96–105.
- Lane, S. N. (1998). *A new development length equation for pretensioned strands in bridge beams and piles*. USA: Federal Highway Administration.
- Lietuvos Standartizacijos departamentas. (2007). *Lietuvos standartas LST EN-1-1:2007: Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Lietuva: Lietuvos Standartizacijos departamentas.
- Marti-Vargas, J. R., Hale, W. M., Garcia-Taengua, E., Serna, P. (2013). Slip distribution model along the anchorage length of prestressing strands. *Engineering Structures*, 59, 674–685.
- Marti-Vargas, J. R., Caro, L. A. & Serna, P. (2013). Experimental Technique for Measuring the Long – term Transfer Length in Prestressed Concrete. *Strain*, 49, 125–134.
- Marti-Vargas, J. R., Hale, W. M. (2013). Predicting Strand Transfer Length in Pretensioned Concrete: Eurocode versus North American Practice. *Journal of Bridge Engineering*, 18, 1270–1280.
- Marti-Vargas, J. R., Garcia-Taengua, E., Serna, P. (2013). Influence of concrete composition on anchorage bond behavior of prestressing reinforcement. *Construction and Building Materials*, 48, 1156–1164.
- Mitchell, D., Cook, W. D., Khan, A. A., Tham, T. (1993). Influence of high strength concrete on transfer and development length of pretensioning strand. *PCI Journal*, 38, 52–66.
- Oh, B. H., Kim, E. S. (2000). Realistic Evaluation of Transfer Lengths in Pretensioned, Prestressed Concrete Members. *ACI Structural Journal*, 97, 821–830.
- Ramirez, J. A., Russell, B. W. (2008). *Transfer, development, and splice length for strand/reinforcement in high – strength concrete*. Washington D. C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- Russel, B. W., Burns, N. H. (1996). Measured transfer lengths of 0.5 and 0.6 in. strands in pretensioned concrete. *PCI Journal*, 41(3), 44–65.
- Staton, B. W., Do, N. H., Ruiz, E. D., Hale, W. M. Transfer lengths of prestressed beams cast with self – consolidating concrete. *PCI Journal*, 209, 64–83.
- Qu, H., Li, T., Chen, G. (2018). Influence Length of Wire Fracture and Wire – to – Wire Interaction in Helically Wired Strands under Axial Loads. *Journal of Bridge Engineering*, 23.
- Herrero, C., Martinez-Lage, I., Martinez-Abella, F. (2013). Transfer length in pretensioned prestressed concrete structures composed of high performance lightweight and normal – weight concrete. *Engineering Structures*, 56, 983–992.

Zia, P., Mostafa, T. (1977). Development length of prestressing strands. *PCI Journal*, 22, 54–65.

1 lentelė. Įtempių perdavimo ilgio eksperimentų duomenys ir rezultatai

Autorius	\emptyset , (mm)	σ_{pi} , (MPa)	f_c , (MPa)	f_{ct} , (MPa)	Atleidimo tipas	l_t , (mm)	$l_{t,LST}$, (mm)	$l_{t,MC}$, (mm)	$l_{t,ACI}$, (mm)
Cousins et al., 1994	12,7	1372	43,5	3,24	Staigus	1092	399	272	842
	12,7	1372	43,5	3,24	Staigus	1092	399	272	842
	12,7	1372	43,5	3,24	Staigus	1346	399	272	842
	12,7	1372	43,5	3,24	Staigus	1346	399	272	842
	12,7	1400	44,5	3,30	Staigus	660	400	273	859
	12,7	1400	44,5	3,30	Staigus	762	400	273	859
	12,7	1407	75,8	4,56	Staigus	559	291	199	863
	12,7	1407	75,8	4,56	Staigus	432	291	199	863
	12,7	1420	69,4	4,39	Staigus	864	305	208	871
	12,7	1427	55,2	3,92	Staigus	635	343	234	876
	12,7	1427	54,6	3,88	Staigus	559	346	236	876
	12,7	1379	43,5	3,24	Staigus	1245	401	274	846
	12,7	1379	43,5	3,24	Staigus	828	401	274	846
	12,7	1379	43,5	3,24	Staigus	1245	401	274	846
	12,7	1379	43,5	3,24	Staigus	991	401	274	846
	12,7	1413	44,5	3,30	Staigus	940	403	275	867
	12,7	1413	51,2	3,69	Staigus	991	361	246	867
	12,7	1427	80,1	4,66	Staigus	279	289	197	876
	12,7	1427	75,8	4,56	Staigus	483	295	201	876
	Deatherage et al., 1994	15,2	1395	55	3,91	Palaiapsnis	584	322	220
15,2		1395	55	3,91	Palaiapsnis	559	322	220	1024
15,2		1395	51,4	3,70	Palaiapsnis	533	340	232	1024
15,2		1395	51,4	3,70	Palaiapsnis	584	340	232	1024
15,2		1395	36,4	2,79	Palaiapsnis	610	451	308	1024
15,2		1395	36,4	2,79	Palaiapsnis	762	451	308	1024
15,2		1395	35,3	2,72	Palaiapsnis	686	463	316	1024
15,2		1395	35,3	2,72	Palaiapsnis	635	463	316	1024
14,3		1395	40,8	3,07	Palaiapsnis	711	385	263	964
14,3		1395	40,8	3,07	Palaiapsnis	914	385	263	964
14,3		1395	38,1	2,90	Palaiapsnis	813	408	278	964
13,3		1395	38,1	2,90	Palaiapsnis	1067	379	259	896
13,3		1395	46,8	3,44	Palaiapsnis	762	320	219	896
13,3		1395	46,8	3,44	Palaiapsnis	1067	320	219	896
13,3		1395	45,6	3,37	Palaiapsnis	762	327	223	896
12,7		1395	45,6	3,37	Palaiapsnis	864	312	213	856
12,7		1395	46,5	3,42	Palaiapsnis	828	308	210	856

1 lentelės tęsinys

Autorius	\emptyset , (mm)	σ_{pi} , (MPa)	f_c , (MPa)	f_{ct} , (MPa)	Atleidimo tipas	l_t , (mm)	$l_{t,LST}$, (mm)	$l_{t,MC}$, (mm)	$l_{t,ACI}$, (mm)
Deatherage et al., 1994	12,7	1395	46,5	3,42	Palaipsnis	828	308	210	856
	12,7	1395	37,7	2,88	Palaipsnis	737	366	249	856
	14,3	1395	37,7	2,88	Palaipsnis	889	412	281	964
	14,3	1395	43	3,21	Palaipsnis	762	369	252	964
	14,3	1395	43	3,21	Palaipsnis	914	369	252	964
	14,3	1395	42,1	3,15	Palaipsnis	686	375	256	964
	13,3	1395	42,1	3,15	Palaipsnis	762	349	238	896
	13,3	1395	42,6	3,19	Palaipsnis	559	346	236	896
	13,3	1395	42,6	3,19	Palaipsnis	889	346	236	896
	13,3	1395	41,1	3,09	Palaipsnis	914	356	243	896
	12,7	1395	41,1	3,09	Palaipsnis	787	340	232	856
	12,7	1395	37,2	2,84	Palaipsnis	457	370	252	856
	12,7	1395	37,2	2,84	Palaipsnis	533	370	252	856
	12,7	1395	36,8	2,82	Palaipsnis	457	373	255	856
	12,7	1395	36,8	2,82	Palaipsnis	457	373	255	856
	12,7	1395	41,2	3,10	Palaipsnis	482	339	232	856
	12,7	1395	41,2	3,10	Palaipsnis	533	339	232	856
	12,7	1395	38,2	2,91	Palaipsnis	533	362	247	856
	12,7	1395	38,2	2,91	Palaipsnis	508	362	247	856
	12,7	1395	52,4	3,76	Palaipsnis	660	280	191	856
12,7	1395	52,4	3,76	Palaipsnis	558	280	191	856	
12,7	1395	47,2	3,46	Palaipsnis	558	304	207	856	
12,7	1395	47,2	3,46	Palaipsnis	584	304	207	856	
Russell, 1996	12,7	1351	35,2	2,71	Staigus	457	469	320	829
	12,7	1351	35,2	2,71	Staigus	406	469	320	829
	12,7	1351	35,2	2,71	Staigus	520	469	320	829
	12,7	1351	35,2	2,71	Staigus	533	469	320	829
	12,7	1351	36,4	2,79	Staigus	546	456	311	829
	12,7	1351	36,4	2,79	Staigus	558	456	311	829
	12,7	1351	36,4	2,79	Staigus	533	456	311	829
	12,7	1351	36,4	2,79	Staigus	533	456	311	829
	15,2	1427	51,2	3,69	Staigus	787	436	297	1048
	15,2	1427	51,2	3,69	Staigus	800	436	297	1048
	15,2	1345	43,8	3,26	Staigus	749	466	318	988
	15,2	1345	43,8	3,26	Staigus	940	466	318	988
	15,2	1365	45,3	3,35	Staigus	864	460	314	1002
	15,2	1365	45,3	3,35	Staigus	940	460	314	1002
	15,2	1365	45,3	3,35	Staigus	828	460	314	1002
	15,2	1365	45,3	3,35	Staigus	826	460	314	1002
	15,2	1372	44,5	3,30	Staigus	699	469	320	1007
	15,2	1372	44,5	3,30	Staigus	724	469	320	1007
	15,2	1427	48,4	3,53	Staigus	800	456	311	1048
	15,2	1427	48,4	3,53	Staigus	787	456	311	1048

Autorius	\emptyset , (mm)	σ_{pi} , (MPa)	f_c , (MPa)	f_{ct} , (MPa)	Atleidimo tipas	l_t , (mm)	$l_{t,LST}$, (mm)	$l_{t,MC}$, (mm)	$l_{t,ACI}$, (mm)
Oh, Kim, 2000	12,7	1395	32,5	2,53	Staigus	803	520	354	856
	12,7	1395	32,5	2,53	Staigus	561	520	354	856
	15,2	1395	32,5	2,53	Staigus	809	622	424	1024
	12,7	1395	34,7	2,68	Staigus	898	491	335	856
	12,7	1395	34,7	2,68	Staigus	617	491	335	856
	15,2	1395	34,7	2,68	Staigus	868	587	401	1024
	12,7	1395	35	2,70	Staigus	640	487	332	856
	12,7	1395	35	2,70	Staigus	697	487	332	856
	15,2	1395	35	2,70	Staigus	1073	583	398	1024
	15,2	1395	35	2,70	Staigus	1094	583	398	1024
	15,2	1395	35	2,70	Staigus	727	583	398	1024
	15,2	1395	35	2,70	Staigus	669	583	398	1024
	12,7	1395	44,5	3,30	Staigus	658	398	272	856
	12,7	1395	44,5	3,30	Staigus	533	398	272	856
	15,2	1395	44,5	3,30	Staigus	682	477	325	1024
	12,7	1395	44,9	3,33	Staigus	725	395	270	856
	12,7	1395	44,9	3,33	Staigus	492	395	270	856
	15,2	1395	44,9	3,33	Staigus	762	473	323	1024
	12,7	1395	45,8	3,38	Staigus	587	389	265	856
	15,2	1395	45,8	3,38	Staigus	872	466	318	1024
15,2	1395	45,8	3,38	Staigus	591	466	318	1024	
12,7	1395	46,7	3,43	Staigus	548	383	261	856	
15,2	1395	46,7	3,43	Staigus	904	458	313	1024	
15,2	1395	46,7	3,43	Staigus	557	458	313	1024	
Kahn et al., 2002	15,2	1314	100	5,08	Staigus	292	292	199	965
	15,2	1314	100	5,08	Staigus	343	292	199	965
	15,2	1314	100	5,08	Staigus	356	292	199	965
	15,2	1314	100	5,08	Staigus	368	292	199	965
	15,2	1314	70	4,41	Staigus	470	336	229	965
	15,2	1314	70	4,41	Staigus	445	336	229	965
	15,2	1314	70	4,41	Staigus	381	336	229	965
	15,2	1314	70	4,41	Staigus	432	336	229	965
Barnes et al., 2003	15,2	1380	95,4	4,99	Staigus	413	312	213	1013
	15,2	1380	95,4	4,99	Staigus	445	312	213	1013
	15,2	1380	95,4	4,99	Staigus	445	312	213	1013
	15,2	1380	95,4	4,99	Staigus	508	312	213	1013
	15,2	1380	77,5	4,60	Staigus	508	339	231	1013
	15,2	1380	77,5	4,60	Staigus	445	339	231	1013
	15,2	1380	77,5	4,60	Staigus	381	339	231	1013
	15,2	1380	77,5	4,60	Staigus	572	339	231	1013
	15,2	1380	87,5	4,83	Staigus	540	322	220	1013
	15,2	1380	87,5	4,83	Staigus	508	322	220	1013
	15,2	1380	86,9	4,81	Staigus	508	323	221	1013

Autorius	\emptyset , (mm)	σ_{pi} , (MPa)	f_c , (MPa)	f_{ct} , (MPa)	Atleidimo tipas	l_t , (mm)	$l_{t,LST}$, (mm)	$l_{t,MC}$, (mm)	$l_{t,ACI}$, (mm)
Barnes et al., 2003	15,2	1380	86,9	4,81	Staigus	476	323	221	1013
	15,2	1380	88,8	4,86	Staigus	730	321	219	1013
	15,2	1380	88,8	4,86	Staigus	445	321	219	1013
	15,2	1380	88,8	4,86	Staigus	381	321	219	1013
	15,2	1380	88,8	4,86	Staigus	635	321	219	1013
	15,2	1380	74	4,51	Staigus	508	345	235	1013
	15,2	1380	74	4,51	Staigus	699	345	235	1013
	15,2	1380	74	4,51	Staigus	413	345	235	1013
	15,2	1380	74	4,51	Staigus	445	345	235	1013
	15,2	1380	73,9	4,51	Staigus	508	345	236	1013
	15,2	1380	73,9	4,51	Staigus	572	345	236	1013
	15,2	1380	73,9	4,51	Staigus	603	345	236	1013
	15,2	1380	73,9	4,51	Staigus	699	345	236	1013
	15,2	1380	47,3	3,47	Staigus	572	449	306	1013
	15,2	1380	47,3	3,47	Staigus	794	449	306	1013
	15,2	1380	47,3	3,47	Staigus	730	449	306	1013
	15,2	1380	39,2	2,97	Staigus	572	524	357	1013
	15,2	1380	39,2	2,97	Staigus	794	524	357	1013
	15,2	1380	39,2	2,97	Staigus	603	524	357	1013
	15,2	1380	41,4	3,11	Staigus	1143	500	341	1013
	15,2	1380	41,4	3,11	Staigus	953	500	341	1013
	15,2	1380	41,4	3,11	Staigus	794	500	341	1013
	15,2	1380	41,4	3,11	Staigus	826	500	341	1013
	15,2	1380	102	5,12	Staigus	349	304	207	1013
	15,2	1380	102	5,12	Staigus	540	304	207	1013
	15,2	1380	85,3	4,78	Staigus	572	326	222	1013
	15,2	1380	85,3	4,78	Staigus	476	326	222	1013
	15,2	1380	93,1	4,95	Staigus	445	315	215	1013
	15,2	1380	93,1	4,95	Staigus	413	315	215	1013
	15,2	1380	93,1	4,95	Staigus	349	315	215	1013
	15,2	1380	93,1	4,95	Staigus	413	315	215	1013
	15,2	1380	97,7	5,04	Staigus	635	309	211	1013
	15,2	1380	97,7	5,04	Staigus	667	309	211	1013
	15,2	1380	97,7	5,04	Staigus	699	309	211	1013
	15,2	1380	97,7	5,04	Staigus	667	309	211	1013
	15,2	1380	85,6	4,79	Staigus	381	325	222	1013
15,2	1380	85,6	4,79	Staigus	476	325	222	1013	
15,2	1380	85,6	4,79	Staigus	540	325	222	1013	
15,2	1380	76,2	4,57	Staigus	381	341	233	1013	
15,2	1380	76,2	4,57	Staigus	667	341	233	1013	
15,2	1380	76,2	4,57	Staigus	476	341	233	1013	
15,2	1380	76,2	4,57	Staigus	413	341	233	1013	
Kose ir Burkett, 2005	15,2	1396	51,5	3,71	Staigus	635	424	290	1025

1 lentelės tęsinys

Autorius	\emptyset , (mm)	σ_{pi} , (MPa)	f_c , (MPa)	f_{ct} , (MPa)	Atleidimo tipas	l_t , (mm)	$l_{t,LST}$, (mm)	$l_{t,MC}$, (mm)	$l_{t,ACI}$, (mm)
Kose ir Burkett, 2005	15,2	1396	51,5	3,71	Staigus	699	424	290	1025
	15,2	1396	51,5	3,71	Staigus	667	424	290	1025
	15,2	1396	51,5	3,71	Staigus	587	424	290	1025
	15,2	1396	34,8	2,69	Staigus	905	586	400	1025
	15,2	1396	34,8	2,69	Staigus	937	586	400	1025
	15,2	1396	37,5	2,86	Staigus	587	550	375	1025
	15,2	1396	37,5	2,86	Staigus	587	550	375	1025
	15,2	1396	37,5	2,86	Staigus	699	550	375	1025
	15,2	1396	37,5	2,86	Staigus	524	550	375	1025
Marti-Vargas et al., 2013	12,9	1274	24,2	1,92	Palaipsnis	650	508	347	794
	12,9	1329	26,1	2,07	Palaipsnis	550	492	336	828
	12,9	1343	28,3	2,23	Palaipsnis	550	461	314	837
	12,9	1293	30,8	2,41	Palaipsnis	600	411	280	806
	12,9	1297	36,3	2,79	Palaipsnis	550	357	243	808
	12,9	1319	37,3	2,85	Palaipsnis	550	354	242	822
	12,9	1303	41,4	3,11	Palaipsnis	550	321	219	812
	12,9	1315	45,3	3,35	Palaipsnis	500	301	205	819
	12,9	1305	46,6	3,43	Palaipsnis	500	292	199	813
	12,9	1326	46,6	3,43	Palaipsnis	450	296	202	826
	12,9	1319	46,7	3,43	Palaipsnis	550	294	201	822
12,9	1299	54,8	3,90	Palaipsnis	400	255	174	810	
Kim et al., 2016	15,2	1395	49	3,57	Staigus	765	441	301	1024
	15,2	1395	49	3,57	Staigus	767	441	301	1024
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	942	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	689	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	800	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	646	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	760	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	645	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	876	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	743	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	675	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	782	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	636	569	388	1322
	15,2	1800	49	3,57	Staigus	980	569	388	1322
	15,2	1395	64	4,24	Staigus	781	371	253	1024
	15,2	1395	64	4,24	Staigus	616	371	253	1024
	15,2	1800	64	4,24	Staigus	759	479	327	1322
	15,2	1800	64	4,24	Staigus	788	479	327	1322
	15,2	1800	64	4,24	Staigus	679	479	327	1322
	15,2	1800	64	4,24	Staigus	566	479	327	1322
15,2	1800	64	4,24	Staigus	714	479	327	1322	
15,2	1800	64	4,24	Staigus	770	479	327	1322	

1 lentelės pabaiga

Autorius	\emptyset, (mm)	σ_{pi}, (MPa)	f_c, (MPa)	f_{ct}, (MPa)	Atleidimo tipas	l_t, (mm)	$l_{t,LST}$, (mm)	$l_{t,MC}$, (mm)	$l_{t,ACI}$, (mm)
Kim et al., 2016	15,2	1800	64	4,24	Staigus	533	479	327	1322
	15,2	1800	64	4,24	Staigus	918	479	327	1322
	15,2	1800	64	4,24	Staigus	639	479	327	1322
	15,2	1800	64	4,24	Staigus	646	479	327	1322
	15,2	1800	64	4,24	Staigus	620	479	327	1322
	15,2	1800	64	4,24	Staigus	675	479	327	1322
Auriaus, 2019	6,8	1321	36	2,69	Palaiapsnis	270	198	112	434
	6,8	1291	36	2,69	Palaiapsnis	250	194	110	424
	6,8	1303	36	2,69	Palaiapsnis	223	196	111	428
	9,3	1269	36	2,69	Palaiapsnis	455	260	178	570
	9,3	1269	36	2,69	Palaiapsnis	498	260	178	570
	9,3	1313	36	2,69	Palaiapsnis	367	270	184	590