

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Klemen, E., 2015. Modeli za zagotavljanje strižne odpornosti armiranobetonskih elementov pri obremenitvi s prečno silo. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Lopatič, J.): 39 str.

Datum arhiviranja: 23-07-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Klemen, E., 2015. Modeli za zagotavljanje strižne odpornosti armiranobetonskih elementov pri obremenitvi s prečno silo. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Lopatič, J.): 39 p.

Archiving Date: 23-07-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidatka:

EVA KLEMEN

**MODELI ZA ZAGOTAVLJANJE STRIŽNE
ODPORNOSTI ARMIRANOBETONSKIH ELEMENTOV
PRI OBREMENITVI S PREČNO SILO**

Diplomska naloga št.: 183/B-GR

**MODELS FOR PROVIDING SHEAR RESISTANCE OF
REINFORCED CONCRETE ELEMENTS SUBJECTED
TO SHEAR**

Graduation thesis No.: 183/B-GR

Mentor:
izr. prof. dr. Jože Lopatič

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 09. 07. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Eva Klemen izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »Modeli za zagotavljanje strižne odpornosti armiranobetonskih elementov pri obremenitvi s prečno silo«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 6.7.2015

Eva Klemen

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 624.012.45:666.982(043.2)
- Avtor:** Eva Klemen
- Mentor:** izr. prof. dr. Jože Lopatič
- Naslov:** Modeli za zagotavljanje strižne odpornosti armiranobetonskih elementov pri obremenitvi s prečno silo
- Tip dokumenta:** Dipl. nal.–UNI
- Obseg in oprema:** 39 str., 4 pregl., 14 sl., 50 en.,
- Ključne besede:** Armirani beton, strižna odpornost, strižna napetost, strižna armatura, kot tlačnih razpor, model ravninskega paličja, modificirana teorija tlačnega polja, splošen model napetostnega polja

Izveleček

V diplomski nalogi je obravnavana strižna odpornost armiranobetonskih elementov pri obremenitvi s prečno silo. Najprej so predstavljene strižne napetosti v betonskih elementih in vplivi, ki so pomembni pri določanju strižne odpornosti. Tretje poglavje prikaže različne postopke določanja strižne odpornosti, ki jih obravnava slovenski standard SIST EN 1992-1-1 in modelni predpis *fib* Model Code 2010, za elemente brez računsko potrebne strižne armature in elemente s strižno armaturo. Pri tem so predstavljeni različni analitični modeli na katerih temelji izračun. Posebej so obravnavani prednapeti elementi, strig v pasnici na stiku pasnice in stojine pri elementih T-prerezov ter strig na stični ploskvi med sloji betona, ki so betonirani v različnih časih. Pri posameznih poglavjih je podan tudi postopek določitve strižne armature in dodatne natezne armature. Prav tako je obravnavan vpliv velikosti naklona tlačnih razpor na strižno odpornost in prerez armature. V predzadnjem poglavju pa je na enostavnem primeru elementa T-prereza prikazan postopek dimenzioniranja na prečno obremenitev.

BIBLIOGRAFIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**UDK:** 624.012.45:666.982(043.2)**Author:** Eva Klemen**Supervisor:** Assoc. Prof. Jože Lopatič, Ph.D.**Title:** Models for providing shear resistance of reinforced concrete elements subjected to shear**Document type:** Graduation Thesis – University studies**Scope and tools:** 39 p., 4 tab., 14 fig., 50 eq.**Keywords:** Reinforced concrete, shear resistance, shear stress, shear reinforcement, inclination of compressive stress field, truss model, modified compression field theory, generalized stress field approach**Abstract**

Shear resistance of reinforced concrete elements subjected to shear were analyzed in this thesis. Firstly, shear stresses in reinforced concrete and influences which are important to determine shear resistance are presented. Later different procedures for determining shear resistance of members without and with shear reinforcement in Slovenian standard SIST EN 1992-1-1 and in model direction *fib* Model Code 2010 are discussed, respectively. Further different analytical models on which the calculation is based and prestressed concrete elements, shear between web and flange of T-section and shear at the interface between concrete cast at different times are discussed specifically. Procedures to determine shear reinforcement and additional longitudinal reinforcement are presented. At last influence of inclination of the compressive stress field on shear resistance and section of reinforcement and a design procedure on shear loading is shown with simple example of T-beam.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA.....	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAFIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
1 UVOD	1
2 SPLOŠNO	3
3 DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH ELEMENTOV NA STRIŽNO OBREMENITEV.....	8
3.1 Elementi, kjer strižna armatura računsko ni potrebna	8
3.1.1 Strižna odpornost strižno nearmiranih elementov po standardu SIST EN 1992-1-1	8
3.1.2 Strižna odpornost strižno nearmiranih elementov po <i>fib</i> Model Code for Concrete Structures 2010.....	8
3.1.3 Strižna armatura.....	9
3.2 Elementi, v katerih je strižna armatura računsko potrebna	10
3.2.1 Izračun strižne odpornosti po standardu SIST EN 1992-1-1	10
3.2.2 Strižna odpornost po <i>fib</i> Model Code for Concrete Structures 2010.....	11
3.2.3 Strižna armatura.....	14
3.3 Strižna odpornost prednapetih elementov	16
3.4 Strig v pasnici na stiku med stojino in pasnico T-prerezov.....	17
3.5 Strig med sloji betona, ki so betonirani v različnih časih	19
3.5.1 Strig med sloji betona, ki so betonirani v različnih časih po standardu SIST EN 1992-1-1	20
3.5.2 Strig med sloji betona, ki so betonirani v različnih časih po <i>fib</i> Model Code for Concrete Structures 2010	21
4 RAČUNSKI PRIMER	23
4.1 Opis naloge.....	23
4.2 Materiali	23
4.3 Geometrijske karakteristike.....	24
4.4 Obtežba.....	24
4.5 Izračun	24
4.5.1 Obtežba za mejno stanje nosilnosti	24
4.5.2 Notranje sile	24
4.5.3 Natezna armatura.....	25
4.5.4 Strig v pasnici na stiku med stojino in pasnico	26

4.5.5	Izračun strižne odpornosti elementov brez strižne armature	27
4.5.6	Izračun strižne odpornosti elementov s strižno armaturo	29
5	ZAKLJUČEK	38
VIRI	39

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Odvisnost koeficientov c in μ od tipa površine stične ploskve iz SIST EN 1992-1-1 [1].....	21
Preglednica 2: Odvisnost koeficientov c in μ od tipa površine stične ploskve iz <i>fib</i> MC 2010 [2].....	22
Preglednica 3: Odvisnost koeficientov c_r , κ_1 , κ_2 in μ od tipa površine stične ploskve iz <i>fib</i> MC 2010 [2].....	22
Preglednica 4: Vrednosti izračunanih parametrov.....	36

KAZALO SLIK

Slika 1: Prerez, deformacije, normalne in strižne napetosti upogibno nerazpokanega elementa (po [9]).....	3
Slika 2: Prerez, deformacije, normalne in strižne napetosti upogibno razpokanega elementa (po [9]) ..	4
Slika 3: Nadomestno ravninsko paličje (iz SIST EN 1992-1-1 [1]).....	5
Slika 4: Splošen model napetostnega polja: a) prerez, b) notranje sile in napetosti, c) deformacije (iz [8]).....	5
Slika 5: Prikaz uporabljenih oznak v izrazih (6), (7) in (8) (iz <i>fib</i> MC 2010 [2])	7
Slika 6: Primerjava rezultatov velikosti strižne trdnosti po različnih metodah pri elementih s tlačno trdnostjo betona $f_{ck}=50MPa$ (iz <i>fib</i> MC 2010 [2]).....	14
Slika 7: Potek sil po elementu T-oblike (iz <i>fib</i> MC 2010 [2]).....	18
Slika 8: Strig med pasnico in stojino T-prerezov iz standarda SIST EN 1992-1-1 [1]	18
Slika 9: Nazobčana izvedba stika (iz SIST EN 1992-1-1 [1]).....	21
Slika 10: Statični sistem armiranobetonskega nosilca s previsnim poljem	23
Slika 11: Prerez	23
Slika 12: Ovojnici največjih in najmanjših upogibnih momentov	24
Slika 13: Ovojnici največjih in najmanjših prečnih sil.....	25
Slika 14: Ovojnica upogibnih momentov in parametri za izračun strižnih napetosti med stojino in pasnico.....	26

1 UVOD

Kljub dolgoletnim raziskavam je strižna odpornost elementov glede na prečno silo še vedno predmet številnih raziskav. Razlog za to so kompleksnost problema, razvoj konstrukcijskih sistemov, izboljšanje lastnosti materialov in nova vprašanja, ki izhajajo iz ocen že obstoječih objektov [7]. Največ razhajanj se pojavi pri določanju strižne odpornosti strižno armiranih elementov, kjer avtorji podajajo različne parametre, ki vplivajo na odpornost.

Nearmirani betonski elementi prevzamejo prečno silo s strižnimi napetostmi, ki so razporejene po celotnem prerezu. Pri elementu brez strižne armature mejno strižno odpornost glede na prečno silo zagotavljajo prispevki strižnih mehanizmov betonskega prereza [10]: napetosti v nerazpokanem delu prereza, zaklinjanje zrn agregata v razpokah, možnični učinek vzdolžne armature in ločni mehanizem elementa. Omenjeni učinki so odvisni od napetostnega stanja v elementu, značilnosti betona in preteklega obremenjevanja, kar predstavlja razloge za težje določljiv prispevek k celotni nosilnosti. V primeru, da so omenjeni učinki premajhni za prevzem strižne obremenitve, moramo elemente strižno armirati, strižno odpornost prereza pa izračunamo s pomočjo analitičnih modelov. Pri dimenzioniranju največji problem nastane pri izračunu nosilnosti tlačnih razpor, ki je odvisna od deformacijskega stanja, medtem ko prispevek vzdolžne armature izračunamo s pomočjo dokaj enostavnih ravnotežnih enačb. Pri tem je v večini primerov merodajna nosilnost strižne armature, pri kateri pa poznamo materialne karakteristike, zato račun ne predstavlja večjih težav, rezultati pa so precej točni [8].

Pri projektiranju armiranobetonskih elementov se v Sloveniji trenutno upoštevajo pravila v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1], ki vsebuje predvsem empirično dobljene izraze. Strižno odpornost strižno armiranih elementov računamo s pomočjo nadomestnega ravninskega paličja, modela, ki je iz tlačnega in nateznega pasu ter razpor. Ker model nadomestnega paličja v računu upošteva le vrednost prečne sile, ki jo element lahko prenese v primeru plastifikacije vložene strižne armature, ne upošteva pa prispevka betona, je postopek dimenzioniranja enostaven in hiter, vendar pa so pri tem izpuščeni pomembni parametri, ki vplivajo na strižno odpornost. Zato postopek za določanje strižne odpornosti prinaša veliko razpršenost rezultatov. Kot omenjata Cladera in Mari [3], je po eni strani lahko preveč konzervativen za elemente z nizkim deležem armature in prednapete elemente, po drugi strani pa je lahko nekoliko nekonzervativen za močno strižno armirane elemente. To pa je tudi razlog, da nekateri predpisi določajo strižno odpornost kot vsoto prispevkov strižnih mehanizmov betonskega elementa brez strižne armature in prispevka strižne armature.

Izraze podane v standardu SIST EN 1992-1-1 [1] sem primerjala z izrazi podanimi v modelnem predpisu *fib* Model Code for Concrete Structures 2010 [2]. Pravila v predpisu *fib* MC 2010 [2] temeljijo na analizah fizikalno mehanskih modelov, so enostavna za razumevanje in vključujejo pomembne vplive na strižno odpornost, dobljene na podlagi velikega števila testiranj. Različne pristope dimenzioniranja obravnava z izrazom "nivo zahtevnosti računa" (ang. level of approximation), kjer so zajeti različni modeli na poenostavljen, konzervativen način in so razporejeni po težavnosti izračuna [6]. Za izračun strižne odpornosti strižno armiranih elementov podaja izraze tako na podlagi mehanizma paličja, kot tudi na podlagi splošnega modela napetostnega polja in poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja. Modelni predpis *fib* MC 2010 [2] predstavlja novosti ter ideje v zvezi z armiranobetonskimi konstrukcijami in bo v prihodnje najverjetneje služil kot osnova za spremembo današnjih standardov iz družine Evrokod 2.

Poleg primerjave izrazov za strižno armirane elemente in elemente, kjer strižna armatura ni potrebna, sem analizirala še prednapete elemente, strig v pasnici na stiku med pasnico in stojino elementov s prerezom T-oblike in strig med sloji betona, ki so betonirani v različnih časih. V drugem delu diplomske naloge sem primerjavo podkrepila še z računskim primerom in na koncu strnila ugotovitve v zaključku.

Za to temo diplomske naloge sem se odločila prav zaradi razhajanj in različnih interpretacij določanja strižne odpornosti glede na prečno silo. Pri pripravi diplomske naloge sem nadgradila in dopolnila do

sedaj dobljeno znanje iz dodiplomskega študija in ga na koncu uporabila pri preprostem teoretičnem primeru.

2 SPLOŠNO

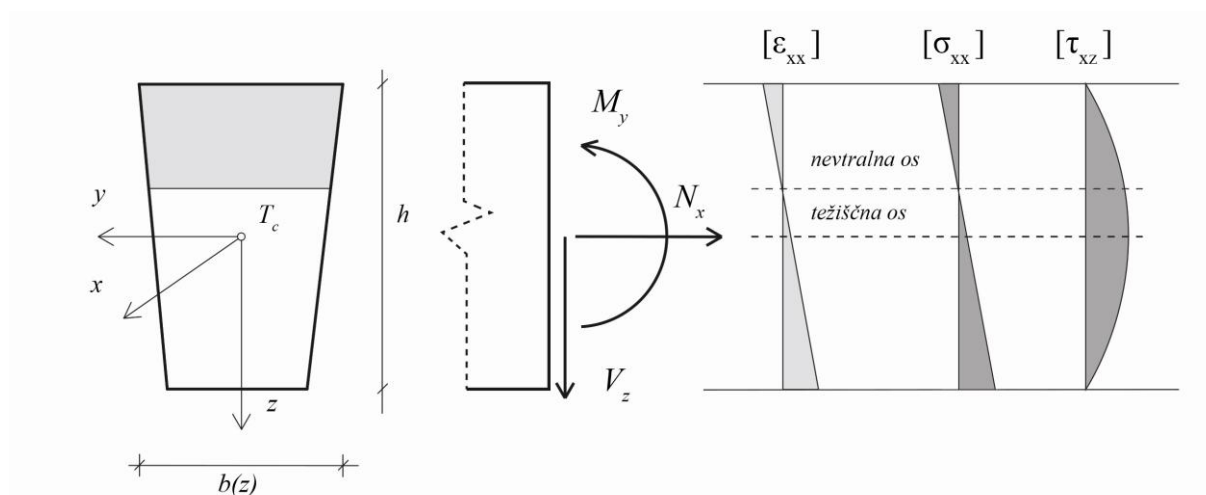
Pri običajnih armiranobetonskih konstrukcijah se pri elementih s prečno obtežbo, poleg upogibnih, pojavijo tudi strižne razpoke. Te nastanejo, ko glavne natezne napetosti dosežejo natezno trdnost. Če so elementi strižno narmirani lahko pojav strižnih razpok pomeni porušitev.

V primeru, da upogibnih razpok ni, celotno strižno odpornost zagotavljajo napetosti v betonu, kar je pomembno pri prednapetih elementih in elementih z velikimi tlačnimi osnimi silami. Strižne napetosti nerazpokanega homogenega prereza so enake vrednosti izračunane po izrazu:

$$\tau_{xz,d}(z) = \tau_{zx,d}(z) = \frac{V_{z,d} \cdot S_y(z)}{I_y \cdot b(z)}, \quad (1)$$

kjer sta:

- S_y statični moment okrog osi y in
- I_y vztrajnostni moment okrog osi y.



Slika 1: Prerez, deformacije, normalne in strižne napetosti upogibno nerazpokanega elementa (po [9])

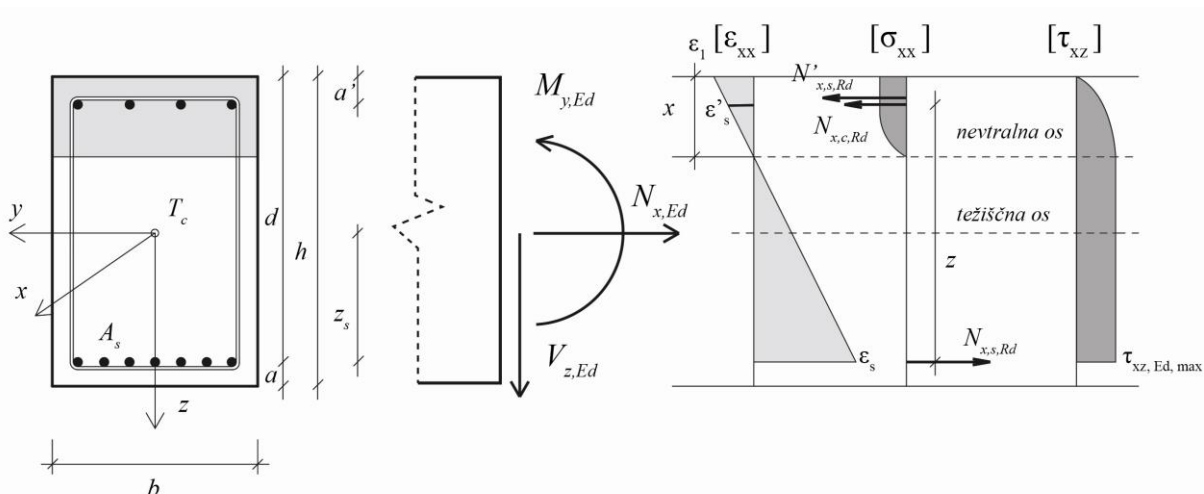
Pri večini armiranobetonskih elementov pa se upogibne razpoke pojavijo. Pri tem mejno strižno odpornost glede na prečno silo zagotavljajo že omenjene napetosti v nerazpokanem tlačnem delu prereza, trenje med zrnji agregata vzdolž razpok, možnični učinek vzdolžne armature in ločni mehanizem elementa [10]. Vpliv posameznega prispevka na strižno odpornost po nastanku razpok je težko določljiv, vendar je, kot podaja Birgisson [4], približno ocenjen na 15–25 % možničnega učinka, 33–50 % trenja med zrnji in 20–40 % napetosti v tlačnem delu. Pri širjenju razpok se strižna odpornost zaradi trenja med zrnji zmanjšuje, zaradi napetosti in možničnega učinka pa povečuje. Na trenje med zrnji agregata vpliva širina razpok, velikost agregatnega zrna in trdnost betona. Z večanjem deleža vzdolžne armature, se zaradi večanja strižne odpornosti širina upogibnih razpok manjša in posledično se vpliv trenja zmanjšuje. Vpliv velikosti agregatnega zrna so ugotavljali s pomočjo raziskav [4], kjer naj bi se s spreminjanjem velikosti maksimalnega agregatnega zrna iz 9,5 mm do 51 mm strižna odpornost normalno velikih armiranobetonskih nosilcev ($d=1400 \text{ mm}$) povečala za 24 %, pri manjših nosilcih ($d=280 \text{ mm}$) pa za 6 %. To dokazuje, da je pri večjih agregatnih zrnih strižna odpornost večja zaradi večje hrapavosti površja. Po drugi strani pa je lahko v betonih visoke trdnosti in betonih, ki vsebujejo lahek agregat, vez med agregatnimi zrnji in cementno pasto tako močna, da pride do razpok v samem agregatnem zrnju in ne v stičnem območju. Površina v razpoki je gladka, kar povzroči zmanjšanje trenja med agregatnimi zrnji.

V upogibno razpokanem elementu strižne napetosti izračunamo z izrazom:

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{z,d}}{z \cdot b(z)}, \quad (2)$$

kjer sta:

$V_{z,d}$ prečna sila v smeri z in
 b širina prečnega prereza.



Slika 2: Prerez, deformacije, normalne in strižne napetosti upogibno razpokanega elementa (po [9])

Največja projektna strižna napetost je določena z izrazom:

$$\max \tau_{xz,d} = \frac{V_{z,d}}{z \cdot b_w}, \quad (3)$$

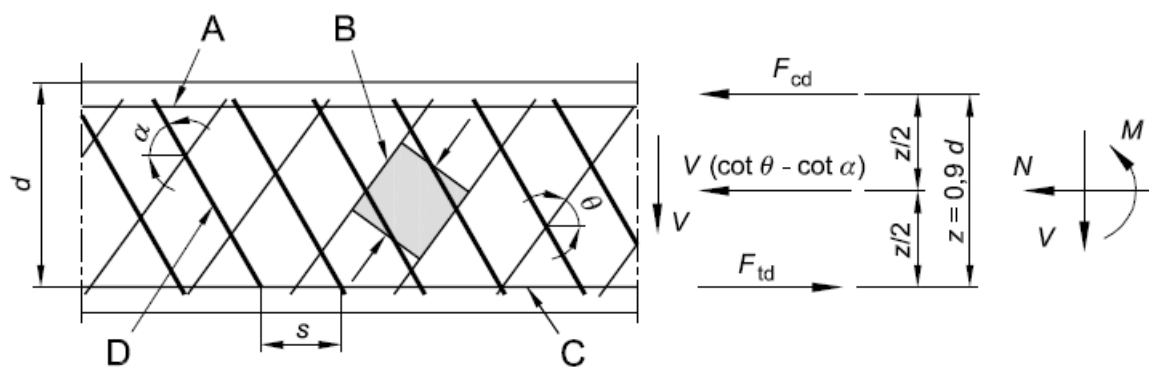
kjer je:

b_w najmanjša širina prečnega prereza med nevtralno osjo in natezno armaturo.

Projektna strižna napetost je največja, ko je širina prereza najmanjša, torej na mestih zožanega prereza.

Ko se v armiranem elementu z vzdolžno in strižno armaturo pojavijo poleg upogibnih še strižne razpoke, si pri določanju strižne odpornosti strižno armiranih elementov pri obremenitvi s prečno silo, pomagamo z analitičnimi modeli.

Eden izmed najbolj uporabljenih modelov je mehanizem nadomestnega ravninskega paličja, ki sta ga že na začetku 20. stoletja uporabila Wilhelm Ritter (1899) in Emil Mörsch (1902). Sestavljen je iz zgornjega tlačnega in spodnjega nateznega pasu, vezi, ki predstavljajo dano strižno armaturo in razpor, ki se formulirajo v nerazpokanih delih betona ter predstavljajo polja tlačnih napetosti (slika 3). Naloga razpor je prenos strižnih sil vzdolž armiranobetonskega elementa. Da pa zagotovimo ta prenos preko strižnih razpok med nerazpokanimi deli betona, moramo v element vgraditi strižno armaturo [3]. Mehanizem ravninskega paličja k strižni odpornosti ne upošteva prispevka betona v strižno nearmiranem elementu. Temelji pa na teoremu spodnje meje plastičnosti, ki pravi, da je obtežba, ki povzroči katerokoli možno razporeditev notranjih sil po elementu v ravnotežju in hkrati napetosti povzročene zaradi zunanje obtežbe ne presežejo dopustnih napetosti na meji tečenja materiala. Armaturo torej mora prej doseči mejo plastičnosti kot beton mejo tlačne trdnosti, zato so rezultati na varni strani [11].

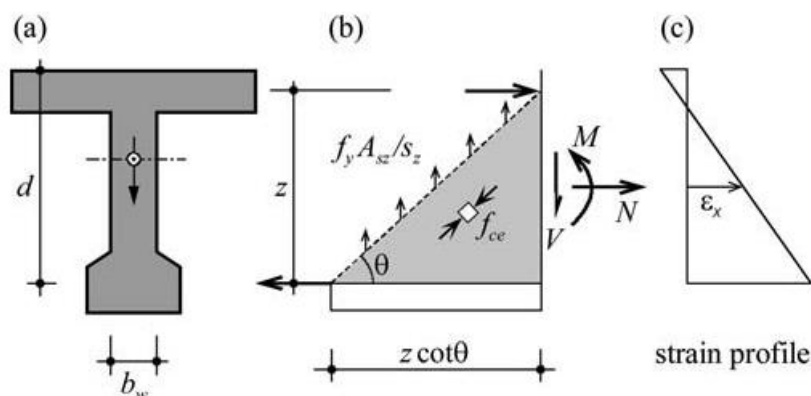


Slika 3: Nadomestno ravninsko paličje (iz SIST EN 1992-1-1 [1])

Na sliki 3 oznake pomenijo:

- A tlačni pas,
- B razpore,
- C natezni pas,
- D strižna armatura,
- α kot med strižno armaturo in referenčno osjo nosilca,
- θ kot med betonsko tlačno razporo in referenčno osjo nosilca,
- F_{td} projektna vrednost natezne sile v vzdolžni armaturi,
- F_{cd} projektna vrednost tlačne sile betona v smeri referenčne osi elementa,
- d statična višina,
- s medsebojna razdalja stremen in
- z ročica notranjih sil. Pri armiranobetonskih elementih brez osne sile lahko upoštevamo približno vrednost $z = 0,9 \cdot d$.

Drugi možen način določitve strižne odpornosti, temelji na podlagi splošnega modela napetostnega polja (ang. Generalized Stress Field Approach – GSFA). Metoda napetostnega polja (ang. Stress Field Approach) je statično enakovredna modelu vezi in razpor (Schlaich, 1987) in se uporablja v inženirski praksi zlasti v conah napetostnih in geometrijskih dikontinuitet. Tako kot pri metodi vezi in razpor, lahko tudi pri metodi napetostnega polja, za posamezno obremenitev določimo več modelov napetostnega polja in izberemo tistega, ki najbolj ustreza prenosu obtežbe po elementu. Pri tem omogoča dobro vizualizacijo poteka napetosti in predstavlja osnovo za dimenzioniranje in oceno strižne odpornosti. V zadnjih letih so se osredotočili na izboljšanje in izpopolnitev te metode in njenih pristopov, ki upoštevajo tako ravnovesne kot tudi kompatibilitetne pogoje. Eden izmed pristopov je splošen model napetostnega polja, ki predstavlja ravnovesni model. Strižna odpornost je tako odvisna od kota tlačanih razpor θ , ki je omejen z zgornjo in spodnjo mejo (θ_{max} in θ_{min}) in od efektivne tlačne trdnosti betona f_{ce} , oba parametra pa sta odvisna od vzdolžnih specifičnih deformacij ϵ_x v elementu [7-8].



Slika 4: Splošen model napetostnega polja: a) prerez, b) notranje sile in napetosti, c) deformacije (iz [8])

Za določitev strižne odpornosti strižno armiranih betonskih prereзов pa lahko uporabimo tudi modificirano teorijo tlačnega polja (ang. Modified Compression Field Theory - MCFT), ki sta jo leta 1986 razvila in eksperimentalno potrdila na 30 armiranobetonskih preizkušencih Frank J. Vecchio in Michael P. Collins [12]. Teorija temelji na analitičnem modelu, ki upošteva celotno deformacijsko napetostno stanje v elementu in opisuje deformabilnost ter nosilnost betona v tlaku glede na stopnjo razpokanosti elementa. Konstitutivni in ravnotežni pogoj ter odnos med napetostmi in deformacijami se formulirajo v smislu povprečnih napetosti in deformacij. Metoda predpostavlja, da je naklon razpok oz. tlačnih razpor vzporeden z glavnimi tlačnimi napetostmi, ki pa sovpadajo s smerjo glavnih deformacij [14]. Po modificirani teoriji tlačnega polja je strižna odpornost elementa vsota prispevka jekla in prispevka betona, ki upošteva vpliv nateznih napetosti v razpokanem betonu.

Strig zaradi prečne sile preverjamo v mejnih stanjih nosilnosti, kjer moramo dokazati varnost konstrukcije proti porušitvi, kar v splošnem zapišemo kot:

$$E_d \leq R_d. \quad (4)$$

Kjer sta:

E_d projektna vrednost učinkov vplivov, ki jih določimo na podlagi ustreznih kombinacij za mejna stanja nosilnosti in
 R_d projektna vrednost pripadajoče odpornosti.

Pri dimenzioniranju strižno obremenjenih armiranobetonskih elementov s prečno silo v mejnih stanjih nosilnosti mora biti strižna odpornost elementa večja od pripadajoče obremenitve:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}. \quad (5)$$

Kjer sta:

V_{Rd} projektna strižna odpornost armiranobetonskega elementa in
 V_{Ed} projektna vrednost prečne sile v prerezu zaradi delovanja zunanje obtežbe in prednapetja.

V splošnem mora biti projektna prečna sila določena za obravnavani prerez, ki je za razdaljo statične višine d odmaknjen od najbližjega roba podpore, od spremembe geometrije ali od podane obremenitve. Dodatni obravnavani prerezi so potrebni v primeru spreminjajoče širine vzdolž elementa, neenakomerne porazdeljene obtežbe, koncentrirane obtežbe ali zmanjšanja količine vzdolžne armature.

Pri dimenzioniranju strižne armature standard SIST EN 1992-1-1 [1] in modelni predpis *fib* MC 2010 [2] podajata različne pogoje reduciranja točkovne obtežbe:

- v primeru točkovne obtežbe delujoče na oddaljenosti $0,5 \cdot d \leq a_v \leq 2 \cdot d$ [1] oz. $d \leq a_v \leq 2 \cdot d$ [2] od najbližjega roba podpore, lahko prispevek te obtežbe k prečni sili V_{Ed} reduciramo s faktorjem $\beta = a_v / 2 \cdot d$ [1-2],
- v primeru, da je točkovna obtežba na zgornji strani na oddaljenosti $a_v < 0,5 \cdot d$ [1] oz. $a_v < d$ [2] od najbližjega roba podpore pa moramo za razdaljo a_v uporabiti $a_v = 0,5 \cdot d$ [1] oz. $a_v = d$ [2]. Iz zgoraj zapisanega pogoja ($\beta = a_v / 2 \cdot d$) sledi, da je v tem primeru $\beta = 0,25$ [1] oz. $\beta = 0,5$ [2].

Ta redukcija je pomembna, kadar je točkovna obtežba velika v primerjavi s celotno prečno obtežbo.

Eden izmed faktorjev, ki vplivajo na strižno odpornost so deformacije, ki jih v računu upošteva modelni predpis *fib* MC 2010 [2]. Pri tem uporabi vzdolžno deformacijo ε_x , ki ustreza deformaciji na

polovici razdalje ročice sil z . Ta deformacija predstavlja stanje povprečnih napetosti in deformacij ter je določena z izrazom:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2 \cdot E_s \cdot A_s} \cdot \left[\frac{M_{Ed}}{z} + V_{Ed} + N_{Ed} \cdot \left(\frac{1}{2} \mp \frac{\Delta e}{z} \right) \right], \quad (6)$$

v primeru povezanih prednapetih kablov pa velja izraz:

$$\varepsilon_x = \frac{\left(\frac{M_{Ed}}{z} + V_{Ed} + N_{Ed} \cdot \frac{(z_p - e_p)}{z} \right)}{2 \cdot \left(\frac{z_s}{z_p} \cdot E_s \cdot A_s + \frac{z_p}{z} \cdot E_p \cdot A_p \right)}. \quad (7)$$

Kjer so:

E_s, E_p	modula elastičnosti natezne oz. prednapete armature,
A_s, A_p	prerez natezne oz. prednapete armature,
z_s	razdalja med težiščno osjo tlačnega dela in vzdolžno armaturo,
z_p	razdalja med težiščno osjo tlačnega dela elementa in osjo prednapetih kablov,
Δe	ekscentričnost težiščne osi tlačnega dela in
e_p	ekscentričnost kablov za prednapetje.

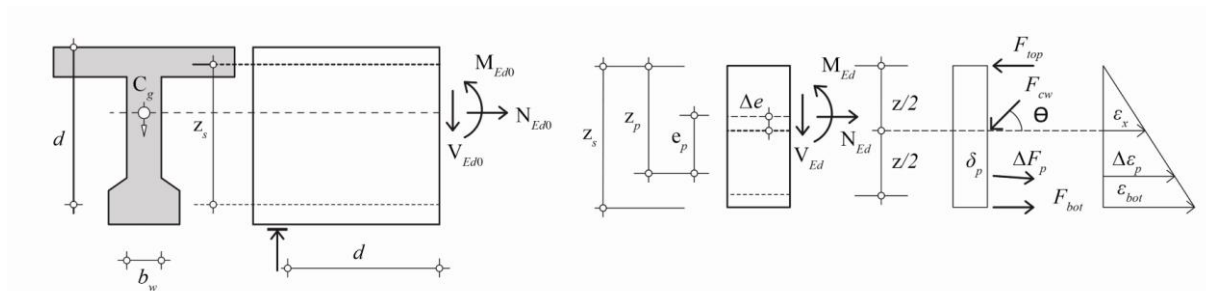
Veljati mora:

- M_{Ed} in V_{Ed} sta pozitivni vrednosti, N_{Ed} pa negativna v primeru tlaka in pozitivna v primeru natega,
- če je vrednost ε_x negativna, jo privzamemo kot vrednost 0,
- za prereze bližje razdalji d od roba najbližje podpore lahko vzamemo vrednost ε_x , ki ustreza vrednosti na prerezu d oddaljenem od roba najbližje podpore in
- za A_s upoštevamo glavno natezno armaturo.

Ročica z za armiranobetonske elemente ne sme biti manjša od $0,9 \cdot d$ ($z \geq 0,9 \cdot d$), za prednapete elemente pa lahko ročico z izračunamo po izrazu:

$$z = \frac{z_s^2 \cdot A_s + z_p^2 \cdot A_p}{z_s \cdot A_s + z_p \cdot A_p}. \quad (8)$$

Pojasnitev zgoraj omenjenih količin je prikazana na sliki 5.



Slika 5: Prikaz uporabljenih oznak v izrazih (6), (7) in (8) (iz fib MC 2010 [2])

3 DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH ELEMENTOV NA STRIŽNO OBREMENITEV

3.1 Elementi, kjer strižna armatura računsko ni potrebna

3.1.1 Strižna odpornost strižno narmiranih elementov po standardu SIST EN 1992-1-1

Standard SIST EN 1992-1-1 [1] podaja empirično dobljen izraz za projektno strižno odpornost elementov brez strižne armature $V_{Rd,c}$:

$$V_{Rd,c} = \left(C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b_w \cdot d, \quad (9)$$

z najmanjšo vrednostjo:

$$V_{Rd,c} = (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d. \quad (10)$$

Kjer so:

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

γ_c delni varnostni faktor za beton,

k koeficient statične višine prereza in je $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$, kjer je d v [mm],

ρ_l delež natezne armature in je $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$,

A_{sl} ploščina prereza natezne armature,

b_w najmanjša širina prečnega prereza v območju natezne cone v [mm],

f_{ck} karakteristična tlačna trdnost 28 dni starega betona v [MPa],

$k_1 = 0,15$,

σ_{cp} tlačna napetost betona v težiščni osi in je $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0,2 \cdot f_{cd}$ [MPa],
kjer sta N_{Ed} v [N] in A_c v [mm²],

N_{Ed} projektna vrednost osne sile prereza, ki jo povzroča obtežba ali prednapetje,

A_c ploščina prečnega prereza betona in

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}.$$

3.1.2 Strižna odpornost strižno narmiranih elementov po *fib* Model Code for Concrete Structures 2010

V modelnem predpisu *fib* MC 2010 [2] je strižna odpornost elementov brez strižne armature odvisna od faktorja k_v , ki v izračunu vključuje učinek velikosti največjega agregatnega zrna d_g in deformacij ε_x . Velikost maksimalnega agregatnega zrna vpliva na trenje med agregatnimi zrni, kar pa ima velik učinek na strižno odpornost narmiranih elementov.

Projektna strižna odpornost elementov brez strižne armature $V_{Rd,c}$ je v modelnem predpisu *fib* MC 2010 [2] podana z izrazom:

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w. \quad (11)$$

Kjer so:

f_{ck}	karakteristična tlačna trdnost v [MPa] in se za $\sqrt{f_{ck}}$ ne vzame več kot 8 MPa,
z	ročica notranjih sil - pri klasično armiranih elementih lahko upoštevamo $z = 0,9 \cdot d$ in
b_w	najmanjša širina prereza med nevtralno osjo in natezno armaturo.

Modelni predpis *fib* MC 2010 [2] za izračun faktorja k_v podaja dva "nivoja zahtevnosti računa".

"Nivo zahtevnosti računa I" velja za elemente z zanemarljivo osno obremenitvijo, s karakteristično mejo elastičnosti armature $f_{yk} \leq 600 \text{ MPa}$ in karakteristično tlačno trdnostjo betona $f_{ck} \leq 70 \text{ MPa}$ ter maksimalno velikostjo agregatnega zrna $d_g \geq 10 \text{ mm}$. Faktor k_v izračunamo z izrazom:

$$k_v = \frac{180}{1000 + 1,25 \cdot z}, \quad (12)$$

kjer je ročica z v [mm].

V izrazu (12) je upoštevana predpostavka, da je deformacija $\varepsilon_x = 0,00125$, kar ustreza polovici deformacije na meji elastičnosti armature z $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ ($\varepsilon_x \approx \frac{f_{yk}}{2 \cdot E_s}$).

Splošno pa je uporaben "nivo zahtevnosti računa II", ki podaja izraz za izračun faktorja k_v :

$$k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \frac{1300}{1000 + k_{dg} \cdot z}. \quad (13)$$

Kjer sta:

ε_x deformacija na sredini ročice z , izračunana z izrazom (6) oz. (7) in
 $k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75$. Izraz velja za elemente z maksimalnim premerom agregatnega zrna d_g različnim od 16 mm. V primeru betona visoke trdnosti ($f_{ck} \geq 70 \text{ MPa}$) ali betona, ki vsebujejo lahek agregat pa privzamemo vrednost $k_{dg} = 0$, zaradi možnih razpok v agregatnem zrnu, ki povzročijo zmanjšanje trenja med agregatnimi zrni.

3.1.3 Strižna armatura

Če je izpolnjen pogoj, da je projektna strižna odpornost večja od projektne strižne obremenitve ($V_{Rd,c} \geq V_{Ed}$), strižne armature računsko ne potrebujemo, namestimo pa vsaj minimalno. Minimalna stopnja armiranja s strižno armaturo je podana z izrazom:

$$\rho_{w,\min} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}. \quad (14)$$

V kolikor pogoj, da je odpornost večja od obremenitve ni izpolnjen, so možni naslednji ukrepi ali njihova kombinacija:

- uporaba betona višjega trdnostnega razreda,
- uporaba prednapetih kablov,

- povečanje količine vzdolžne armature,
- uporaba strižne armature in
- povečanje dimenzij betonskega prereza.

3.2 Elementi, v katerih je strižna armatura računsko potrebna

Če strižna odpornost $V_{Rd,c}$ ni dovolj velika za prevzem prečne sile V_{Ed} , elemente dimenzioniramo s pomočjo analitičnih modelov.

Projektna strižna odpornost elementov, kjer je strižna armatura računsko potrebna je v splošnem podana z izrazom:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max} \quad (15)$$

Kjer so:

- | | |
|--------------|--|
| $V_{Rd,c}$ | projektna strižna odpornost elementa brez strižne armature, |
| $V_{Rd,s}$ | projektna vrednost prečne sile, ki jo element lahko prenese v primeru plastifikacije vložene strižne armature in |
| $V_{Rd,max}$ | vrednost največje prečne sile, ki jo element lahko prenese in je omejena s porušitvijo tlačnih razpor. |

3.2.1 Izračun strižne odpornosti po standardu SIST EN 1992-1-1

Standard SIST EN 1992-1-1 [1] pri računu strižne odpornosti strižno armiranega elementa upošteva, da v primeru strižnih razpok pride do prehoda iz mehanizma homogenega nosilca v mehanizem nadomestnega paličja, ki je prikazan na sliki 3. Ker v tem primeru celotno strižno odpornost pripisemo armaturi in ne upoštevamo vpliva betona ($V_{Rd,c} = 0$), se izraz (15) poenostavi:

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max} \quad (16)$$

Strižno odpornost elementov, ki jo določa nosilnost poševne strižne armature določimo z izrazom:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha, \quad (17)$$

kjer sta:

- | | |
|-----------|--|
| A_{sw} | ploščina prečnega prereza strižne armature v eni krivitvi in |
| f_{ywd} | projektna meja elastičnosti strižne armature. |

Zagotoviti moramo še, da je projektna prečna sila manjša od projektne vrednosti prečne sile, ki jo lahko prenese element in je omejena z drobljenjem tlačnih razpor $V_{Rd,max}$ pri modelu ravninskega paličja:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta} \quad (18)$$

Kjer so:

- | | |
|---------------|--|
| v_1 | redukcijski faktor tlačne trdnosti strižno razpokanega betona in je enak |
| | $v_1 = v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$, |
| α_{cw} | koeficient, ki upošteva stanje napetosti v tlačnem pasu in velja: |

$$\alpha_{cw} = 1 \text{ za konstrukcije brez prednapetja, sicer pa}$$

$$\alpha_{cw} = (1 + \sigma_{cp} / f_{cd}) \text{ za } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd},$$

$$\alpha_{cw} = 1,25 \text{ za } 0,25 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5 \cdot f_{cd},$$

$$\alpha_{cw} = 2,5 \cdot (1 + \sigma_{cp} / f_{cd}) \text{ za } 0,5 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0 \cdot f_{cd} \text{ in}$$

σ_{cp} srednja tlačna napetost betona, ki pripada projektni osni sili; upoštevamo jo kot pozitivno.

V izrazih (17) in (18) je velikost kota θ omejena s pogojem: $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$, torej velja $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$. Naklon θ je lahko med podanima vrednostma izbran poljubno. Ker sta strižni odpornosti $V_{Rd,s}$ in $V_{Rd,max}$ odvisni od naklona tlačnih razpor je pomembno, katero vrednost si bomo izbrali. Z večanjem kota θ se strižna odpornost $V_{Rd,s}$ manjša, $V_{Rd,max}$ pa se večja in obratno, z manjšanjem kota θ se strižna odpornost $V_{Rd,s}$ večja, $V_{Rd,max}$ pa se manjša.

3.2.2 Strižna odpornost po *fib* Model Code for Concrete Structures 2010

V modelnem predpisu *fib* MC 2010 [2] se izraz za projektno strižno odpornost, ki jo lahko prenese strižna armatura $V_{Rd,s}$, v primeru nagnjene strižne armature, ujema z izrazom iz standarda SIST EN 1992-1-1 [1]:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha.$$

Strižna odpornost, ki je omejena z drobljenjem tlačnih razpor $V_{Rd,max}$ je podana z izrazom:

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}. \quad (19)$$

Kjer so:

θ naklon tlačne razpore glede na vzdolžno os elementa,
 k_c redukcijski faktor trdnosti in je $k_c = k_e \cdot \eta_{fc}$. Pri tem k_e zajame vpliv deformacijskega stanja v stojini nosilca, η_{fc} pa zajame krhko obnašanje betonov višjih trdnosti.

$$\eta_{fc} = \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} \leq 1,0, \text{ kjer je karakteristična tlačna trdnost } f_{ck} \text{ v [MPa].}$$

Pri izračunu odpornosti moramo upoštevati omejitev naklona tlačnih diagonal θ :

$$\theta_{min} \leq \theta \leq 45^\circ.$$

Naklon θ je lahko med podanima vrednostma izbran poljubno.

Velikost minimalnega naklona tlačnih diagonal θ_{min} in koeficient k_e se spreminjata v odvisnosti od izbranega modela za račun odpornosti. Paramter k_e upošteva vpliv deformacijskega stanja v stojini, ki je pomemben predvsem pri prednapetih elementih ali pri elementih v tlaku in manj pomemben pri armiranih elementih in/ali prevezih z velikimi vrednostmi θ in k_e .

Modelni predpis *fib* MC 2010 [2] obravnava tri "nivoje zahtevnosti računa", ki temeljijo na različnih modelih - modelu na podlagi mehanizma nadomestnega paličja, splošnem modelu napetostnega polja

in modelu na podlagi poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja. Izbor modela je odvisen od želene natančnosti rezultatov in od pomembnosti elementa v objektu.

Izračun strižne odpornosti na podlagi mehanizma nadomestnega ravninskega paličja

Modelni predpis *fib* MC 2010 [2] pod izrazom "nivo zahtevnosti računa I" podaja izračun strižne odpornosti na podlagi mehanizma nadomestnega ravninskega paličja. Ker mehanizem paličja pri strižni odpornosti upošteva le vpliv armature, vpliv prispevka betona iz mehanizma v elementu brez strižne armature pa je zanemarjen ($V_{Rd,c} = 0$), se izraz $V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max}$ poenostavi:

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max} . \quad (20)$$

Pri tem pa mora logično veljati $V_{Rd} \geq V_{Rd,c}$, sicer strižna armatura ne bi bila potrebna.

Minimalni naklon tlačnih diagonal θ_{min} je odvisen od načina obremenitve in vrste elementa ter velja:

$$\theta_{min} = 25^\circ \text{ za elemente obremenjene z natezno osno silo ali prednapete elemente,}$$

$$\theta_{min} = 40^\circ \text{ za elemente obremenjene s tlačno osno silo in}$$

$$\theta_{min} = 30^\circ \text{ za ostale armiranobetonske elemente.}$$

Pri tem upoštevamo vrednost $k_e = 0,55$. Vrednosti za θ_{min} in k_e lahko uporabimo pri prerezih, kjer je deformacija $\varepsilon_x < 0,001$, izračunana po izrazu (6) oz. (7).

Izračun strižne odpornosti na podlagi splošnega modela napetostnega polja

Izračun strižne odpornosti je v modelnem predpisu *fib* MC 2101 [2] podan pod izrazom "nivo zahtevnosti računa II" in temelji na podlagi splošnega modela napetostnega polja. Kot pri mehanizmu paličja tudi pri splošnem modelu napetostnega polja strižno odpornost zagotavlja le armatura, zato mora veljati pogoj:

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max} .$$

Minimalni naklon tlačnih razpor je določen z izrazom:

$$\theta_{min} = 20^\circ + 10000 \cdot \varepsilon_x . \quad (21)$$

Koeficient k_e je določen z izrazom:

$$k_e = \frac{1}{1,2 + 55 \cdot \varepsilon_1} \leq 0,65 . \quad (22)$$

Pri tem je ε_1 dobljen s pomočjo Mohrovih krogov deformacij:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x - \varepsilon_2) \cdot \cot^2 \theta . \quad (23)$$

Napetost ε_x izračunamo po izrazih (6) oz. (7). V [6] je za ustrezno poenostavitev navedeno, da lahko za $-\varepsilon_2$ vzamemo $-\varepsilon_2 = \varepsilon_{c0} = 0,002$. Pri tem vrednost ustreza največji deformaciji.

Izračun strižne odpornosti na podlagi poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja

Modelni predpis *fib* MC 2010 [2] pod izrazom "nivo zahtevnosti računa III" podaja izračun strižne odpornosti na podlagi poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja. V nasprotju z mehanizmom

paličja in splošnega modela napetostnega polja, poenostavljena modificirana teorija tlačnega polja k strižni odpornosti upošteva tudi prispevek betona ($V_{Rd,c} \neq 0$), zato velja splošen izraz za strižno odpornost V_{Rd} :

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s}.$$

Pri izračunu strižne sile, ki jo lahko prenese element in je omejena z drobljenjem tlačnih razpor $V_{Rd,max}$, upoštevamo, da je $\theta = \theta_{min} = 20^\circ + 10000 \cdot \varepsilon_x$:

$$V_{Rd,max}(\theta_{min}) = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta_{min} + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta_{min}}. \quad (24)$$

Kot v splošnem, pa mora tudi tu veljati, da je strižna odpornost manjša od strižne sile, ki jo lahko prenese element in je omejena z drobljenjem tlačnih razpor:

$$V_{Rd} \leq V_{Rd,max}(\theta_{min}). \quad (25)$$

Za določitev projektne strižne odpornosti, ki jo pripišemo vplivu betona $V_{Rd,c}$ ($V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w$), uporabimo faktor k_v , ki je enak:

$$k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \left(1 - \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}(\theta_{min})} \right) \geq 0. \quad (26)$$

Kjer je vzdolžna deformacija ε_x izračunana z izrazoma (6) ali (7).

Pri izračunu dodatne natezne sile ΔF_{td} moramo upoštevati nadomestno projektno prečno silo:

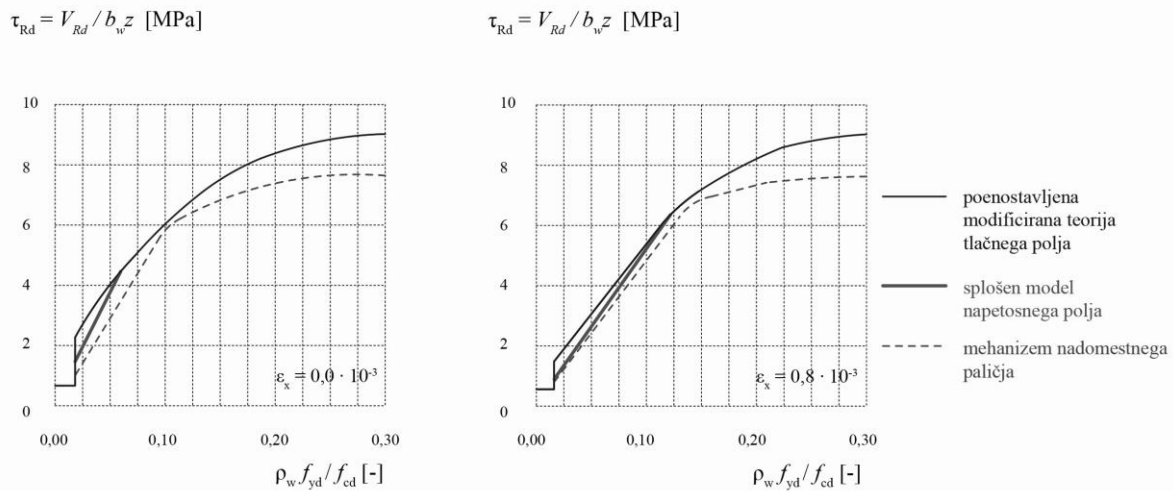
$$V_{Ed}^* = V_{Ed} + V_{Rd,c}. \quad (27)$$

Dodatna natezna sila ΔF_{td} , ki jo v vzdolžni armaturi povzroča prečna sila V_{Ed} , je določena na podlagi mehanizma paličja:

$$\Delta F_{td} = \frac{V_{Ed}}{2} \cdot (\cot \theta - \cot \alpha). \quad (28)$$

Primerjava rezultatov

Primerjava rezultatov posameznih metod določitve strižne odpornosti je prikazana na sliki 6:



Slika 6: Primerjava rezultatov velikosti strižne trdnosti po različnih metodah pri elementih s tlačno trdnostjo betona $f_{ck}=50MPa$ (iz *fib* MC 2010 [2])

Iz slike 6 je razvidno, da so strižne trdnosti τ_{Rd} določene na podlagi poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja in splošnega modela napetosnega polja večje od strižnih trdnosti izračunanih s pomočjo mehanizma nadomestnega paličja. Največja razlika je opazna pri elementih z večjim deležem strižne armature. Strižne trdnosti izračunane s pomočjo splošnega modela napetosnega polja so pri elementih z manjšim deležem strižne armature nekoliko manjše od tistih, ki so določene na podlagi poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja. Prav pri teh elementih je vpliv betona na odpornost, ki ga upošteva poenostavljena modificirana teorija tlačnega polja, najbolj pomemben, kar predstavlja razlog za razhajanje v krivuljah. Pri večjem deležu strižne armature pa sta krivulji identični.

3.2.3 Strižna armatura

Po standardu SIST EN 1992-1-1 [1] in modelnem predpisu *fib* MC 2010 [2] mora biti stopnja armiranja s strižno armaturo pri elementih, kjer je strižna armatura računsko potrebna, večja od minimalne stopnje armiranja podane z izrazom:

$$\rho_w > \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}. \quad (29)$$

Stopnja armiranja s strižno armaturo ρ_w pa je določena z izrazom:

$$\rho_w = A_{sw} / (s \cdot b_w \cdot \sin \alpha). \quad (30)$$

Kjer so:

- A_{sw} prerez strižne armature na dolžini s ,
- s medsebojna razdalja strižne armature in
- α kot med strižno armaturo in vzdolžno osjo nosilca.

Na podlagi pogoja $\rho_{w,min} \leq \rho_w$, dobimo izraz za minimalni prerez strižne armature:

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{\min} \geq \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \cdot b_w \cdot \sin \alpha. \quad (31)$$

Izraz za strižno odpornost elementov, ki jo določa nosilnost strižne armature $V_{Rd,s}$ ($V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$) lahko poleg izračuna strižne odpornosti, ki jo določa strižna armatura, uporabimo še za izračun prereza strižne armature armiranih elementov podanega z izrazom:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{f_{ywd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha}, \quad (32)$$

kjer je upoštevan pogoj $V_{Rd,s} = V_{Ed}$.

V primeru duktilnega obnašanja, mora veljati, da je strižna armatura plastificirana preden je izčrpana nosilnost tlačnih razpor. S pomočjo tega pogoja dobimo največji možen prerez strižne armature $A_{sw,max}$, ki še zagotavlja plastifikacijo:

$$\frac{A_{sw,max}}{s} \leq \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \sin^2 \theta \cdot b_w}{\sin \alpha \cdot f_{ywd}}. \quad (33)$$

V standardu SIST EN 1992-1-1 [1] je podan pogoj, da medsebojna oddaljenost skupin strižne armature ne sme presegati vrednosti $s_{l,max}$, podane z izrazom:

$$s_{l,max} = 0,75 \cdot d \cdot (1 + \cot \alpha). \quad (34)$$

Pri računu celotne sile v vzdolžni armaturi, moramo poleg sile F_s , dobljene pri upogibnem dimenzioniranju ($F_s = \frac{M_{Ed}}{z}$), ki se spreminja glede na spreminjanje upogibnih momentov, upoštevati še dodatno natezno silo ΔF_{td} , ki jo v vzdolžni armaturi povzroča prečna sila V_{Ed} , določena na podlagi mehanizma paličja in je:

$$\Delta F_{td} = \frac{V_{Ed}}{2} \cdot (\cot \theta - \cot \alpha).$$

V nasprotju z nateznim pasom, se tlačni pas razbremeni. Sila v tlačnem pasu se zmanjša za $-\Delta F_{td}$.

Dodatno vzdolžno armaturo, ki jo dodamo k že obstoječi natezni armaturi dobimo s pomočjo izraza:

$$\Delta A_{sl} = \frac{\Delta F_{td}}{f_{yd}} = \frac{V_{Ed}}{2 \cdot f_{yd}} \cdot (\cot \theta - \cot \alpha). \quad (35)$$

Kot pri določanju strižne odpornosti ima tudi pri določanju strižne armature vpliv naklon tlačnih razpor, ki pa je v okviru omejitev izbran poljubno. Z večanjem kota θ se povečuje potreben prerez strižne armature, manjša pa se prerez dodatne vzdolžne armature, ali obratno, z manjšanjem kota θ se zmanjšuje potreben prerez strižne armature, večja pa se prerez dodatne vzdolžne armature.

3.3 Strižna odpornost prednapetih elementov

Prednapetje ima globalno v večini primerov ugoden vpliv na strižno odpornost, saj zmanjšuje prečne sile, ki odpadejo na preostali armiranobetonski element. To pa pri izračunu upoštevamo na strani učinka vplivov [13]:

$$V_{Ed}^* = V_{Ed} + V_{Ed,p}. \quad (36)$$

Kjer pod strižno silo $V_{Ed,p}$ zajamemo osnovne učinke prednapetja pri statično določenih konstrukcijah, pri statično nedoločenih konstrukcijah pa še parazitne učinke.

Pri računu odpornosti strižno nearmiranih elementov, je $V_{Rd,c}$ večja kot pri elementih armiranih z vzdolžno armaturo, kar pa lahko pomeni, da ne potrebujemo strižne armature, ampak vstavimo le minimalno. Pri teh elementih se lahko strižna odpornost v območjih, ki so razpokana zaradi upogiba in v prerezih, ki so bližje podpori od presečišča težiščne osi elementa ter od notranjega roba ležišča pod kotom 45° nagnjene linije, izračuna z izrazom iz standarda SIST EN 1992-1-1 [1]:

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

V SIST EN 1992-1-1 [1] je za prereze, ki niso razpokani zaradi upogiba, strižna odpornost v težiščni osi določena z izrazom:

$$V_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_1 \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}}. \quad (37)$$

Kjer so:

I	vztrajnostni moment prereza,
b_w	širina prečnega prereza v težiščni osi z upoštevanjem zaščitnih cevi kablov,
S	statični moment ploskve prereza nad težiščno osjo glede na težiščno os,
σ_{cp}	tlačna napetost betona ob težiščni osi, ki jo povzroča osna obremenitev in/ali prednapetje,
α_1	$= l_x / l_{pt2} \leq 1,0$ za predhodno napete kable oz. $= 1,0$ za druge vrste prednapetja,
l_x	oddaljenost obravnavanega prereza od začetne točke dolžine vnosa kableske sile,
l_{pt2}	zgornja meja dolžine vnosa pri prednapetih elementih in velja $l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{pt}$,
l_{pt}	osnovna vrednost dolžine vnosa in velja $l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{pm0} / f_{bpt}$,
α_1	$= 1,0$ za postopno sproščanje kabla, $= 1,25$ za hipno sprostitev kabla,
α_2	$= 0,25$ za kable z okroglim prečnim prerezom, $= 0,19$ za vrvi iz 3 ali 7 žic,
ϕ	nazivni premer kabla in
σ_{pm0}	napetost kabla takoj ob sprostitvi.

Pri računu strižne odpornosti v težiščni osi mora veljati, da največja natezna napetost ne preseže projektne osne natezne trdnosti ($\max |\sigma_d| \leq f_{ctd} = \frac{f_{ctk,0.05}}{\gamma_c}$).

Modelni predpis *fib* MC 2010 [2] pa bolj specifično obravnava prednapete elemente in sicer prednapete votle plošče. Strižna odpornost v težiščni osi je določena z izrazom:

$$V_{Rd,ct} = 0,8 \cdot \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_l \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}}, \quad (38)$$

kjer sta:

$$\alpha_l = l_x / l_{bpt,95\%},$$

$$l_{bpt,95\%} = \frac{0,01 \cdot \phi_s \cdot \sigma_{pi}}{f_{ctd}} \text{ in}$$

σ_{pi} začetna napetost v kabljih.

Pri strižno armiranih elementih prednapetje vpliva na odpornost glede tlačnih razpor. V SIST EN 1992-1-1 [1] je ta vpliv zajet v koeficientu α_{cw} , ki zajema vpliv tlačnih napetosti betona zaradi osne sile in je lahko $0 \leq \alpha_{cw} \leq 1,25$, kar pomeni, da lahko zmanjša ali poveča strižno odpornost $V_{Rd,max}$. V modelnem predpisu *fib* MC 2010 [2] pa je zajeto v deformacijah ϵ_x .

Pri računu moramo v primeru prednapetih kablov s premerom cevi $\phi_d > b_w / 8$, zaradi zmanjšanja širine prečnega prereza, največjo strižno odpornost $V_{Rd,max}$ izračunati na podlagi nazivne širine stojine:

$$b_{w,nom} = b_w - k_D \cdot \Sigma \phi_D. \quad (39)$$

Kjer sta:

ϕ_D zunanji premer zaščitnih cevi in

$\Sigma \phi_D$ vsota zunanjih premerov zaščitnih cevi, ki je določena za najneugodnejšo raven (za upogibno razpokane prereze) ali za določeno obravnavano višino (za upogibno nerazpokane prereze).

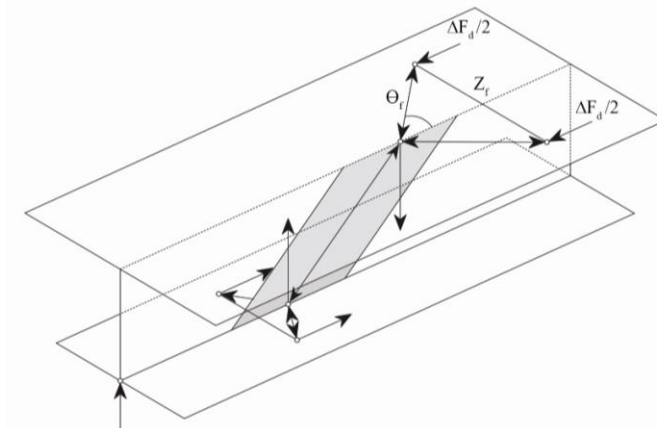
Vrednost k_D je odvisna od materiala cevi in od zainjiciranosti. Predlagane vrednosti za projektiranje v standardu SIST EN 1992-1-1 [1] in modelnem predpisu *fib* MC 2010 [2] so:

- zainjicirani kabli v kovinskih ceveh $k_D=0,5$,
- zainjicirani kabli v plastičnih ceveh $k_D=1,2$ [1] oz. $k_D=0,8$ [2],
- nezainjicirani kabli v ceveh $k_D=1,2$.

V primeru $\phi_D \leq b_w / 8$ pa velja $b_{w,nom} = b_w$.

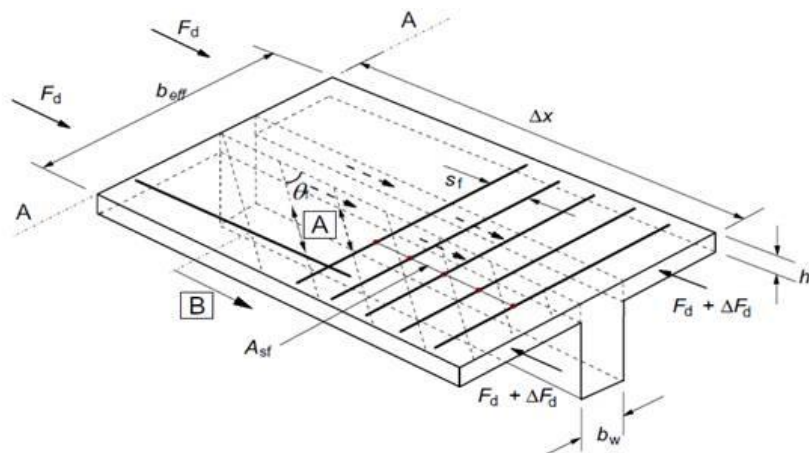
3.4 Strig v pasnici na stiku med stojino in pasnico T-prerezov

Ena izmed najbolj uporabnih geometrijskih oblik iz armiranega betona, ki se uporabljajo pri gradnji stavb in mostov, so plošče, ki so monolitno povezane z nosilci in skupaj tvorijo prerez T-oblike. Pri elementih T-prereza vnos tlačnih in nateznih sil v pasnice povzroči strižne sile na prehodu med stojino in pasnicami kot je prikazano na sliki 7 iz modelnega predpisa *fib* MC 2010 [2].



Slika 7: Potek sil po elementu T-oblike (iz fib MC 2010 [2])

Strig med pasnico in stojino T-prerezov pa je nekoliko drugače prikazan v standardu SIST EN 1992-1-1 [1] (slika 8).



Slika 8: Strig med pasnico in stojino T-prerezov iz standarda SIST EN 1992-1-1 [1]

Za določitev strižne odpornosti pasnice uporabimo mehanizem nadomestnega paličja, pri čemer lahko pasnico obravnavamo kot sistem tlačnih razpor, natezno armaturo pa kot natezne vezi. Da se izognemo določanju nadomestnega paličja za posamezno obtežbo, je v standardu SIST EN 1992-1-1 [1] določena poenostavitev tako, da povprečno povečanje normalne sile na meter, izračunamo na dolžini Δx in s tem na enostavnejši način dobimo povprečno armaturo, ki bi jo dobili s pomočjo modela paličja [5].

Vzdolžna strižna napetost v_{Ed} v stiku med pasnico in stojino je v standardu SIST EN 1992-1-1 [1] določena z izrazom:

$$v_{Ed} = \Delta F_d / (h_f \cdot \Delta x). \quad (40)$$

Kjer so:

h_f	debelina pasnice ob stiku,
Δx	dolžina obravnavanega odseka in
ΔF_d	sprememba vzdolžne sile v pasnici na odseku Δx .

Spremembo normalne sile ΔF_d izračunamo na dva načina [5]:

- v primeru tlačene pasnice (pozitivni upogibni moment):

$$\Delta F_d = \frac{\Delta M_{Ed}}{z} \cdot \frac{b_i}{b_{eff}}, \quad (41)$$

kjer so:

ΔM_{Ed} sprememba upogibnega momenta na odseku Δx ,
 b_i širina enega dela pasnice od stojine,
 b_{eff} pa skupna sodelujoča širina pasnice

- in v primeru natezne pasnice (negativni upogibni moment):

$$\Delta F_d = \frac{\Delta M_{Ed}}{z} \cdot \frac{A_{si}}{A_s}, \quad (42)$$

kjer sta:

A_{si} prerez armature v enem delu pasnice do stojine in
 A_s prerez armature na celotni sodelujoči širini pasnice.

Največja vrednost Δx je lahko polovica razdalje med prerezom, kjer je upogibni moment enak 0 in prerezom, kjer je upogibni moment največji. Pri računu na območju Δx upoštevamo večjo izmed vrednosti spremembe upogibnega momenta ΔM_{Ed} . V primeru delovanja točkovnih sil pa dolžina Δx ne sme preseči razdalj med sosednjima točkovnima silama.

Za preprečitev porušitve tlačnih razpor v pasnici mora biti izpolnjena naslednja zahteva:

$$v_{Ed} \leq v \cdot f_{cd} \cdot \sin \theta_f \cdot \cos \theta_f \quad (43)$$

Kjer so v standardu SIST EN 1992 -1-1 [1] za kot θ_f podane naslednje omejitve:

$$1,0 \leq \cot \theta_f \leq 2,0 \text{ oz. } 26,5^\circ \leq \theta_f \leq 45^\circ \quad \text{za tlačene pasnice in}$$

$$1,0 \leq \cot \theta_f \leq 1,25 \text{ oz. } 38,6^\circ \leq \theta_f \leq 45^\circ \quad \text{za natezne pasnice,}$$

v modelnem predpisu *fib* MC 2010 [2] pa so omejitve za kot θ_f nekoliko drugačne:

$$25^\circ \leq \theta_f \leq 45^\circ \quad \text{za tlačene pasnice in}$$

$$35^\circ \leq \theta_f \leq 50^\circ \quad \text{za natezne pasnice.}$$

Prečno armaturo na enoto dolžine A_{sf} / s_f določimo z izrazom:

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \geq \frac{v_{Ed} \cdot h_f}{\cot \theta_f \cdot f_{yd}} \quad (44)$$

V primeru kombinacije prečnega upogiba in striga med stojino in pasnico mora biti ploščina prereza armature večja od vrednosti dobljene s pomočjo izraza (44) oziroma večja od vsote polovice potrebne armature, ki je določena z izrazom (44) in armature, ki je potrebna za prevzem prečnega upogiba.

3.5 Strig med sloji betona, ki so betonirani v različnih časih

Pri elementih, katerih deli so betonirani v različnih časih je pomembno, da je zagotovljena dobra sprijemnost med posameznimi sloji. Parametri, ki vplivajo na sprijemnost in trenje so [2]:

- dobra priprava in ustrezna čistoča površine v času vgrajevanja betona,

- trdnostna razreda starega in novega betona,
- kvaliteta zgornjega sloja starega betona,
- poroznost in vlažnost starega betona,
- kvaliteta, struktura in razmerje sestavin svežega betona,
- stopnja krčenja svežega betona in
- starost starega betona.

Prav sprijemnost in trenje v veliki meri vplivata na celotno strižno odpornost elementa. V splošnem ločimo dve situaciji [2]: togo povezavo in podajno povezavo med sloji betona. Pri togi povezavi je sprijemnost med sloji zelo močna, zato je glavni prispevek k strižni odpornosti prav sprijemnost slojev. Pri podajni povezavi pa je sprijemnost manj izrazita, zato večino celotne strižne odpornosti prispevata trenje in možnični učinek.

3.5.1 Strig med sloji betona, ki so betonirani v različnih časih po standardu SIST EN 1992-1-1

Dodatno k osnovnim zahtevam za strižno nosilnost betonskih elementov iz predhodnih razdelkov je potrebno za stično območje med sloji različnih starosti zadostiti še zahtevi:

$$v_{Edi} \leq v_{Rdi} \cdot \quad (45)$$

Pri tem sta v_{Edi} projektna vrednost strižne napetosti v stični ploskvi in v_{Rdi} projektna strižna odpornost stika ter sta podani z naslednjima izrazoma:

$$v_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i) \text{ in} \quad (46)$$

$$v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot \quad (47)$$

Kjer so:

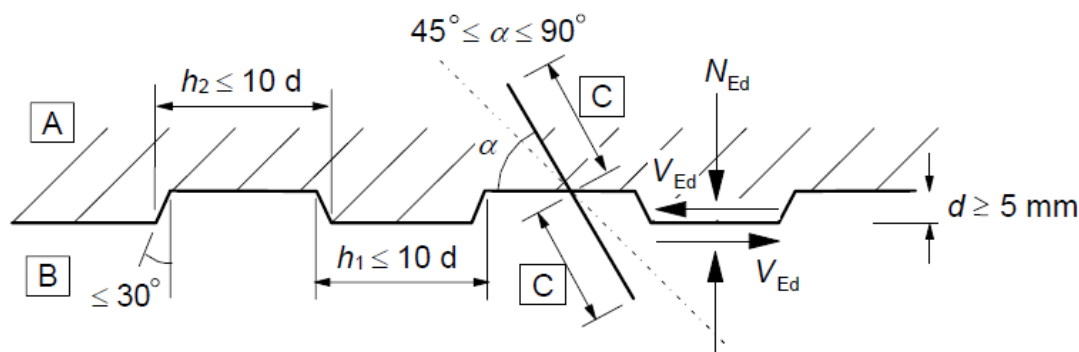
β	razmerje med vzdolžno silo v novi betonski ploskvi in celotno vzdolžno silo v tlačni oziroma natezni coni, ki sta izračunani v obravnavanem prerezu,
z	ročica notranjih sil sestavljenega prereza,
b_i	širina stične ploskve,
f_{ctd}	projektna natezna trdnost betona,
σ_n	napetost, ki jo v stični ploskvi povzroča najmanjša zunanja normalna sila, pravokotna na stično ploskev, ki lahko deluje sočasno s prečno silo. V primeru tlaka se upošteva kot pozitivna vrednost, v primeru natega pa kot negativna, tako da je $\sigma_n < 0,6 \cdot f_{cd}$. Kadar je napetost σ_n natezna je potrebno upoštevati $c \cdot f_{ctd} = 0$.
ρ	Delež armature, ki seka stično ploskev in je $\rho = \frac{A_s}{A_i}$,
A_s	ploščina prečnega prereza armature, ki prečka stično ploskev, vključno s strižno armaturo,
A_i	ploščina stika,
α	kot sidranja in mora veljati $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ter je prikazan na sliki 9,
v	redukcijski faktor trdnosti strižno razpokanega betona, ki je enak $v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$, kjer je f_{ck} v [MPa] in
c in μ	faktorja, ki sta odvisna od hrapavosti stične ploskve in sta podana v preglednici 1.

Površine glede hrapavosti lahko razdelimo na zelo gladke, gladke, hrapave in nazobčane ter na podlagi tega odčitamo ustrezno vrednost faktorjev c in μ .

Preglednica 1: Odvisnost koeficientov c in μ od tipa površine stične ploskve iz SIST EN 1992-1-1 [1]

Tip površine stične ploskve	c	μ
Zelo gladka površina	0,25	0,5
Gladka površina	0,35	0,6
Hrapava površina	0,45	0,7
Nazobčana površina	0,5	0,9

V primeru občutneje razpokanega stika se pri gladkih in hrapavih stikih vzame $c = 0$, pri nazobčanih pa $c = 0,5$, pri dinamičnih obtežbah in utrujanju pa je potrebno vrednosti c zmanjšati na polovico.



Slika 9: Nazobčana izvedba stika (iz SIST EN 1992-1-1 [1])

Na sliki 9 oznake pomenijo:

- A novi beton,
- B stari beton in
- C sidranje.

Za določitev ustrezne hrapavosti površin upoštevamo naslednje smernice podane v standardu SIST EN 1992-1-1 [1]:

- zelo gladka površina: površina, vgrajena na jeklo, plastiko ali posebej pripravljen lesen kalup,
- gladka površina: površina, oblikovana z vlečenjem ali iztiskanjem z ekstrudorjem ali površina brez nadaljnje obdelave po vibriranju,
- hrapava površina: površina z vsaj 3 mm globoko hrapavostjo na medsebojni oddaljenosti približno 40 mm, ki se dobi z grabljenjem, površinsko izpostavljenimi zrni agregata ali drugimi postopki, ki zagotavljajo primerljivo obnašanje in
- nazobčana površina: ostalo (glej sliko 9).

3.5.2 Strig med sloji betona, ki so betonirani v različnih časih po *fib* Model Code for Concrete Structures 2010

Modelni predpis *fib* MC 2010 [2] navaja enakovreden izrazu $v_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i)$ iz standarda SIST EN 1992-1-1 [1], le da uporabi druge oznake:

$$\tau_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i). \quad (48)$$

V primeru stične ploskve brez armature (toga povezava med sloji) pa je τ_{Rdi} določena z izrazom (49) in upošteva v izračunu vpliv trenja in sprjemnosti:

$$\tau_{Rdi} = c_a \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}. \quad (49)$$

Kjer so:

c_a koeficient sprijemnosti na stični ploskvi z vrednostmi podanimi v preglednici 2,
 μ koeficient trenja z vrednostmi podanimi v preglednici 2 in

$$\nu = 0,55 \cdot \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} < 0,55.$$

Preglednica 2: Odvisnost koeficientov c in μ od tipa površine stične ploskve iz *fib* MC 2010 [2]

Tip površine stične ploskve	c_a	μ	
		$f_{ck} \geq 20 \text{ MPa}$	$f_{ck} \geq 35 \text{ MPa}$
Zelo gladka površina	0,025	0,5	
Gladka površina	0,2	0,6	
Hrapava površina	0,4	0,7	
Nazobčana površina	0,5	0,8	1

Pri dinamičnih obtežbah in utrujanju je potrebno vrednosti c_a zmanjšati na polovico.

Za razvrstitev površin v različne razrede hrapavosti si pomagamo s smernicami podanimi v standardu SIST EN 1992-1-1 [1].

Če ne moremo zagotoviti toge sprijemnosti na stični ploskvi ali je projektna strižna odpornost stika dobljena z izrazom (49) manjša od projektne vrednosti strižne napetosti ($\tau_{Rdi} < \tau_{Edi}$), moramo zagotoviti ustrezno povezavo (armaturo) na stiku. Tako izračunana odpornost τ_{Rdi} je enaka:

$$\tau_{Rdi} = c_r \cdot f_{ck}^{1/3} + \mu \cdot \sigma_n + \kappa_1 \cdot \rho \cdot f_{yd} (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) + \kappa_2 \cdot \rho \sqrt{f_{yd} \cdot f_{cd}} \leq \beta_c \cdot \nu \cdot f_{cd} \quad (50)$$

Kjer so:

c_r koeficient zaklinjanja med zrni agregata na stični ploskvi z vrednostmi podanimi v preglednici 3,
 κ_1 interakcijski koeficient aktivacije natezne sile v armaturi ali moznikih z vrednostmi podanimi v preglednici 3,
 κ_2 interakcijski koeficient upogibne odpornosti z vrednostmi podanimi v preglednici 3,
 α naklon armature, ki seka stično ploskev in
 β_c koeficient trdnosti tlačnih razpor z vrednostmi podanimi v preglednici 3.

Preglednica 3: Odvisnost koeficientov c_r , κ_1 , κ_2 in μ od tipa površine stične ploskve iz *fib* MC 2010 [2]

Tip površine stične ploskve	c_r	κ_1	κ_2	κ_2	μ	
					$f_{ck} \geq 20 \text{ MPa}$	$f_{ck} \geq 35 \text{ MPa}$
Zelo gladka površina	0	0	1,5	0,3	0,5	
Gladka površina	0	0,5	1,1	0,4	0,6	
Hrapava površina	0,1	0,5	0,9	0,5	0,7	
Nazobčana površina	0,2	0,5	0,9	0,5	0,8	1

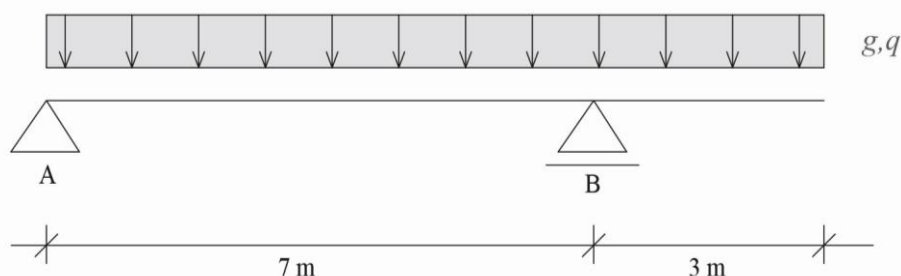
Pri dinamičnih obtežbah in utrujanju je potrebno vrednost τ_{Rdi} izračunano po izrazu (50) zmanjšati na 40 %.

4 RAČUNSKI PRIMER

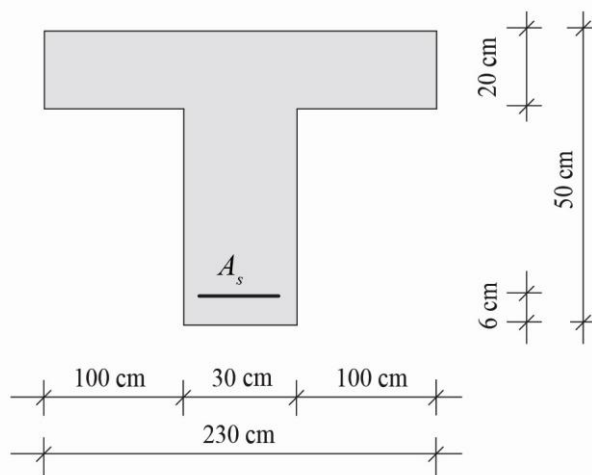
4.1 Opis naloge

Namen računskega primera je v praksi prikazati dimenzioniranje na strižno obremenitev. V primeru sem se osredotočila na primerjavo izračuna strižne odpornosti, strižne armature in dodatne natezne armature po izrazih podanih v standardu SIST EN 1992-1-1 [1] in modelnem predpisu *fib* MC 2010 [2]. Pri tem sem račun izvedla po postopku na podlagi modela nadomestnega ravninskega paličja, splošnega modela napetostnega polja in poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja. Želela sem predstaviti tudi vpliv različne izbire naklona tlačnih diagonal.

Za računski primer sem izbrala armiranobetonski nosilec s previsnim poljem, ki je obremenjen z razporejeno stalno in koristno obtežbo. Prerez nosilca je T-oblike in je po celotni dolžini homogen.



Slika 10: Statični sistem armiranobetonskega nosilca s previsnim poljem



Slika 11: Prerez

4.2 Materiali

Beton C30/37

- karakteristična tlačna trdnost: $f_{ck} = 3,0 \text{ kN} / \text{cm}^2$
- projektna tlačna trdnost: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{3,0}{1,5} = 2,0 \text{ kN} / \text{cm}^2$
- prostorninska teža (z armaturo): $\rho_b = 25 \text{ kN} / \text{m}^3$
- velikost maksimalnega agregatnega zrna: $d_g = 32 \text{ mm}$

Jeklo S500-B

- karakteristična meja elastičnosti: $f_{yk} = 50 \text{ kN} / \text{cm}^2$
- projektna meja elastičnosti: $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,48 \text{ kN} / \text{cm}^2$
- modul elastičnosti: $E_s = 20000 \text{ kN} / \text{cm}^2$

4.3 Geometrijske karakteristike

- statična višina $d = h - a_s = 50 - 6 = 44 \text{ cm}$
- širina podpore $c = 30 \text{ cm}$

4.4 Obtežba

Stalna obtežba:

- lastna teža
 $g_{l.t.} = \rho_b \cdot (b \cdot d_0 + b_0 \cdot (h - d_0)) = 25 \cdot (2,3 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot (0,5 - 0,2)) = 13,75 \text{ kN} / \text{m}$
- $g = 15 \text{ kN} / \text{m}$

Koristna obtežba:

- $q = 17 \text{ kN} / \text{m}$

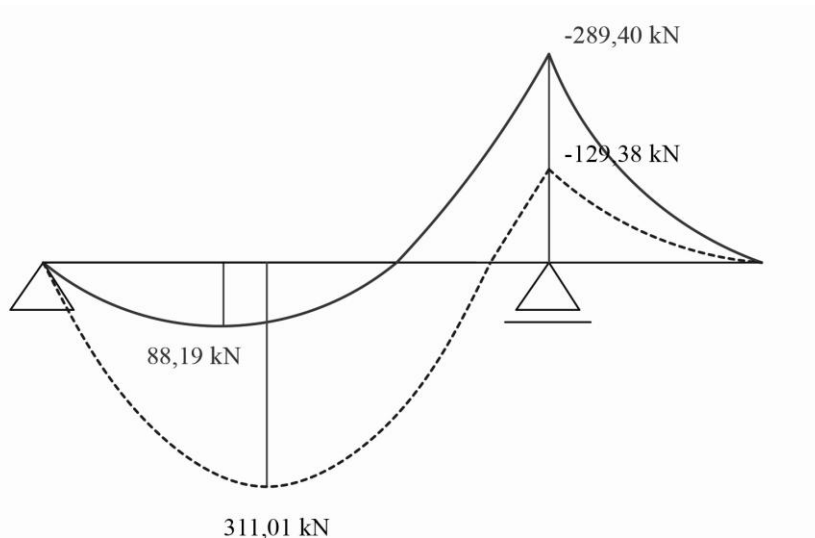
4.5 Izračun**4.5.1 Obtežba za mejno stanje nosilnosti**

$$g_{Ed} = (g_{l.t.} + g) \cdot \gamma_G = (13,75 + 15) \cdot 1,35 = 38,81 \text{ kN} / \text{m}$$

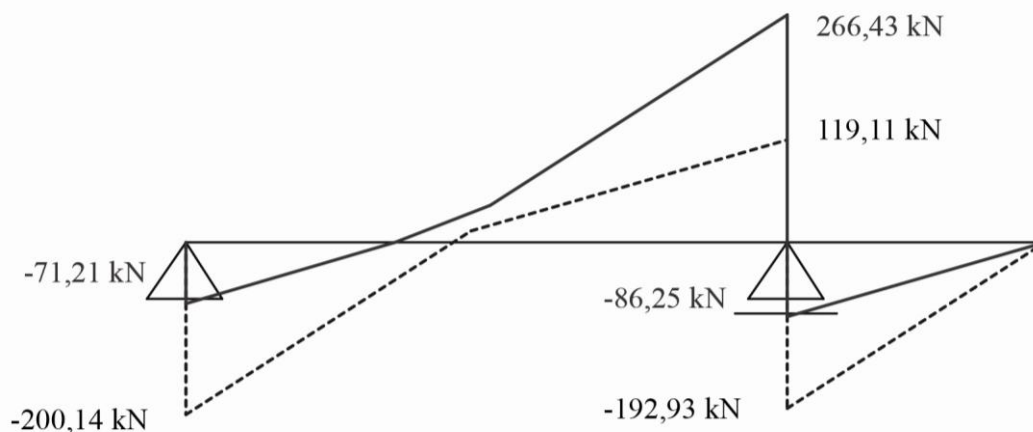
$$q_{Ed} = q \cdot \gamma_Q = 17 \cdot 1,5 = 25,5 \text{ kN} / \text{m}$$

4.5.2 Notranje sile

Na slikah 12 in 13 so podane ovojnice maksimalnih in minimalnih upogibnih momentov ter prečnih sil.



Slika 12: Ovojnice največjih in najmanjših upogibnih momentov



Slika 13: Ovojnici največjih in najmanjših prečnih sil

4.5.3 Natezna armatura

Izračun sodelujoče širine prereza b_{eff} v polju:

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,2 \cdot b_1 + 0,1 \cdot l_0 \\ 0,2 \cdot l_0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,2 \cdot 1 + 0,1 \cdot 5,7 \\ 0,2 \cdot 5,7 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,77 \\ 1,14 \end{array} \right\} = 0,77m$$

$$b_{eff} = 2 \cdot b_{eff,1} + b_0 = 2 \cdot 77 + 30 = 184cm$$

Pri tem privzamemo, da je po celotni dolžini konstrukcije enaka širina pasnic.

Vzdolžna armatura v polju:

$$k_d = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot d^2} = \frac{311,01 \cdot 100}{2 \cdot 184 \cdot 44^2} = 0,044$$

Izberem deformacije $\varepsilon_s / -\varepsilon_1 = 10 / 3,5\text{‰}$, kjer je $k_s = 1,121$ in $k_x = 0,259$.

Ker je $x = k_x \cdot d = 0,259 \cdot 44 = 11,4cm < d_0 = 20cm$, lahko uporabim tabele za pravokotni prerez.

$$A_s = \frac{k_s \cdot M_{Ed}}{d \cdot f_{yd}} = \frac{1,121 \cdot 311,01 \cdot 100}{44 \cdot 43,48} = 18,22cm^2$$

Izberem vzdolžno armaturo $10\phi 16$ ($A_{s,dej} = \mathbf{20,11cm^2}$). Zaradi razporeditve armature vzdolž nosilca, vzamem ob podporah vzdolžno armaturo $6\phi 16$ in je $A_{s,podpora} = \mathbf{12,06cm^2}$.

Vzdolžna armatura nad podporo B:

$$k_d = \frac{|M_{Ed}|}{f_{cd} \cdot b_0 \cdot d^2} = \frac{289,4 \cdot 100}{2 \cdot 30 \cdot 44^2} = 0,249$$

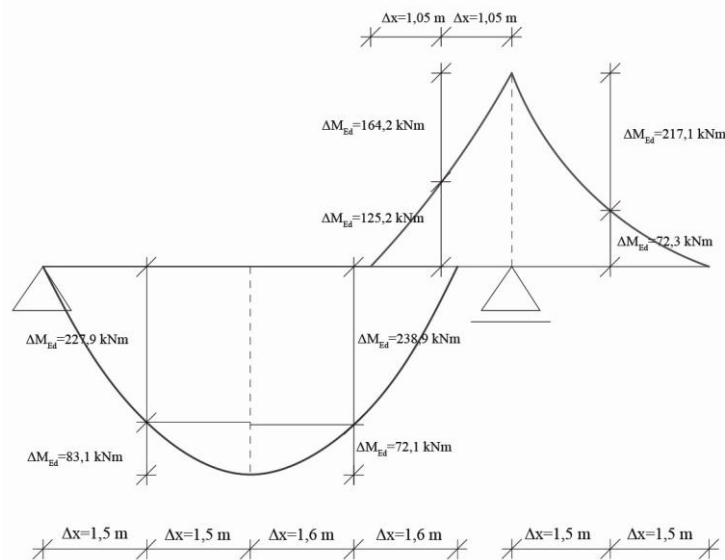
Izberem deformacije $\varepsilon_s / -\varepsilon_1 = 6 / 3,5\text{‰}$, kjer je $k_s = 1,181$ in $k_x = 0,368$.

Ker je $x = k_x \cdot d = 0,368 \cdot 44 = 16,2cm < h - d_0 = 30cm$, lahko uporabim tabele za pravokotni prerez.

$$A_s = \frac{k_s \cdot |M_{Ed}|}{d \cdot f_{yd}} = \frac{1,181 \cdot 289,4 \cdot 100}{44 \cdot 43,48} = 17,87cm^2$$

Izberem vzdolžno armaturo $9\phi 16$ ($A_{s,dej} = \mathbf{18,10cm^2}$).

4.5.4 Strig v pasnici na stiku med stojino in pasnico



Slika 14: Ovojnica upogibnih momentov in parametri za izračun strižnih napetosti med stojino in pasnico

Strig v polju, pozitivni moment:

$$\Delta x_1 = 1,6m$$

$$\Delta x_2 = 1,5m$$

$$\Delta M_{Ed,1} = 238,9kNm$$

$$\Delta M_{Ed,2} = 227,9kNm$$

Določitev strižne armature:

$$\Delta F_{d,1} = \frac{\Delta M_{Ed,1}}{z} \cdot \frac{b_1}{b_{eff}} = \frac{238,9 \cdot 100}{39,6} \cdot \frac{77}{184} = 252,5kN$$

$$v_{Ed,1} = \frac{\Delta F_d}{h_f \cdot \Delta x_1} = \frac{252,5}{20 \cdot 1600} = 0,0079kN / cm^2$$

$$\Delta F_{d,2} = \frac{\Delta M_{Ed,2}}{z} \cdot \frac{b_1}{b_{eff}} = \frac{227,9 \cdot 100}{39,6} \cdot \frac{77}{184} = 240,8kN$$

$$v_{Ed,2} = \frac{\Delta F_{d,2}}{h_f \cdot \Delta x_2} = \frac{240,8}{20 \cdot 1500} = 0,008kN / cm^2$$

$$v_{Ed,2} = 0,008kN / cm^2 \leq v \cdot f_{cd} \cdot \sin \theta_f \cdot \cos \theta_f = 0,528 \cdot 2 \cdot \sin 45^\circ \cdot \cos 45^\circ = 0,528kN / cm^2$$

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \geq \frac{v_{Ed,2} \cdot h_f}{\cot \theta_f \cdot f_{yd}} = \frac{0,008 \cdot 20}{\cot 45^\circ \cdot 2} = 0,08cm^2 / cm = \mathbf{8,0cm^2 / m}$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 12cm \rightarrow (\frac{A_{sf,dej}}{s_f} = \mathbf{8,42cm^2 / m})$.

Strig ob podpori B, negativni moment:

Na osnovi celotne natezne armature, ki jo potrebujemo v pasnici, določim razpored palic po celotni pasnici. Izberem, da položim po 4 palice ($4\phi 16 \rightarrow A_{s,1} = A_{s,2} = 8,04cm^2$) na vsako stran pasnice in 4 palice v stojino.

$$\Delta x_1 = 1,5m$$

$$\Delta x_2 = 1,05m$$

$$\Delta M_{Ed,1} = 217,1kNm$$

$$\Delta M_{Ed,2} = 164,2kNm$$

Določitev strižne armature:

$$\Delta F_{td,1} = \frac{\Delta M_{Ed,1}}{z} \cdot \frac{A_{s1}}{A_s} = \frac{217,1 \cdot 100}{39,6} \cdot \frac{8,04}{20,11} = 219,2 \text{ kN}$$

$$v_{Ed,1} = \frac{\Delta F_{td,1}}{h_f \cdot \Delta x} = \frac{219,2}{20 \cdot 1500} = 0,0073 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$\Delta F_{td,2} = \frac{\Delta M_{Ed,2}}{z} \cdot \frac{A_{s1}}{A_s} = \frac{164,2 \cdot 100}{39,6} \cdot \frac{8,04}{20,11} = 165,8 \text{ kN}$$

$$v_{Ed,2} = \frac{\Delta F_{td,2}}{h_f \cdot \Delta x} = \frac{165,8}{20 \cdot 1050} = 0,0079 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$v_{Ed,2} = 0,0079 \text{ kN} / \text{cm}^2 \leq v \cdot f_{cd} \cdot \sin \theta_f \cdot \cos \theta_f = 0,528 \cdot 2 \cdot \sin 45^\circ \cdot \cos 45^\circ = 0,528 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \geq \frac{v_{Ed,2} \cdot h_f}{\cot \theta_f \cdot f_{yd}} = \frac{0,0079 \cdot 20}{\cot 45^\circ \cdot 2} = 0,079 \text{ cm}^2 / \text{cm} = \mathbf{7,9 \text{ cm}^2 / \text{m}}$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 12 \text{ cm} \rightarrow \left(\frac{A_{sf,dej}}{s_f} = \mathbf{8,4 \text{ cm}^2 / \text{m}} \right)$.

4.5.5 Izračun strižne odpornosti elementov brez strižne armature

Zaradi pretežno razporejene obtežbe ob podpori A in B, lahko prečno silo na dolžini d od podpore reduciramo:

$$x = \frac{c}{2} + d = \frac{30}{2} + 44 = 59 \text{ cm.}$$

Strižna odpornost elementov brez strižne armature nad podporo A

Na razdalji d od roba podpore je prečna sila enaka $V_{Ed}^* = -162,2 \text{ kN}$, upogibni moment pa $M_{Ed} = 105,7 \text{ kNm}$.

Izračun v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]

$$V_{Rd,c} = \max \left\{ \begin{array}{l} (C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d \\ (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d \end{array} \right. =$$

$$= \max \left\{ \begin{array}{l} (0,12 \cdot 1,67 \cdot (100 \cdot 0,0091 \cdot 30)^{1/3}) \cdot 300 \cdot 440 \\ 0,41 \cdot 300 \cdot 440 \end{array} \right. = \max \left\{ \begin{array}{l} 79,7 \text{ kN} \\ 54,1 \text{ kN} \end{array} \right. = \mathbf{79,7 \text{ kN}}$$

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

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{440}} = 1,67 \leq 2,0$$

$$\rho_l = \frac{A_{st}}{b_w \cdot d} = \frac{12,06}{30 \cdot 44} = 0,0091$$

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 1,67^{3/2} \cdot 30^{1/2} = 0,41$$

Ker je $|V_{Ed}^*| = 162,2 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 79,7 \text{ kN}$, je strižna armatura potrebna.

Izračun v skladu z modelnim predpisom fib MC 2010 [2]

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w = 0,172 \cdot \frac{\sqrt{30}}{1,5} \cdot 396 \cdot 300 = \mathbf{74,6kN}$$

$$k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \frac{1300}{1000 + k_{dg} \cdot z} = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot 0,00089} \cdot \frac{1300}{1000 + 0,75 \cdot 396} = 0,172$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2 \cdot E_s \cdot A_s} \cdot \left[\frac{M_{Ed}}{z} + |V_{Ed}^*| \right] = \frac{1}{2 \cdot 20000 \cdot 12,06} \cdot \left[\frac{105,7 \cdot 100}{39,6} + 162,2 \right] = 0,89 \cdot 10^{-3}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 44 = 39,6 \text{ cm}$$

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} = \frac{32}{16 + 32} = 0,67 < 0,75 \rightarrow k_{dg} = 0,75$$

Ker je $|V_{Ed}^*| = 162,2 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 74,6 \text{ kN}$, je strižna armatura potrebna.

Strižna odpornost elementov brez strižne armature levo ob podpori B

Na razdalji d levo od roba podpore B je prečna sila enaka $V_{Ed}^* = 228,5 \text{ kN}$, upogibni moment pa $M_{Ed} = -144,6 \text{ kNm}$.

Izračun v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]

$$V_{Rd,c} = \max \left\{ \begin{array}{l} (C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \\ (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \end{array} \right. =$$

$$= \max \left\{ \begin{array}{l} (0,12 \cdot 1,67 \cdot (100 \cdot 0,0137 \cdot 30)^{1/3}) \cdot 300 \cdot 440 \\ 0,415 \cdot 300 \cdot 440 \end{array} \right. = \max \left\{ \begin{array}{l} 91,3 \text{ kN} \\ 54,8 \text{ kN} \end{array} \right. = \mathbf{91,3kN}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{18,1}{30 \cdot 44} = 0,0137$$

Ker je $V_{Ed}^* = 228,5 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 91,3 \text{ kN}$, je strižna armatura potrebna.

Izračun v skladu z modelnim predpisom fib MC 2010 [2]

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w = 0,226 \cdot \frac{\sqrt{30}}{1,5} \cdot 396 \cdot 300 = \mathbf{98,0kN}$$

$$k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \frac{1300}{1000 + k_{dg} \cdot z} = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot 0,00082} \cdot \frac{1300}{1000 + 0,75 \cdot 39,6} = 0,226$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2 \cdot E_s \cdot A_s} \cdot \left[\frac{|M_{Ed}|}{z} + V_{Ed}^* \right] = \frac{1}{2 \cdot 20000 \cdot 18,1} \cdot \left[\frac{144,6 \cdot 100}{39,6} + 228,5 \right] = 0,82 \cdot 10^{-3}$$

Ker je $V_{Ed}^* = 228,5 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 98,0 \text{ kN}$, je strižna armatura potrebna.

Strižna odpornost elementov brez strižne armature desno ob podpori B

Na razdalji d desno od roba podpore B je prečna sila enaka $V_{Ed}^* = -155 \text{ kN}$, upogibni moment pa $M_{Ed} = -188 \text{ kNm}$.

Izračun v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]

Po SIST EN 1992-1-1 [1] je strižna odpornost elementa brez strižne armature enaka za območje levo in desno od podpore B: $|V_{Ed}^*| = 155kN > V_{Rd,c} = 91,3kN$. Ker velja $|V_{Ed}^*| > V_{Rd,c}$, je strižna armatura potrebna.

Izračun v skladu z modelnim predpisom fib MC 2010 [2]

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w = 0,174 \cdot \frac{\sqrt{30}}{1,5} \cdot 396 \cdot 300 = 75,5kN$$

$$k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \frac{1300}{1000 + k_{dg} \cdot z} = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot 0,00087} \cdot \frac{1300}{1000 + 0,75 \cdot 396} = 0,174$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2 \cdot E_s \cdot A_s} \cdot \left[\frac{|M_{Ed}|}{z} + |V_{Ed}^*| \right] = \frac{1}{2 \cdot 20000 \cdot 18,1} \cdot \left[\frac{188 \cdot 100}{39,6} + 155 \right] = 0,87 \cdot 10^{-3}$$

Ker velja $|V_{Ed}^*| = 155kN > V_{Rd,c} = 75,5kN$, je strižna armatura potrebna.

4.5.6 Izračun strižne odpornosti elementov s strižno armaturo

Ker je v vseh primerih $V_{Ed} > V_{Rd,c}$, moramo element strižno armirati. Izberem, da je strižna armatura pravokotna glede na os nosilca ($\alpha=90^\circ$).

Strižna odpornost elementov s strižno armaturo ob podpori A

Zaradi lažjega sidranja vzdolžne armature v krajni podpori A izberem maksimalni kot tlačnih razpor θ .

Izračun v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]

Določitev kota tlačnih razpor θ :

Kot tlačnih razpor mora biti $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, izberem $\theta = 45^\circ$.

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{|V_{Ed}^*|}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{162,2}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 45^\circ} = 0,094cm^2 / cm = 9,4cm^2 / m$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 10cm$ ($\frac{A_{sw,dej}}{s} = 10,1cm^2 / m$).

Izračun strižne odpornosti $V_{Rd,s}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 10,1 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 45^\circ = 173,9kN$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot z}{(\cot \theta + \tan \theta)} = \frac{1 \cdot 0,528 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 39,6}{(\cot 45^\circ + \tan 45^\circ)} = 627,3kN > V_{Rd,s} = 173,9kN$$

$$v_1 = v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{30}{250}\right) = 0,528$$

$$V_{Rd,max} = 627,3kN > |V_{Ed}| = 200,1kN$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{|V_{Ed}^*|}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{162,2}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 45^\circ = 1,87cm^2$$

Izračun v skladu z modelnim predpisom fib MC 2010 [2]

$$\eta_{fc} = \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} = \left(\frac{30}{30} \right)^{1/3} = 1,0$$

Izračun, ki temelji na *mehanizmu nadomestnega paličja* (nivo zahtevnosti računa I)

Določitev kota tlačnih razpor θ :

Kot tlačnih razpor mora biti $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, enako kot pri standardu SIST EN 1992-1-1 [1] izberem $\theta = 45^\circ$.

Izračun potrebne strižne armature:

Vrednost A_{sw}/s je enaka vrednosti izračunani v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]:

$$\frac{A_{sw}}{s} = 9,4 \text{ cm}^2 / \text{m} \rightarrow \phi 8 / 10 \text{ cm} \rightarrow \frac{A_{sw,dej}}{s} = 10,1 \text{ cm}^2 / \text{m} \text{ in } V_{Rd,s} = 173,9 \text{ kN}.$$

Izračun strižne odpornosti $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 0,55 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 30 \cdot 39,6 \cdot \frac{\cot 45^\circ}{1 + \cot^2 45^\circ} = 653,4 \text{ kN}$$

$$k_c = k_\varepsilon \cdot \eta_{fc} = 0,55 \cdot 1 = 0,55$$

$$k_\varepsilon = 0,55$$

$$V_{Rd,max} = 653,4 \text{ kN} > V_{Rd,s} = 173,9 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = 653,4 \text{ kN} > |V_{Ed}| = 200,1 \text{ kN}$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

Vrednost ΔA_{sl} je enaka vrednosti izračunani v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]:

$$\Delta A_{sl} = 1,87 \text{ cm}^2.$$

Izračun, ki temelji na *splošnem modelu napetostnega polja* (nivo zahtevnosti računa II)

Določitev kota tlačnih razpor θ :

$$\theta_{\min} = 20^\circ + 10000 \cdot \varepsilon_x = 20^\circ + 10000 \cdot 0,00089 = 28,9^\circ$$

Omejitev kota tlačnih razpor je $28,9^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, izberem $\theta = 45^\circ$.

Izračun potrebne strižne armature:

Vrednost A_{sw}/s je enaka vrednosti izračunani v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]:

$$\frac{A_{sw}}{s} = 9,4 \text{ cm}^2 / \text{m} \rightarrow \phi 8 / 10 \text{ cm} \rightarrow \frac{A_{sw,dej}}{s} = 10,1 \text{ cm}^2 / \text{m} \text{ in } V_{Rd,s} = 173,9 \text{ kN}$$

Izračun strižne odpornosti $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 0,65 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 30 \cdot 39,6 \cdot \frac{\cot 45^\circ}{1 + \cot^2 45^\circ} = 772,2 \text{ kN}$$

$$k_\varepsilon = \frac{1}{1,2 + 55 \cdot \varepsilon_1} = \frac{1}{1,2 + 55 \cdot 0,00378} = 0,71 > 0,65 \rightarrow k_\varepsilon = k_c = 0,65$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0,002) \cdot \cot^2 \theta = 0,00089 + (0,00089 + 0,002) \cdot \cot^2 45^\circ = 0,00378$$

$$V_{Rd,max} = 772,2 \text{ kN} > V_{Rd,s} = 173,9 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = 772,2 \text{ kN} > |V_{Ed}| = 200,1 \text{ kN}$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

Vrednost ΔA_{sl} je enaka vrednosti izračunani v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]:

$$\Delta A_{sl} = \mathbf{1,87cm^2}.$$

Izračun, ki temelji na *poenostavljeni teoriji tlačnega polja* (nivo zahtevnosti računa III)

Določitev kota tlačnih razpor θ :

$$\theta_{\min} = \mathbf{28,9^\circ}.$$

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,c}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,max}(\theta_{\min}) = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 0,564 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 30 \cdot 39,6 \cdot \frac{\cot 28,9^\circ}{1 + \cot^2 28,9^\circ} = \mathbf{567kN}$$

$$k_\varepsilon = \frac{1}{1,2 + 55 \cdot \varepsilon_1} = \frac{1}{1,2 + 55 \cdot 0,0104} = 0,564 < 0,65 \rightarrow k_\varepsilon = k_c = 0,564$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0,002) \cdot \cot^2 \theta = 0,00089 + (0,00089 + 0,002) \cdot \cot^2 28,9^\circ = 0,0104$$

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w = 0,122 \cdot \frac{\sqrt{30}}{1,5} \cdot 396 \cdot 300 = \mathbf{52,9kN}$$

$$k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \left(1 - \frac{|V_{Ed}^*|}{V_{Rd,max}(\theta_{\min})} \right) = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot 0,00089} \cdot \left(1 - \frac{162,2}{567} \right) = 0,122 > 0$$

$$|V_{Ed}^*| = V_{Rd,s} + V_{Rd,c} = 162,2kN \rightarrow \text{potr.}(V_{Rd,s}) = |V_{Ed}^*| - V_{Rd,c} = 162,2 - 52,9 = 109,3kN$$

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{\text{potr.}(V_{Rd,s})}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{109,3}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 28,9^\circ} = 0,035cm^2 / cm = \mathbf{3,5cm^2 / m}$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 10cm$ ($\frac{A_{sw,dej}}{s} = \mathbf{10,1cm^2 / m}$).

Izračun strižne odpornosti $V_{Rd,s}$ in V_{Rd} :

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 10,1 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 28,9^\circ = \mathbf{315,0kN}$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} = 52,9 + 315 = \mathbf{367,9kN} > |V_{Ed}^*| = 162,2kN$$

$$V_{Rd,max}(\theta_{\min}) = 567kN > |V_{Ed}^*| = 200,1kN$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{|V_{Ed}^*|}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{162,2}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 28,9^\circ = \mathbf{3,38cm^2}$$

Strižna odpornost elementov s strižno armaturo levo ob podpori B

Izračun v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]

Določitev kota tlačnih razpor θ :

Kot tlačnih razpor mora biti $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, izberem $\theta = \theta_{\min} = \mathbf{21,8^\circ}$.

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}^*}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{228,5}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 21,8^\circ} = 0,0531 \text{ cm}^2 / \text{cm} = 5,31 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 13 \text{ cm}$ ($\frac{A_{sw,dej}}{s} = 7,77 \text{ cm}^2 / \text{m}$).

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,s}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 7,77 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 21,8^\circ = 334,5 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot z}{(\cot \theta + \tan \theta)} = \frac{1 \cdot 0,528 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 39,6}{(\cot 21,8^\circ + \tan 21,8^\circ)} = 432,6 \text{ kN} > V_{Rd,s} = 334,5 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = 432,6 \text{ kN} > V_{Ed} = 266,4 \text{ kN}$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{V_{Ed}^*}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{228,5}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 21,8^\circ = 6,57 \text{ cm}^2$$

Izračun v skladu z modelnim predpisom fib MC 2010 [2]

Izračun, ki temelji na *mehanizmu nadomestnega paličja* (nivo zahtevnosti računa I)

Določitev kota tlačnih razpor θ :

Kot tlačnih razpor mora biti $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, enako kot pri standardu SIST EN 1992-1-1 [1] izberem minimalni naklon, ki je tu $\theta = \theta_{\min} = 30^\circ$.

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}^*}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{228,5}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 30^\circ} = 0,0766 \text{ cm}^2 / \text{cm} = 7,66 \text{ cm}^2 / \text{cm}$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 13 \text{ cm}$ ($\frac{A_{sw,dej}}{s} = 7,77 \text{ cm}^2 / \text{m}$).

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,s}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 7,77 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 30^\circ = 231,7 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 0,55 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 30 \cdot 39,6 \cdot \frac{\cot 30^\circ}{1 + \cot^2 30^\circ} = 565,9 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = 565,9 \text{ kN} > V_{Rd,s} = 231,7 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = 565,9 \text{ kN} > V_{Ed} = 266,4 \text{ kN}$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{V_{Ed}^*}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{228,5}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 30^\circ = 4,55 \text{ cm}^2$$

Izračun, ki temelji na *splošnem modelu napetostnega polja* (nivo zahtevnosti računa II):

Določitev kota tlačnih razpor θ :

$$\theta_{\min} = 20^\circ + 10000 \varepsilon_x = 20^\circ + 10000 \cdot 0,00082 = 28,2^\circ$$

Omejitev kota tlačnih razpor je $28,2^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, izberem minimalni kot $\theta = \theta_{\min} = 28,2^\circ$.

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}^*}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{228,5}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 28,2^\circ} = 0,0712 \text{ cm}^2 / \text{cm} = 7,12 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 13 \text{ cm}$ ($A_{sw,dej} = 7,77 \text{ cm}^2$).

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,s}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 7,77 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 28,2^\circ = 249,5 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 0,556 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 30 \cdot 39,6 \cdot \frac{\cot 28,2^\circ}{1 + \cot^2 28,2^\circ} = 550,2 \text{ kN}$$

$$k_\varepsilon = \frac{1}{1,2 + 55\varepsilon_1} = \frac{1}{1,2 + 55 \cdot 0,0109} = 0,556 < 0,65 \rightarrow k_\varepsilon = k_c = 0,556$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0,002) \cdot \cot^2 \theta = 0,00082 + (0,00082 + 0,002) \cdot \cot^2 28,2^\circ = 0,0106$$

$$V_{Rd,max} = 550,2 \text{ kN} > V_{Rd,s} = 249,5 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = 550,2 \text{ kN} > V_{Ed} = 266,4 \text{ kN}$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{V_{Ed}^*}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{228,5}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 28,2^\circ = 4,9 \text{ cm}^2$$

Izračun, ki temelji na *poenostavljeni teoriji tlačnega polja* (nivo zahtevnosti računa III):

Določitev kota tlačnih razpor θ :

$$\theta = \theta_{\min} = 28,2^\circ$$

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,c}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,max}(\theta_{\min}) = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \sin \theta \cos \theta = 0,556 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 30 \cdot 39,6 \cdot \sin 28,2^\circ \cdot \cos 28,2^\circ = 550,2 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w = 0,105 \cdot \frac{\sqrt{30}}{1,5} \cdot 39,6 \cdot 300 = 45,5 \text{ kN}$$

$$k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \left(1 - \frac{V_{Ed}^*}{V_{Rd,max}(\theta_{\min})} \right) = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot 0,00082} \cdot \left(1 - \frac{228,5}{550,2} \right) = 0,105 > 0$$

$$V_{Ed}^* = V_{Rd,s} + V_{Rd,c} = 228,5 \text{ kN} \rightarrow \text{potr.}(V_{Rd,s}) = V_{Ed}^* - V_{Rd,c} = 228,5 - 45,5 = 183 \text{ kN}$$

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{\text{potr.}(V_{Rd,s})}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{183}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 28,2^\circ} = 0,057 \text{ cm}^2 / \text{cm} = 5,7 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 13 \text{ cm}$ ($\frac{A_{sw,dej}}{s} = 7,77 \text{ cm}^2 / \text{m}$).

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,s}$ in V_{Rd} :

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 7,77 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 28,2^\circ = \mathbf{249,5kN}$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} = 45,5 + 249,5 = \mathbf{295kN} > V_{Ed}^* = 228,5kN$$

$$V_{Rd,max}(\theta_{min}) = 550,2kN > V_{Ed} = 266,4kN$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{V_{Ed}^*}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{228,5}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 28,2^\circ = \mathbf{4,9cm^2}$$

Strižna odpornost elementov s strižno armaturo desno ob podpori B

Izračun v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [1]

Določitev kota tlačnih razpor θ :

Kot tlačnih razpor mora biti $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, izberem $\theta = \mathbf{21,8^\circ}$.

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{|V_{Ed}^*|}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{155}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 21,8^\circ} = 0,036cm^2 / cm = \mathbf{3,6cm^2 / m}$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 19cm$ ($\frac{A_{sw,dej}}{s} = \mathbf{5,32cm^2 / m}$).

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,s}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 5,32 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 21,8^\circ = \mathbf{229kN}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot z}{(\cot \theta + \tan \theta)} = \frac{1 \cdot 0,528 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 39,6}{(\cot 21,8^\circ + \tan 21,8^\circ)} = \mathbf{432,6kN} > V_{Rd,s} = 229kN$$

$$V_{Rd,max} = 432,6kN > |V_{Ed}| = 192,9kN$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{|V_{Ed}^*|}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{155}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 21,8^\circ = \mathbf{4,46cm^2}$$

Izračun v skladu z modelnim predpisom fib MC 2010 [2]

Izračun, ki temelji *mehanizmu nadomestnega paličja* (nivo zahtevnosti računa I)

Določitev kota tlačnih razpor θ :

Kot tlačnih razpor mora biti $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, izberem $\theta = \theta_{min} = \mathbf{30^\circ}$.

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{|V_{Ed}^*|}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{155}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 30^\circ} = 0,052cm^2 / cm = \mathbf{5,2cm^2 / cm}$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 19cm$ ($\frac{A_{sw,dej}}{s} = \mathbf{5,32cm^2 / m}$).

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,s}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 5,32 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 30^\circ = \mathbf{158,7kN}$$

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 0,55 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 30 \cdot 39,6 \cdot \frac{\cot 30^\circ}{1 + \cot^2 30^\circ} = \mathbf{565,9kN}$$

$$V_{Rd,max} = 565,9kN > V_{Rd,s} = 158,7kN$$

$$V_{Rd,max} = 565,9kN > |V_{Ed}| = 192,9kN$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{|V_{Ed}^*|}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{155}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 30^\circ = \mathbf{3,09cm^2}$$

Izračun, ki temelji na *splošnem modelu napetostnega polja* (nivo zahtevnosti računa II)

Določitev kota tlačanih razpor θ :

$$\theta_{min} = 20^\circ + 10000 \cdot \varepsilon_x = 20^\circ + 10000 \cdot 0,00087 = 28,7^\circ$$

Omejitev kota tlačnih razpor je $28,7^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, izberem $\theta = \theta_{min} = \mathbf{28,7^\circ}$.

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{|V_{Ed}^*|}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{155}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 28,7^\circ} = 0,0493cm^2 / cm = 4,93cm^2 / cm$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 19cm$ ($\frac{A_{sw,dej}}{s} = \mathbf{5,32cm^2 / m}$).

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,s}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 5,32 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 28,7^\circ = \mathbf{167,3kN}$$

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 0,564 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 30 \cdot 39,6 \cdot \frac{\cot 28,7^\circ}{1 + \cot^2 28,7^\circ} = \mathbf{564,5kN}$$

$$k_\varepsilon = \frac{1}{1,2 + 55 \cdot \varepsilon_1} = \frac{1}{1,2 + 55 \cdot 0,0104} = 0,564 < 0,65 \rightarrow k_\varepsilon = k_c = 0,564$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0,002) \cdot \cot^2 \theta = 0,00087 + (0,00087 + 0,002) \cdot \cot^2 28,7^\circ = 0,0104$$

$$V_{Rd,max} = 564,5kN > V_{Rd,s} = 167,3kN$$

$$V_{Rd,max} = 564,5kN > |V_{Ed}| = 192,9kN$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{|V_{Ed}^*|}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{155}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 28,7^\circ = \mathbf{3,26cm^2}$$

Izračun, ki temelji na *poenostavljeni teoriji tlačnega polja* (nivo zahtevnosti računa III)

Določitev kota tlačnih razpor θ :

$$\theta = \theta_{min} = \mathbf{28,7^\circ}$$

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,c}$ in $V_{Rd,max}$:

$$V_{Rd,max}(\theta_{min}) = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \sin \theta \cos \theta = 0,564 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 30 \cdot 39,6 \cdot \sin 28,7^\circ \cdot \cos 28,7^\circ = \mathbf{564,5kN}$$

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w = 0,126 \cdot \frac{\sqrt{30}}{1,5} \cdot 396 \cdot 300 = \mathbf{54,7kN}$$

$$k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \left(1 - \frac{|V_{Ed}^*|}{V_{Rd,max}(\theta_{min})} \right) = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot 0,00087} \cdot \left(1 - \frac{155}{564,5} \right) = 0,126 > 0$$

$$|V_{Ed}^*| = V_{Rd,s} + V_{Rd,c} = 155kN \rightarrow \text{potr.}(V_{Rd,s}) = V_{Ed}^* - V_{Rd,c} = 155 - 54,7 = 100,3kN$$

Izračun potrebne strižne armature:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{\text{potr.}(V_{Rd,s})}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{100,3}{43,48 \cdot 39,6 \cdot \cot 28,7^\circ} = 0,0319cm^2 / cm = 3,19cm^2 / m$$

Izberem dvostrizno streme $\phi 8 / 19cm$ ($\frac{A_{sw,dej}}{s} = \mathbf{5,32cm^2 / m}$).

Izračun strižnih odpornosti $V_{Rd,s}$ in V_{Rd} :

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,dej}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = 5,32 \cdot 39,6 \cdot 43,48 \cdot \cot 28,7^\circ = \mathbf{167,3kN}$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} = 54,7 + 167,3 = \mathbf{222kN} > |V_{Ed}^*| = 155kN$$

$$V_{Rd,max}(\theta_{min}) = 564,5kN > V_{Ed} = 192,9kN$$

Izračun dodatne vzdolžne armature:

$$\Delta A_{sl} = \frac{|V_{Ed}^*|}{2 \cdot f_{yd}} \cdot \cot \theta = \frac{155}{2 \cdot 43,48} \cdot \cot 28,7^\circ = \mathbf{3,26cm^2}$$

Zgoraj izračunane vrednosti so podane v preglednici 4.

Preglednica 4: Vrednosti izračunanih parametrov

		SIST EN 1992-1-1 [1]		fib Model Code 2010 [2]						
				Nadomestno paličje		Splošen model napetostnega polja		Modificirana teorija tlačnega polja		
Podpora A	$V_{Rd,c}$ [kN]	79,7		74,6						
	θ_{izb} [°]	45		45		45		28,9		
	V_{Rd} [kN]	$V_{Rd,c}$ [kN]	173,9	0	173,9	0	173,9	0	367,9	52,9
		$V_{Rd,s}$ [kN]		173,9		173,9		173,9		315
	$V_{Rd,max}$ [kN]	627,3		653,4		772,2		567		
	V_{Ed} [kN]			200,1						
	A_{sw}/s [cm ² /m]	9,4		9,4		9,4		3,5		
	$A_{sw,dej}/s$ [cm ² /m]			10,1						
	ΔA_s [cm ²]	1,87		1,87		1,87		3,38		

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 4

Podpora B levo	$V_{Rd,c}$ [kN]	91,3		98						
	θ_{izb} [°]	21,8		30		28,2		28,2		
	V_{Rd} [kN]	$V_{Rd,c}$ [kN]	334,5	0	231,7	0	249,5	0	295	45,5
		$V_{Rd,s}$ [kN]		334,5		231,7		249,5		249,5
	$V_{Rd,max}$ [kN]	432,6		565,9		550,2		550,2		
	V_{Ed} [kN]	266,4								
	A_{sw}/s [cm ² /m]	5,31		7,66		7,12		5,7		
	$A_{sw,dej}/s$ [cm ² /m]	7,77								
	ΔA_s [cm ²]	6,57		4,55		4,9		4,9		
Podpora B desno	$V_{Rd,c}$ [kN]	91,3		75,7						
	θ_{izb} [°]	21,8		30		28,7		28,7		
	V_{Rd} [kN]	$V_{Rd,c}$ [kN]	229	0	158,7	0	167,3	0	222	54,7
		$V_{Rd,s}$ [kN]		229		158,7		167,3		167,3
	$V_{Rd,max}$ [kN]	432,6		565,9		564,5		564,5		
	V_{Ed} [kN]	192,9								
	A_{sw}/s [cm ² /m]	3,6		5,2		4,93		3,19		
	$A_{sw,dej}/s$ [cm ² /m]	5,32								
	ΔA_s [cm ²]	4,46		3,09		3,26		3,26		

Iz preglednice 4 je razvidno, da je strižna odpornost elementov brez strižne armature nekoliko večja po izrazih iz SIST EN 1992-1-1 [1] kot iz modelnega predpisa *fib* MC 2010 [2], le levo od podpore B velja ravno obratno.

Pri izbiri kota tlačnih razpor sem si pri podpori A izbrala maksimalen možen kot tlačnih razpor θ zaradi lažjega sidranja, desno in levo od podpore B pa minimalen kot θ . S tem sem želela prikazati vpliv velikosti kota θ na strižno odpornost in potrebno armaturo. Maksimalen kot θ_{max} je 45°, le pri modelu, ki temelji na poenostavljeni modificirani teoriji tlačnega polja, se zaradi podanega postopka vedno uporablja minimalen naklon. Pri izbiri najmanjšega kota θ_{min} SIST EN 1992-1-1 [1] upošteva vrednost 21,8°, medtem ko modelni predpis *fib* MC 2010 [2] pri nadomestnem paličju upošteva različne vrednosti glede na vrsto obremenitve, pri ostalih dveh postopkih pa je naklon določen na podlagi vzdolžne deformacije ϵ_x . Razvidno je, da podani minimalni kot θ_{min} pri postopku s pomočjo modela nadomestnega paličja po *fib* MC 2010 [2], le malo odstopa od minimalnega naklona θ_{min} izračunanega na podlagi splošnega modela napetostnega polja in modificirane teorije tlačnega polja, medtem ko standard SIST EN 1992-1-1 [1] podaja precej manjši minimalni kot θ_{min} .

Zaradi lažje primerljivosti rezultatov, sem pri računu po vseh metodah izbrala enak prerez dejanske strižne armature $A_{sw,dej}$ in enak razmak med stremeni s . Ker je izraz za strižno odpornost, ki jo pripišemo strižni armaturi $V_{Rd,s}$ po obeh predpisih identičen, so vrednosti v primeru enakega izbranega kota tlačnih razpor iste. Vpliv betona pa upošteva le postopek na podlagi poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja, kar prinaša nekoliko večje vrednosti celotne strižne odpornosti V_{Rd} in manjši prerez izračunane strižne armature.

Rezultati določeni na podlagi nadomestnega paličja so po obeh predpisih enaki v primeru enakega izbranega kota tlačnih razpor, le pri določitvi največje možne strižne odpornosti $V_{Rd,max}$ modelni predpis *fib* MC 2010 [2] prinaša večje vrednosti.

5 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem obravnavala strižno odpornost armiranobetonskih elementov in potrebno armaturo za prevzem prečne sile.

Prvi del naloge je splošen in podaja informacije o načinih prevzema prečne sile in parametrih, ki vplivajo na strižno odpornost.

V osrednjem delu naloge sem se osredotočila na primerjavo posameznih postopkov določitve strižne odpornosti po veljavnem standardu SIST EN 1992-1-1 [1] in modelnem predpisu *fib* Model Code 2010 [2]. Pri tem sem obravnavala armiranobetonske elemente brez in z računsko potrebno strižno armaturo, prednapete elemente, elemente T-oblik in elemente s sloji betoniranimi v različnih časih. Račun strižne odpornosti strižno armiranih elementov sem izvedla na podlagi treh analitičnih modelov: modela nadomestnega ravninskega paličja, splošne teorije napetostnega polja in poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja. Pozornost sem usmerila na različne parametre, ki jih upošteva posamezen predpis. Modelni predpis *fib* MC 2010 [2] pri računu strižne odpornosti vključuje vpliv deformacij, ki so zajete pri določitvi naklona tlačnih razpor θ in pri redukcijskima faktorjema strižne odpornosti k_v in k_c . Poleg tega pri elementih z minimalno strižno armaturo upošteva vpliv maksimalnega zrna agregata, ki povečuje oz. zmanjšuje trenje v razpokah. Pri elementih s strižno armaturo pa celotno strižno odpornost na podlagi poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja obravnava kot vsoto odpornosti, ki jo pripišemo armaturi in odpornosti, ki jo pripišemo betonu, zato so dobljene vrednosti nekoliko višje od vrednosti na podlagi drugih modelov, predvsem pri elementih z manjšim deležem strižne armature.

Prikazala sem tudi vpliv izbranega naklona tlačnih razpor θ na strižno odpornost in armaturo. Predpisi navadno podajajo pri izbiri le spodnjo in zgornjo mejo, izbira med podanima vrednostnima pa je poljubna. V primeru izbranega večjega kota θ , sta največja možna strižna odpornost $V_{Rd,max}$ in prerez strižne armature A_{sw} večji, zmanjša pa se strižna odpornost, ki jo pripišemo strižni armaturi $V_{Rd,s}$ in dodatna natezna armatura ΔA_s , oziroma obratno pri manjšem izbranem kotu θ , se zmanjšata $V_{Rd,max}$ in A_{sw} ter povečata $V_{Rd,s}$ in ΔA_s . Maksimalni kot 45° navadno izberemo pri krajnjih podporah, saj večji delež strižne armature omogoča lažje sidranje vzdolžne armature. Sicer pa je optimalna izbira kota odvisna od posameznega primera, pri določitvi pa pomagajo predvsem izkušnje.

Pri večslojnih elementih, betoniranih z betonom v različnih časih pa je pri strigu med sloji pomembna predvsem sprjemnost ter trenje med starim in novim betonom, kar v računu strižne odpornost upoštevatava oba predpisa, vendar SIST EN 1992-1-1 [1] podaja nekoliko manjše vrednosti vplivnih koeficientov. Modelni predpis *fib* MC 2010 [2] pa še v primeru podajne povezave upošteva vpliv možničnega učinka vzdolžne armature.

Zadnji del diplomske naloge prikazuje postopek določitve strižne odpornosti, strižne armature in dodatne natezne armature na primeru enostavnega nosilca s previsnim poljem T-prereza po obeh omenjenih predpisih. Pri izračunu sem med seboj primerjala vrednosti dobljene na podlagi modela nadomestnega ravninskega paličja po SIST EN 1992-1-1 [1] in modelnem predpisu *fib* MC 2010 [2] ter na podlagi splošnega pristopa napetostnega polja in poenostavljene modificirane teorije tlačnega polja, ki ju omenja *fib* MC 2010 [2]. Izračunane vrednosti so bile pričakovane in v skladu z omenjenimi ugotovitvami. Postopki na podlagi nadomestnega paličja in splošnega modela napetostnega polja so si precej podobni, medtem ko se postopek na podlagi modificirane teorije tlačnega polja malo razlikuje. Pri tem je pomembno, da postopek na podlagi modificirane teorije tlačnega polja vedno upošteva minimalni izračunani kot tlačnih razpor, zato je prerez uporabljene strižne armature nekoliko manjši, hkrati pa je prerez dodatne natezne armature večji. Celotna strižna odpornost pa je zaradi upoštevanja vpliva strižne armature in betona večja od ostalih postopkov. Podani postopek se mi zdi enostaven in primeren za praktično uporabo, saj je kot tlačnih razpor podan in ni potrebno iskati optimalnega, hkrati pa najbolje predstavi dejansko obnašanje armiranobetonskih elementov, saj upošteva tudi odpornost samega betona, ki jo drugi postopki zanemarjajo.

VIRI

- [1] SIST EN 1992-1-1:2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij 1-1.del: Splošna pravila in pravila za stavbe.
- [2] Fédération Internationale du Béton (*fib*). 2013. Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne, Ernest & Sohn: 434 str.
- [3] Cladera, A., Mari, A. R., 2007. Shear strength in the new Eurocode 2. A step forward?. *Structural Concrete* 8, 2:57-66.
- [4] Birgisson, S. R. 2011. Shear Resistance of Reinforced concrete Beams Without Stirrups. Thesis in Civil Engineering BSc. Reykjavik, School of Science and Engineering: 76 str.
- [5] Fekonja, P. 2012. Uporaba programskih orodij pri projektiranju konstrukcijskih elementov medgeneracijskega središča Koper. Diplomaska naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo Maribor (samozaložba P. Fekonja): 142 str.
- [6] Sigrist, V., Bentz, E., Ruiz, M. F., Foster, S., Muttoni, A. 2013. Background to the *fib* Model Code 2010 Shear Provisions – Part I: Beams and Slabs. *Structural Concrete*, 3:195-203.
- [7] Sigrist, V., Hackbarth, B. 2010. A Structured Approach to the Design and Analysis of Beams in Shear. Recent Developments on Shear and Punching Shear in RC and FRC Elements, Salo, Italy, October 2010, *fib* bulletin 57 http://www.academia.edu/407242/A_structured_approach_to_the_design_and_analysis_of_beams_in_shear (Pridobljeno 01. 07. 2015.)
- [8] Sigrist, V. 2011. Generalized Stress Field Approach for Analysis of Beams in Shear. *ACI Structural Journal* 14, 4:479-487.
- [9] Saje D. 2013. 4. vaja: Projektiranje strižno obremenjenih armiranobetonskih elementov (UNI GR-B). Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 30 str. http://www.fgg.uni-lj.si/kmlk/Drago/BK_I/BK_I_2013_14/BETONSKE_KONSTRUKCIJE_I_2013_2014_4_vaja.pdf (Pridobljeno 12. 4. 2015.)
- [10] Lopatič J. 2011a. Betonske konstrukcije I. Študijsko gradivo (UNI GR-B). Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 99 str.
- [11] Pirih, M. 2010. Projektiranje betonskih konstrukcij s pomočjo modela z vezmi in razporami. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Pirih): 113 str.
- [12] Vecchio, F. J., Collins, M. P. 1986. The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI Journal* 83, 2:219-231.
- [13] Lopatič J. 2011b. Betonske konstrukcije II. Študijsko gradivo (UNI GR-B). Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 164 str.
- [14] Rejec, K. 2011. Neelastično strižno obnašanje armiranobetonskih sten pri potresnem vplivu. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Rejec): 354 str.